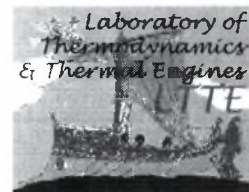
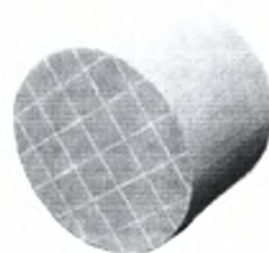
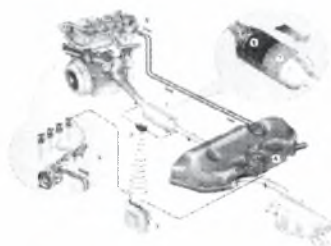
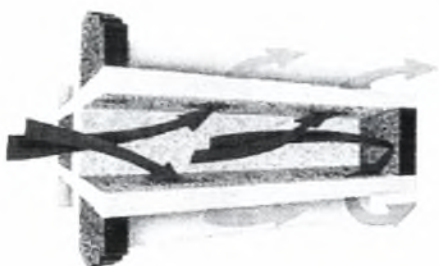




**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ΠΡΟΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ ΑΙΘΑΛΗΣ”

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΚΑΤΣΑΟΥΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Γ. ΚΟΛΤΣΑΚΗΣ

ΒΟΛΟΣ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2001



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 1988/1
Ημερ. Εισ.:
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2001
ΚΑΤ

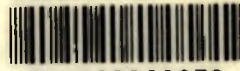
στοις γονείς μου



αρ . 2.7.6/Π.Α.....



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000062979



Εισαγωγή.

Οι νέοι κανονισμοί περιορισμού των εκπομπών ρύπων των κινητήρων επιβάλλουν την μείωση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης, τα οποία είναι εξαιρετικά επικίνδυνα και επιβλαβή για το περιβάλλον. Οι σύγχρονοι κινητήρες diesel έχουν πολύ χαμηλές εκπομπές CO και υδρογονανθράκων, όμως οι εκπομπές NOx και σωματιδίων αιθάλης είναι σημαντικές και η μείωση τους αποτελεί στόχο των τεχνολογιών αντιρρύπανσης που χρησιμοποιούνται. Η μείωση των εκπομπών μπορεί να γίνει με βελτιώσεις στον σχεδιασμό του κινητήρα, με τεχνολογίες καυσίμου, λαδιού και προσθέτου και με την μετεπεξεργασία καυσαερίων.

Τα φίλτρα σωματιδίων αιθάλης συγκρατούν τα σωματίδια που εκπέμπουν οι κινητήρες diesel. Η απόδοση τους φτάνει το 90% και έχουν ικανοποιητική μηχανική και θερμική αντοχή. Όμως η φόρτιση μετά από κάποιο διάστημα λειτουργίας του κινητήρα είναι μεγάλη και πρέπει να γίνει αναγέννηση, δηλ. καύση του καπνού για είναι δυνατή η αποτελεσματική λειτουργία του φίλτρου. Η αναγέννηση δεν έχει αναπτυχθεί αρκετά και πολλές φορές δημιουργεί προβλήματα αφού κατά την καύση του καπνού μπορεί να αστοχήσει το φίλτρο λόγω υπερβολικής έκλυσης θερμότητας. Τα προβλήματα της παγίδας αιθάλης θα πρέπει να λυθούν για να είναι δυνατή η ευρεία χρησιμοποίηση τους σαν συσκευή αντιρρύπανσης στα οχήματα με κινητήρα diesel.

Σήμερα τα φίλτρα αιθάλης στα επιβατικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούνται μόνο από την PSA όμως οι μελλοντικοί κανονισμοί περιορισμού των εκπομπών σωματιδίων καπνού επιβάλλουν από όλα τα οχήματα με κινητήρα diesel που θα κυκλοφορούν να έχουν συσκευές αντιρρύπανσης για τα σωματίδια καπνού, όπως τα φίλτρα αιθάλης.

Ο σχεδιασμός και η βελτίωση των φίλτρων αιθάλης μπορεί να γίνει ευκολότερα, πιο αποδοτικά και με μικρότερο κόστος με τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης. Η συνεισφορά της υπολογιστικής προσομοίωσης της λειτουργίας της παγίδας αιθάλης, μπορεί να είναι σημαντική αφού πολλές δοκιμές μπορούν να γίνουν αποφεύγοντας το κόστος των πειραματικών δοκιμών. Επιπλέον πολλές παράμετροι της λειτουργίας του φίλτρου μπορούν να υπολογιστούν, να αναλυθούν και να πάρουμε χρήσιμα συμπεράσματα πολύ γρηγορότερα και αξιόπιστα.

Η διπλωματική εργασία με θέμα 'Προϋπολογισμός λειτουργίας κεραμικών φίλτρων αιθάλης' έγινε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος **'Ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού συστημάτων μετεπεξεργασίας καυσαερίων' για την PSA Peugeot Citroen**, του Εργαστηρίου Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας.

Ο στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των βασικών αρχών λειτουργίας των φίλτρων αιθάλης και στη συνέχεια των υπολογισμών που έγιναν με το λογισμικό προσομοίωσης λειτουργίας φίλτρων αιθάλης Catwall. Ακόμα η επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του κώδικα και ο εντοπισμός των σημείων που πρέπει να βελτιωθούν αποτελούν αντικείμενο μελέτης στην εργασία, όπως και ο προσδιορισμός κάποιων παραμέτρων για τις



οποιές υπάρχει αβεβαιότητα (κινητική της αναγέννησης, ιδιότητες καπνού και άλλα).

Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων του υλικού, του καπνού και της μόνωσης όπως και η επιλογή της κινητικής του καπνού και του προσθέτου στην καύση ήταν κάτι που διευρενήθηκε με στόχο την όσο το δυνατό καλύτερη προσέγγιση των μετρήσεων.

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στις εκπομπές καυσαερίων των κινητήρων diesel, στους κανονισμούς περιορισμού των εκπομπών ρύπων και στα σωματίδια αιθάλης. Ακόμα παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των φίλτρων αιθάλης, η αναγέννηση της παγίδας, τα υλικά κατασκευής και το πρόσθετο καυσίμου.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει τους υπολογισμούς της θερμοκρασίας και του ΔΡ για τα πειράματα με μικρά φίλτρα που έγιναν από την PSA. Περιγράφεται η πειραματική διάταξη από την οποία προήλθαν οι μετρήσεις και γίνεται υπολογισμός της μάζας αιθάλης στο φίλτρο από τις εκπομπές καυσαερίου και σύγκριση της με αυτήν που υπολογίζει ο κώδικας Catwall. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σύγκριση της υπολογισμένης και μετρημένης θερμοκρασίας και πτώσης πίεσης για τα πειράματα με φίλτρα SiC και κορδιερίτη.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της πειραματικής διάταξης για τις μετρήσεις με τα αδιαβατικά φίλτρα που έγιναν από το IFP. Ακολουθεί ο υπολογισμός της θερμοκρασίας και του ΔΡ και η σύγκριση με την πειραματική για τα φίλτρα SiC. Επίσης γίνεται η επιλογή της κινητικής της καύσης του καπνού χωρίς πρόσθετο με την σύγκριση 4 κινητικών για όλα τα πειράματα.

Το επόμενο κεφάλαιο ασχολείται με τον υπολογισμό της λειτουργίας των φίλτρων του εργαστηρίου. Περιγράφεται η πειραματική διάταξη από την οποία προήλθαν οι μετρήσεις, γίνεται σύγκριση της υπολογισμένης και μετρημένης θερμοκρασίας και πτώσης πίεσης για τα πειράματα με φίλτρα SiC και κορδιερίτη. Ακόμα γίνεται προσπάθεια για την επιλογή της κινητικής της καύσης του καπνού με πρόσθετο με την σύγκριση 4 κινητικών για όλες τις περιπτώσεις. Επιπλέον περιλαμβάνεται ο προσδιορισμός των παραμέτρων των πειραμάτων για την βελτίωση των υπολογισμών.

Στο παράρτημα I περιγράφεται η λειτουργία του κώδικα Catwall όπως τη θεωρία υπολογισμού του μοντέλου. Το παράρτημα II περιλαμβάνει την προεπεξεργασία και την μετεπεξεργασία των δεδομένων.

Τα συμπεράσματα από τους υπολογισμούς κάθε κεφαλαίου παρατίθενται με στόχο την περαιτέρω βελτίωση του κώδικα, προτάσεις για νέα πειράματα που θα εξυπηρετήσουν αυτό το σκοπό, αλλά και γενικές παρατηρήσεις που είτε επιβεβαιώνουν τα δεδομένα από την βιβλιογραφία είτε περιγράφουν την επίδραση των παραμέτρων της αναγέννησης στον υπολογισμό για επιπλέον διευρεύνηση τους.



Abstract.

The new emission control regulations for the diesel engines impose less soot particulate emissions. The particulates are dangerous and very harmful for the environment. Today, the CO and HC emissions of the diesel engines are already very low but the NO_x and particulates emissions are still high. These are the goal of the modern emission control technologies. The reduction of the NO_x and particulates emitted can be reduced with improvements in the engine design, fuel, oil and additive technologies and with exhaust after treatment.

The soot filters collect the particulates from the diesel engine exhaust gas. The filter efficiency can be over 90% and the durability is satisfactory. When the trap's soot load is high the regeneration is necessary to retain the efficiency and to avoid the filter failure. The regeneration methods must be further developed in order to avoid problems caused from the heat released during the combustion of the soot. These problems must be completely solved, for the soot traps to become a common used emission control device in passenger cars.

Today, soot filters in passenger cars are used only from PSA, but the emission control regulations in the future will impose every vehicle with a diesel engine to have reduced particulates emissions. That will lead in the wide use of soot filters.

The design and improvement of soot traps can be much more easier, more efficiently and with less cost with the use of soot filter simulation software. Many tests and modifications can be made, avoiding the experimental cost. Besides, many parameters of the filter function can be computed and analysed faster and reliably.

The diploma thesis with title 'Modeling of ceramic soot filters' was conducted within the purposes of the research project '**Development of computational tools for exhaust after-treatment systems design optimization**' for PSA Peugeot Citroen, at the Laboratory of Thermodynamics and Thermal Engines, of the Department of Mechanical and Industrial Engineering.

The goal of the diploma thesis is the presentation of the basics of soot traps and the calculations conducted with the soot filter simulation software Catwall. The validation of the model as well as to find the points that need to be improved are a part of the thesis.

The properties of the materials, soot and insulation were defined and there was an effort to choose the most suitable kinetics scheme for the soot combustion and the additive reaction.

The first chapter describes the emissions of the diesel engines, the emissions regulations, the soot particulates, the soot filters basics, regeneration, materials and the fuel additive.

The second chapter deals with the modeling of the experiments of the small filters, conducted by PSA. The experiments are described and the results from the calculations are compared with the measurements with SiC and Cordierite filters.



In the next chapter the experiments conducted with insulated filters by the IFP are described and then the temperature and ΔP calculations are presented. The effort to choose the most suitable kinetics parameters follows as well as the comparison of 4 kinetics schemes for the soot combustion without additive.

The forth chapter describes the experiments conducted at the Laboratory of Thermodynamics and Thermal Engines. The results from the calculations are compared with the measurements with SiC and Cordierite filters and there is also an effort to choose the most suitable kinetics scheme, with a comparison of 4 kinetics schemes for the soot combustion with additive.

The model is described in appendix I and the preprocessing and postprocessing of the experimental data are presented in appendix II.

The conclusions from the calculations are presented in order to improve the source code and to suggest the conduction of new experiments, which will help in achieving this goal. Finally many remarks are made on the results, which confirm the literature data or describe the effect of the regeneration parameters on the calculations, which need to be further searched through.



Ευχαριστίες.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για όσα μου προσφέρανε για την ολοκλήρωση των σπουδών μου και για την συμπαράσταση τους στην διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά πρώτα τον Δρ. Α. Σταματέλλο, Αν. Καθηγητή στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας για την καθοδήγηση του και τις συμβουλές του, όπως επίσης και για την παροχή κάθε βοήθειας και μέσου. Η συνεργασία μας κατά την περίοδο που εργάστηκα στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών, ήταν πλούσια σε απόκτηση γνώσεων αλλά και εμπειριών μέσα από συμμετοχή μου στις ερευνητικές δραστηριότητες του εργαστηρίου.

Επίσης πρέπει να ευχαριστήσω θερμά τον διδάσκοντα στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Γ. Κολτσάκη για την επίβλεψη της διπλωματικής μου και τις συμβουλές του, οι οποίες ήταν ιδιαίτερα πολύτιμες. Χωρίς την βοήθεια του η εκπόνηση της θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολη.

Ακόμα, δεν πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Γ. Στρατάκη για την πολύ καλή συνεργασία στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών και για την βοήθεια του, όπως και τον υποψήφιο Μηχανολόγο Μηχανικό Βιομηχανίας, Γ. Κωνσταντά για την συνεργασία και την συμπαράσταση του. Το κλίμα στο εργαστήριο ήταν ιδιαίτερα καλό και αυτό διευκόλυνε και βοήθησε πολύ την συνεργασία μας.

Θα πρέπει επιπλέον, να ευχαριστήσω τους φίλους και τις φίλες μου για την συμπαράσταση τους και τις όμορφες στιγμές που περάσαμε κατά την διάρκεια των σπουδών μας.



Περιεχόμενα.

Εισαγωγή	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	5
Πίνακας συμβολισμών	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
1.1.1 Το καύσιμο diesel.	10
1.1.2 Ο κινητήρας diesel.	10
1.1.3 Οι εκπομπές των κινητήρων diesel.	13
1.2 Η νομοθεσία περιορισμού εκπομπών ρύπων.	14
1.2.1 Η νομοθεσία για τις εκπομπές καυσαερίων στις Η.Π.Α.	14
1.2.2 Η νομοθεσία για τις εκπομπές καυσαερίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση.	14
1.2.3 Κύκλοι εκπομπών ECE και EUDC.	17
1.3 Τεχνολογία αντιρρύπανσης κινητήρων diesel.	19
1.4.1 Τα σωματίδια αιθάλης.	21
1.4.2 Οι αρχές λειτουργίας του φίλτρου σωματιδίων αιθάλης.	22
1.4.3 Οι μηχανισμοί συγκράτησης των σωματιδίων.	23
1.4.4 SOF και ενώσεις του θείου.	25
1.5 Η αναγέννηση στις παγίδες αιθάλης.	25
1.6.1 Υλικά και κατασκευή των φίλτρων αιθάλης.	30
1.6.2 Διαστάσεις και πτώση πίεσης.	31
1.6.3 Μονόλιθοι κορδιερίτη.	32
1.6.4 Μονόλιθοι SiC.	33
1.7 Τα είδη των φίλτρων αιθάλης.	34
1.8.1 Πρόσθετο καυσίμου.	36
1.8.2 Συσσώρευση στάχτης.	39
1.9 Το σύστημα φίλτρου αιθάλης της Peugeot.	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
2.1 Πειραματική διάταξη μικρών φίλτρων από την οποία προήλθαν οι μετρήσεις.	42
2.2.1 Προυπολογισμός λειτουργίας μικρών φίλτρων.	42
2.2.2 Υπολογισμός της μάζας αιθάλης.	44
2.3 Προυπολογισμός λειτουργίας μικρών φίλτρων SiC.	49
2.4 Προυπολογισμός λειτουργίας μικρών φίλτρων κορδιερίτη.	55
2.5 Συμπεράσματα.	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
3.1 Πειραματική διάταξη φίλτρων SiC από την οποία προήλθαν οι μετρήσεις.	61
3.2 Επιλογή των παραμέτρων των υπολογισμών και της κινητικής.	62
3.3 Προυπολογισμός λειτουργίας φίλτρων SiC του IFP.	67
3.4 Υπολογισμός σφάλματος υπολογισμού, λόγου αναγέννησης, ποσοστού SOF	79



και μάζας αιθάλης.	
3.5 Συμπεράσματα.	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Πειραματική διάταξη φίλτρων SiC από την οποία προήλθαν οι μετρήσεις.	89
4.2.1 Προϋπολογισμός λειτουργίας φίλτρων SiC και κορδιερίτη του εργαστηρίου.	92
4.2.2 Επιλογή κινητικής της αναγέννησης.	93
4.2.3 Υπολογισμός της συγκέντρωσης του προσθέτου στον καπνό.	96
4.2.4 Υπολογισμός της παροχής καυσαερίου.	97
4.2.5 Προϋπολογισμός λειτουργίας φίλτρων SiC του εργαστηρίου.	97
4.2.6 Προϋπολογισμός λειτουργίας φίλτρων κορδιερίτη του εργαστηρίου.	104
4.2.7 Προϋπολογισμός φόρτισης και σενάριο πιθανής αστοχίας του φίλτρου.	106
4.3 Συμπεράσματα.	109

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

111

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

I.1 Λειτουργία του κώδικα Catwall.	113
I.2 Υπολογισμοί για την θερμική αναγέννηση.	113
I.3 Υπολογισμοί για την καταλυτική αναγέννηση.	115
I.4 Λογικό διάγραμμα του κώδικα.	122
I.5 Αρχεία εισόδου και αρχεία εξόδου.	123
I.6 Δυνατότητες ανάπτυξης του κώδικα.	126

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

II.1 Προεπεξεργασία δεδομένων Catwall.	127
II.2 Μετεπεξεργασία δεδομένων Catwall.	128
II.3 Διαδικασία ρύθμισης του Catwall.	129

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

III.1 Σχήματα και εικόνες.	131
----------------------------	-----



Πίνακας συμβολισμών

M	μάζα των σωματιδίων στο φίλτρο
\dot{m}	παροχή καυσαερίου (kg/sec)
\dot{V}	παροχή καυσαερίου (m^3/sec)
E	ενέργεια ενεργοποίησης (J/mole)
e_f	είναι η απόδοση του φίλτρου
$F(t)$	η παροχή καυσαερίου
k	προεκθετικός παράγοντας (m/secK)
$k(T)$	είναι η σταθερά του ρυθμού της αντίδρασης (1/sec)
k_p	διαπερατότητα του στρώματος καπνού
k_s	διαπερατότητα του τοιχώματος
k_w	διαπερατότητα του υλικού του τοιχώματος (m^2)
m	είναι η παροχή σωματιδίων από τον κινητήρα (kg/sec)
m_c	μάζα αιθάλης (kg)
m_g	παροχή καυσαερίου (kg/sec)
m_p	μάζα αιθάλης (kg)
p_{exh}	πίεση στην εξαγωγή
R	ρυθμός αντίδρασης (1/sec)
R	σταθερά των αερίων ($m^3Pa/moleK$)
S_p	ειδική επιφάνεια του στρώματος καπνού ($5.5 \times 10^7 m^{-1}$)
T	θερμοκρασία
T_{exh}	θερμοκρασία του καυσαερίου στην εξαγωγή
$T_{μετρ.}$	Μετρημένη θερμοκρασία
$T_{υπολ.}$	Υπολογισμένη θερμοκρασία
V	όγκος του φίλτρου (m^3)
V_w	ταχύτητα καυσαερίου (m/sec)
w	πάχος του στρώματος καπνού (m)
W_w	πάχος τοιχώματος (m)
y	κλάσμα O_2 στο καυσαέριο
α	βαθμός οξειδωσης του καπνού
$A_{συν.}$	Συνολική επιφάνεια φίλτρου (m^2)
$A_{συνδετικού}$	Επιφάνεια συνδετικού (m^2)
$A_{φίλτρου}$	Ενεργή επιφάνεια φίλτρου (m^2)
ΔH	ενθαλπία της οξειδωσης του καπνού (J/mole)
ΔP	πτώση πίεσης στο φίλτρο (mbar)
$\Delta P_{μετρ.}$	Μετρημένο ΔP
$\Delta P_{υπολ.}$	Υπολογισμένο ΔP
ϵ	πορώδες του υλικού



μ	δυναμικό ιξώδες του καυσαερίου (Pa*sec)
μ	ιξώδες του καυσαερίου
ρ	πυκνότητα καυσαερίου (kg/m^3)
ρ_p	πυκνότητα του στρώματος καπνού
ρ_p	πυκνότητα του στρώματος καπνού (kg/m^3)
ρ_s	πυκνότητα του τοιχώματος (kg/m^3)
T	χρόνος (sec)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1

**ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ,
ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ, ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ
ΚΑΠΝΟΥ, ΠΡΟΣΘΕΤΟ ΚΑΥΣΙΜΟΥ,
ΦΙΛΤΡΑ ΑΙΘΑΛΗΣ**

1.1.1 Το καύσιμο diesel.

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

Ο αριθμός κετανίου όσο μεγαλύτερος είναι τόσο ευκολότερα γίνεται η ανάφλεξη του καυσίμου και οι τιμές που παίρνει είναι 40-50. Το ιξώδες 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. Η μέγιστη συγκέντρωση του θείου στις Η.Π.Α. είναι 0.05% κ.β.

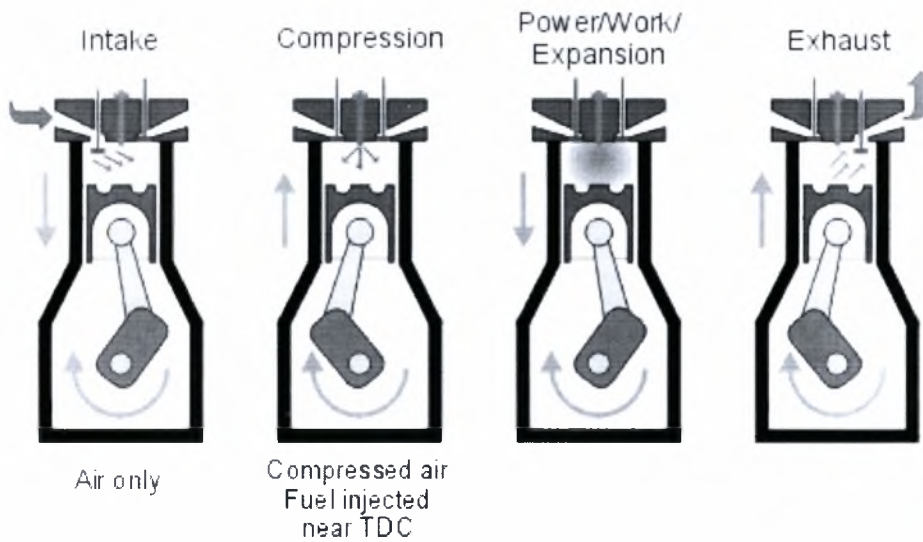
Το diesel περιέχει αρκετά πρόσθετα για να βελτιωθεί η συμπεριφορά του, όπως : ενώσεις με τις οποίες η καύση γίνεται με λιγότερο θόρυβο και αυξάνουν τον αριθμό κετανίου, αντιδιαβρωτικές ουσίες και λιπαντικές ουσίες. Η συνολική περιεκτικότητα αυτών των ενώσεων είναι 0.1%.

1.1.2 Ο κινητήρας diesel.

Ο κινητήρας diesel εφευρέθηκε στη δεκαετία του 1890. Ο κινητήρας λειτουργεί με εισαγωγή αέρα στον κυλινδρους και συνήθως το καύσιμο ψεκάζεται απ'ευθείας μέσα στο θάλαμο καύσης. Ο έλεγχος της ροπής του κινητήρα γίνεται με την μεταβολή της ποσότητας καυσίμου που εγχύεται. Η ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στον κύλινδρο εξαρτάται από τις στροφές του κινητήρα. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η λειτουργία του κινητήρα diesel. Στην πρώτη φάση γίνεται η εισαγωγή αέρα, μετά ψεκάζεται το καύσιμο και

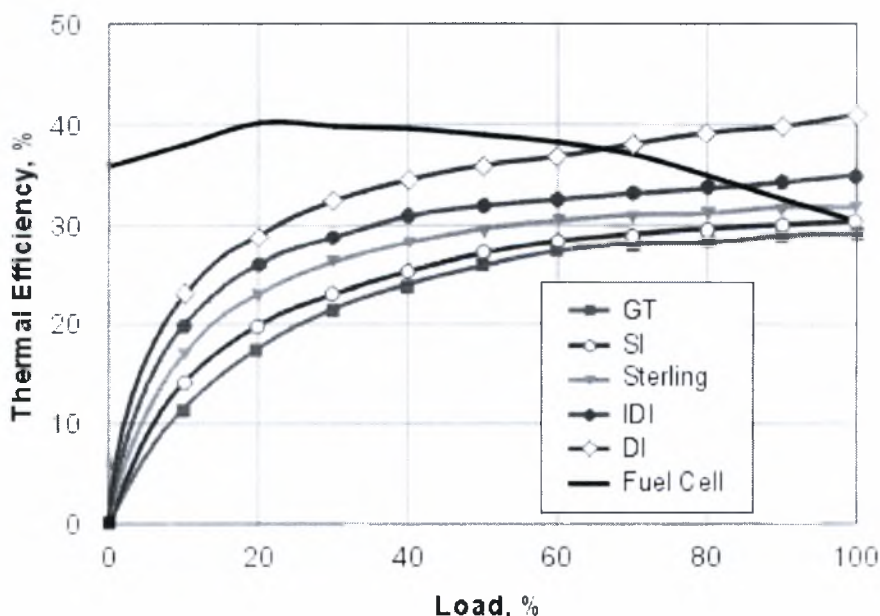


συμπιέζεται το μίγμα, γίνεται αυτοανάφλεξη του diesel και στη συνέχεια το καυσαέριο βγαίνει από τον κύλινδρο.



Σχήμα 1.1. Λειτουργία κινητήρα diesel.

Υπάρχουν κινητήρες diesel φυσικής αναπνοής (natural aspirated) και στροβιλουπερπληρούμενοι (turbocharged). Η σχέση συμπίεσης είναι 12-24 και το καύσιμο ψεκάζεται σε υψηλή πίεση. Έτσι επειδή η θερμοκρασία και η πίεση του μίγματος είναι πάνω από τις συνθήκες αυτοανάφλεξης του diesel γίνεται η καύση στον κύλινδρο. Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα diesel είναι μεγαλύτερος από τον βενζινοκινητήρα επειδή λειτουργεί με φτωχό μίγμα, έτσι η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερη. Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η σύγκριση της απόδοσης μεταξύ των διάφορων κινητήρων.



Σχήμα 1.2. Απόδοση σε σχέση με το φορτίο του κινητήρα.

Όπου :

Gas turbine (GT) στροβιλοκινητήρες



Spark ignited gasoline engine (SI) βενζινοκινητήρες
 Sterling hot-air engine
 DI and IDI diesel engines κινητήρες diesel έμμεσου και άμεσου ψεκασμού
 Fuel cells κελιά καυσίμου

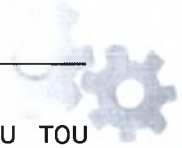
Άλλα πλεονεκτήματα των κινητήρων diesel είναι :

- Οι κινητήρες diesel επιπλέον έχουν πολύ χαμηλά επίπεδα εκπομπών άκαυστων HC και CO και οι εκπομπές CO₂ είναι 19% χαμηλότερες από τους βενζινοκινητήρες. Όμως οι εκπομπές NOx είναι μεγαλύτερες και οι εκπομπές σωματιδίων αιθάλης σημαντικές.
- Η αποδιδόμενη ροπή είναι μεγαλύτερη από τους βενζινοκινητήρες και είναι διαθέσιμη σε χαμηλότερες στροφές όπως και η ισχύς.
- Η σχέση συμπίεσης είναι σχεδόν διπλάσια και έτσι εκλύεται μεγαλύτερη ποσότητα της θερμότητας αλλά νωρίτερα στον κύκλο καύσης και με μεγαλύτερο ρυθμό. Αυτό απαιτεί η κατασκευή του κινητήρα να είναι πιο στιβαρή. Έτσι οι κινητήρες diesel έχουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μέχρι και 3-4 φορές περισσότερο από τους βενζινοκινητήρες.
- Εκτός από αυτό είναι πολύ αξιόπιστοι επειδή χρησιμοποιούν λιγότερα μηχανικά μέρη (αφού δεν χρειάζονται μπουζί, διανομέα και σύστημα ανάφλεξης). Επίσης η απόδοση είναι μεγαλύτερη σε χαμηλότερες στροφές όπου οι τριβές είναι μικρότερες και έτσι αυξάνεται ακόμα περισσότερο η αξιοπιστία.
- Ο έλεγχος της ισχύος και της ροπής γίνεται με ρύθμιση της ποσότητας καυσίμου που ψεκάζεται στον κύλινδρο και όχι με την ρύθμιση της ποσότητας αέρα. Αυτό έχει αποτέλεσμα ο κινητήρας να αναπνέει καλύτερα και μικρότερες τριβές άντλησης του αέρα.

Ο πίνακας 1.1 δείχνει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κινητήρων diesel.

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

Πίνακας 1.1



Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για την μείωση του θορύβου του κινητήρα diesel αλλά θα πρέπει να εξελιχθεί ακόμα περισσότερο. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του κινητήρα diesel είναι η μικρή απόδοση ισχύος ανά μονάδα βάρους. Έτσι η ειδική απόδοση φτάνει το 50-65% της απόδοσης των βενζινοκινητήρων.

Η μείωση των εκπομπών NO_x και σωματιδίων αιθάλης είναι ο στόχος των σύγχρονων τεχνολογιών αντιρρύπανσης. Οι βελτιώσεις που γίνονται για την μείωση των ρύπων που δημιουργούνται μέσα στον κύλινδρο δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές. Έτσι η τεχνολογία αντιρρύπανσης κατευθύνεται προς την βελτίωση του καυσίμου και την μετεπεξεργασία καυσαερίου.

Το υψηλό κόστος του κινητήρα diesel οφείλεται κυρίως στο μεγάλης ακρίβειας σύστημα τροφοδοσίας που πρέπει να διαχωρίζει πολύ καλά τα σταγονίδια καυσίμου. Η χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων για την χρήση υψηλής πίεσης σύστημα τροφοδοσίας είναι ένα μέσο για την μείωση του κόστους.

Η χαμηλή θερμοκρασία καυσαερίου είναι πλεονέκτημα αφού η απόδοση είναι μεγαλύτερη λόγω μικρότερων απωλειών θερμότητας αλλά συχνά οι συσκευές αντιρρύπανσης απαιτούν μεγάλη θερμοκρασία για την αποτελεσματική μετεπεξεργασία καυσαερίων.

1.1.3 Οι εκπομπές των κινητήρων diesel.

Η καύση του καυσίμου diesel στους κινητήρες εσωτερικής καύσης έχει ως προϊόντα κυρίως CO₂, H₂O και την ποσότητα του αέρα που δεν χρησιμοποιήθηκε. Η συγκέντρωση των αερίων αυτών στα καυσαέρια είναι :

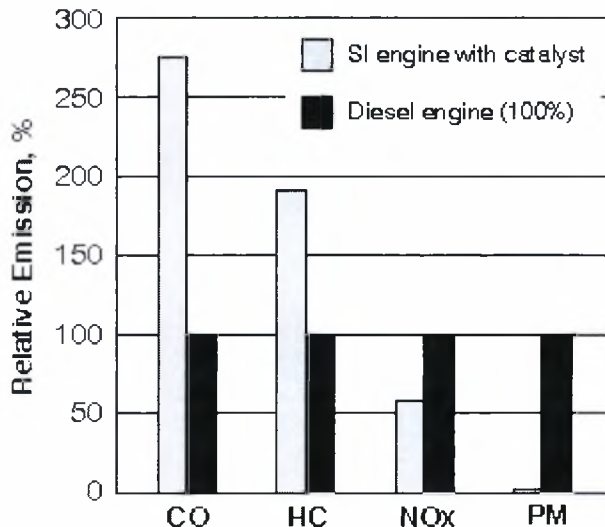
- CO₂ 2-12%
- H₂O 2-12%
- O₂ 3-17%
- N₂ υπόλοιπο καυσαέριο

Τα άλλα συστατικά του καυσαερίου παράγονται λόγω μη ιδανικής καύσης, αντιδράσεων μεταξύ των συστατικών του μίγματος υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία, καύση του λιπαντικού και καύσης των ενώσεων του καυσίμου που δεν περιέχουν υδρογονάνθρακες όπως οι ενώσεις του θείου. Η συγκέντρωση αυτών των αερίων συνολικά φτάνει το 1%.

Οι κανονισμοί που έχουν θέσει οι Η.Π.Α. , η Ευρωπαϊκή Ένωση και άλλες χώρες για τις εκπομπές των κινητήρων diesel αφορούν :

- Σωματίδια (Diesel Particulate Matter) που περιέχονται στις εκπομπές.
- Οξείδια του αζώτου (NO_x).
- Υδρογονάνθρακες (HC).
- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO).

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το diesel λειτουργούν διαφορετικά από τους βενζινοκινητήρες (π.χ. η δημιουργία του μίγματος γίνεται εσωτερικά και η ανάφλεξη προκαλείται λόγω της συμπίεσης του μίγματος) και έτσι οι εκπομπές τους είναι διαφορετικές.



Σχήμα 1.3. Εκπομπές βενζινοκινητήρων και κινητήρων diesel κατά την διάρκεια του Ευρωπαϊκού κύκλου.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3 οι εκπομπές CO και HC των πετρελαιοκινητήρων είναι σημαντικά χαμηλότερες ενώ οι εκπομπές NOx είναι υψηλότερες από αυτές των βενζινοκινητήρων με τριοδικό καταλύτη. Ένα μεγάλο μειονέκτημα του diesel σαν καυσίμου είναι η εκπομπή σωματιδίων τα οποία δεν υπάρχουν στις εκπομπές των βενζινοκινητήρων. Η μείωση των εκπομπών NOx και σωματιδίων είναι ο στόχος των σύγχρονων τεχνολογιών αντιρύπανσης.

Οι εκπομπές του diesel περιέχουν ακόμα πάρα πολλά συστατικά των οποίων η συγκέντρωση είναι συνήθως μικρότερη από τα όρια που έχουν καθοριστεί :

- PAH (polynuclear aromatic hydrocarbons) που βρίσκονται συνήθως στα σωματίδια (DPM) αλλά και σε αέρια φάση.
- SOF (soluble organic fraction) που και αυτά βρίσκονται στα σωματίδια.
- Αλδεύδες, που παράγονται από τα HC.
- SO₂
- N₂O
- Οξείδια μετάλλων.

1.2 Η νομοθεσία για τις εκπομπές καυσαερίων.

1.2.1 Η νομοθεσία για τις εκπομπές καυσαερίων στις Η.Π.Α.

Οι εκπομπές καυσαερίων που θα πρέπει να έχουν τα οχήματα καθορίστηκαν από την EPA (U.S. Environmental Protection Agency) το 1990 και υπάρχουν δύο κανονισμοί, το Tier 1 και το Tier 2. Ο κανονισμός Tier 1 καθορίστηκε τελικά το 1991 και εφαρμόστηκε το 1997 ενώ ο Tier 2 εγκρίθηκε το 1999 και η εφαρμογή του θα αρχίσει το 2004.



Ο κανονισμός Tier 1.

Εφαρμόζεται στα ελαφρά οχήματα με βάρος μέχρι 8500lb και αναφέρεται σε οχήματα με διάρκεια ζωής 100.000miles. Ακόμα θα πρέπει στα 50000miles οι εκπομπές του οχήματος να είναι κάτω από τα, ειδικά για αυτό το χρονικό διάστημα καθορισμένα όρια. Οι διαφορές στα όρια μεταξύ των βενζινοκινητήρων και των κινητήρων diesel είναι κυρίως οι εκπομπές NOx. Τα οχήματα δοκιμάζονται στη διαδικασία FTP 75 και οι μετρήσεις εκφράζονται σε gr/mile. Μια συμπληρωματική διαδικασία SFTP θα προστεθεί μέχρι το 2004 που αφορά την οδήγηση στον αυτοκινητόδρομο (κύκλος US76) και την οδήγηση στην πόλη με το σύστημα κλιματισμού ενεργοποιημένο (κύκλος SC03).

Ο πίνακας 1.2 δείχνει τα όρια εκπομπών ρύπων Tier 1 με τον κύκλο FTP 75 σε gr/mile.

Κατηγορία	50,000 miles/5 χρόνια						100,000 miles/10 χρόνια ¹					
	THC	NMHC	CO	NOx diesel	NOx gasoline	PM	THC	NMHC	CO	NOx diesel	NOx gasoline	PM
Επιβατικά	0.41	0.25	3.4	1.0	0.4	0.08	-	0.31	4.2	1.25	0.6	0.10
LLDT, LVW <3,750 lbs	-	0.25	3.4	1.0	0.4	0.08	0.80	0.31	4.2	1.25	0.6	0.10
LLDT, LVW >3,750 lbs	-	0.32	4.4	-	0.7	0.08	0.80	0.40	5.5	0.97	0.97	0.10
HLDT, ALVW <5,750 lbs	0.32	-	4.4	-	0.7	-	0.80	0.46	6.4	0.98	0.98	0.10
HLDT, ALVW >5,750 lbs	0.39	-	5.0	-	1.1	-	0.80	0.56	7.3	1.53	1.53	0.12

Πίνακας 1.2

1 – Διάρκεια ζωής 120.000miles/11χρόνια για όλα τα φορτηγά πάνω από 6000lb και για το THC για αυτά με βάρος λιγότερο από 6000lb.

Όπου :

LVW - loaded vehicle weight

ALVW - adjusted LVW

LLDT - light light-duty truck (below 6,000 lbs)

HLDT - heavy light-duty truck (above 6,000 lbs)

Το 1997 η EPA καθόρισε τους κανονισμούς για το πρόγραμμα National Low Emission Vehicle (NLEV) που θέτει αυστηρότερους περιορισμούς στις εκπομπές ρύπων πριν εφαρμοστεί το Tier 2. Το πρόγραμμα NLEV συνδυάζει τους περιορισμούς όλων των πολιτειών και υποχρεώνει τους κατασκευαστές να παράγουν αυτοκίνητα που να τηρούν τους συνεχώς αυστηρότερους περιορισμούς εκπομπών ρύπων.



Ο κανονισμός Tier 2.

Τα όρια που προβλέπει το Tier 2 είναι σημαντικά χαμηλότερα από το Tier 1. Ακόμα ο κανονισμός ισχύει για όλα τα οχήματα ανεξάρτητα από το βάρος τους. Έτσι οι μεγαλύτεροι κινητήρες θα πρέπει να χρησιμοποιούν υψηλότερη τεχνολογία αντιρρύπανσης για να πετύχουν τις επιτρεπόμενες εκπομπές ρύπων. Το Tier 1 εφαρμόζεται σε οχήματα με βάρος μέχρι 8500lb όμως το Tier 2 μέχρι 10000lb. Επίσης ισχύει σε όλα τα οχήματα ανεξάρτητα από το καύσιμο που χρησιμοποιούν. Οι κατασκευαστές θα πρέπει να κατατάξουν τα αυτοκίνητα που παράγουν σε μια από τις 8 κατηγορίες του κανονισμού αλλά ο μέσος όρος εκπομπών NOx θα πρέπει να είναι 0.07gr/mile. Η εφαρμογή του Tier 2 θα γίνει από το 2004 μέχρι το 2009.

Ο πίνακας 1.3 δείχνει τα όρια εκπομπών ρύπων Tier 1 με τον κύκλο FTP 75 σε gr/mile.

Κατηγορία	50,000 miles					120,000 miles				
	NMOG	CO	NOx	PM	HCHO	NMOG	CO	NOx*	PM	HCHO
Προσωρινές κατηγορίες										
MDPV						0.280	7.3	0.9	0.12	0.032
10	0.125 (0.160)	3.4 (4.4)	0.4	-	0.015 (0.018)	0.156 (0.230)	4.2 (6.4)	0.6	0.08	0.018 (0.027)
9	0.075 (0.140)	3.4	0.2	-	0.015	0.090 (0.180)	4.2	0.3	0.06	0.018
Μόνιμες κατηγορίες										
8	0.100 (0.125)	3.4	0.14	-	0.015	0.125 (0.156)	4.2	0.20	0.02	0.018
7	0.075	3.4	0.11	-	0.015	0.090	4.2	0.15	0.02	0.018
6	0.075	3.4	0.08	-	0.015	0.090	4.2	0.10	0.01	0.018
5	0.075	3.4	0.05	-	0.015	0.090	4.2	0.07	0.01	0.018
4	-	-	-	-	-	0.070	2.1	0.04	0.01	0.011
3	-	-	-	-	-	0.055	2.1	0.03	0.01	0.011
2	-	-	-	-	-	0.010	2.1	0.02	0.01	0.004
1	-	-	-	-	-	0.000	0.0	0.00	0.00	0.000

* ο επιτρεπόμενος μέσος όρος εκπομπών NOx είναι 0.07gr/mile

Πίνακας 1.3

Ο κανονισμός Tier 2 έχει αποτέλεσμα την απαίτηση των αντιρρυπαντικών συσκευών (όπως οι καταλύτες) που θα χρησιμοποιηθούν για καλύτερη ποιότητα καυσίμου. Έτσι η περιεκτικότητα θείου στη βενζίνη πρέπει να είναι 300ppm από το 2004 και 80ppm από το 2006. Οι περιορισμοί για το καύσιμο diesel έχουν καθοριστεί το 1999.



1.2.2 Η νομοθεσία για τις εκπομπές καυσαερίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Οι περιορισμοί για τις εκπομπές ρύπων καθορίστηκαν αρχικά στην οδηγία 70/220/EEC της Ε.Ε. που περιλαμβάνει τους κανονισμούς Euro 1 και Euro 2 (Οδηγία 93/59/EC) αλλά και τους πρόσφατους Euro 3 και 4 (Οδηγία 98/69/EC). Οι κανονισμοί για το 2000-2005 επιβάλλουν καλύτερη ποιότητα καυσίμου. Ο ελάχιστος αριθμός κετανίου του diesel πρέπει να είναι 51 και μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο 350ppm για το 2000 και 50ppm το 2005. Η βενζίνη πρέπει να έχει 150ppm θείο το 2000 και 50ppm το 2005. Ο κύκλος οδήγησης είναι ο κύκλος ECE 15 και EUDC.

Τα ευρωπαϊκά όρια είναι διαφορετικά για τους βενζινοκινητήρες από τους κινητήρες diesel. Οι κινητήρες diesel έχουν χαμηλότερα όρια για το CO αλλά υψηλότερα όρια NOx και οι βενζινοκινητήρες δεν έχουν όριο για τα σωματίδια.

Ο πίνακας 1.4 δείχνει τα όρια εκπομπών ρύπων σε gr/km.

Κανονισμός	Έτος	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
Diesel						
Euro 1	1992	2.72	-	0.97	-	0.14
Euro 2 - IDI	1996	1.0	-	0.7	-	0.08
Euro 2 - DI	1999	1.0	-	0.9	-	0.10
Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05
Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025
Petrol (Gasoline)						
Euro 3	2000.01	2.30	0.20	-	0.15	-
Euro 4	2005.01	1.0	0.10	-	0.08	-

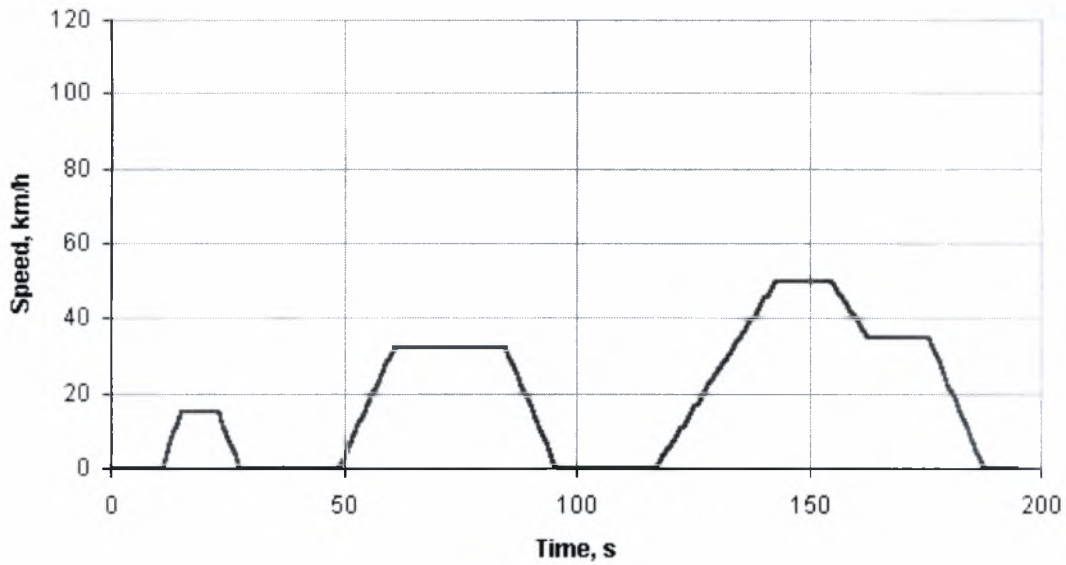
Πίνακας 1.4

Η διάρκεια ζωής του οχήματος είναι 80.000km στο Euro 3 και 100.000km στο Euro 4.

1.2.3 Κύκλοι εκπομπών ECE και EUDC.

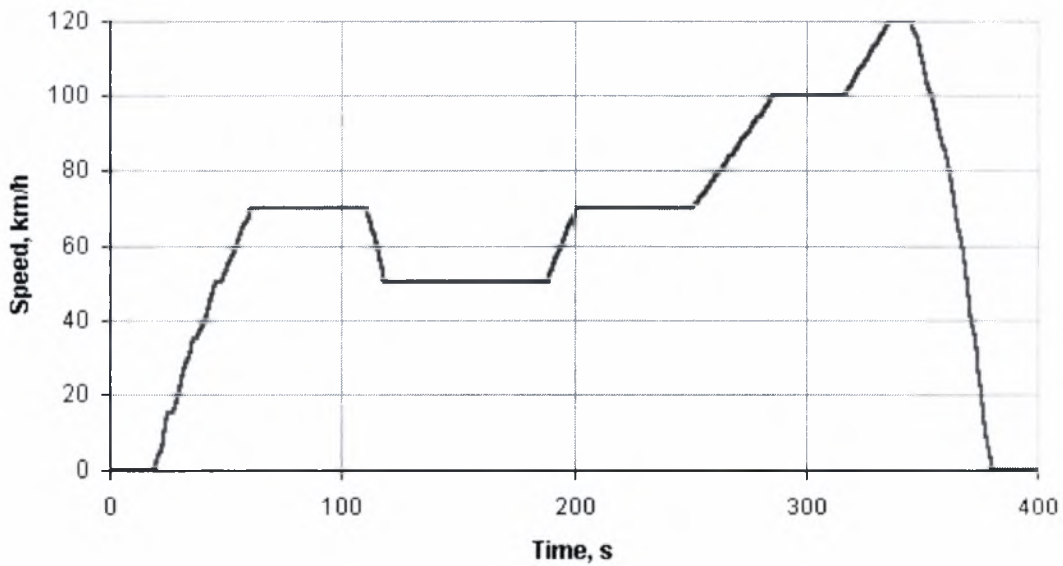
Οι κύκλοι ECE και EUDC χρησιμοποιούνται για την πιστοποίηση των εκπομπών των οχημάτων στην Ευρώπη. Περιλαμβάνουν 4 τμήματα ECE που επαναλαμβάνονται συνεχόμενα και ακολουθεί ένα τμήμα EUDC. Πριν την δοκιμή το όχημα είναι ακίνητο για 6 ώρες και σε θερμοκρασία 20-30°C.

Ο κύκλος ECE είναι ένας αστικός κύκλος οδήγησης και δημιουργήθηκε για να προσομοιώσει τις συνθήκες οδήγησης στην πόλη. Τα χαρακτηριστικά του κύκλου είναι η μικρή ταχύτητα, το χαμηλό φορτίο και οι χαμηλές θερμοκρασίες καυσαερίου.

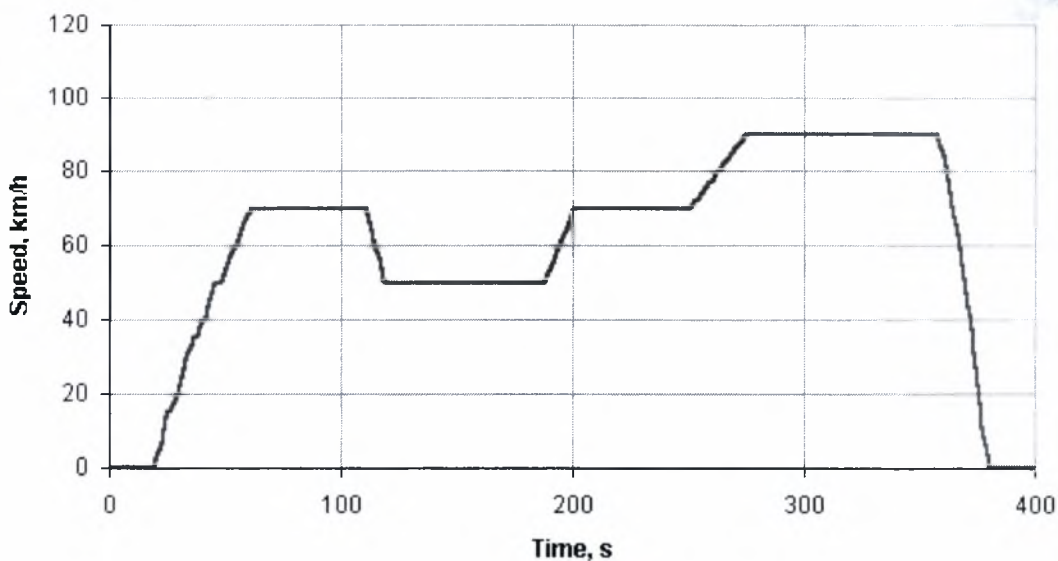


Σχήμα 1.4. Κύκλος ECE 15.

Ο κύκλος EUDC προστέθηκε μετά από το τέταρτο τμήμα του ECE για να προσομοιώσει συνθήκες οδήγησης με μεγαλύτερη ταχύτητα. Η μέγιστη ταχύτητα του κύκλου είναι 120km/h.



Σχήμα 1.5. Κύκλος EUDC.



Σχήμα 1.6. Κύκλος EUDC για οχήματα με μικρή ισχύ.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τα χαρακτηριστικά των κύκλων οδήγησης ECE και EUDC.

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

Πίνακας 1.5

1.3 Τεχνολογία αντιρρύπανσης κινητήρων diesel.

Οι τεχνολογίες αντιρρύπανσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε :

1. Βελτιώσεις στον σχεδιασμό του κινητήρα.
 - Ηλεκτρονικός έλεγχος του κινητήρα.
 - Βελτιώσεις του συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου.
 - Επανακυκλοφορία καυσαερίου (Exhaust Gas Recirculation, EGR).
 - Βελτιώσεις στο σύστημα εισαγωγής αέρα.
 - Βελτιώσεις του θαλάμου καύσης.
 - Προσθήκη νερού.
 - Βελτιώσεις στην επικάλυψη του κυλίνδρου.
2. Τεχνολογίες καυσίμου, λαδιού και προσθέτου.
 - Βελτιώσεις στο καύσιμο και το λιπαντικό.
 - Εναλλακτικά καύσιμα.
 - Πρόσθετο καύσιμο.
3. Μετεπεξεργασία καυσαερίων.



- Οξειδωτικός καταλύτης.
- Καταλύτης αποθήκευσης NOx (τεχνολογία που αναπτύσσεται).
- Συστήματα καταλύτη SCR.
- Φίλτρο αιθάλης.

Οι τεχνολογίες αντιρρύπανσης έχουν στόχο κυρίως την μείωση των εκπομπών NOx και σωματιδίων αιθάλης. Μεγάλες βελτιώσεις έγιναν στην γεωμετρία του θαλάμου καύσης για την καλύτερη κίνηση του αέρα και δημιουργία του μίγματος. Ακόμα οι εκπομπές μειώθηκαν αρκετά λόγω της χρήσης υψηλής πίεσης συστήματος τροφοδοσίας και του σχεδιασμού του για τον καλύτερο διαχωρισμό των σταγονιδίων καυσίμου και την ανάμιξη τους με τον αέρα. Η καλύτερη ψύξη του αέρα εισαγωγής στους υπερπληρούμενους κινητήρες έχει επίσης αποτέλεσμα την μείωση των εκπομπών NOx.

Ακόμα ο ηλεκτρονικός έλεγχος του κινητήρα diesel μπορεί να βελτιώσει πολύ τις εκπομπές ρύπων. Κάποιες μέθοδοι όμως που μειώνουν τις εκπομπές NOx αυξάνουν τις εκπομπές σωματιδίων και αντίστροφα, έτσι για παράδειγμα η καθυστέρηση του ψεκασμού καυσίμου μειώνει τα NOx στο καυσαέριο αλλά αυξάνει τα σωματίδια αιθάλης. Το αποτέλεσμα είναι να μην είναι εύκολη η ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών NOx και σωματιδίων.

Η μείωση της περιεκτικότητας θείου στο καύσιμο έχει αποτέλεσμα λιγότερες εκπομπές SO₂ αλλά δίνει και την δυνατότητα χρήσης καταλύτη στους κινητήρες diesel. Ακόμα χρησιμοποιούνται πολλά πρόσθετα καυσίμου για την μείωση των εκπομπών ρύπων. Η μετεπεξεργασία καυσαερίων μπορεί να είναι λύση αφού αν έχει στόχο την μείωση των εκπομπών σωματιδίων, μπορεί ο κατασκευαστής να βελτιώσει το σχεδιασμό του κινητήρα για να μειώσει τα NOx.

Η προσπάθεια για αντιρρύπανση πρέπει να είναι συνδυασμός βελτιώσεων που αφορούν το καύσιμο, το πρόσθετο και την μετεπεξεργασία των καυσαερίων. Οι παρακάτω τεχνολογίες προσφέρουν την δυνατότητα μείωσης των ρύπων και έχουν πολλά πλεονεκτήματα.

- Η επανακυκλοφορία καυσαερίου (Exhaust Gas Recirculation, EGR) είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης των NOx. Όμως με τη χρήση του EGR μπορεί να αυξηθεί η αιθάλη στο καυσαέριο και τα σωματίδια που εισέρχονται με στον αέρα εισαγωγής προκαλούν φθορά του κινητήρα. Η λύση είναι η τοποθέτηση μιας παγίδας αιθάλης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με το EGR.
- Ο οξειδωτικός καταλύτης μειώνει τις εκπομπές αιθάλης οξειδώνοντας τους υδρογονάνθρακες (SOF) που περιέχεται στα σωματίδια αλλά δεν συγκρατεί τον άνθρακα των σωματιδίων αιθάλης. Έτσι ο κινητήρας μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να παράγει λιγότερα σωματίδια καπνού αλλά περισσότερο SOF.
- Το βιοκαύσιμο είναι ανανεούμενη πηγή ενέργειας και μπορεί να μειώσει τις εκπομπές ρύπων αλλά δεν είναι συμβατό με μερικά υλικά που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες diesel. Έτσι για τον σχεδιασμό ενός κινητήρα που χρησιμοποιεί βιοκαύσιμο θα πρέπει να γίνει προσεχτικά η επιλογή των υλικών.

Οι παρακάτω μέθοδοι μειώνουν τις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης.

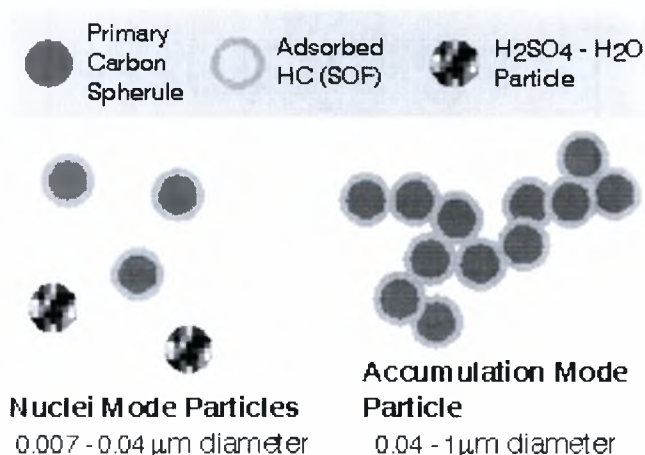


- Η αύξηση του στροβιλισμού του μίγματος στο θάλαμο καύσης. Αυτό γίνεται με την κατάλληλη διαμόρφωση της επιφάνειας του πιστονιού που συχνά έχει εσοχές που αυξάνουν το στροβιλισμό του μίγματος αέρα καυσίμου.
- Η αύξηση της πίεσης ψεκασμού του καυσίμου βελτιώνει τον διαχωρισμό των σταγονιδίων του καυσίμου και έτσι γίνεται καλύτερη καύση με αποτέλεσμα να παράγονται λιγότερα σωματίδια.
- Μεγάλες ποσότητες αιθάλης παράγονται κατά την διάρκεια της επιτάχυνσης. Αυτό μπορεί αποφευχθεί με εισαγωγή επιπλέον αέρα στην επιτάχυνση.
- Η χρήση οξειδωτικού καταλύτη μειώνει το ποσοστό του SOF στα σωματίδια μέχρι 20-30%.
- Η τοποθέτηση παγίδας αιθάλης μειώνει τις εκπομπές σωματιδίων αιθάλης σε μεγάλο βαθμό (η απόδοση του φίλτρου μπορεί να φτάσει το 95%). Τα μειονεκτήματα όμως είναι τα προβλήματα αξιοπιστίας και αντοχής των φίλτρων αιθάλης και η αυξημένη κατανάλωση καυσίμου λόγω της πτώσης πίεσης λόγω της ροής του καυσαερίου μέσα από το φίλτρο.
- Η χρήση diesel με μεγαλύτερο αριθμό κετανίου, λιγότερα αρωματικά συστατικά ή μεγαλύτερο κινηματικό ιξώδες μπορεί να μειώσει την παραγόμενη ποσότητα καπνού.
- Η χρήση λιπαντικών με μη μεταλλικά συστατικά έχει αποτέλεσμα λιγότερη στάχτη που προέρχεται από το λιπαντικό.
- Η τοποθέτηση κεραμικών υλικών στην επιφάνεια του κυλίνδρου σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές όπως μεταβολή του χρονισμού έγχυσης καυσίμου μειώνει τις εκπομπές αιθάλης χωρίς αύξηση των NOx.

1.4.1 Τα σωματίδια αιθάλης.

Τα σωματίδια αιθάλης είναι από τα πιο πολύπλοκα συστατικά των καυσαερίων των κινητήρων diesel. Αποτελούνται κυρίως από άνθρακα, υδρογονάνθρακες που παράγονται από το καύσιμο και το λιπαντικό και ένυδρο θειικό οξύ που παράγεται από το θείο που περιέχεται στο καύσιμο. Ακόμα τα σωματίδια (DPM) περιέχουν και PAH (polynuclear aromatic hydrocarbons). Τα σωματίδια αυτά είναι υπεύθυνα για τον μαύρο καπνό που παράγουν οι πετρελαιοκινητήρες και ακόμα δεν έχει καθοριστεί πλήρως ο μηχανισμός δημιουργίας τους μέσα τον θάλαμο καύσης. Είναι πολύ επικίνδυνα όταν εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα και η μείωση τους αποτελεί στόχο των τεχνολογιών μείωσης ρύπων των κινητήρων diesel.

Τα σωματίδια άνθρακα αποτελούν το κύριο συστατικό όμως απορροφούν και άλλες ενώσεις. Είναι μίγμα σωματιδίων που αποτελούνται μόνο από τον πυρήνα (nuclei mode particles) και σωματιδίων που προέρχονται από την συσσώρευση πυρήνων (accumulation mode particles). Τα πρώτα έχουν διάμετρο 0.007-0.04μm αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής μάζας των σωματιδίων. Αυτά προέρχονται από τον άνθρακα που σχηματίζεται στον θάλαμο καύσης. Ακόμα η συσσώρευση σωματιδίων ένυδρου θειικού οξέος οδηγεί στην δημιουργία των θειικών σωματιδίων (sulfuric particulates). Τα σωματίδια που προέρχονται από την συσσώρευση πυρήνων έχουν διάμετρο 0.04-0.1μm.



Σχήμα 1.6. Σωματίδια των εκπομπών diesel.

Τα DPM αποτελούνται από 3 μέρη :

1. Στερεό τμήμα που αποτελείται από τον άνθρακα.
2. Διαλυμένο οργανικό κλάσμα (SOF).
3. Σωματίδια που περιέχουν θείο.

Τα σωματίδια που βγαίνουν από τον θάλαμο καύσης είναι στερεά (άνθρακας) και μπορούν να συσσωρευτούν στην εξαγωγή ανάλογα με την θερμοκρασία του καυσαερίου. Κάποια από αυτά μένουν στα τοιχώματα του συστήματος εξαγωγής και εκεί είναι πιθανή η ύπαρξη σωματιδίων που περιέχουν HC, οξείδια του θείου και νερό. Επιπλέον στα καυσαέρια υπάρχουν και κάποια στερεά σωματίδια στάχτης όπως μερικά μέταλλα (Ca,Zn) που προέρχονται από το λιπαντικό. Η συσσωμάτωση των πτητικών συστατικών της στάχτης γίνεται στον θάλαμο καύσης κατά την διάρκεια της εκτόνωσης. Το συνολικό ποσοστό στάχτης (ash) στην στερεά μάζα που περιέχει το καυσαέριο φτάνει το 10%.

Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των σωματιδίων DPM αλλάζουν καθώς τα καυσαέρια αναμιγνύονται με τον αέρα και ψύχονται. Οι υδρογονάνθρακες απορροφώνται από τα σωματίδια άνθρακα και δημιουργούν το SOF αλλά τα θειούχα συστατικά περιέχονται χωριστά από τα DPM στα καυσαέρια. Τα διαλυμένα οργανικά συστατικά συχνά αναφέρονται και ως Volatile Organic Fraction (VOF). Η περιεκτικότητα σε SOF διαφέρει ανάλογα τον κινητήρα και οι υδρογονάνθρακες που περιέχονται σε αυτά προέρχονται κυρίως από το λιπαντικό και λιγότερο από το καύσιμο. Τα σωματίδια με μικρή περιεκτικότητα SOF ονομάζονται ξηρά και αυτά με υψηλή περιεκτικότητα υγρά. Τα τελευταία μπορούν να περιέχουν μέχρι και 50% SOF.

1.4.2 Οι αρχές λειτουργίας του φίλτρου σωματιδίων αιθάλης (soot particulates).

Τα φίλτρα σωματιδίων αιθάλης συγκρατούν τα σωματίδια που εκπέμπουν οι κινητήρες diesel. Δουλεύουν κυρίως στηριζόμενα σε ένα συνδυασμό μηχανισμών όπως η απόθεση λόγω διάχυσης και λόγω αδράνειας. Τα πιο



συνηθισμένα υλικά κατασκευής των φίλτρων σωματιδίων αιθάλης είναι κεραμικά με ροή διαμέσου του τοιχώματος και υλικά με συνεχείς κεραμικές ίνες. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για την αναγέννηση των φίλτρων. Τα παθητικά φίλτρα χρησιμοποιούν καταλύτη για να μειώσουν την θερμοκρασία καύσης του καπνού (soot). Τα ενεργητικά φίλτρα θερμαίνουν ηλεκτρικά ή με ανάφλεξη του καυσίμου τα συλλεγμένα σωματίδια για την καύση τους.

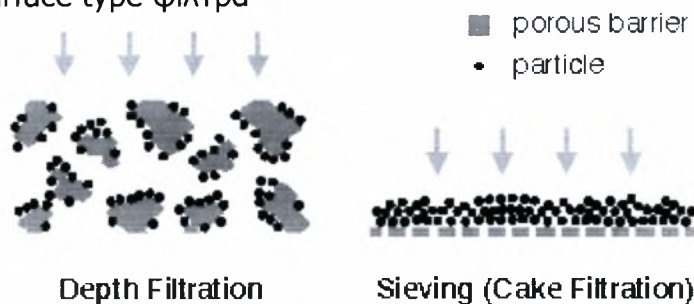
Οι μηχανισμοί συλλογής σωματιδίων που σχετίζονται με την λειτουργία των φίλτρων έχουν αποτέλεσμα να είναι πολύ αποτελεσματικά τα στερεά ανθρακούχα συστατικά των σωματιδίων που εκπέμπουν οι κινητήρες diesel (Diesel Particulate Matter). Ο βαθμός αποτελεσματικότητας του φίλτρου στην συγκράτηση των οργανικών συστατικών (Solid Organic Fraction) των DPM εξαρτάται από τον τύπο του και των συνθηκών λειτουργίας.

Κάποια από τα υλικά που αναπτύχθηκαν για την χρήση στα φίλτρα συγκράτησης σωματιδίων των εκπομπών των κινητήρων diesel έχουν εντυπωσιακή αποτελεσματικότητα που πολλές φορές ξεπερνάει το 90%. Ακόμα έχουν ικανοποιητική μηχανική και θερμική αντοχή. Η αναγέννηση του φίλτρου όμως είναι κάτι που δεν έχει αναπτυχθεί αρκετά. Ο καπνός που δημιουργείται από τους κινητήρες diesel έχει χαμηλή πυκνότητα και έτσι καταλαμβάνει πολύ χώρο. Έτσι η αναγέννηση πρέπει να γίνεται είτε ανά διαστήματα ή συνεχώς. Η αναγέννηση γίνεται στο φίλτρο που είναι πάνω στο όχημα με καύση του καπνού. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την καύση του καπνού στο φίλτρο όμως υπάρχουν ακόμα προβλήματα που έχουν αποτέλεσμα την αύξηση της πτώσης πίεσης ή ακόμα και την παρεμπόδιση της ροής. Επιπλέον η υπερβολική έκλυση θερμότητας κατά την διάρκεια της αναγέννησης μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του υλικού. Όμως η νομοθεσία απαιτεί συνεχώς την μείωση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης και έτσι αυτά τα φίλτρα αναπτύσσονται και βελτιώνονται συνεχώς.

1.4.3 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



Σχήμα 1.7. Deep bed φίλτρα και Surface type φίλτρα



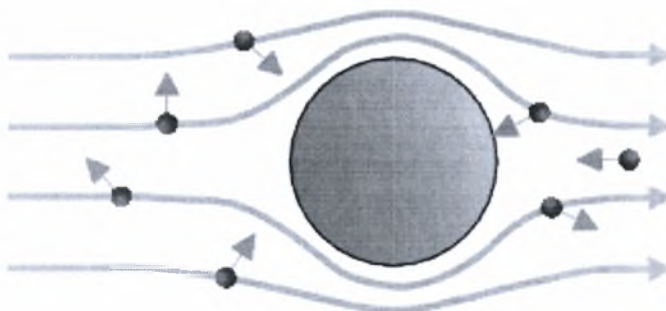
Στα Deep bed φίλτρα η μέση διάμετρος των σωματιδίων του τοιχώματος είναι μεγαλύτερη από την διάμετρο των σωματιδίων που συλλέγονται με ένα συνδυασμό μηχανισμών συλλογής. Αυτά είναι και τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται κυρίως στην συλλογή σωματιδίων των εκπομπών των κινητήρων diesel. Η απόδοση και η πτώση 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 :

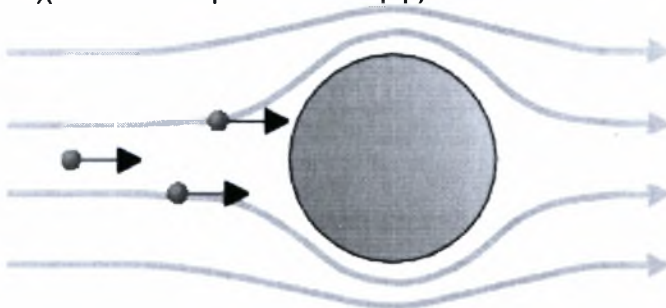
- Απόθεση λόγω διάχυσης.
- Απόθεση λόγω αδράνειας.
- Απόθεση λόγω ανάσχεσης (interception) της ροής.

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.



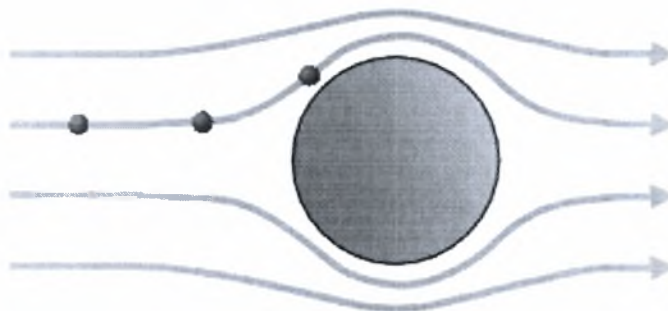
Σχήμα 1.8. Απόθεση λόγω διάχυσης.

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.



Σχήμα 1.9. Απόθεση λόγω αδράνειας.

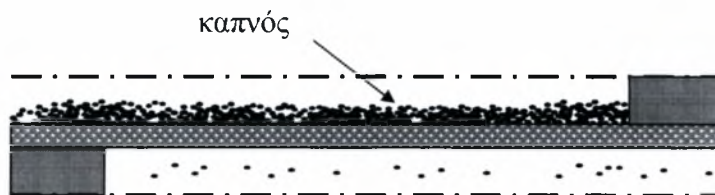
Η απόθεση λόγω αδράνειας εμφανίζεται περισσότερο όσο μεγαλώνει η διάμετρος των σωματιδίων. Αυτά πλησιάζουν το μέσο συλλογής και αποθέτονται πάνω σε αυτό λόγω αδράνειας.



Σχήμα 1.10. Απόθεση λόγω ανάσχεσης (interception) της ροής.

Η απόθεση λόγω ανάσχεσης (interception) της ροής εμφανίζεται όταν μια ροική 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. Το σχήμα 1.11 δείχνει την συλλογή των σωματιδίων από το κανάλι του φίλτρου.



Σχήμα 1.11. Συλλογή σωματιδίων καπνού στο κανάλι του φίλτρου.

1.4.4 SOF και ενώσεις του θείου.

Τα σωματίδια των εκπομπών των κινητήρων diesel αποτελούνται από 3 τμήματα : τον στερεό άνθρακα, τα υγρά οργανικά συστατικά (Solid Organic Fraction) και τις ενώσεις του θείου (sulfates). Οι μηχανισμοί συγκράτησης είναι αποτελεσματικοί και σε στερεά και σε υγρά σωματίδια. Όμως ενώ όλα τα στερεά σωματίδια δημιουργούνται στο θάλαμο καύσης, κάποια από τα υγρά δημιουργούνται στην εξαγωγή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη απόδοση του φίλτρου. Ακόμα όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του φίλτρου, τόσο περισσότερα SOF περνούν από αυτό σαν αέρια. Έτσι ο βαθμός απόδοσης ενός φίλτρου χωρίς καταλυτική επιστρωση μπορεί να μειωθεί με την αύξηση της θερμοκρασίας. Κάποια φίλτρα χρησιμοποιούν καταλύτη για να μειώσουν την θερμοκρασία καύσης του καπνού και έτσι να γίνει αναγέννηση του φίλτρου, οι οποίοι είναι αποτελεσματικοί με τους υδρογονάνθρακες και με τα υγρά οργανικά συστατικά.

1.5. Η αναγέννηση στις παγίδες αιθάλης.

Η αναγέννηση χαρακτηρίζεται από το ισοζύγιο του καπνού (soot) που συλλέγεται στην παγίδα και του καπνού 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

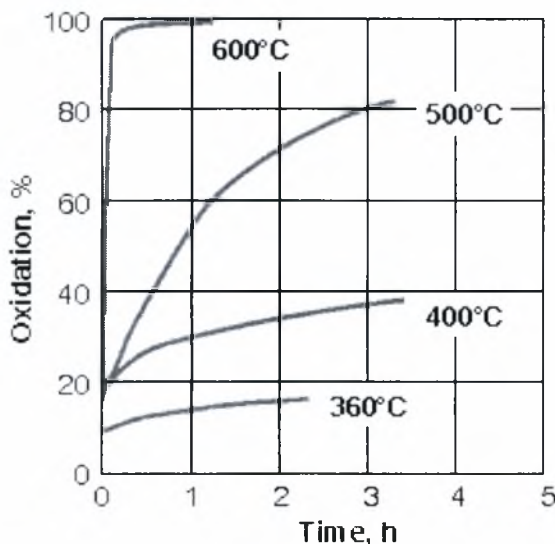


προσθεθεί καταλύτης. Αυτό μπορεί να γίνει με την προσθήκη του καταλύτη στην επιφάνεια του φίλτρου ή στο καύσιμο σαν πρόσθετο (additive).

Η πυκνότητα του καπνού είναι χαμηλή (συνήθως μικρότερη από 0.1 gr/cm^3) και αυτό έχει ως αποτέλεσμα γρήγορη φόρτιση της παγίδας. Η ποσότητα του καπνού 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 CO_2 . Αυτή είναι και η καλύτερη και καθαρότερη μέθοδος αναγέννησης που χρησιμοποιείται στις παγίδες αιθάλης.

Ο ρυθμός καύσης R περιορίζεται από την κινητική της οξειδωσης του άνθρακα. Ακόμα ο ρυθμός της αντίδρασης εξαρτάται από την θερμοκρασία, την συγκέντρωση των αντιδρώντων και μπορεί να επιταχυνθεί από καταλύτες. Ο καπνός έχει σχετικά μικρό ρυθμό καύσης και για αυτό το λόγο πρέπει να επιμηκύνεται το χρονικό διάστημα που μένει στην παγίδα για 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 δηλ. 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 του καπνού. Έτσι ο καπνός καίγεται γρηγορότερα όταν η φόρτιση του φίλτρου είναι μεγάλη.



Σχήμα 1.12. Οξείδωση του καπνού σε σχέση με το χρόνο για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η οξείδωση ονομάζεται θερμοκρασία ανάφλεξης του καπνού η οποία εξαρτάται και από τις ιδιότητες του καπνού και τις συνθήκες στις οποίες γίνεται η καύση. Υπάρχουν δύο μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της θερμοκρασίας ανάφλεξης του καπνού. Η μέθοδος TGA (*thermal gravimetric analysis*) και η μέθοδος DTA (*differential thermal analysis*).



Στις δύο μεθόδους ο καπνός (ή καπνός με πρόσθετο) θερμαίνεται σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα και θερμοκρασία. Η θερμοκρασία ανεβαίνει αργά και συνεχώς γίνεται μέτρηση του βάρους του καπνού. Στην μέθοδο DTA τοποθετείται ένα θερμοστοιχείο στο δείγμα του καπνού και μετράει την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και της αιθάλης. Ο ρυθμός οξειδωσης αυξάνει συνεχώς μέχρι να καεί όλη η ποσότητα του καπνού. Έτσι στην μέθοδο TGA την θερμοκρασία ανάφλεξης του καπνού την βρίσκουμε από το σημείο στο οποίο μειώνεται η μάζα του και στην μέθοδο DTA από το σημείο στο οποίο ανεβαίνει με μεγάλο ρυθμό η θερμοκρασία.

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

t είναι ο χρόνος (sec)

k(T) είναι η σταθερά του ρυθμού της αντίδρασης (1/sec)

T είναι η θερμοκρασία

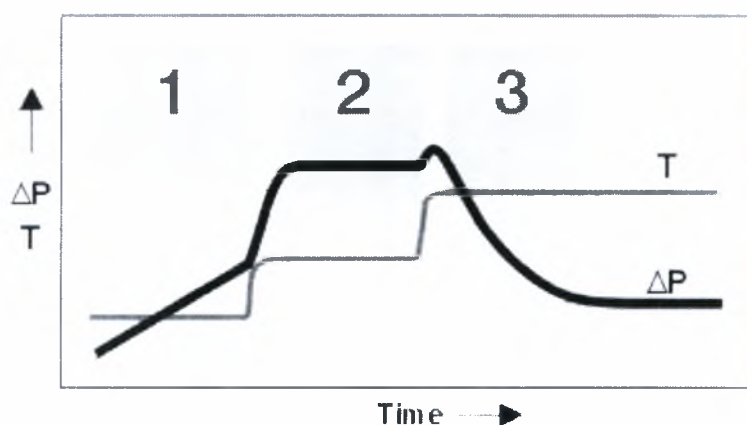
e_f είναι η απόδοση του φίλτρου

m είναι η παροχή σωματιδίων από τον κινητήρα (kg/sec)

Ο όρος dM/dt εκφράζει την συσσώρευση της αιθάλης. Οι δύο άλλοι όροι της εξίσωσης εκφράζουν την οξειδωση και την συλλογή του καπνού στο φίλτρο. Έτσι το φίλτρο μπορεί να είναι σε κατάσταση :

1. συσσώρευσης καπνού ($dM/dt > 0$)
2. ισοζυγίου ($dM/dt = 0$)
3. αναγέννησης ($dM/dt < 0$)

Η κατάσταση λειτουργίας του φίλτρου φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 1.13. Κατάσταση λειτουργίας του φίλτρου.

Το σχήμα 1.13 περιγράφει 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 οξειδωσης είναι χαμηλός και η παγίδα συσσωρεύει καπνό. Αυτό έχει αποτέλεσμα την συνεχή αύξηση του ΔΡ. Αν η φόρτιση συνεχιστεί σε αυτήν την θερμοκρασία το φίλτρο θα στομώσει (clogging).

Όταν η θερμοκρασία αυξάνει, αυξάνει και η πτώση πίεσης ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης παροχής καυσαερίου και της συσσώρευσης σωματιδίων. Έτσι ο ρυθμός οξειδωσης των σωματιδίων μεγαλώνει συνεχώς και το φίλτρο βρίσκεται σε κατάσταση ισοζυγίου. Αυτό διακρίνεται από την σταθεροποίηση του ΔΡ. 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 οξειδωσης. 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 του καπνού μειώνεται κατά την διάρκεια της αναγέννησης, μειώνεται και ο ρυθμός οξειδωσης. 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 οξειδωσης.

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 οξειδωσης των σωματιδίων.
- Σύσταση των σωματιδίων. Σωματίδια με διαφορετική περιεκτικότητα VOF έχουν διαφορετικό ρυθμό οξειδωσης.
- 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 καπνού 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 το ΔP . Αν η παγίδα είναι υπερφορτισμένη σε καπνό και υπάρχει υψηλή συγκέντρωση O_2 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 NO_x 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 O_2 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 οξειδωση τους από το O_2 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. Προυπόθεση για την αποτελεσματική λειτουργία τους είναι η αύξηση της θερμοκρασίας ως ένα απαιτούμενο επίπεδο για κάποιο χρονικό διάστημα.

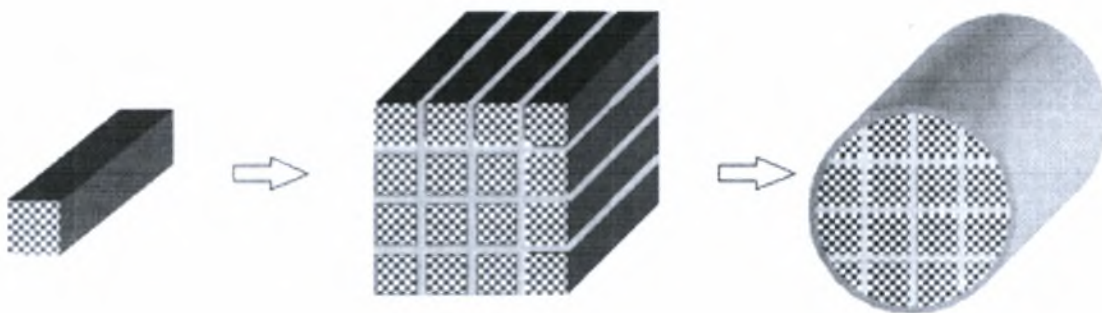
Υπάρχουν δύο τρόποι για την εισαγωγή του καταλύτη στο σύστημα : η προσθήκη καταλύτη στην επιφάνεια του φίλτρου ή η προσθήκη του στο καύσιμο. Οι παγίδες αιθάλης με καταλύτη (Catalyzed Diesel Particulate Traps, CDPF) χρησιμοποιούν καταλύτη που είναι τοποθετημένος στο τοίχωμα του φίλτρου. Συχνά χρησιμοποιούνται 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.

1.6.1 Υλικά και κατασκευή των φίλτρων αιθάλης.

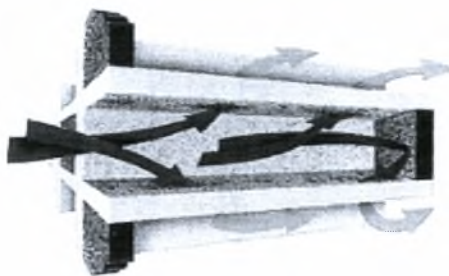
Τα φίλτρα κατασκευάζονται κυρίως από μονόλιθους στους οποίους γίνεται ροή του καυσαερίου διαμέσου του τοιχώματος (wall flow monolith). Τα κανάλια του φίλτρου είναι τα μισά κλειστά και τα μισά ανοιχτά έτσι ώστε να εξαναγκάζεται η ροή να περνάει μέσα από το τοίχωμα. Τα φίλτρα αυτά είναι συνήθως κατασκευασμένα από κορδιερίτη (cordierite) ή από από καρβίδιο του πυριτίου SiC. Το σχήμα 1.14 δείχνει την διαδικασία κατασκευής των φίλτρων SiC. Αρχικά γίνεται διαμόρφωση σε τμήματα με διαστάσεις 34mm, 34mm, 254mm και τοποθέτηση τάπας (τσιμέντο). Στη συνέχεια γίνεται συναρμολόγηση με τη χρήση συνδετικού (τσιμέντο) πάχους 1mm 4 με 4 τμήματα σε κάθε πλευρά. Μετά γίνεται κοπή σε κυλινδρικό σχήμα και τοποθέτηση του εξωτερικού καλύμματος (τσιμέντο) με πάχος 1mm.



Σχήμα 1.14. 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 του καπνού.

Τα κεραμικά φίλτρα με ροή διαμέσου του τοιχώματος (wall flow monolith) είναι ο πιο κοινός τύπος φίλτρου που χρησιμοποιείται σε κινητήρες diesel. Χαρακτηριστικό αυτών των φίλτρων είναι η μεγάλη επιφάνεια και η μεγάλη αποτελεσματικότητα. Οι μονόλιθοι αποτελούνται από πολλά παράλληλα τοποθετημένα μικρά κανάλια. Τα αξονικά κανάλια ταπώνονται (plugging) όπως φαίνεται στο σχήμα 1.15.



Σχήμα 1.15. Ροή καυσαερίου σε μονόλιθο (Corning Inc.).

Στα διπλανά κανάλια τοποθετούνται τάπες (plugs) εναλλάξ σε κάθε άκρο για να οδηγηθεί η ροή να περάσει μέσα από το πορώδες τοίχωμα του φίλτρου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το φίλτρο μπορεί να είναι κατασκευασμένο από κορδιερίτη (cordierite) ή καρβίδιο του πυριτίου (SiC). Η κατανομή των πόρων στο τοίχωμα πρέπει να ελεγχθεί προσεκτικά κατά την διάρκεια της παραγωγής. Ο μέσος όρος του μεγέθους των πόρων είναι 10-15 μ m. 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 αστάλινα 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.

1.6.2 Διαστάσεις και πτώση πίεσης.

Οι διαστάσεις της παγίδας εξαρτώνται από τον κινητήρα και την μέθοδο αναγέννησης που χρησιμοποιείται. Συνήθως το φίλτρο αιθάλης είναι μεγαλύτερο από τον καταλυτικό μετατροπέα που τοποθετείται στον κινητήρα. Συχνά το μέγεθος (lt) του καταλύτη είναι ίσο ή μικρότερο από τον κυβισμό του κινητήρα ενώ το μέγεθος των φίλτρων αιθάλης είναι στις περισσότερες περιπτώσεις 0.1-0.2lt ανά kW της ισχύος που αποδίδει ο κινητήρας. Αυτό σημαίνει ότι ο όγκος του φίλτρου είναι 1-2lt για κάθε λίτρο του κυβισμού για κινητήρες φυσικής αναπνοής (natural aspirated engines) και αναλογικά περισσότερο για υπερπληρούμενους κινητήρες.



Μεγαλύτερος όγκος του φίλτρου έχει αποτέλεσμα μικρότερη πτώση πίεσης και λιγότερο συχνές αναγεννήσεις. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση της παγίδας τόσο αυξάνεται η πτώση πίεσης η οποία υπολογίζεται από τον νόμο του Darcy :

$$\Delta P_{wall} = (\mu/k_w) \cdot V_w \cdot W_w$$

Όπου :

k_w διαπερατότητα του υλικού του τοιχώματος (m^2)

μ δυναμικό ιξώδες του καυσαερίου ($Pa \cdot sec$)

V_w ταχύτητα καυσαερίου (m/sec)

W_w πάχος τοιχώματος (m)

Η συνολική πτώση πίεσης είναι :

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{wall} + \Delta P_{particulate}$$

Η πτώση πίεσης σε καθαρό φίλτρο είναι 1-2kPa ανάλογα με το μέγεθος του. Η διαπερατότητα του καπνού είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη από του κορδιερίτη με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του ΔP να οφείλεται στο στρώμα αιθάλης και όχι στο τοίχωμα.

1.6.3 Μονόλιθοι κορδιερίτη.

Ο κορδιερίτης είναι ένα συνθετικό κεραμικό ($2MgO-2Al_2O_3-5SiO_2$) και είναι το πιο κοινό υλικό κατασκευής φίλτρων αιθάλης. Αρχικά αναπτύχθηκε για καταλύτες αλλά πολλά υλικά είναι κοινά με τα DPF (Diesel Particulate Filters). Λόγω της πολύ καλής θερμικής συμπεριφοράς είναι κατάλληλο για την χρήση του στις παγίδες αιθάλης. Έχει υψηλή αντοχή στην θερμοκρασία (περίπου $1200^\circ C$) και καλή μηχανική αντοχή. Ακόμα έχει πολύ χαμηλή σταθερά θερμικής διαστολής και είναι πολύ ανθεκτικό σε θερμικές καταπονήσεις.

Τα φίλτρα από κορδιερίτη είναι βελτιστοποιημένα για να έχουν μεγάλη θερμική αντοχή και αντίσταση στην δημιουργία ρωγμών (cracking). Έτσι π.χ. η Corning Inc. χρησιμοποιεί το υλικό EX-80 στα DPF με τις ακόλουθες ιδιότητες.

Ιδιότητα	
Σταθερά θερμικής διαστολής ($25-800^\circ C$)* $10^{-7}/^\circ C$	5
Απόδοση	91%
Πορώδες	48 %
Μέσο μέγεθος πόρων	12 μm

Πίνακας 1.6.

Κορδιερίτης (Cordierite)	
$Mg_2Al_4Si_5O_{18}$	
Πυκνότητα	2.38-2.42mg/m ³
Αντοχή	40.85-47.66MPa
Σκληρότητα	1.44e3-1.59e3 MPa
Μέτρο Young	107-113GPa
Σημείο τήξης	1800-2000K
Ειδική θερμότητα	931-969J/kgK
Θερμική αγωγιμότητα	1.9-2.1W/mK
Συντελεστής θερμικής διαστολής	2.9-3.1 $10^6/K$

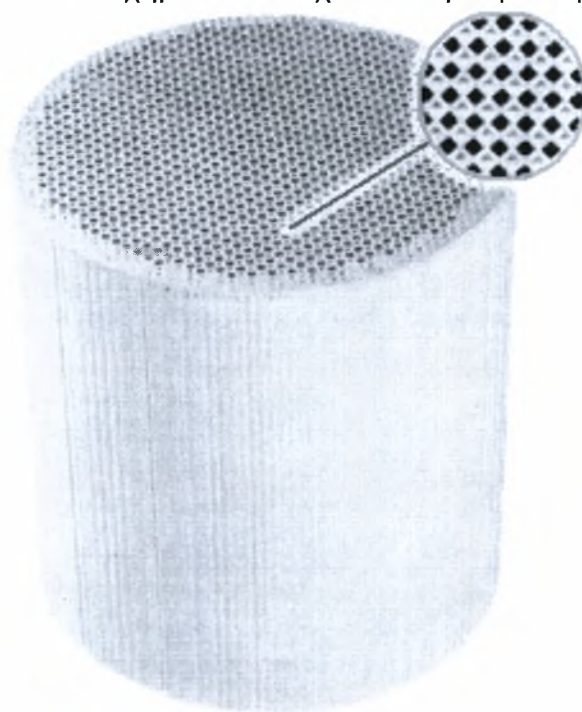
Πίνακας 1.7.



Το Cr του κορδιερίτη μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία με τη σχέση :

$$Cr_{wall_{cordierite}}=(1.071+1.56\times 10^{-4}\times T-3.435\times 10^{-4}/T^2)10^3$$

Οι μονόλιθοι κορδιερίτη κατασκευάζονται σε δύο στάδια. Αρχικά τα ανοιχτά κανάλια διαμορφώνονται και θερμαίνονται. Μετά τα άκρα των καναλιών ταπώνονται με κορδιερίτη και θερμαίνονται ξανά. Η μεγαλύτερη διάμετρος που μπορεί να κατασκευαστεί είναι 300mm. Μεγαλύτερα φίλτρα κατασκευάζονται με ένωση πολλών τμημάτων με συνδετικό υλικό (τσιμέντο). Στην συνέχεια το υλικό κόβεται σε κυλινδρικό σχήμα και το εξωτερικό καλύπτεται με τσιμέντο. Το σχήμα 1.16 δείχνει ένα φίλτρο κορδιερίτη.



Σχήμα 1.16. Φίλτρο κορδιερίτη.

Ο προσδιορισμός του τύπου του φίλτρου γίνεται συνήθως με τον εξής τρόπο : τύπος σύστασης / πυκνότητα καναλιών (cells per square inch) / πάχος τοιχώματος (mils), π.χ EX-80/100/17.

1.6.4 Μονόλιθοι SiC.

Το καρβίδιο του πυριτίου είναι ένα άλλο υλικό που χρησιμοποιείται στις παγίδες αιθάλης. Κατασκευάζεται όπως ο μονόλιθος από κορδιερίτη και η σημαντικότερη διαφορά του είναι η υψηλή θερμική σταθερότητα. Η θερμική αγωγιμότητα του SiC είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από του κορδιερίτη επιτρέποντας την γρηγορότερη διάχυση των θερμικών τάσεων κατά την διάρκεια της αναγέννησης. Η αντοχή του SiC στην θερμοκρασία είναι υψηλότερη (περίπου 1800°C). Ακόμα έχει μεγαλύτερη αντοχή και αντίσταση στη διάβρωση αλλά και μεγαλύτερη σταθερά θερμικής διαστολής.



Τα φίλτρα SiC είναι αρκετά ακριβότερα από αυτά από κορδιερίτη αλλά λόγω της μικρότερης πτώσης πίεσης απαιτείται μικρότερο μέγεθος φίλτρου. Οι ιδιότητες του SiC φαίνονται στο πίνακα.

Ιδιότητα	
Μέγεθος πόρων	5-25 μm
Πορώδες	45 %
Θερμική αγωγιμότητα στους 25°C	11 W/mK
Θερμική αγωγιμότητα στους 630°C	7 W/mK
Ειδική θερμότητα στους 25°C	750 J/kg
Ειδική θερμότητα στους 800°C	1250 J/kg
Σταθερά θερμικής διαστολής στους 25°C (αξονικά)	$4.2 \cdot 10^{-6}$ mm/mm°C
Σταθερά θερμικής διαστολής στους 650°C (ακτινικά)	$3.9 \cdot 10^{-6}$ mm/mm°C

Πίνακας 1.8

Καρβίδιο του πυριτίου (SiC)	
SiC	
Πυκνότητα	3.18-3.24mg/m ³
Αντοχή	170.3-198.7MPa
Σκληρότητα	2.57e4-2.84e4 MPa
Μέτρο Young	437-459GPa
Σημείο τήξης	2910-3030K
Ειδική θερμότητα	1020-1060J/kgK
Θερμική αγωγιμότητα	75-81W/mK
Συντελεστής θερμικής διαστολής	$3.43-3.57 \cdot 10^{-6}/K$

Πίνακας 1.9

Το Cr του SiC μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία με τη σχέση :

$$Cr_{wallSiC} = 2e-7 \times T^3 - 0.001 \times T^2 + 1.6186 \times T + 320.17$$

Τα φίλτρα SiC είναι διαθέσιμα σε διαμέτρους μέχρι 286mm αλλά συνήθως αρκετά μικρότερα κομμάτια ενώνονται. Η συνιστώμενη μέθοδος για την αναγέννηση είναι η ηλεκτρική θέρμανση του φίλτρου λόγω της καλής θερμικής σταθερότητας του υλικού.

1.7 Τα είδη των φίλτρων αιθάλης.

Οι παγίδες αιθάλης σχεδιάζονται με συνδυασμό διαφορετικών υλικών και με επιλεγμένες μεθόδους αναγέννησης. Οι ακόλουθοι παράγοντες λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό του φίλτρου.

- Αποτελεσματικότητα συλλογής σωματιδίων.
- Διείσδυση μικρών σωματιδίων (<0.1μm).



- Σχηματισμός θειούχων ενώσεων.
- Αύξηση εκπομπών (CO, HC, NOx)
- Εκπομπές στάχτης προσθέτου.
- Πτώση πίεσης.
- Διάρκεια ζωής του φίλτρου.
- Κόστος συντήρησης.

Οι περισσότερες παράμετροι συνδέονται με την μέθοδο αναγέννησης και την συμβατότητα με το υλικό του φίλτρου. Συχνά εμφανίζονται προβλήματα που σχετίζονται με την αναγέννηση και έτσι επηρεάζεται η αξιοπιστία και η απόδοση. Τα προβλήματα χωρίζονται σε 2 κατηγορίες :

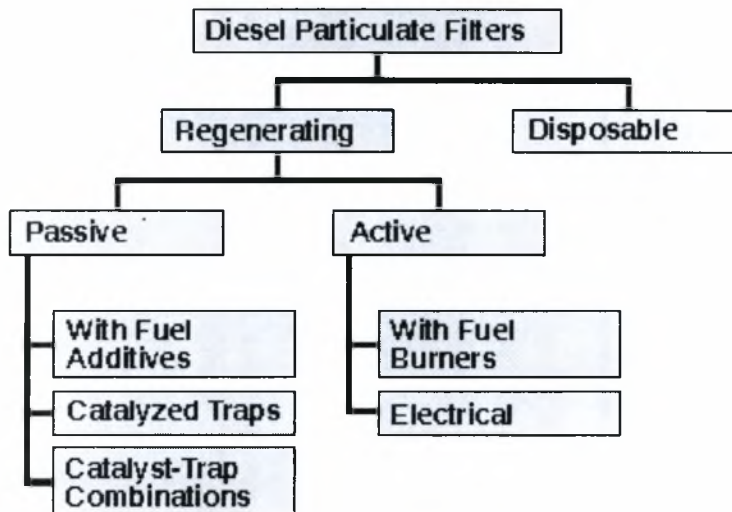
1. Αναγέννηση με μικρή απόδοση.

Στην ιδανική περίπτωση η οξειδωση των σωματιδίων είναι συνεχής και η φόρτιση της παγίδας διατηρείται πάντα σε ένα σταθερό επίπεδο λόγω των εκπομπών του κινητήρα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σταθερή πτώση πίεσης στο φίλτρο. Όμως η αναγέννηση με μικρή απόδοση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την συνεχώς αυξανόμενη φόρτιση και πτώση πίεσης, έτσι είναι πιθανή η στόμωση (clogging) του φίλτρου. Αυτό είναι ένα πολύ συνηθισμένο πρόβλημα στα παθητικά συστήματα (στα συστήματα που αναγεννώνται μόνα τους όταν η θερμοκρασία είναι επαρκής για αυτό). Έτσι η συνεχής αναγέννηση (continuous regeneration) δεν παρουσιάζει υψηλές θερμοκρασίες και δεν καταπονείται το υλικό της παγίδας όμως η στόμωση μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του φίλτρου.

2. Γρήγορη, ανεξέλεγκτη αναγέννηση.

Η γρήγορη αναγέννηση εμφανίζεται στην περίπτωση η παγίδα είναι υπερβολικά φορτισμένη και αναφλέγεται. Ο ρυθμός καύσης είναι μεγάλος και τα ποσά θερμότητας που εκλύονται έχουν αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας της παγίδας και ακόμα και την αστοχία του υλικού λόγω δημιουργίας ρωγμής. Η ανεξέλεγκτη αναγέννηση μπορεί να είναι πρόβλημα και των παθητικών αλλά και των ενεργητικών συστημάτων. Στα παθητικά αυτό συμβαίνει σε μεγάλη φόρτιση του φίλτρου όταν υπάρξει μια κορύφωση της θερμοκρασίας και γίνει ανάφλεξη του καπνού. Στα ενεργητικά συστήματα όπως αυτά που θερμαίνουν ηλεκτρικά την παγίδα ή αυτά στα οποία η επιπλέον ανάφλεξη καυσίμου ενεργοποιεί την καύση, η φόρτιση ελέγχεται ηλεκτρονικά και δεν πρέπει να υπερβεί την επιτρεπόμενη. Ο έλεγχος όμως αυτός είναι πάρα πολύ δύσκολο να είναι ακριβής και πολλές φορές η φόρτιση είναι μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζει ο έλεγχος. Έτσι μπορεί το φίλτρο να αστοχήσει λόγω αναγέννησης της υπερβολικής φόρτισης.

Το σχήμα 1.17 δείχνει την κατηγοριοποίηση των φίλτρων αιθάλης ανάλογα με την μέθοδο της αναγέννησης που χρησιμοποιούν. Όλα τα συστήματα χρησιμοποιούν θερμική αναγέννηση κατά την οποία τα σωματίδια οξειδώνονται και δίνουν αέρια προϊόντα. Η θερμοκρασία της παγίδας όμως είναι χαμηλή για να διατηρείται η συνεχής αναγέννηση. Υπάρχουν δύο λύσεις σε αυτό, η μείωση της θερμοκρασίας καύσης του καπνού (μέθοδος που χρησιμοποιείται στα παθητικά συστήματα) ή η αύξηση της θερμοκρασίας του (η μέθοδος αναγέννησης στα ενεργητικά συστήματα).



Σχήμα 1.17. Είδη φίλτρων αιθάλης.

Όροι σχήματος : Passive (παθητικά), with fuel additives (με πρόσθετο καυσίμου), catalyzed traps (παγίδες με καταλυτική επιφάνεια), catalyst trap combinations (συνδυασμοί καταλύτη και φίλτρου), active (ενεργητικά), with fuel burners (καυστήρες καυσίμου), electrical (φίλτρα θερμαινόμενα ηλεκτρικά).

Τα παθητικά συστήματα μειώνουν την θερμοκρασία στην οποία γίνεται η καύση του καπνού έτσι ώστε να είναι δυνατή η αναγέννηση κατά την διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση ενός καταλύτη οξειδωσης, ο οποίος μπορεί να τοποθετηθεί στην επιφάνεια της παγίδας ή στο καύσιμο. Οι καταλυτικές παγίδες χρησιμοποιούν καταλύτες που περιέχουν λευκόχρυσο, και τα ενεργά συστατικά στα πρόσθετα καυσίμου είναι σίδηρος, χαλκός, λευκόχρυσος και άλλα μέταλλα. Το φίλτρο CRT(Continuously Regenerated Trap) χρησιμοποιεί καταλύτη πριν την παγίδα για παράγει NO_2 που οξειδώνει τα σωματίδια του καπνού που συλλέγονται.

Τα ενεργητικά συστήματα αυξάνουν την θερμοκρασία του φίλτρου αιθάλης και συνήθως η παγίδα θερμαίνεται ηλεκτρικά ή γίνεται μεγαλύτερη έγχυση καυσίμου και σε μεγάλη γωνία στροφάλου έτσι ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία καυσαερίου (fuel burners). Αυτά τα συστ. είναι περισσότερο πολύπλοκα από ότι τα παθητικά. Απαιτούν ηλεκτρονική μονάδα για να ενεργοποιεί και να ελέγχει την αναγέννηση.

1.8.1 Πρόσθετο καυσίμου.

Τα πρόσθετα καυσίμου χρησιμοποιούνται στα παθητικά συστήματα για να μειωθεί η θερμοκρασία καύσης του καπνού. Το πρόσθετο συνήθως περιέχει σίδηρο, δημήτριο, χαλκό, λευκόχρυσο. Το δημήτριο χρησιμοποιείται σαν πρόσθετο από την Peugeot.

Τα πρόσθετα χρησιμοποιήθηκαν για την μείωση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης. Αργότερα το ενδιαφέρον για τα πρόσθετα αφορούσε την καταλυτική δράση στην οξειδωση των σωματιδίων. Το πρόσθετο βγαίνει από τον θάλαμο καύσης σαν οξείδιο 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 οξειδωση 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 πίνακας 1.10 δείχνει κάποιους τύπους προσθέτου που χρησιμοποιούνται σε συστήματα φίλτρων αιθάλης.

Ενεργό μέταλλο προσθέτου	Ονομασία	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 1.10

Η εμπορική χρήση προσθέτων καυσίμου απαιτεί έγκριση, έτσι στις Η.Π.Α. 3 από τα προϊόντα του πίνακα έχουν άδεια για πώληση.

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

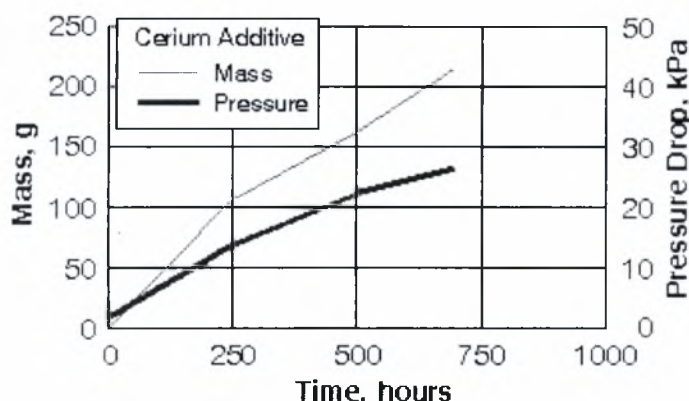
- Η ανάγκη να προστεθεί το πρόσθετο στο καύσιμο. Πολλές φορές αυτό δεν είναι εύκολο και έχουν αναπτυχθεί αυτοματοποιημένες συσκευές έγχυσης προσθέτου στο δοχείο καυσίμου του αυτοκινήτου. Αυτό όμως κάνει το σύστημα πολυπλοκότερο και ακριβότερο.
- Απόθεση στάχτης (προσθέτου) στο φίλτρο. Η μεγαλύτερη ποσότητα του προσθέτου 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 καύσιμου 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. Η συγκέντρωση του Ce που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές του προσθέτου ήταν 12ppm. Η αύξηση της θερμοκρασίας ήταν από 380 στους 470°C. Το σχήμα 1.18 δείχνει την πτώση πίεσης και την μάζα που συλλέχθηκε.



Σχήμα 1.18. Πτώση πίεσης και μάζα προσθέτου.

Κατά την διάρκεια της δοκιμής με διάρκεια 700h παρατηρήθηκαν :

- Μετά την αρχική φάση η απόδοση του φίλτρου ήταν πάνω από 90%.
- Η αναγέννηση γινόταν κανονικά και δεν παρουσιάστηκε καμία βλάβη ή φθορά στο φίλτρο.
- Η περισσότερη από την μάζα της στάχτης παρέμεινε στο φίλτρο (μετρήθηκε 90.5% απόδοση στην κατακράτηση CeO_2).
- Η αύξηση της μάζας και της αντίθλιψης της παγίδας (μετά από την αρχική φάση) οφειλόταν στην συσσώρευση στάχτης λαδιού και προσθετου.
- Μείωση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης από τον κινητήρα κατά 21%.
- Αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου 4.7%.

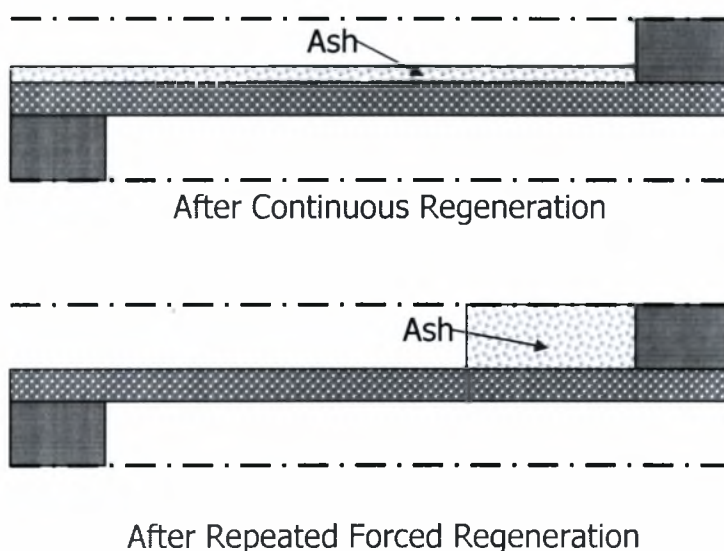


1.8.2 Συσσώρευση στάχτης.

Η στάχτη (ash) αποτελείται από σωματίδια που προέρχονται κυρίως από το πρόσθετο (ανόργανο οξείδιο, CeO_2) και από άλλα συστατικά που προέρχονται από το καύσιμο και το λιπαντικό. Αυτά μπορεί να ενωθούν με την αιθάλη και έτσι περίπου 90% κατακρατείται από το φίλτρο. Αυτό έχει αποτέλεσμα αυξανόμενη πτώση πίεσης λόγω συνεχούς συσσώρευσης στάχτης στην παγίδα αιθάλης. Έτσι μετά από κάποιο διάστημα λειτουργίας της παγίδας η στάχτη πρέπει να απομακρυνθεί με αέρα υψηλής πίεσης.

Η αναγέννηση του φίλτρου μπορεί να είναι συνεχής (continuous regeneration, οι συνθήκες είναι κατάλληλες για αναγέννηση συνεχώς) ή εξαναγκασμένη (forced regeneration, η χρήση post injection αυξάνει την θερμοκρασία και γίνεται αναγέννηση) και η συσσώρευση στάχτης στην δεύτερη περίπτωση είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνει και η διάρκεια λειτουργίας του φίλτρου.

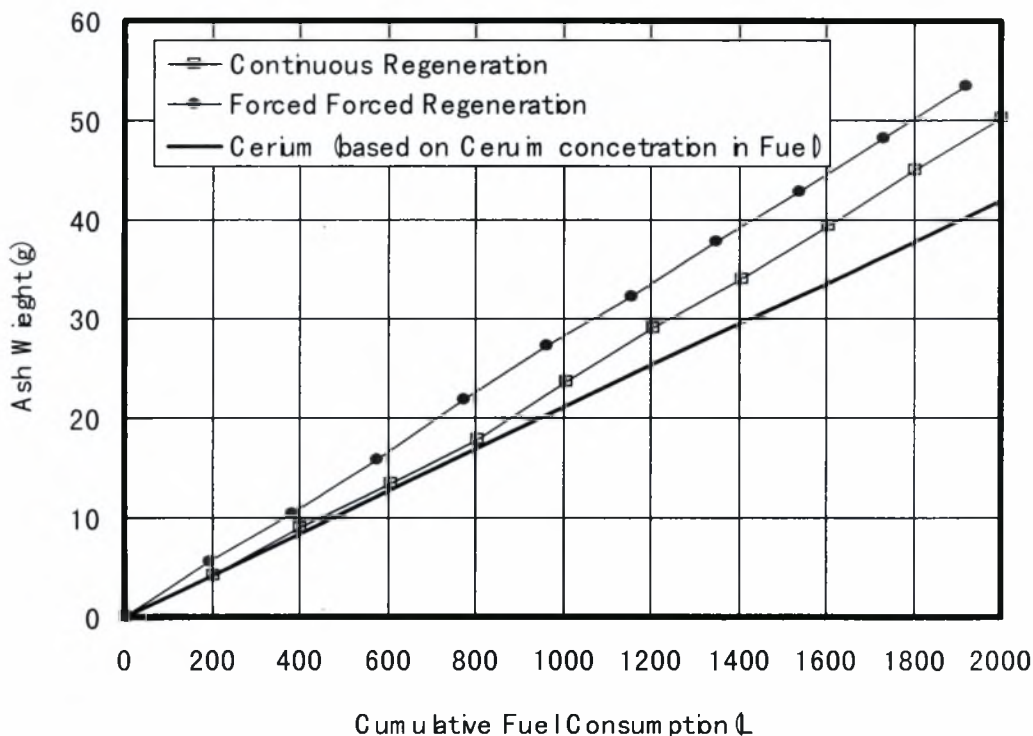
Η συσσώρευση στάχτης για συνεχή και εξαναγκασμένη αναγέννηση φαίνεται στο σχήμα 1.19.



Σχήμα 1.19. Συσσώρευση στάχτης στην συνεχή και εξαναγκασμένη αναγέννηση του φίλτρου.



Η συσσώρευση στάχτης στο φίλτρο φαίνεται στο σχήμα 1.20.



Σχήμα 1.20. Συσσώρευση στάχτης στην συνεχή και εξαναγκασμένη αναγέννηση.

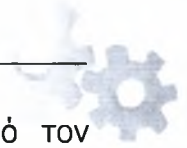
1.9 Το σύστημα φίλτρου αιθάλης της Peugeot.

Η PSA Peugeot Citroën ανέπτυξε ένα σύστημα φίλτρου αιθάλης που έχει μπει σε παραγωγή το 2000. Η εταιρεία θα τοποθετήσει το φίλτρο στον κινητήρα DW12TED4, 2.2lt, 98kW ο οποίος έχει common rail σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου. Το φίλτρο έχει σχεδιαστεί να μειώσει τις εκπομπές αιθάλης στα επίπεδα των προδιαγραφών της E.E. για το 2005 στα 0.025gr/km.

Το σύστημα χρησιμοποιεί πρόσθετο καυσίμου για να μειώσει την θερμοκρασία ανάφλεξης της αιθάλης για να γίνει η αναγέννηση. Το σύστημα της PSA χρησιμοποιεί έναν κινητήρα χαμηλών εκπομπών, στοιχεία ενεργητικού συστήματος και αντιρρυπαντική τεχνολογία στα καυσαέρια για να πετύχει τα όρια εκπομπών.

Στην εξαγωγή είναι τοποθετημένος ένας οξειδωτικός καταλύτης και ένα φίλτρο SiC. Το πρόσθετο που χρησιμοποιείται είναι Ce (Eolys της Rhodia) για να γίνεται αναγέννηση σε θερμοκρασία κάτω από 450°C. Το καυσαέριο δεν φτάνει αυτήν την θερμοκρασία κατά την διάρκεια της λειτουργίας του κινητήρα. Έτσι η αναγέννηση ελέγχεται από το σύστημα τροφοδοσίας common rail που αυξάνει την θερμοκρασία με συνδυασμό δύο μεθόδων :

1. Επιπλέον ψεκασμός καυσίμου (post injection) στην φάση της εκτόνωσης. Αυτό προκαλεί επιπλέον καύση (post combustion) στον κύλινδρο και αύξηση της θερμοκρασίας καυσαερίου 200-250 °C.



2. Συμπληρωματική καύση (post combustion) που προκαλείται από τον οξειδωτικό καταλύτη πριν από το φίλτρο. Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες που παράγονται από τον επιπλέον ψεκασμό καυσίμου (post injection) οξειδώνονται και αυξάνουν την θερμοκρασία 100 °C.

Ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων έχει αποτέλεσμα την συνολική αύξηση της θερμοκρασίας καυσαερίου 450 °C. Η αναγέννηση της παγίδας γίνεται κάθε 400-500km. Το πρόσθετο βρίσκεται αποθηκευμένο στο αυτοκίνητο και γίνεται αυτόματα η έγχυση του Ce στο καύσιμο. Όταν το δοχείο καυσίμου του αυτοκινήτου γεμίζει εισέρχεται η κατάλληλη ποσότητα προσθέτου. Για 60lt καυσίμου απαιτούνται 37.5ml διαλύματος που περιέχει 1.9gr Ce. Αυτό σημαίνει συγκέντρωση προσθέτου στο καύσιμο 25ppm. Το δοχείο του προσθέτου περιέχει 5lt και είναι αρκετό για 80000km. Μετά αναπληρώνεται το πρόσθετο και το φίλτρο αιθάλης καθαρίζεται από την στάχτη με νερό υπό πίεση. Η επίπτωση της χρήσης προσθέτου είναι 5% περισσότερη κατανάλωση καυσίμου λόγω της αυξημένης πτώσης πίεσης και του επιπλέον ψεκασμού καυσίμου.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου 1.

A. M. Σταματέλος, 'Διδακτικές σημειώσεις στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης', Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, 2000.

DieselNet Technology Guide, 'Traps with Fuel Additives', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'What is diesel fuel', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'The Case for the Diesel Engine', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'What are Diesel Emissions', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

Emission Standards, <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'Diesel Particulate Matter', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'Diesel Trap Concepts', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'Diesel Filter Regeneration', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'Wall-Flow Monoliths', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2

ΠΡΟΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ ΑΙΘΑΛΗΣ ΚΟΡΔΙΕΡΙΤΗ ΚΑΙ SiC

2.1 Πειραματική διάταξη μικρών φίλτρων από την οποία προήλθαν οι μετρήσεις.

Τα πειράματα με τα μικρά φίλτρα κορδιερίτη και SiC διαμέτρου 58mm και μήκους 152mm έγιναν από την PSA για πειραματικούς σκοπούς. Η φόρτιση γίνεται στον κινητήρα Peugeot DW10ATED και 8 φίλτρα τοποθετούνται στην εξαγωγή. Τα χαρακτηριστικά των φίλτρων φαίνονται στον πίνακα.

Φίλτρα κορδιερίτη	
Διάμετρος	58mm
Μήκος	152mm
cpsi (channels per square inch)	100
πάχος υποστρώματος (substrate thickness)	17mils (0.4318mm)
μήκος τάπας των καναλιών (plug length)	5mm

Πίνακας 2.1

Φίλτρα SiC	
Διάμετρος	58mm
Μήκος	152mm
cpsi (channels per square inch)	100
πάχος υποστρώματος (substrate thickness)	17mils (0.4318mm)
μήκος τάπας των καναλιών (plug length)	5mm

Πίνακας 2.2

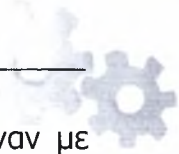
Στη συνέχεια δίνεται σταθερή παροχή συνθετικού αερίου που περιέχει O₂ και N₂. Η συγκέντρωση του O₂ είναι 18% και μειώνεται έως 4% σε 1320sec. Η αρχική θερμοκρασία του αερίου είναι 100°C και ανεβαίνει σταδιακά ως τους 730 °C σε 1320sec. Στην συνέχεια η θερμοκρασία και η συγκέντρωση O₂ είναι σταθερή για 600sec. Οι μετρήσεις που γίνονται στο πείραμα είναι :

- Θερμοκρασία αερίου στην είσοδο και στην έξοδο του φίλτρου.
- Πτώση πίεσης του φίλτρου.

Ακόμα δίνεται η παροχή αερίου και η αρχική φόρτιση της παγίδας.

2.2.1 Προϋπολογισμός λειτουργίας μικρών φίλτρων.

Ο προϋπολογισμός της λειτουργίας των μικρών φίλτρων κορδιερίτη και SiC έγινε με το λογισμικό προσομοίωσης λειτουργίας φίλτρων αιθάλης Catwall το οποίο περιγράφεται στο παράρτημα I. Τα πειράματα από τα οποία προήλθαν οι μετρήσεις περιλαμβάνουν διάφορες φορτίσεις, σύσταση καπνού, διαφορετικά φίλτρα και διαφορετική παροχή καυσαερίου. Συγκεκριμένα η φόρτιση έγινε με κύκλο EUDC ή ECE2, τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 100cpsi/17mils, 200cpsi/14mils και 300cpsi/12mils και η παροχή καυσαερίου



ήταν 0.00358kg/sec και 0.02156kg/sec. Ακόμα κάποιες μετρήσεις έγιναν με συγκέντρωση προσθέτου 25ppm και 50ppm.

Η φόρτιση έγινε σε πέδη στην οποία ελέγχεται η ροπή και οι στροφές του κινητήρα. Η αναγέννηση έγινε σε συσκευή από ατσάλι που αντέχει μέχρι 1400K και είναι μονωμένη. Το αέριο εισόδου θερμαίνεται από θερμαντήρα μέχρι 973K. Τα μεγέθη που ελέγχονται στην είσοδο είναι η παροχή αερίου, θερμοκρασία και συγκέντρωση O₂. Γίνεται μέτρηση της πτώσης πίεσης στο φίλτρο και της συγκέντρωσης CO, CO₂, HC και O₂. Η κλίση της θερμοκρασίας ελέγχεται ηλεκτρονικά και η παροχή αερίου μπορεί να ρυθμιστεί από 25000h⁻¹ ως 150000 h⁻¹. Η φόρτιση EUDC έγινε σε 2590RPM/97Nm και η ECE2 σε 2030RPM/21.4Nm.

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι οι μετρήσεις με φίλτρα κορδιερίτη θεωρούνται από την PSA σχετικά αναξιόπιστες και για αυτό το λόγο θα πρέπει να είμαστε επιφυλακτικοί με τους υπολογισμούς.

Αρχικά έγινε διευρεύνηση των ιδιοτήτων του κορδιερίτη, του SiC και του καπνού στη βιβλιογραφία και στη συνέχεια ρυθμίστηκαν οι ιδιότητες έτσι ώστε το μοντέλο να υπολογίζει σωστά τη θερμοκρασία και την πτώση πίεσης. Μετά έγινε η εισαγωγή τους στο αρχείο εισόδου .dprf Οι ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό είναι :

Υλικό	Κορδιερίτης	SiC	Καπνός
Πυκνότητα (kg/m ³)	1600	1800	80
Διαπερατότητα (m ²)	0.35×10 ⁻¹²	3.7×10 ⁻¹³	0.7×10 ⁻¹² (στο SiC) 0.4×10 ⁻¹² (στον κορδιερίτη)
Cp (J/kgK)	Μεταβολή με την θερμοκρασία	Μεταβολή με την θερμοκρασία	1510
Αγωγιμότητα (W/mK)	Μεταβολή με την θερμοκρασία	Μεταβολή με την θερμοκρασία	0.21

Πίνακας 2.3

Στη συνέχεια καθορίστηκε η τιμή του α (βαθμός οξειδωσης) από τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς, $\alpha=0.88$. Ακόμα έγινε ρύθμιση (tuning), αλλά και σύμφωνα με την διευρένηση που περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο επιλέχθηκε η κινητική του καπνού χωρίς πρόσθετο $k=0.015\text{m/secK}$ και $E=120000\text{J/mole}$ για τις μετρήσεις σε φίλτρα SiC και $k=0.007\text{m/secK}$ και $E=120000\text{J/mole}$ για τις μετρήσεις σε φίλτρα κορδιερίτη. Η κινητική για τις μετρήσεις με πρόσθετο που χρησιμοποιήθηκε ήταν $k=10000000\text{m/secK}$ και $E=100000\text{J/mole}$ για την αναγωγή του προσθέτου και $k=100000000\text{m/secK}$ και $E=100000\text{J/mole}$ για την οξειδωση του προσθέτου.

Ακόμα θεωρούμε ότι το στρώμα καπνού κατανέμεται ομοιόμορφα κατά μήκος του καναλιού και ότι οι απώλεια θερμότητας στο περιβάλλον γίνεται με ελεύθερη συναγωγή.

Ο πίνακας 2.4 δείχνει τις μετρήσεις από τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για τον υπολογισμό της λειτουργίας των φίλτρων.



Μέτρηση	Υλικό	Κύκλος φόρτισης	Πρόσθετο (ppm)	cps	Πάχος υποστρώματος (mils)	Μάζα καπνού (gr)	GHSV
757	SiC	EUDC	0	200	14 (3.556×10 ⁻⁴ m)	2.02	25000
776	SiC	EUDC	0	200	14 (3.556×10 ⁻⁴ m)	3.05	25000
778	SiC	ECE 2	0	300	12 (3.048×10 ⁻⁴ m)	3.20	25000
788	SiC	EUDC	50	200	14 (3.556×10 ⁻⁴ m)	1.4	25000
975	Κορδιερίτης	EUDC	0	100	17 (4.318×10 ⁻⁴ m)	2.05	25000
977	Κορδιερίτης	EUDC	0	100	17 (4.318×10 ⁻⁴ m)	3.10	25000
980	Κορδιερίτης	EUDC	0	100	17 (4.318×10 ⁻⁴ m)	2.02	150000
981	Κορδιερίτης	EUDC	0	100	17 (4.318×10 ⁻⁴ m)	4	150000
1011	SiC	EUDC	25	200	14 (3.556×10 ⁻⁴ m)	1.64	25000

Πίνακας 2.4

Όπου GHSV (Gas Hourly Space Velocity) είναι η παροχή αερίου και ισχύει :

$$V = \pi \frac{d^2}{4} h = 3.14 \frac{0.058^2}{4} 0.152 = 0.0004 \text{m}^3$$

$$\text{GHSV} = \frac{V}{V} \text{ και έτσι η παροχή είναι :}$$

$$\dot{V} = V \times \text{GHSV} = 0.0004 \times 25000 = 0.0027 \text{m}^3/\text{sec} \text{ και}$$

$$m = \rho \times \dot{V} = 1.29 \times 0.0027 = 0.00358 \text{kg/sec}$$

και για GHSV 150000h⁻¹ είναι $V = 0.0004 \times 150000 = 0.016 \text{ m}^3/\text{sec}$ και

$$m = \rho \times \dot{V} = 1.29 \times 0.016 = 0.02156 \text{ kg/sec}$$

2.2.2 Υπολογισμός της μάζας αιθάλης.

Ο υπολογισμός της μάζας αιθάλης στο φίλτρο μπορεί να γίνει από το ισοζύγιο μάζας για τον C από τις μετρήσεις CO, CO₂ και HC στην έξοδο του φίλτρου. Στην διάρκεια της αναγέννησης τα CO και το CO₂ προέρχονται μόνο από την καύση του C και οι υδρογονάνθρακες από την εκρόφιση από τα σωματίδια καπνού αφού στο φίλτρο εισέρχεται αέριο που περιέχει O₂ και N₂. Οι αναλυτές καυσαερίων δίνουν την συγκέντρωση σε ppm και έτσι θα πρέπει να υπολογιστούν τα moles/sec κάθε συστατικού και έτσι έχουμε :

moles CO/sec = (moles καυσαερίου/sec) × (moles CO/1000000 moles καυσαερίου) και αφού kg/sec καυσαερίου = moles καυσαερίου × MB_{καυσαερίου}/sec είναι

$$\text{moles CO/sec} = (\text{kg/sec καυσαερίου}) \times (\text{moles CO}/1000000 \text{ moles καυσαερίου}) / \text{MB}_{\text{καυσαερίου}}$$

έτσι υπολογίζονται τα moles/sec και για το CO₂ και HC.

$$\text{moles CO}_2/\text{sec} = (\text{kg/sec καυσαερίου}) \times (\text{moles CO}_2/1000000 \text{ moles καυσαερίου}) / \text{MB}_{\text{καυσαερίου}}$$

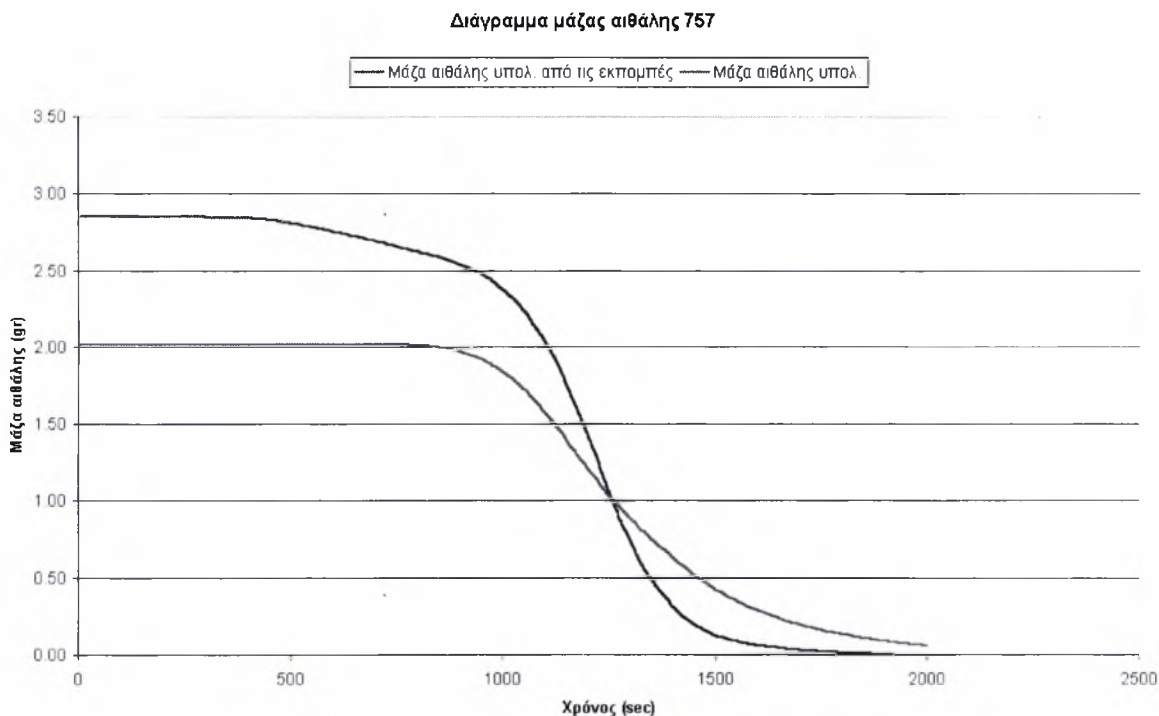
$$\text{moles HC/sec} = (\text{kg/sec καυσαερίου}) \times (\text{moles HC}/1000000 \text{ moles καυσαερίου}) / \text{MB}_{\text{καυσαερίου}}$$



Η μάζα C που υπήρχε στο φίλτρο πριν την αναγέννηση είναι :

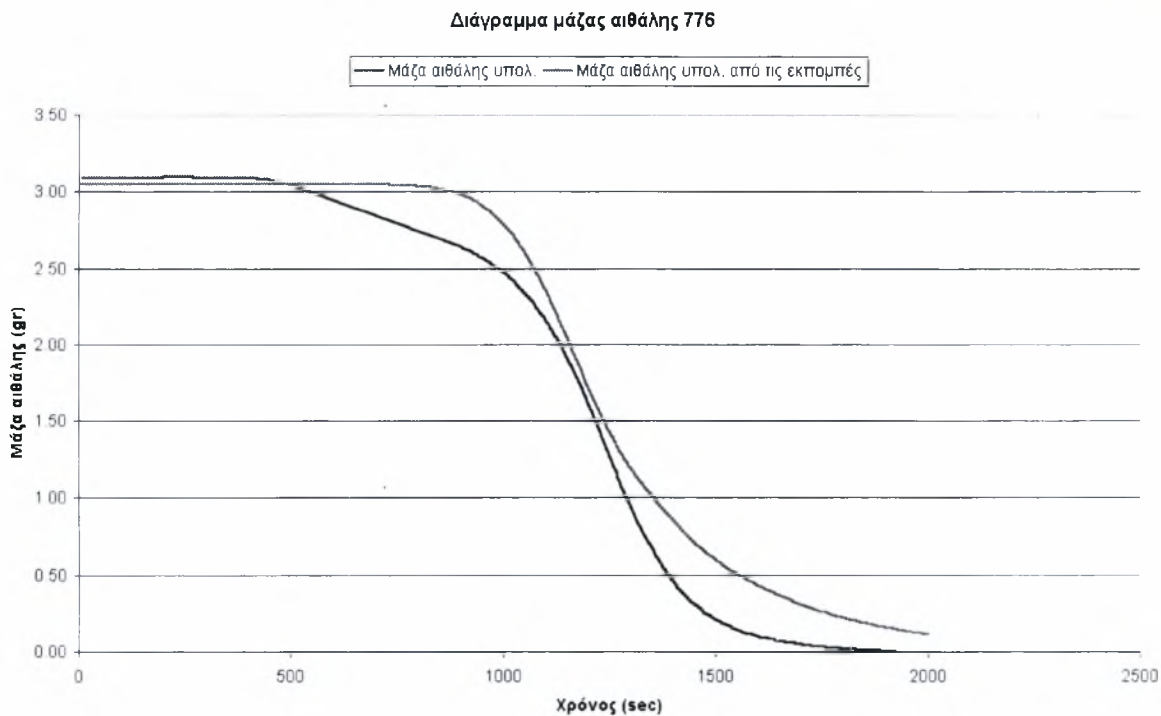
$$m_c = (\text{moles CO/sec} + \text{moles CO}_2/\text{sec} + \text{moles HC/sec}) \times MB_c \times \text{χρόνος(sec)}$$

Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα της μάζας C που υπολογίζει ο κώδικας και της μάζας που υπολογίζεται με τον παραπάνω τρόπο σε σχέση με το χρόνο για τις μετρήσεις.

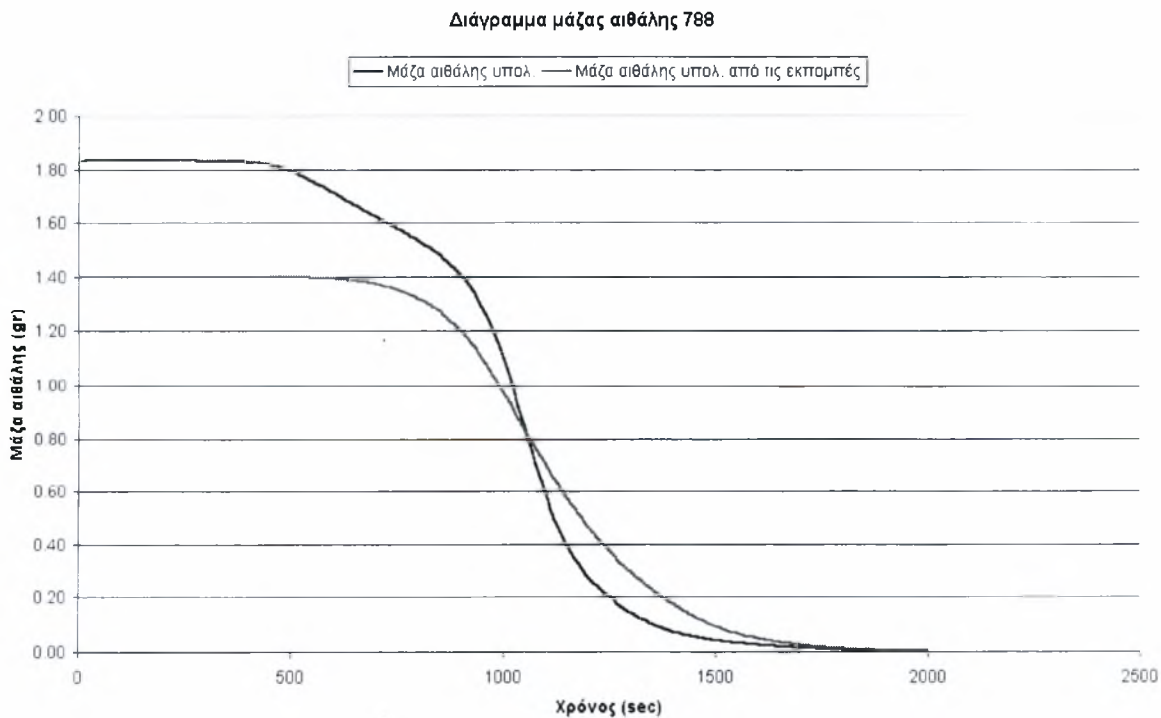


Σχήμα 2.1

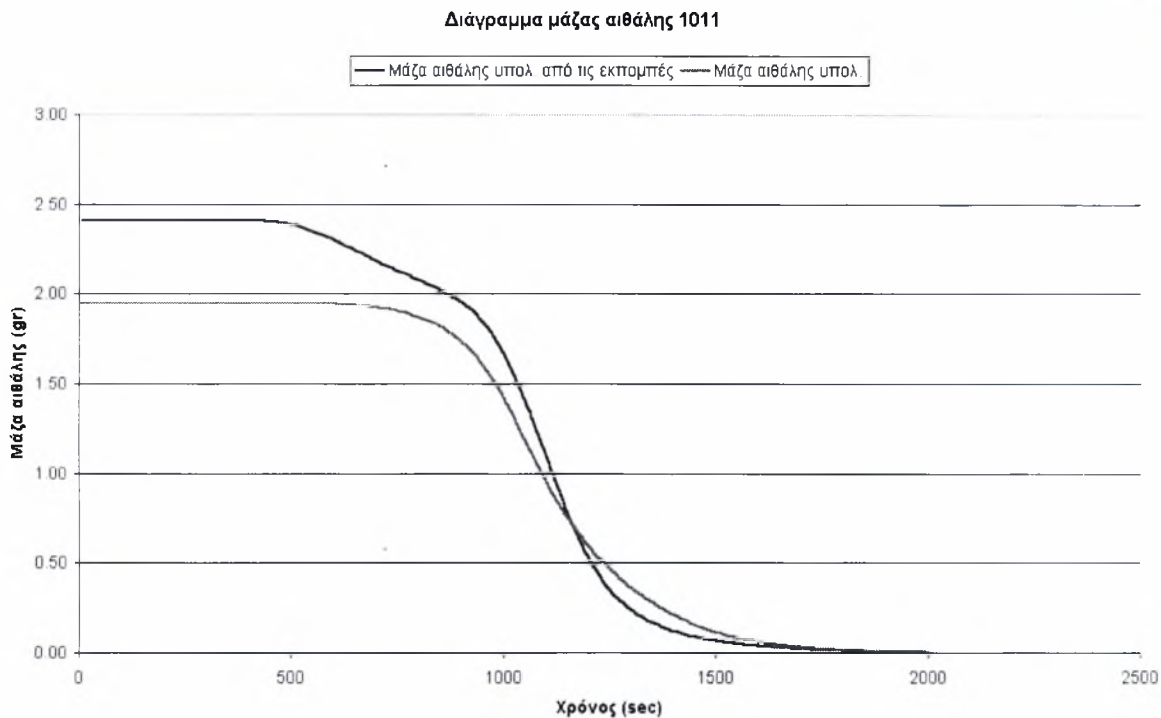
Η διαφορά στην αρχική φόρτιση μάλλον οφείλεται στο SOF στα σωματίδια καπνού. Έτσι φαίνεται ότι η μάζα αιθάλης αρχικά είναι μεγαλύτερη ενώ στην πραγματικότητα η φόρτιση είναι χαμηλότερη. Αυτό επαληθεύεται και από την πτώση πίεσης αφού με αυτή την τιμή φόρτισης το μοντέλο προσεγγίζει ικανοποιητικά το πειραματικό ΔΡ. Αυτό ισχύει και για τις υπόλοιπες μετρήσεις.



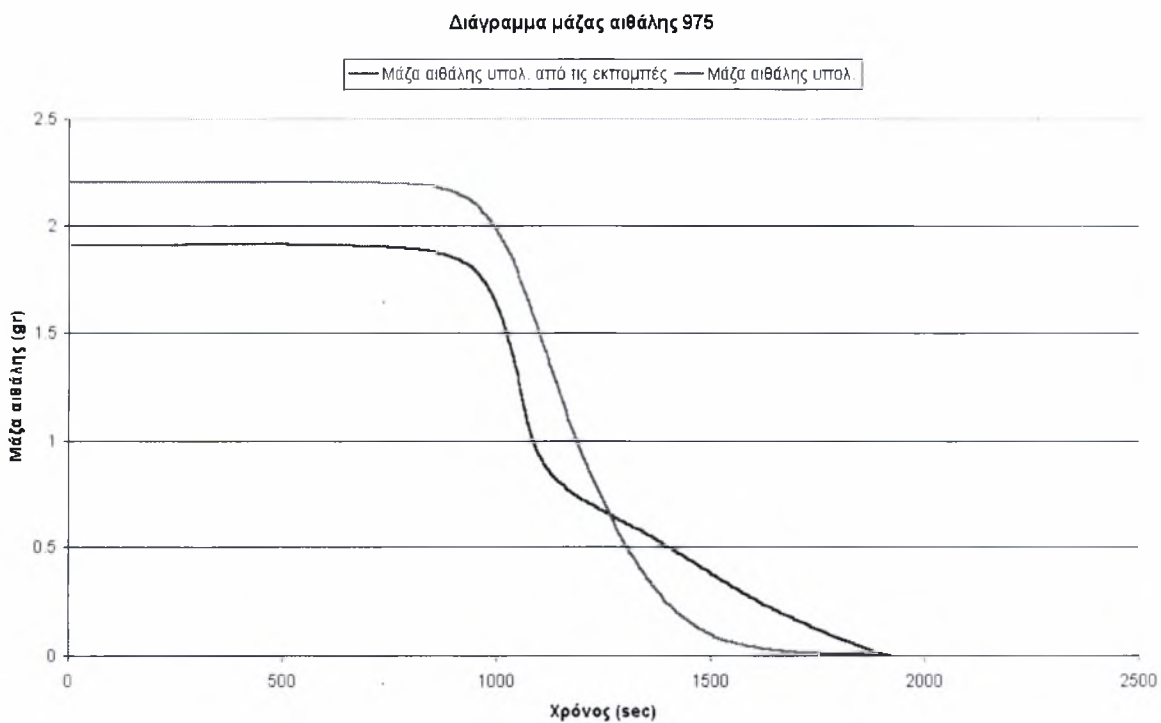
Σχήμα 2.2



Σχήμα 2.3



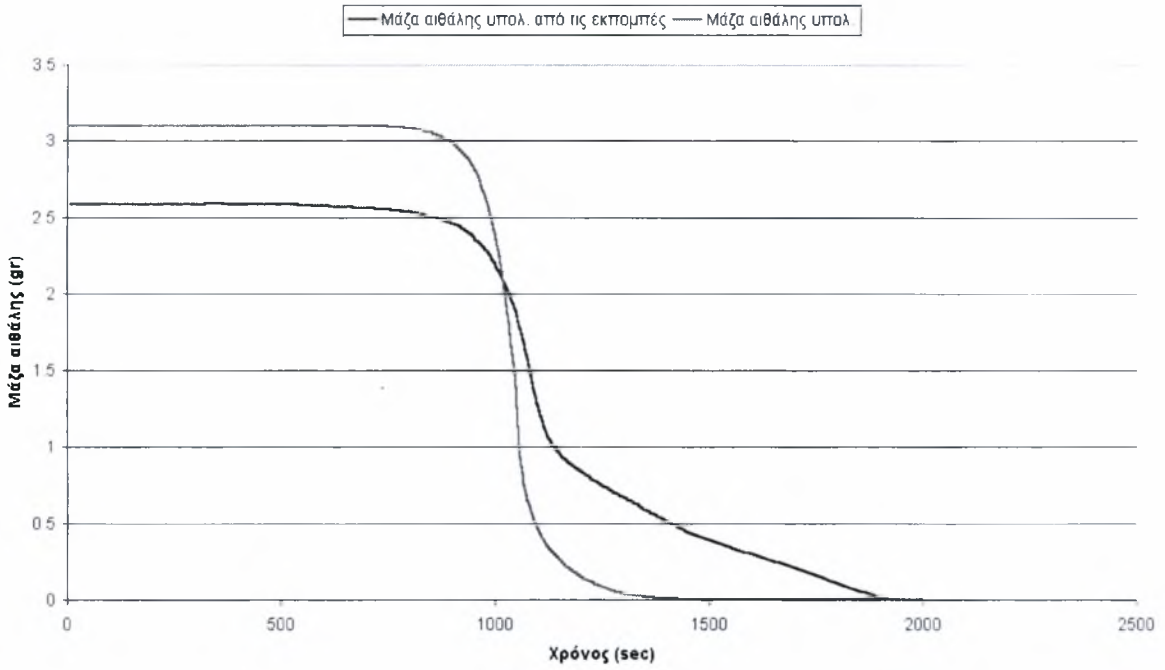
Σχήμα 2.4



Σχήμα 2.5

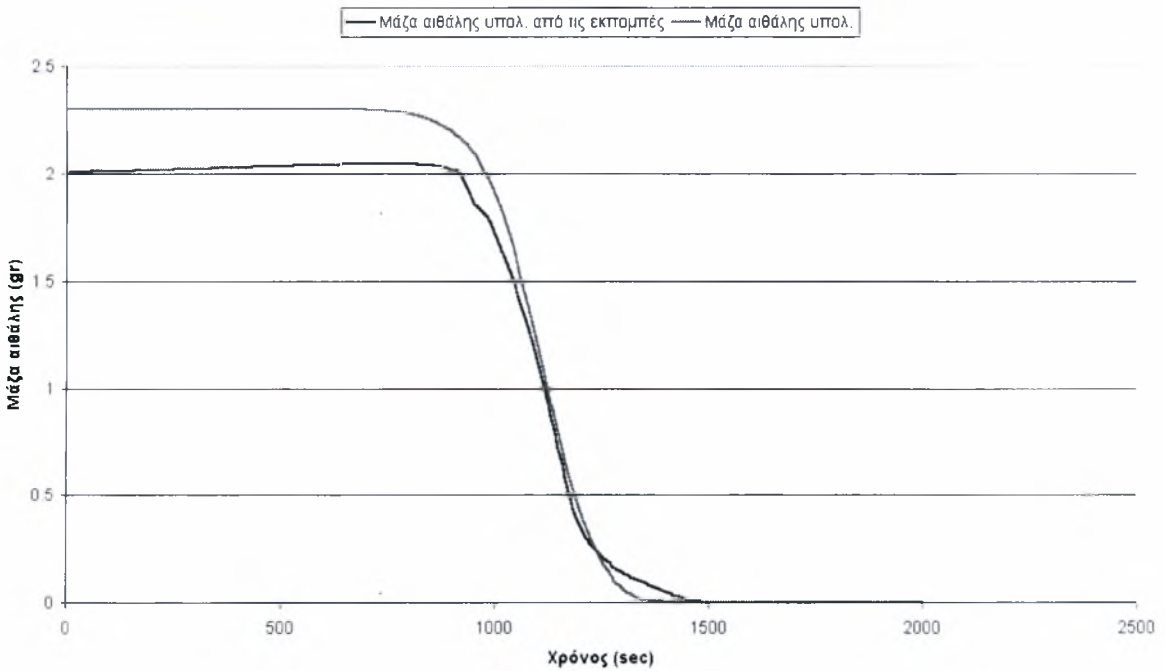


Διάγραμμα μάζας αιθάλης 977

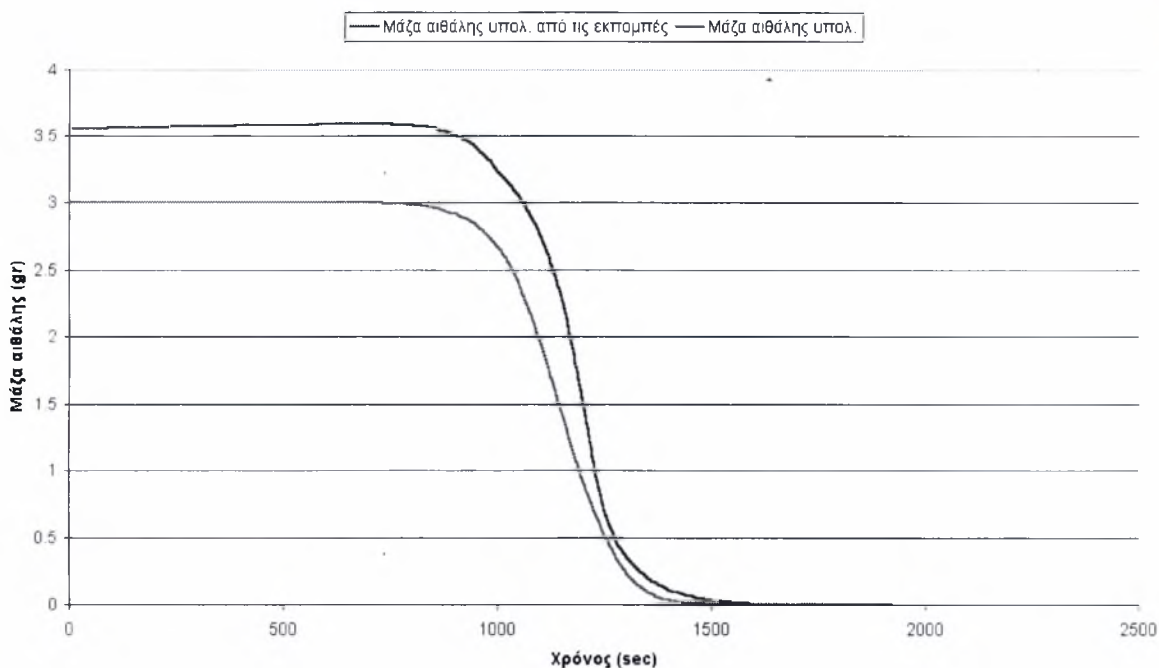


Σχήμα 2.6

Διάγραμμα μάζας αιθάλης 980



Σχήμα 2.7



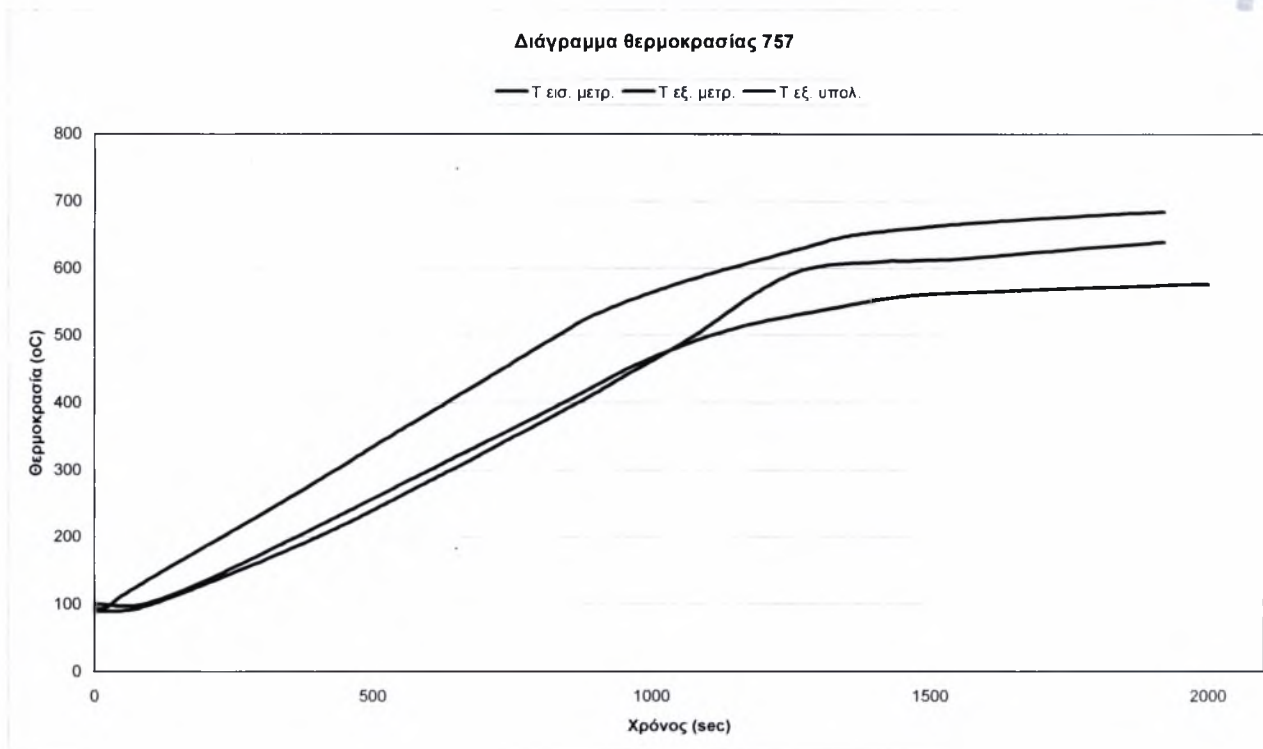
Σχήμα 2.8

Η σύγκριση της μάζας που υπολογίζει ο κώδικας με την μάζα που υπολογίζουμε από τις εκπομπές καυσαερίων δείχνει ότι το μοντέλο προσεγγίζει ικανοποιητικά την αναγέννηση. Σε όλες τις μετρήσεις η τελική μάζα σχεδόν συμπίπτει ενώ στις περισσότερες η κλίση της καμπύλης θεωρείται ικανοποιητική.

2.3 Προϋπολογισμός λειτουργίας μικρών φίλτρων SiC.

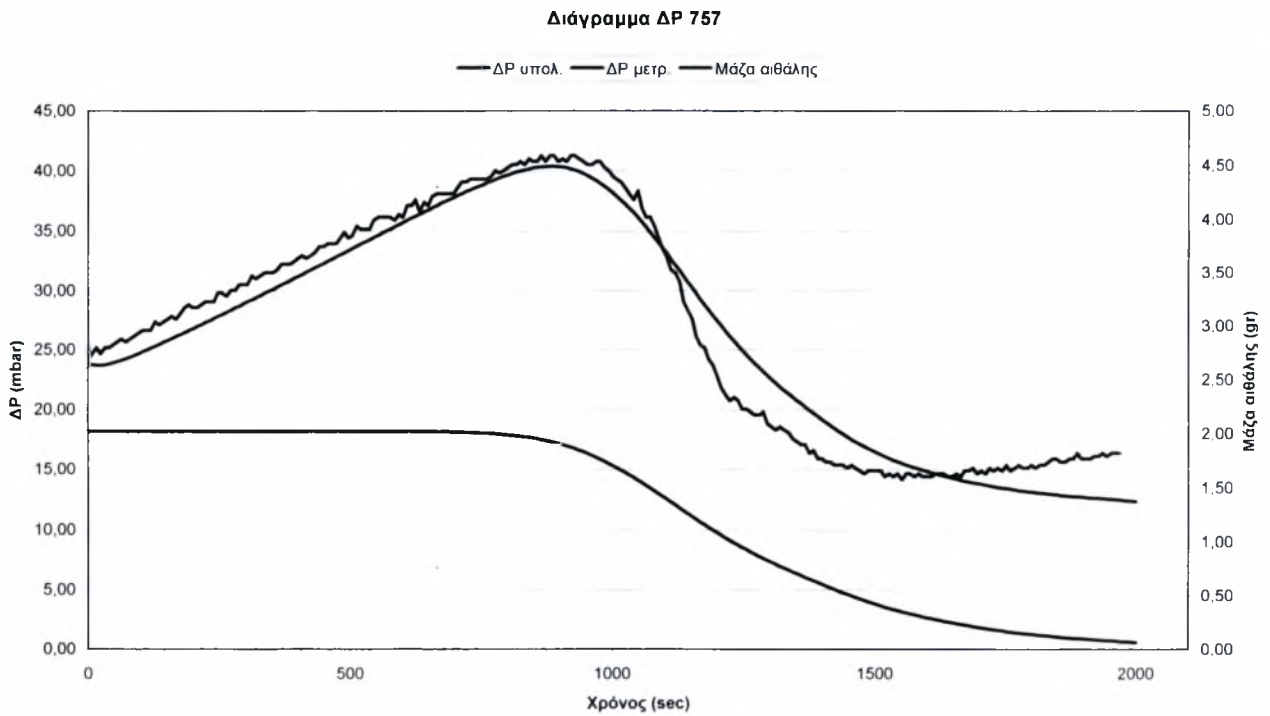
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συγκρίσεις της υπολογισμένης και μετρημένης πτώσης πίεσης και θερμοκρασίας για τα πειράματα με μικρά φίλτρα SiC.

Το διάγραμμα θερμοκρασίας της μέτρησης 757 που ακολουθεί, δείχνει την εξέλιξη της θερμοκρασίας του καυσαερίου που μετρήθηκε στην είσοδο και στην έξοδο του φίλτρου καθώς και την υπολογισμένη θερμοκρασία εξόδου σε σχέση με το χρόνο. Η θερμοκρασία εισόδου του καυσαερίου είναι φυσικά υψηλότερη από την έξοδο αφού έχουμε θέρμανση του υλικού του φίλτρου και απώλειες στο περιβάλλον. Στο σημείο που αρχίζει η αναγέννηση (περίπου 900sec) παρατηρούμε αύξηση της μετρ. Τεξ. που οφείλεται στην εξώθερμη αντίδραση καύσης του καπνού. Το μοντέλο μέχρι εκείνο το σημείο καταφέρνει να δίνει πολύ ικανοποιητική προσέγγιση της θερμοκρασίας, όμως κατά τη διάρκεια της καύσης η θερμοκρασία που υπολογίζει ο κώδικας μένει χαμηλότερα. Αυτό σημαίνει ότι κάποια παράμετρος του προβλήματος δεν υπολογίζεται σωστά και προκαλεί αυτή την απόκλιση. Όμως η ρύθμιση του κώδικα (tuning) ταυτόχρονα για την θερμοκρασία και το ΔΡ είναι πάρα πολύ δύσκολη και θα πρέπει να επιλέξουμε την καλύτερη δυνατή λύση. Άλλωστε φαινόμενα που μπορεί να είναι η αιτία για το σφάλμα αυτό όπως η ανομοιομορφία στην κατανομή της ταχύτητας στα κανάλια και της φόρτισης από το κέντρο στην περιφέρεια, είναι κάτι πολύ δύσκολο να υπολογιστούν με επιτυχία.



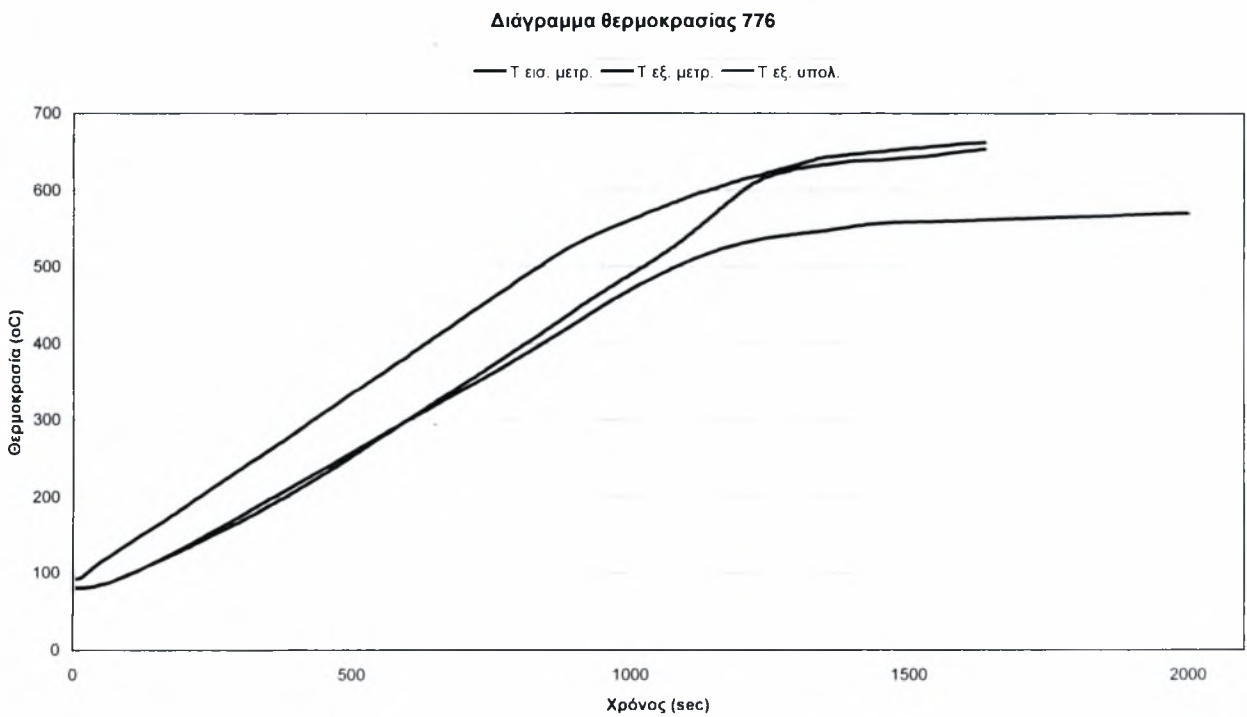
Σχήμα 2.9

Στο επόμενο διάγραμμα (Σχ. 2.10) φαίνεται η εξέλιξη της μετρημένης, της υπολογισμένης πτώσης πίεσης και η μάζα αιθάλης σε σχέση με το χρόνο. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της πίεσης και σε κάποιο χρονικό σημείο (περίπου 900sec) αρχίζει η αναγέννηση. Αυτό μπορεί να μας δώσει μια εικόνα για την εξάρτηση του ΔP από την φόρτιση. Χαρακτηριστικό είναι ότι όταν αρχίζει η αναγέννηση μειώνεται το ΔP λόγω μείωσης του πάχους του στρώματος αιθάλης στο φίλτρο. Όπως φαίνεται και στο γράφημα το μοντέλο προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά την μέτρηση. Η κλίση του μετρημένου και υπολογισμένου ΔP δείχνουν ότι η κινητική που επιλέχθηκε είναι πολύ κοντά στην πραγματική όπως επίσης και οι τιμές της διαπερατότητας του υλικού και του καπνού που επηρεάζουν πολύ την πτώση πίεσης είναι αρκετά σωστές. Αυτό επιβεβαιώνεται και επειδή τα αποτελέσματα είναι εξίσου ικανοποιητικά και στα υπόλοιπα πειράματα. Η αναγέννηση ουσιαστικά τελειώνει μετά τα 1500sec αφού από εκεί και μετά η μείωση της μάζας είναι πολύ μικρή. Ο καπνός που μένει μετά την αναγέννηση είναι 0.065gr δηλαδή η παγίδα είναι σχεδόν άδεια από καπνό.



Σχήμα 2.10

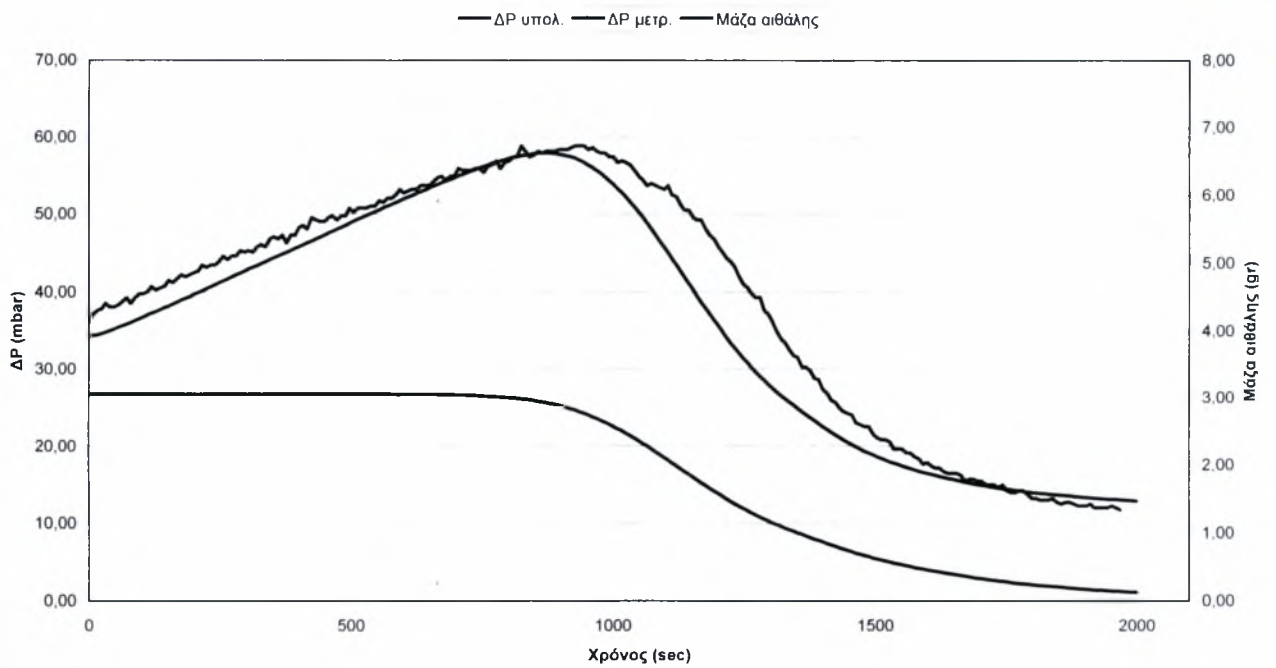
Ακολουθούν τα διαγράμματα θερμοκρασίας και ΔΡ για τα υπόλοιπα πειράματα.



Σχήμα 2.11

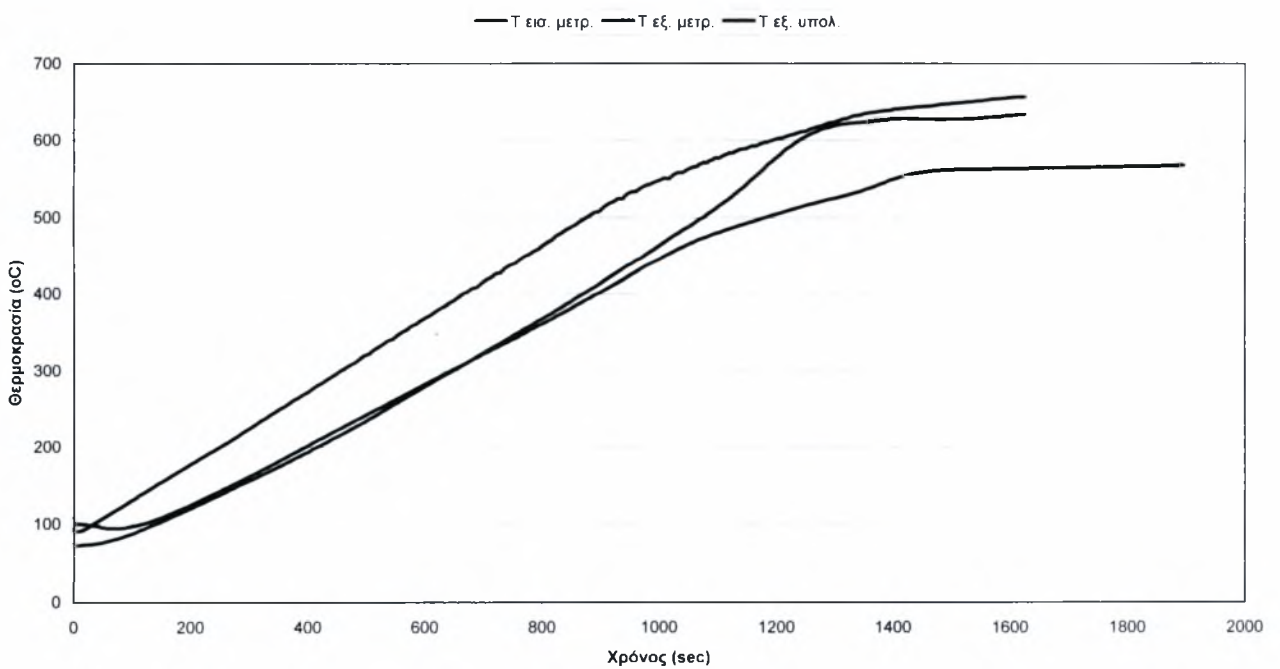


Διάγραμμα ΔΡ 776



Σχήμα 2.12

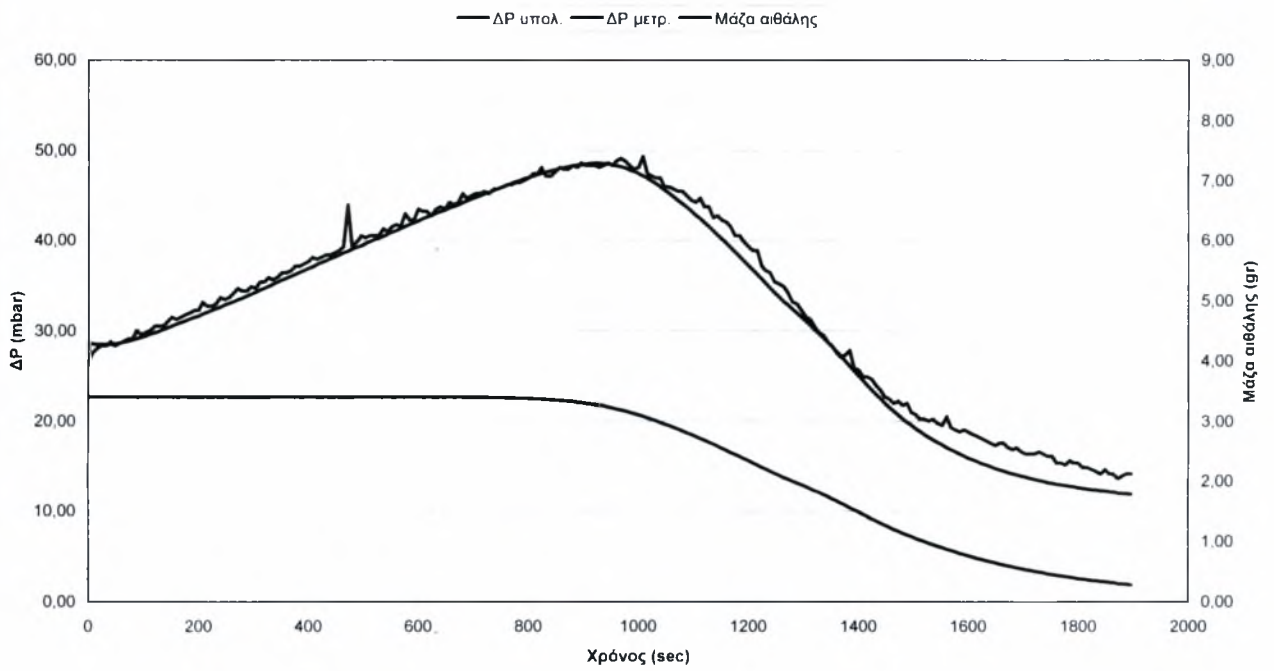
Διάγραμμα θερμοκρασίας 778



Σχήμα 2.13

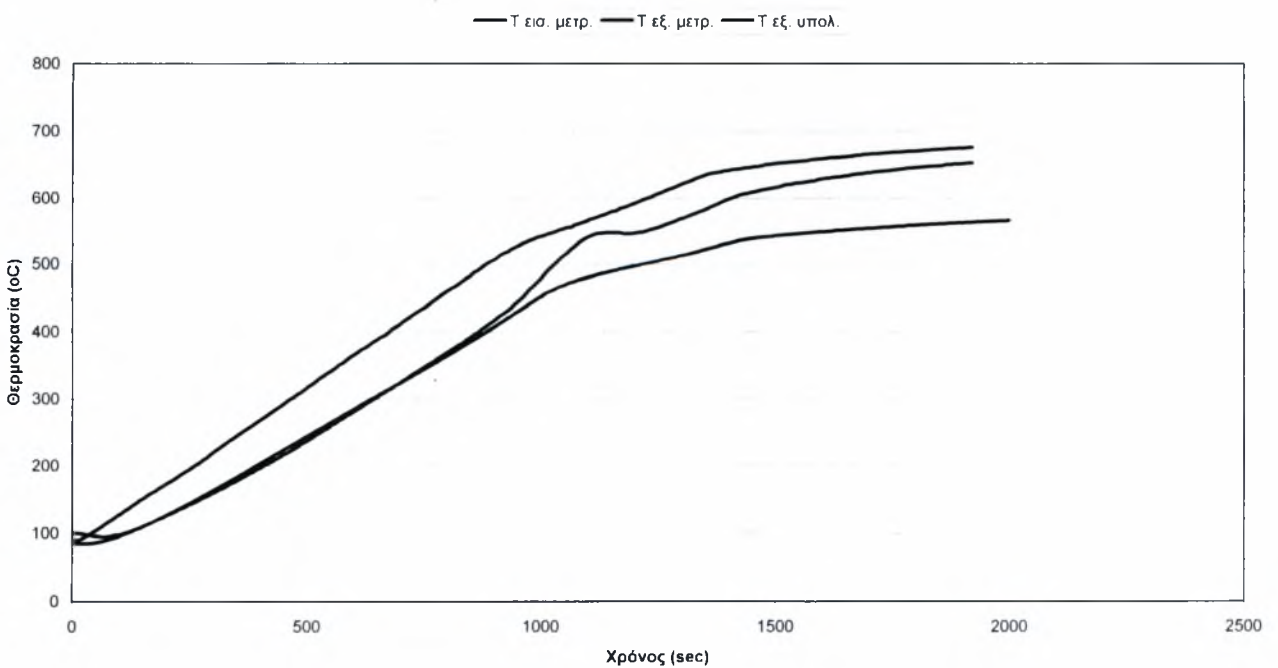


Διάγραμμα ΔΡ 778



Σχήμα 2.14

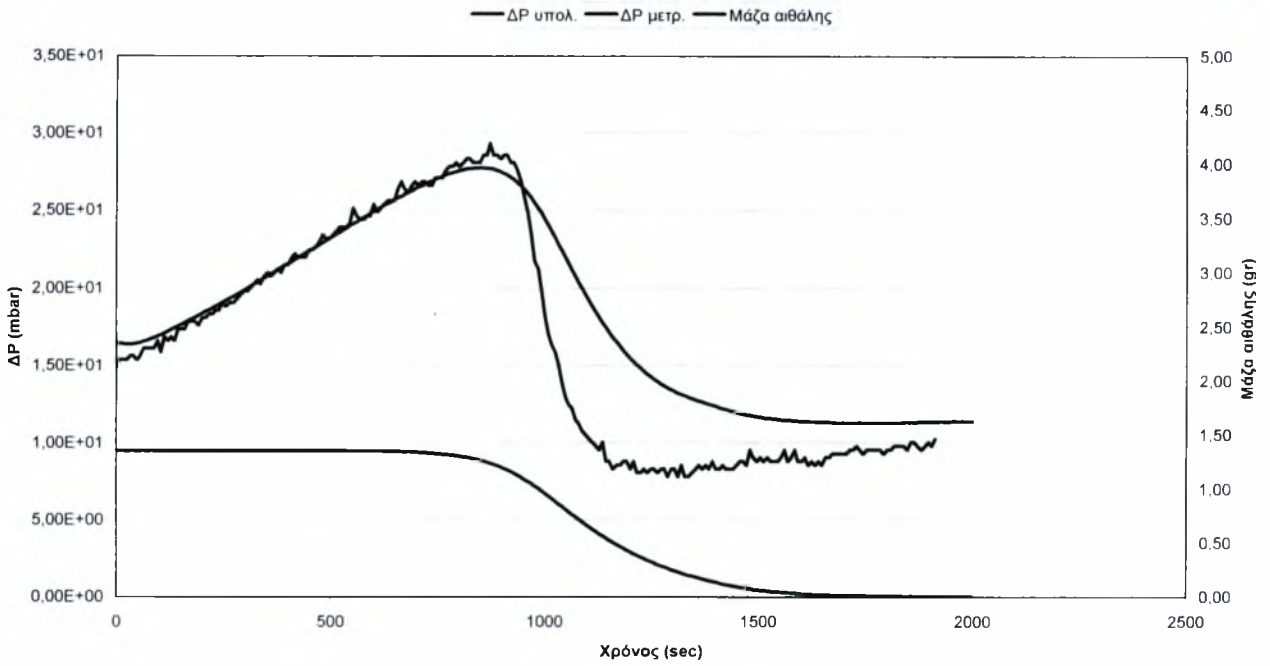
Διάγραμμα θερμοκρασίας 788



Σχήμα 2.15

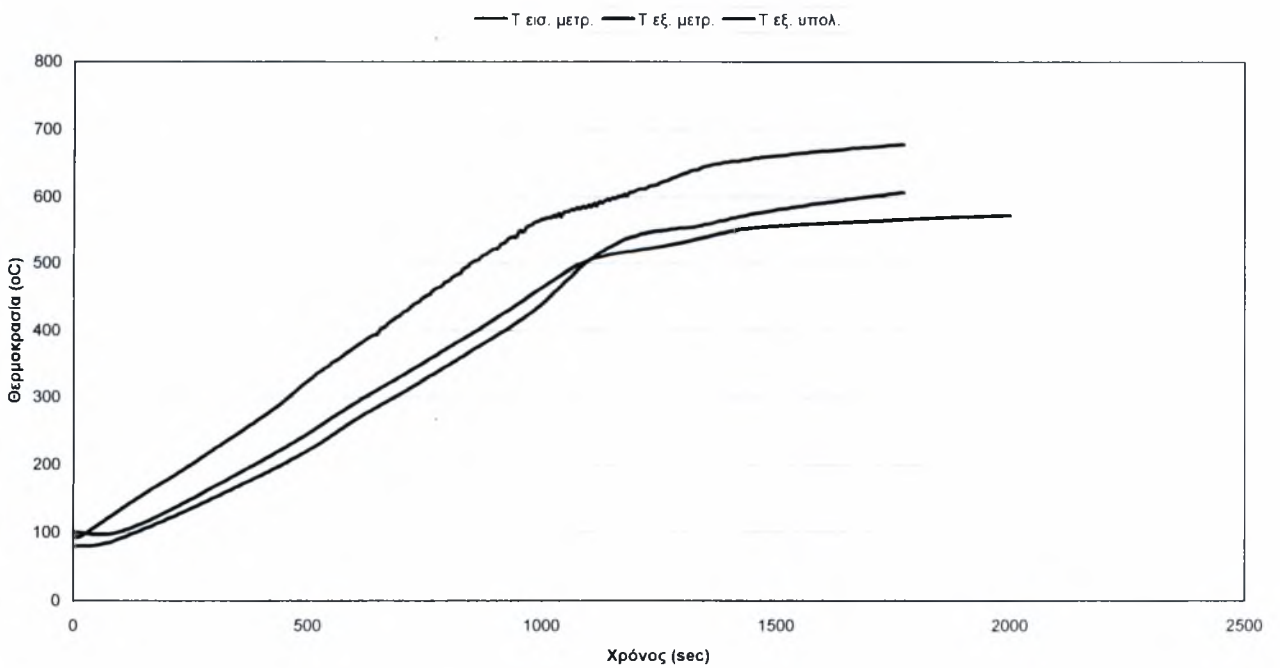


Διάγραμμα ΔΡ 788

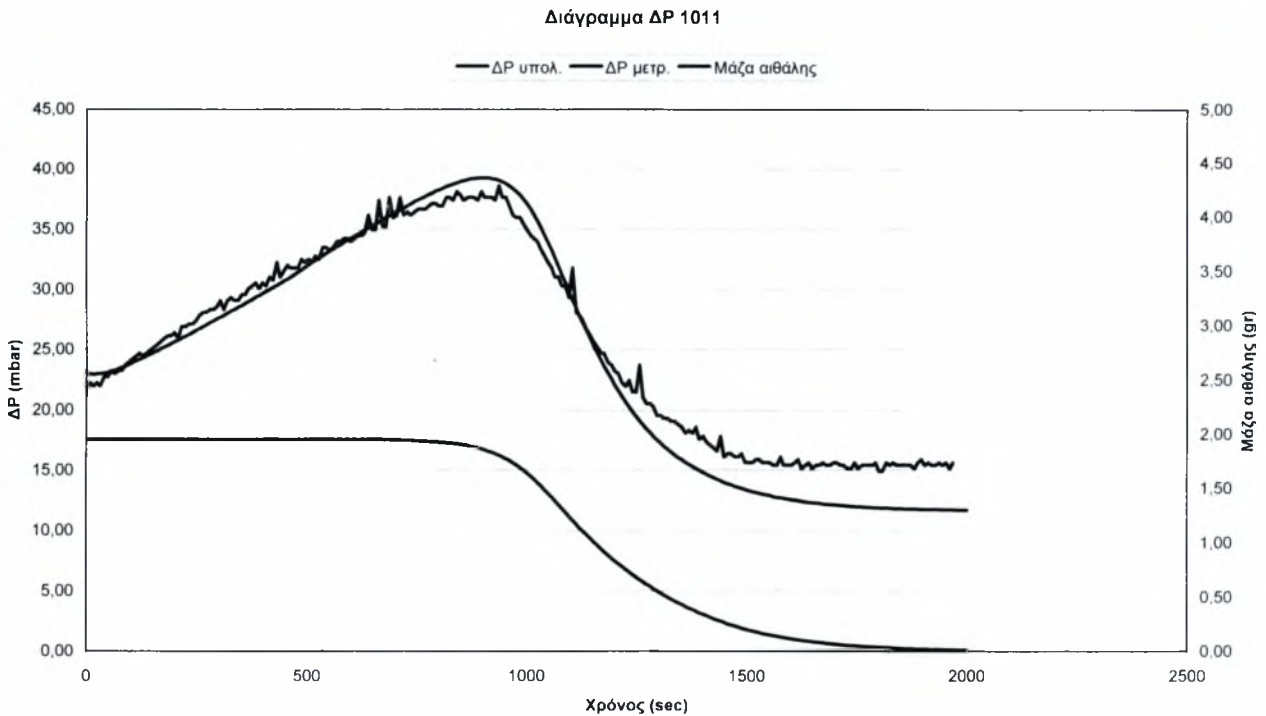


Σχήμα 2.16

Διάγραμμα θερμοκρασίας 1011



Σχήμα 2.17

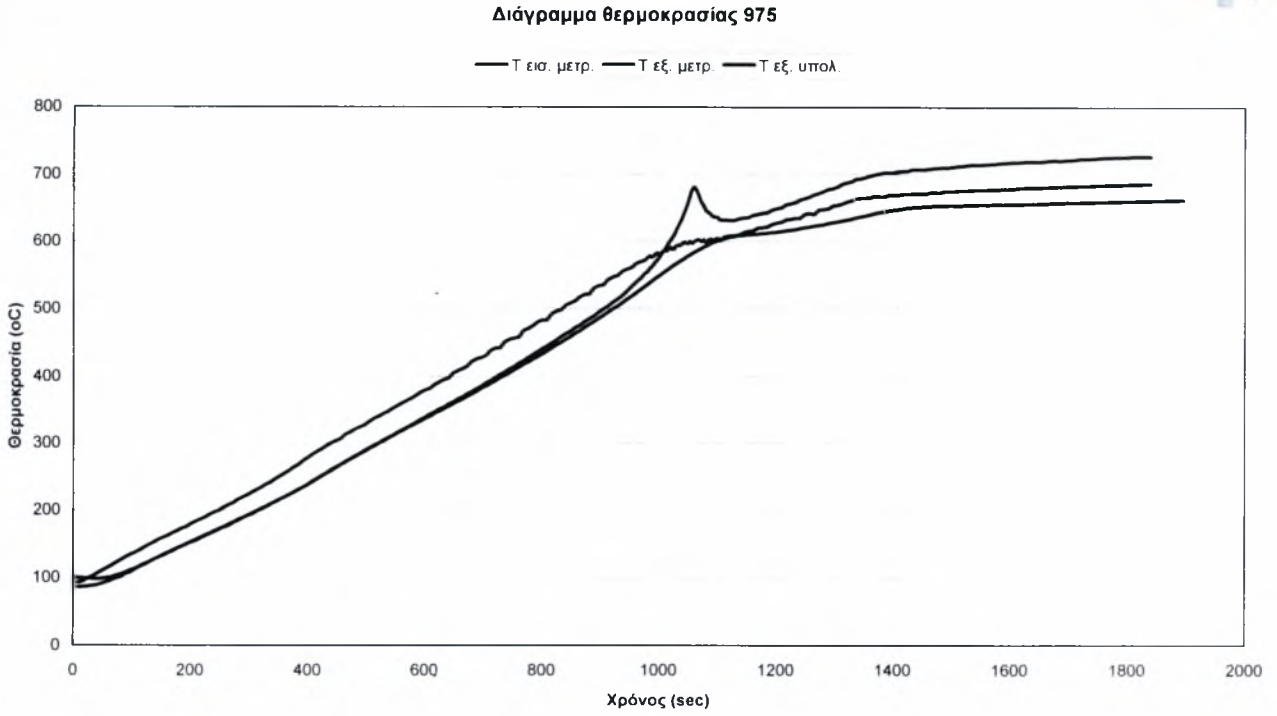


Σχήμα 2.18

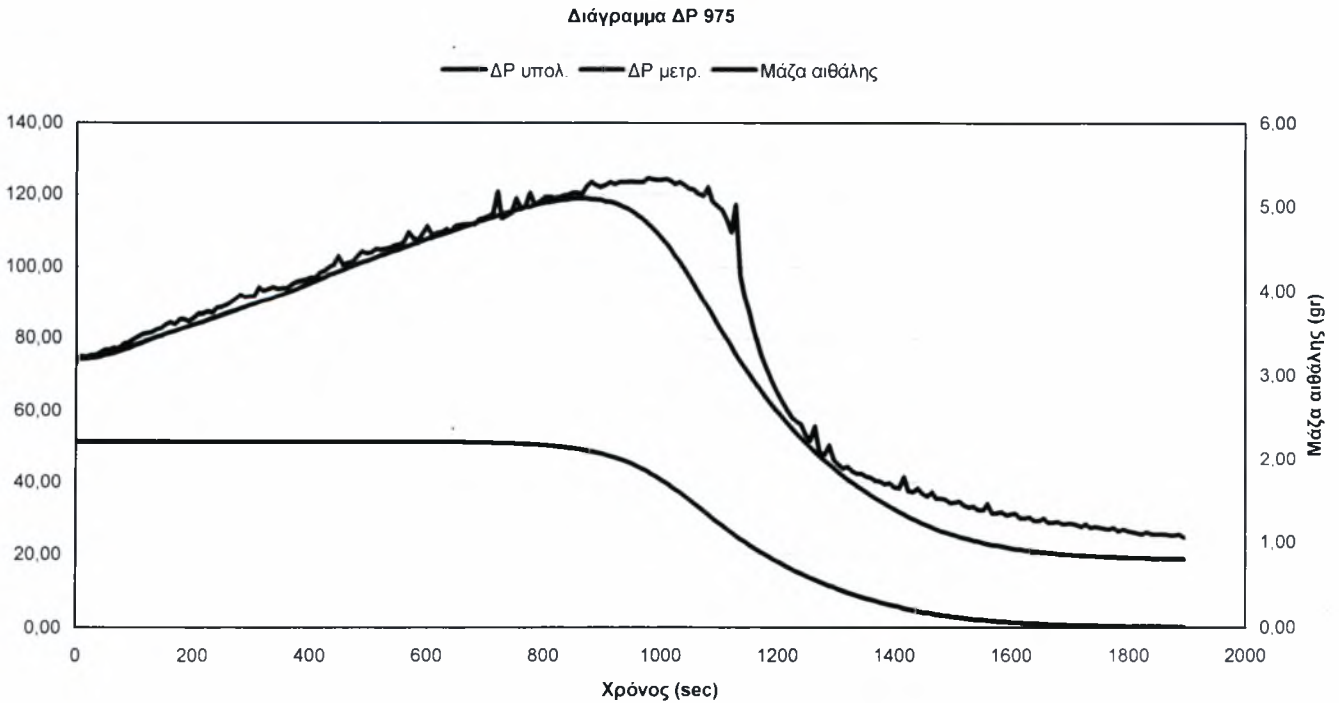
Όπως φαίνεται στα διαγράμματα σύγκρισης υπολογισμένης και μετρημένης θερμοκρασίας και πτώσης πίεσης δεν υπάρχουν ιδιαίτερα προβλήματα στην προσέγγιση των μετρήσεων. Ακόμα η κινητική που επιλέχθηκε δείχνει να είναι αρκετά κοντά στην πραγματική αφού η καύση επίσης υπολογίζεται αρκετά σωστά.

2.4 Προϊπολογισμός λειτουργίας μικρών φίλτρων κορδιερίτη.

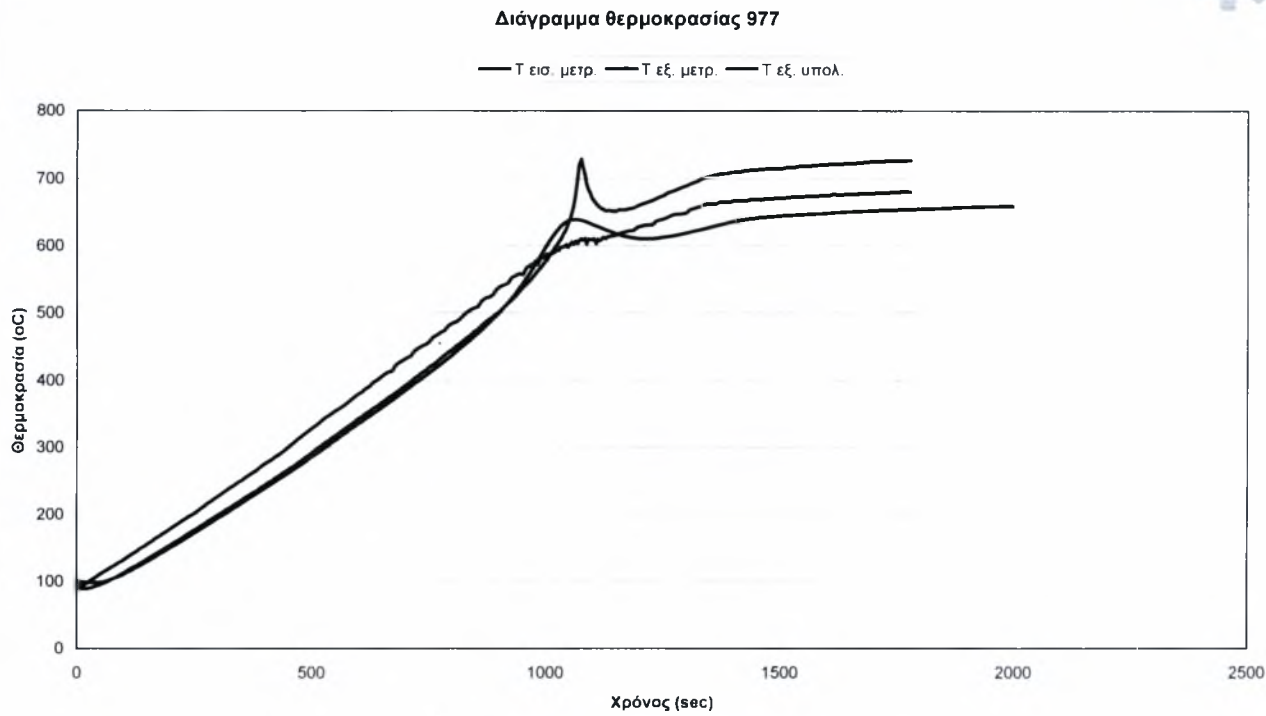
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συγκρίσεις της υπολογισμένης και μετρημένης πτώσης πίεσης και θερμοκρασίας για τα πειράματα με μικρά φίλτρα κορδιερίτη.



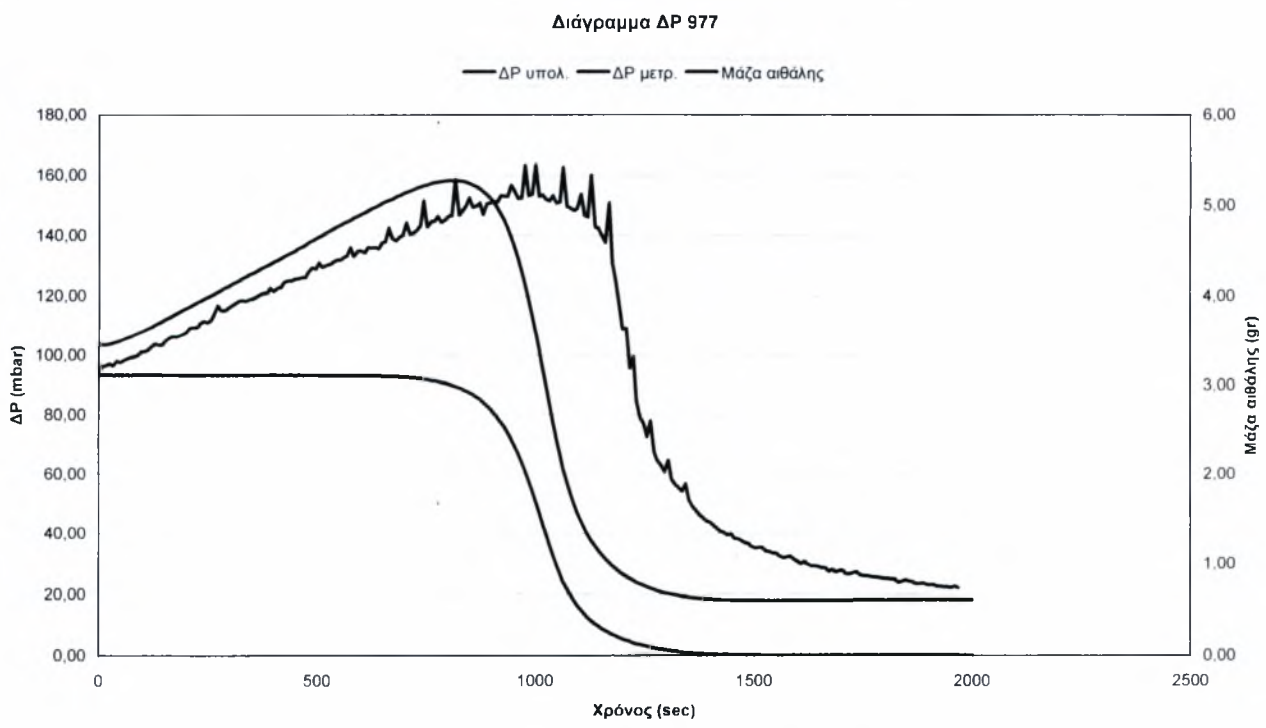
Σχήμα 2.19



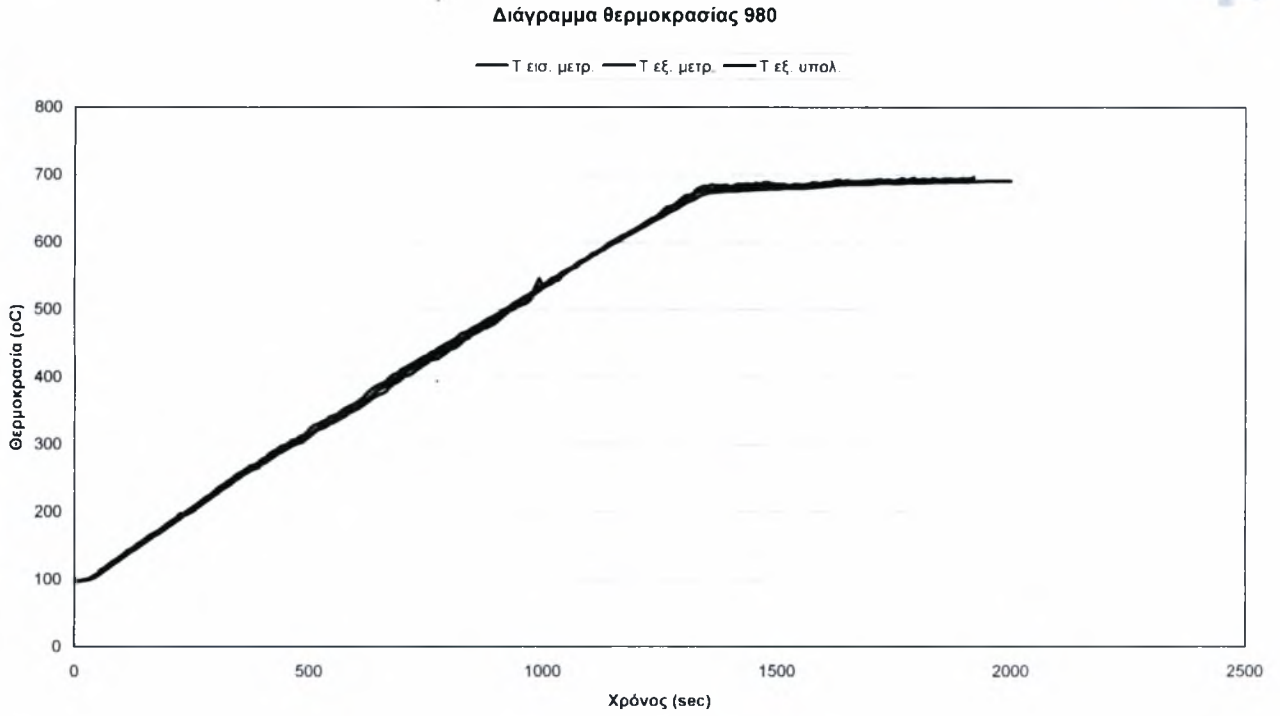
Σχήμα 2.20



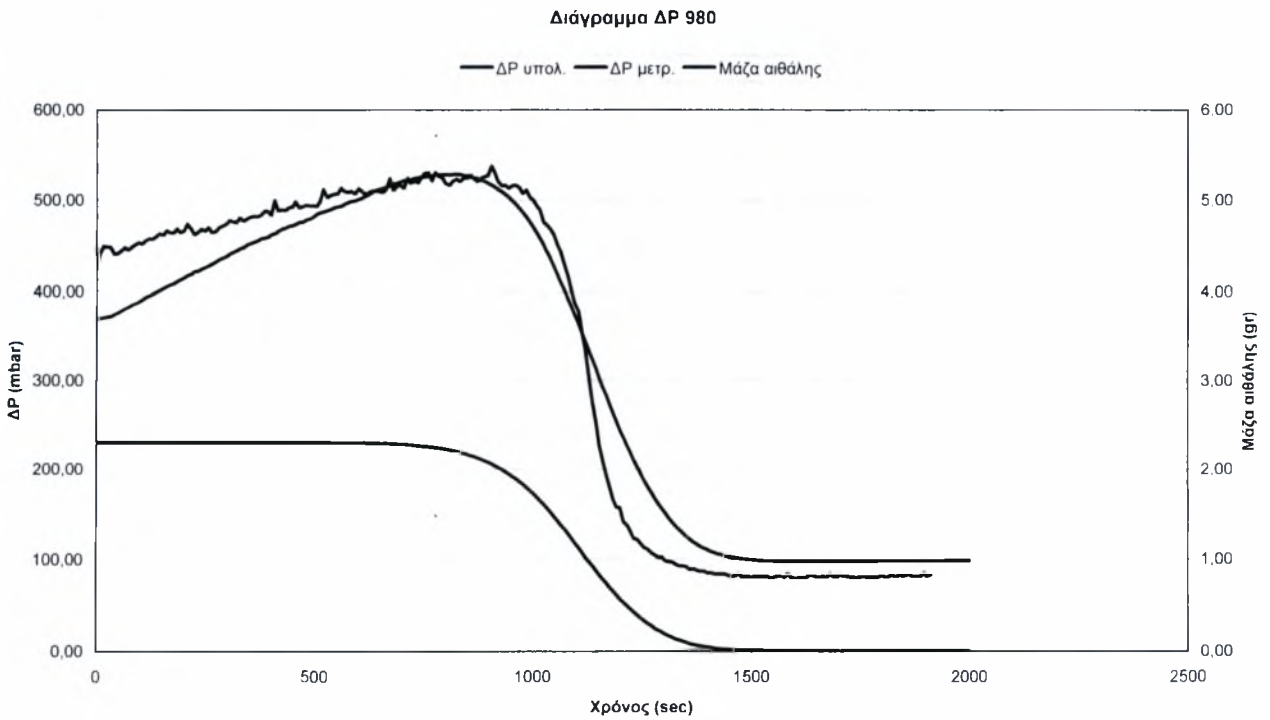
Σχήμα 2.21



Σχήμα 2.22



Σχήμα 2.23

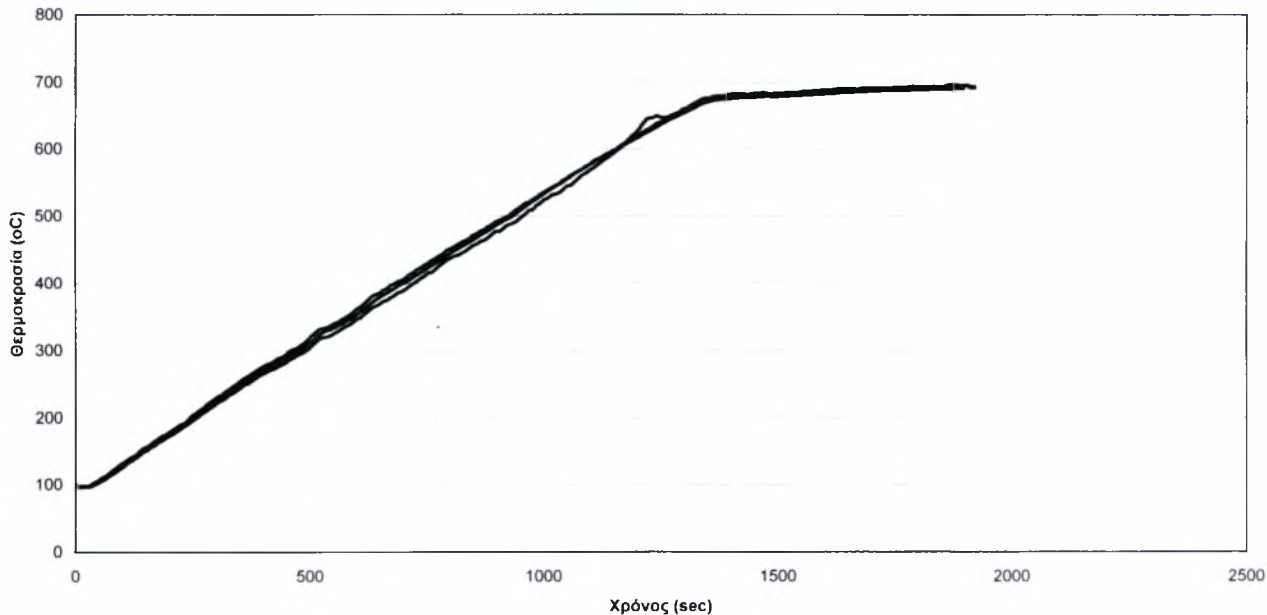


Σχήμα 2.24



Διάγραμμα θερμοκρασίας 981

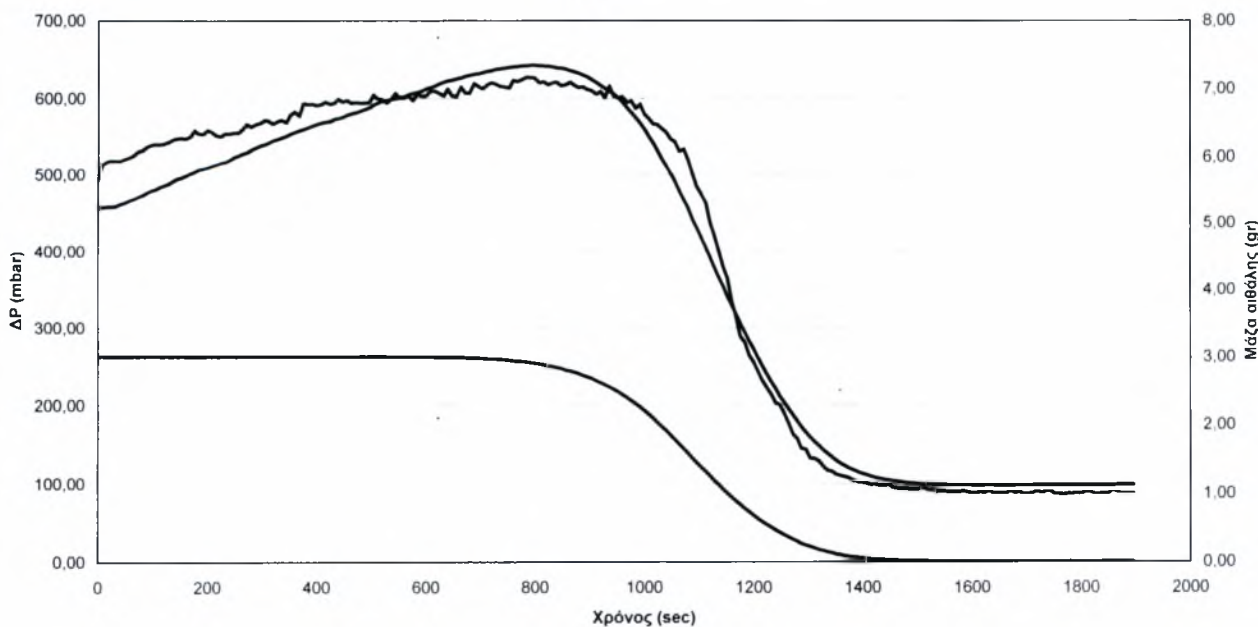
— T εισ. μετρ. — T εξ. μετρ. — T εξ. υπολ.



Σχήμα 2.25

Διάγραμμα ΔΡ 981

— ΔΡ υπολ. — ΔΡ μετρ. — Μάζα αιθάλης



Σχήμα 2.26



2.5 Συμπεράσματα.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει διερεύνηση των ιδιοτήτων του SiC και του κορδιερίτη, και οι τιμές που επιλέχθηκαν φαίνεται να είναι πολύ κοντά στις πραγματικές.

Αυτό που πρέπει να επισημάνουμε είναι η εγκυρότητα του υπολογισμού της μάζας καπνού στο φίλτρο από τον κώδικα επιβεβαιώνεται από την σύγκριση του με τον υπολογισμό της φόρτισης από τις εκπομπές CO, CO₂, HC. Αυτή η σύγκριση στις περισσότερες μετρήσεις, μας δείχνει ότι ο καπνός περιέχει SOF το οποίο είναι ο λόγος για τον οποίο η αρχική μάζα που υπολογίζεται από τις εκπομπές είναι λίγο μεγαλύτερη. Η διαφορά αυτή παρατηρείται μέχρι η θερμοκρασία ανέβει τόσο ώστε να γίνει εκρόφηση των υδρογονανθράκων.

Όσον αφορά τον υπολογισμό της θερμοκρασίας, μέχρι να αρχίσει η αναγέννηση η προσέγγιση είναι πολύ καλή. Στην αναγέννηση παρατηρείται απόκλιση όμως η ρύθμιση (tuning) των παραμέτρων είναι πολύ δύσκολο να γίνει με ταυτόχρονη προσέγγιση της θερμοκρασίας και του ΔΡ. Έτσι επιλέγουμε την καλύτερη δυνατή λύση.

Η επιλογή των τιμών της διαπερατότητας του καπνού δείχνει να είναι σωστή, όπως και της κινητικής. Η ενέργεια ενεργοποίησης $E=120000\text{J/mole}$ για την θερμική αναγέννηση ανταποκρίνεται πολύ καλά στις πραγματικές συνθήκες.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου 2.

G. C. Koltsakis, A. M. Stamatelos, P. Versaevel, H. Colas, C. Rigauudeau, R. Noiro, 'Some Empirical Observations on Diesel Particulate Filter Modeling and Comparison Between Simulations and Experiments', SAE paper 2000-01-477, 2000.

S. C. Sorenson, Jakob W. Hoj, Per Stobbe, 'Flow Characteristics of SiC Diesel Particulate Filter Materials', SAE paper, 940236, 1994.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3

ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ ΑΙΘΑΛΗΣ SiC ΤΟΥ IFP

3.1 Πειραματική διάταξη φίλτρων SiC από την οποία προήλθαν οι μετρήσεις.

Τα πειράματα έγιναν από το IFP (Institut Francais du Petrole) με φίλτρα SiC. Τα φίλτρα έχουν εξαιρετικά ισχυρή μόνωση πάχους 10εκ. και τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον Πίνακα 3.1. Έτσι το φαινόμενο μπορεί να θεωρηθεί αδιαβατικό και μονοδιάστατο αφού θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Οι μετρήσεις γίνονται με διαφορετικές παροχές, αρχική φόρτιση και συγκέντρωση O₂ στο καυσαέριο. Η φόρτιση της παγίδας έχει γίνει στον κινητήρα Peugeot DW10ATED σύμφωνα με τον κύκλο ECE ή τον κύκλο EUDC.

Φίλτρα SiC	
Διάμετρος	143.8mm
Μήκος	152mm
cpsi (channels per square inch)	200
πάχος υποστρώματος (substrate thickness)	14mils (0.3556mm)
μήκος τάπας των καναλιών (plug length)	5mm

Πίνακας 3.1

Οι μετρήσεις που γίνονται στο πείραμα είναι :

- στροφές του κινητήρα
- φορτίο
- ΔΡ στο φίλτρο
- θερμοκρασία στην είσοδο και στην έξοδο του φίλτρου
- συγκέντρωση HC, CO, CO₂, Nox
- παροχή αέρα και καυσίμου

Θα πρέπει να πούμε ότι η εξαγωγή θερμαίνεται με εναλλάκτες και αυτό καθορίζει την θερμοκρασία καυσαερίου. Ακόμα δίνεται η παροχή καυσαερίου, αρχική φόρτιση και συγκέντρωση O₂ στο καυσαέριο.

Ο υπολογισμός της λειτουργίας των φίλτρων SiC του IFP έγινε αφού διερευνήθηκαν οι συνθήκες των πειραμάτων και στη συνέχεια η ρύθμιση (tuning) της κινητικής της οξειδωσης του καπνού. Οι μετρήσεις αυτές είναι πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες από ότι τα μικρά φίλτρα λόγω του ότι το φίλτρο είναι αυτό που χρησιμοποιείται στο αυτοκίνητο και επειδή η αναγέννηση γίνεται με καυσαέριο.

Τα πειράματα από τα οποία προήλθαν οι μετρήσεις έγιναν σε σταθερό σημείο λειτουργίας του κινητήρα και έτσι η παροχή καυσαερίου και η συγκέντρωση O₂ είναι σταθερά στη διάρκεια του πειράματος. Οι μετρήσεις συμπεριλαμβάνουν διάφορες φορτίσεις, σύσταση καπνού, διαφορετική συγκέντρωση O₂ και διαφορετική παροχή καυσαερίου.

Έγινε διερεύνηση των ιδιοτήτων του καπνού ανάλογα με τον κύκλο φόρτισης (EUDC ή ECE) και εκτίμηση του ποσοστού SOF στον καπνό έτσι



ώστε ο υπολογισμός να είναι πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες του πειράματος. Υπολογίστηκε ο ρυθμός της καύσης R και έγινε σύγκριση του ρυθμού καύσης στα πειράματα. Επίσης έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων με φόρτιση EUDC και σύγκριση των αντίστοιχων με φόρτιση ECE. Επίσης υπολογίστηκε ενδεικτικά η πτώση πίεσης που οφείλεται μόνο στο στρώμα καπνού για να γίνει εκτίμηση της μάζας κάθε χρονική στιγμή. Σε όλες τις περιπτώσεις έγινε εκτίμηση του σφάλματος μεταξύ των μετρήσεων και των υπολογισμών.

3.2 Επιλογή των παραμέτρων των υπολογισμών και της κινητικής.

Οι ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό είναι :

Υλικό	SiC	Καπνός
Πυκνότητα (kg/m ³)	1800 όπως χρησιμοποιούμε 2200 (λόγω της ύπαρξης του συνδεδετικού υλικού)	80 (για φόρτιση EUDC) 60 (για φόρτιση ECE)
Διαπερατότητα (m ²)	3.7×10^{-13}	1.2×10^{-12} (για φόρτιση EUDC) 1.4×10^{-12} (για φόρτιση ECE)
Cp (J/kgK)	Μεταβολή με την θερμοκρασία	1510
Αγωγιμότητα (W/mK)	Μεταβολή με την θερμοκρασία	0.21

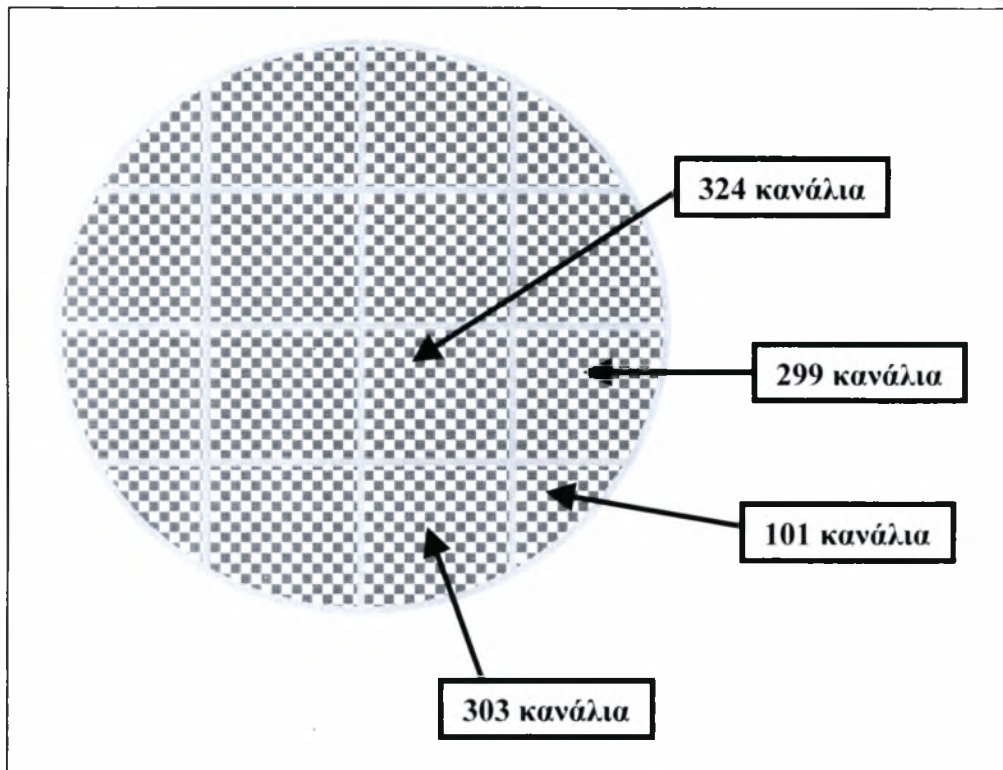
Πίνακας 3.2

Ακόμα το πραγματικό πάχος του υποστρώματος του φίλτρου είναι 4×10^{-4} m.

Παρατηρήθηκε ότι ο καπνός από τον αστικό κύκλο (EUDC) έχει μεγαλύτερη πυκνότητα και μικρότερη διαπερατότητα από ότι ο καπνός από τον κύκλο ECE. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν για την καλύτερη προσέγγιση των μετρήσεων από τον κώδικα.

Η τιμή του α (βαθμός οξειδωσης) που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς επιλέχθηκε $\alpha=0.88$. Ακόμα θεωρούμε ότι το στρώμα καπνού κατανέμεται ομοιόμορφα κατά μήκος του καναλιού ότι οι ιδιότητες της μόνωσης των φίλτρων σύμφωνα με στοιχεία από το IFP είναι : πάχος μόνωσης 0.1m, θερμική αγωγιμότητα 0.15 W/mK, πυκνότητα 1610 kg/m³. Λόγω της μόνωσης των φίλτρων θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον και ότι το φαινόμενο είναι αδιαβατικό.

Η ονομαστική διάμετρος και το cpsi του φίλτρου δεν είναι τα ενεργά μεγέθη αφού υπάρχει το συνδεδετικό υλικό και σύμφωνα με τα στοιχεία της IBIDEN η ενεργή επιφάνεια είναι το 92.3% της συνολικής και το 7.7% είναι το συνδεδετικό. Έτσι ισχύει $A_{\text{συν.}} = A_{\text{φίλτρου}} + A_{\text{συνδεδετικού}}$. Ο αριθμός των καναλιών του φίλτρου μετρήθηκε ίσος με 4108 κανάλια. Κάθε τμήμα του φίλτρου έχει πλευρά μήκους 34mm=1.338in και 18κανάλια στη κάθε πλευρά του. Έτσι έχουμε 18channels/1.338in=13.452cpsi και έτσι έχουμε $\text{cpsi} = 13.452^2 = 181$. Η ενεργή επιφάνεια είναι $A_{\text{φίλτρου}} = \text{Αριθμός καναλιών}/\text{cpsi}$ και η ενεργή διάμετρος είναι $d = \sqrt{4A/\pi} = 5.376\text{in} = 0.1365\text{m}$. Αυτό σημαίνει ότι το 90.1% είναι η ενεργή επιφάνεια και το 8.9% είναι το συνδεδετικό.



Σχήμα 3.1

Το σχήμα 3.1 δείχνει τον αριθμό των καναλιών στα τμήματα του φίλτρου.

Ο πίνακας 3.3 δείχνει τις μετρήσεις από τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για τον υπολογισμό της λειτουργίας των φίλτρων.

Μέτρηση	Υλικό	Παροχή καυσαερίου (Kg/h)	Παροχή καυσαερίου (Kg/sec)	Αρχική φόρτιση (gr)	% O ₂	Κύκλος φόρτισης	Συγκέντρωση προσθέτου (ppm)	Σημείο λειτουργίας
0311	SiC	195	0.054	24.6	15	ECE	0	2500RPM/35Nm
0711	SiC	100	0.027	23.9	10	EUDC	0	1770RPM/60Nm
0911	SiC	200	0.055	24.4	16	EUDC	0	2500RPM/30Nm
1311	SiC	100	0.027	23.6	15	EUDC	0	2170RPM/20Nm
1511	SiC	180	0.05	23.9	8	EUDC	0	2600RPM/95Nm
1711	SiC	100	0.027	25.2	14	ECE	0	2170RPM/20Nm
2111	SiC	185	0.051	25.1	9	ECE	0	2600RPM/95Nm
2311	SiC	110	0.030	12.8	16	ECE	0	2170RPM/20Nm
2510	SiC	95	0.026	24	9	ECE	0	1770RPM/60Nm
0801	SiC	185	0.051	23.9	9	ECE	25	2600RPM/90Nm
1912	SiC	100	0.027	29.4	9	ECE	25	1770RPM/60Nm

Πίνακας 3.3

Επιπλέον έγινε ρύθμιση (tuning) και επιλέχθηκε η κινητική του καπνού χωρίς πρόσθετο $k=0.003\text{m/secK}$ και $E=120000\text{J/mole}$. Η κινητική για τις μετρήσεις με πρόσθετο που χρησιμοποιήθηκε ήταν $k=70000000\text{m/secK}$ και $E=100000\text{J/mole}$ για την αναγωγή του προσθέτου και $k=700000000\text{m/secK}$ και $E=100000\text{J/mole}$ για την οξείδωση του προσθέτου. Θα πρέπει να



σημειώσουμε ότι οι επιλογές της κινητικής έγιναν με στόχο την χρήση κοινών τιμών για όλες τις μετρήσεις έτσι ώστε να προσεγγίζονται τα πειράματα όσο το δυνατό καλύτερα. Η κινητική για τις μετρήσεις χωρίς πρόσθετο επιλέχθηκε αφού έγινε σύγκριση των κινητικών :

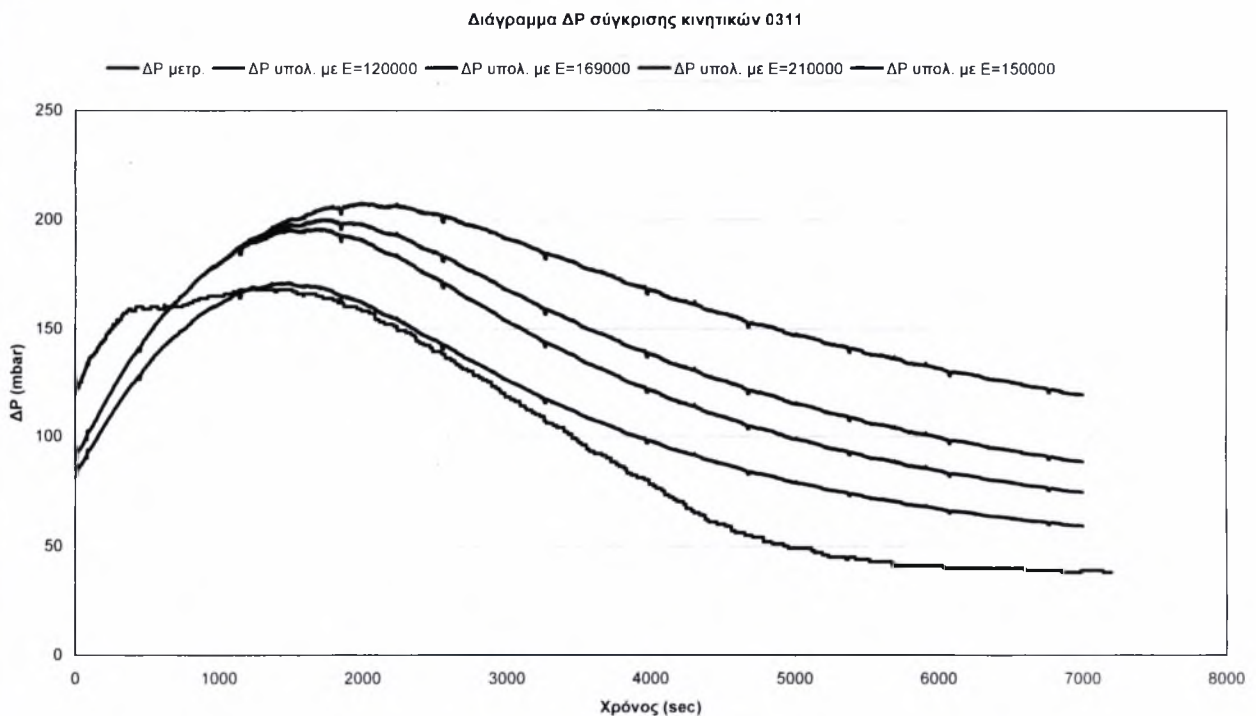
$k=0.003\text{m/secK}$ και $E=120000\text{J/mole}$,

$k=0.3\text{m/secK}$ και $E=150000\text{J/mole}$,

$k=5\text{m/secK}$ και $E=169000\text{J/mole}$,

$k=2300\text{m/secK}$ και $E=210000\text{J/mole}$.

Ο υπολογισμός της λειτουργίας των φίλτρων έγινε με τις 4 κινητικές για όλα τα πειράματα και τα διαγράμματα που ακολουθούν δείχνουν τη σύγκριση του ΔP που υπολογίζεται για τις διαφορετικές τιμές χημικής κινητικής.

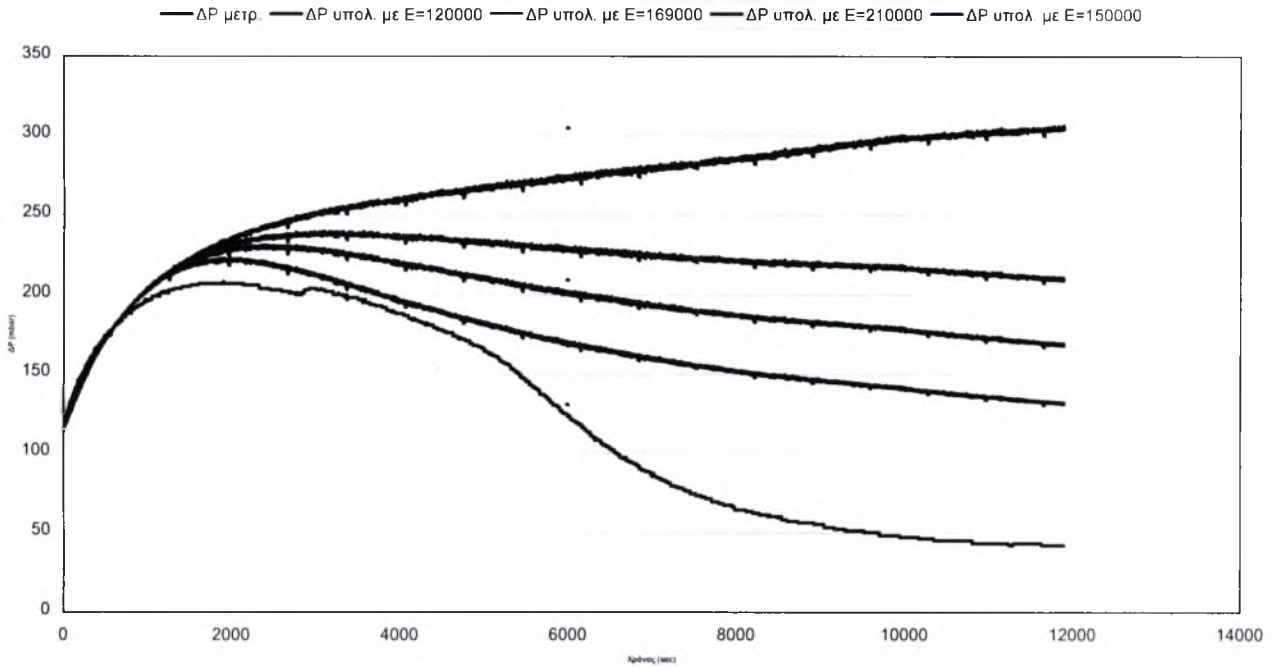


Σχήμα 3.2

Όπως φαίνεται από τα σχήματα 3.2 και 3.3 η κινητική που προσεγγίζει καλύτερα το μετρημένο ΔP είναι η $E=120000\text{J/mole}$ για τις μετρήσεις 0311 και 0911 στις οποίες η αναγέννηση γίνεται σε χαμηλή σχετικά θερμοκρασία (488°C και 461°C). Αντίθετα οι μετρήσεις 1711 και 2510 στις οποίες η αναγέννηση γίνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία (566°C και 572°C) φαίνεται ότι και οι 4 κινητικές προσεγγίζουν ικανοποιητικά την μέτρηση (σχήματα 3.4 και 3.5). Αυτό μας οδηγεί να επιλέξουμε την κινητική με $E=120000\text{J/mole}$ όμως θα πρέπει να πούμε ότι η επιλογή αυτή γίνεται με επιφυλακτικότητα επειδή και με τις υπόλοιπες τιμές της ενέργειας ενεργοποίησης οι υπολογισμοί είναι ικανοποιητικοί.

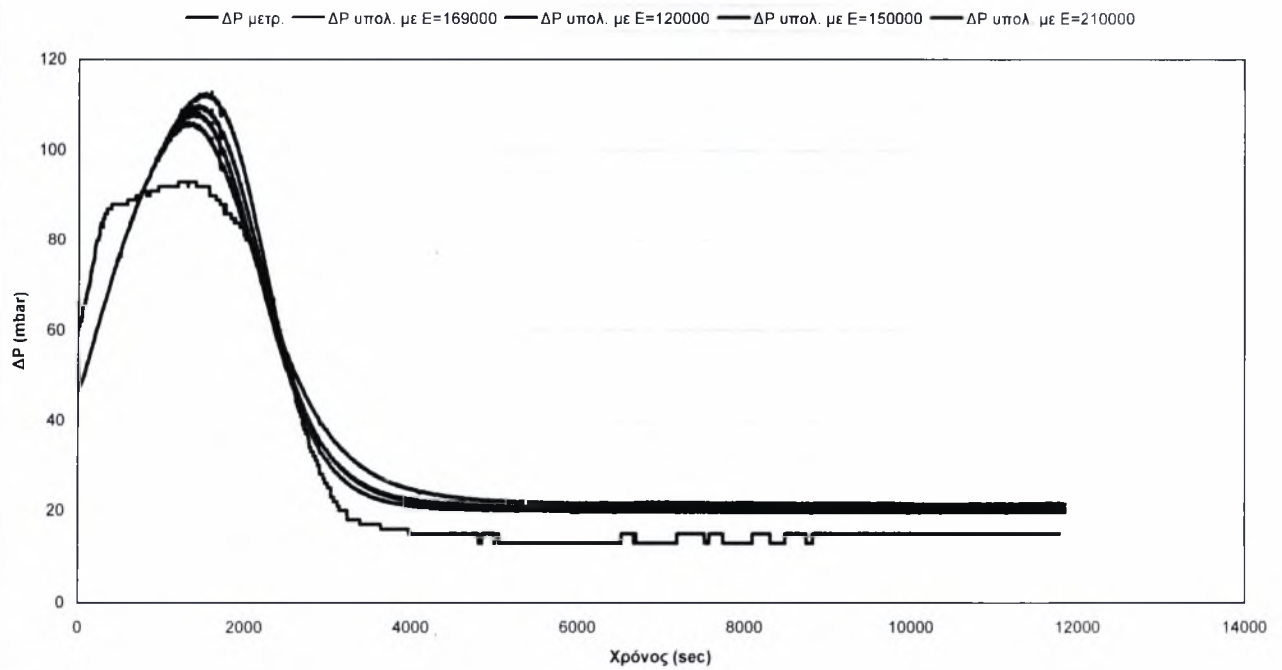


Διάγραμμα ΔΡ σύγκρισης κινητικών 0911



Σχήμα 3.3

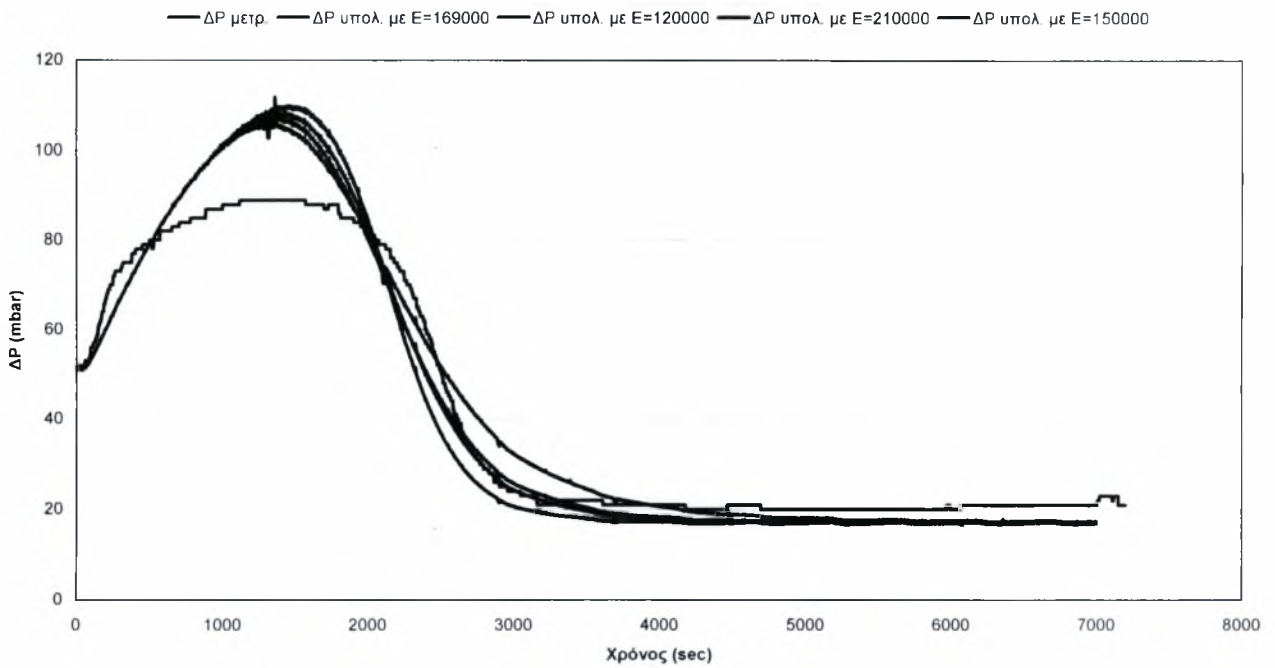
Διάγραμμα ΔΡ σύγκρισης κινητικών 1711



Σχήμα 3.4

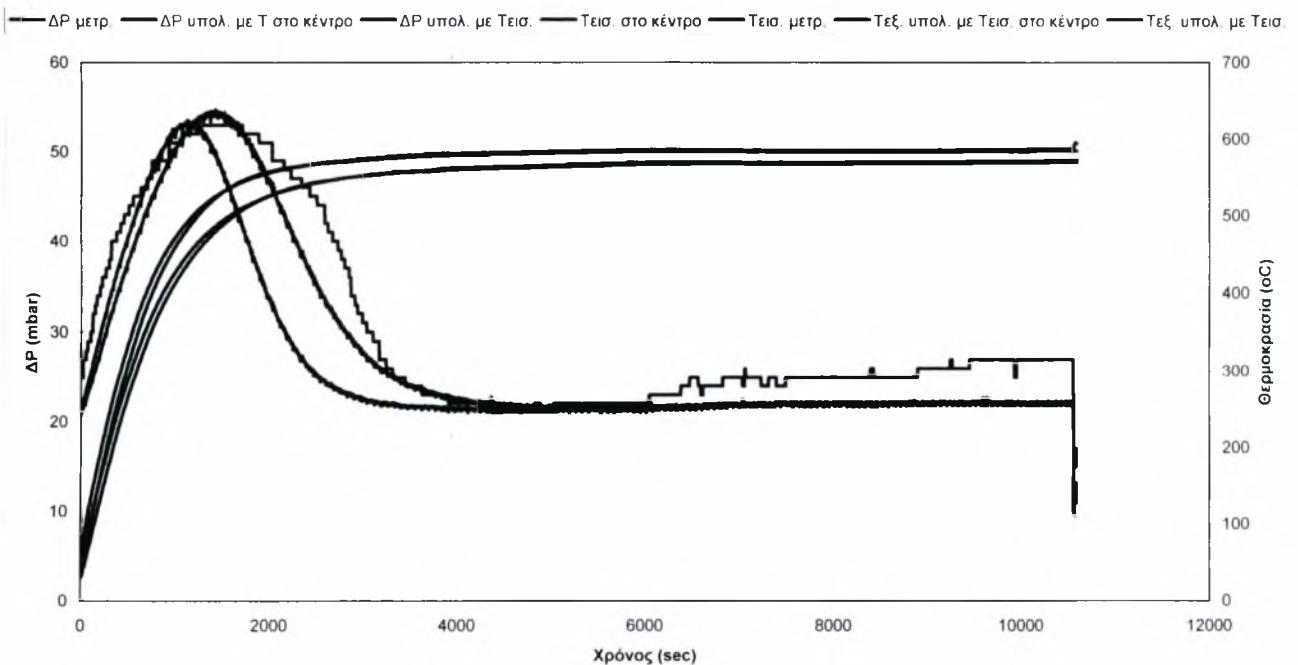


Διάγραμμα ΔΡ σύγκρισης κινητικών 2510



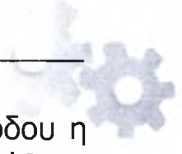
Σχήμα 3.5

Διάγραμμα σύγκρισης Τεισ. 2311



Σχήμα 3.6

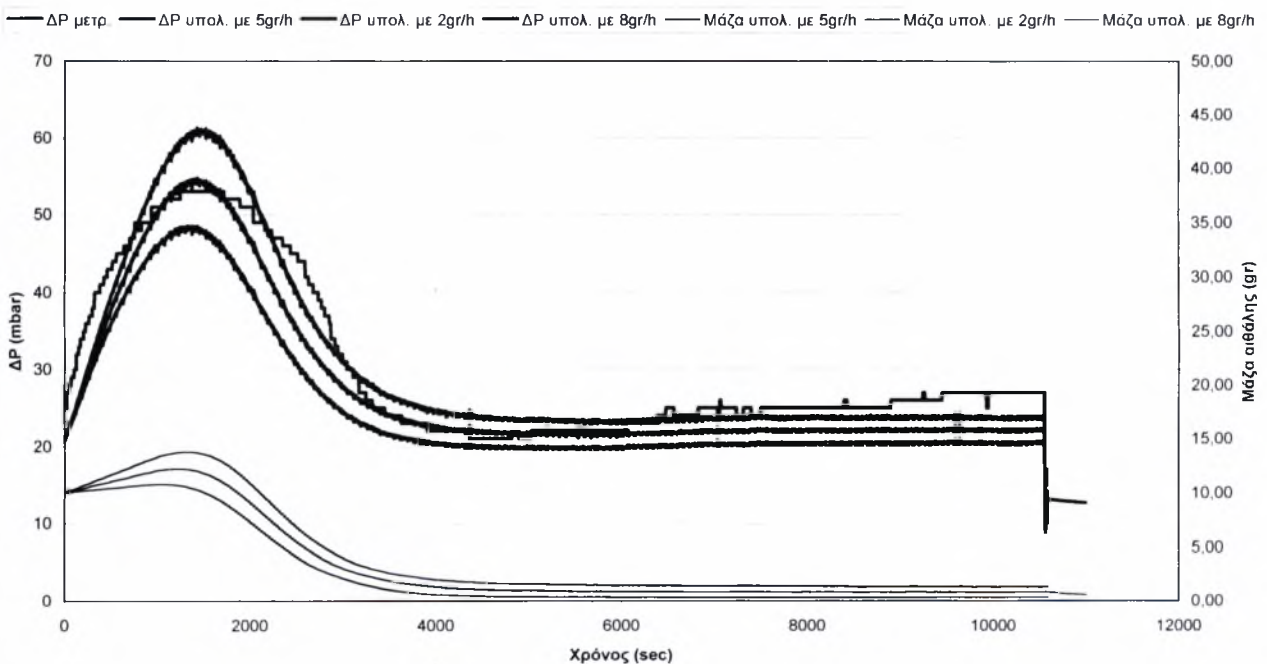
Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέτρηση της θερμοκρασία εισόδου είχε κάποιο πρόβλημα και αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.6 όπου παρουσιάζεται ο υπολογισμός με τη χρήση της θερμοκρασίας εισόδου και της θερμοκρασίας



στο κέντρο του φίλτρου. Έτσι χρησιμοποιήθηκε σαν θερμοκρασία εισόδου η θερμοκρασία στο κέντρο του φίλτρου. Η θερμοκρασία εισόδου που μετρήθηκε μάλλον είναι μεγαλύτερη από την πραγματικότητα και έτσι η καύση γίνεται νωρίτερα. Αυτό μας δείχνει την ευαισθησία στην θερμοκρασία εισόδου για την οποία υπάρχει αβεβαιότητα και η οποία επηρεάζει την καύση του καπνού.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση των εκπομπών καπνού του κινητήρα στην αναγέννηση. Από το διάγραμμα εκπομπών καπνού σε διάφορα σημεία λειτουργίας του κινητήρα στο παράρτημα II επιλέχθηκε η κατάλληλη τιμή για τον υπολογισμό. Όμως και εδώ πρέπει να είμαστε επιφυλακτικοί για τις μετρήσεις αυτές για τις εκπομπές καπνού. Η επιρροή των εκπομπών στην αναγέννηση φαίνεται στο σχήμα 3.6. Έγινε υπολογισμός ενδεικτικά για την μέτρηση 2311 με εκπομπές καπνού 2gr/h, 5gr/h και 8gr/h για το συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας στο οποίο από τα στοιχεία της IBIDEN οι εκπομπές είναι 5gr/h. Πράγματι η τιμή αυτή δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα στον υπολογισμό του ΔΡ. Η μικρότερη τιμή 2gr/h δίνει μικρότερη φόρτιση και συνεπώς μικρότερο ΔΡ ενώ μεγαλύτερη τιμή 8gr/h δίνει μεγαλύτερη φόρτιση και υψηλότερο ΔΡ.

Διάγραμμα σύγκρισης εκπομπών καπνού 2311



Σχήμα 3.6

3.3 Προϋπολογισμός λειτουργίας φίλτρων SiC του IFP.

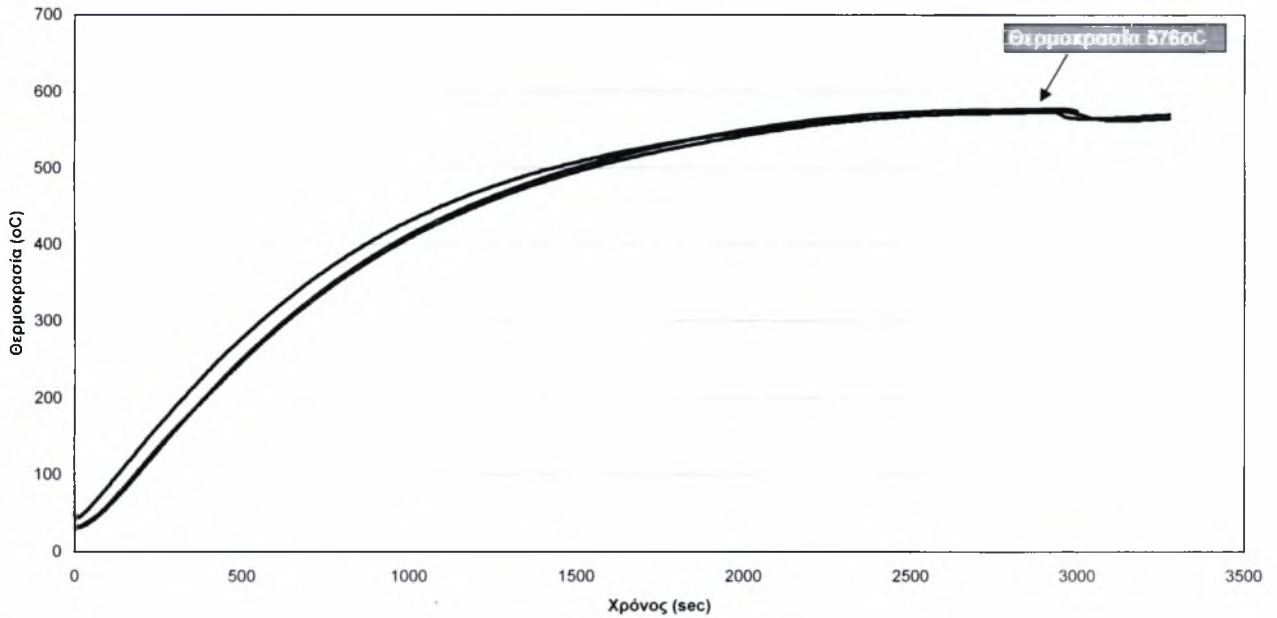
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις μετρήσεις του IFP με καπνό από κύκλο EUDC και η σύγκριση τους με τα πειραματικά δεδομένα.

Στο διάγραμμα θερμοκρασίας της μέτρησης 0711 παρατηρούμε ότι λόγω της μόνωσης η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου δεν διαφέρουν πολύ επειδή δεν έχουμε απώλειες στο περιβάλλον. Το μοντέλο καταφέρνει να υπολογίσει πολύ καλά την θερμοκρασία εξόδου υπό τις συνθήκες αυτές.



Διάγραμμα θερμοκρασίας 0711

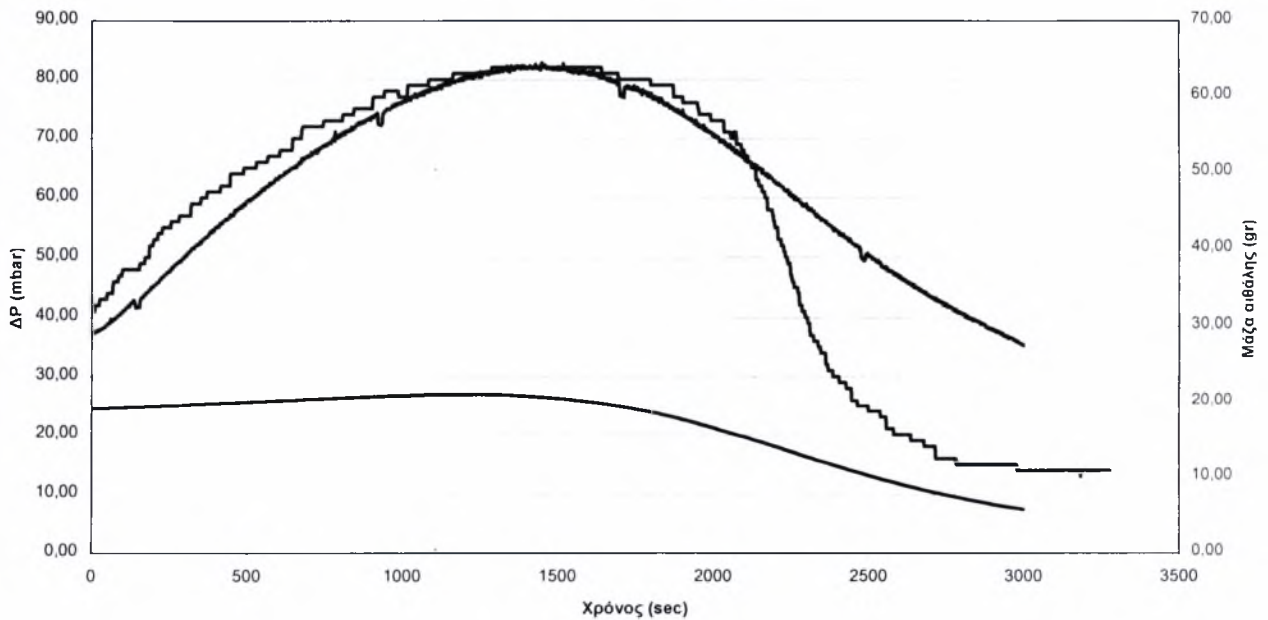
— Τεξ. μετρ. — Τεισ. μετρ. — Τεξ. υπολ.



Σχήμα 3.7

Διάγραμμα ΔΡ 0711

— ΔΡ υπολ. — ΔΡ μετρ. — Μάζα καπνού

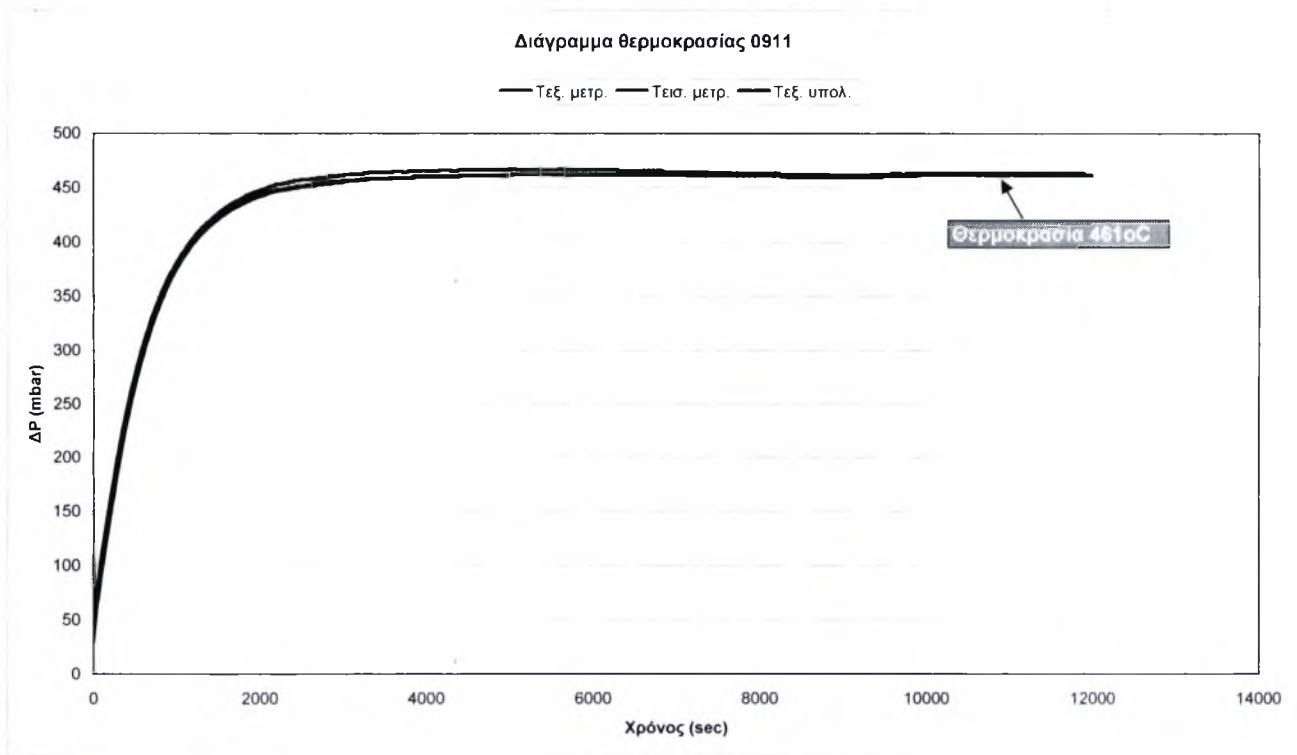


Σχήμα 3.8

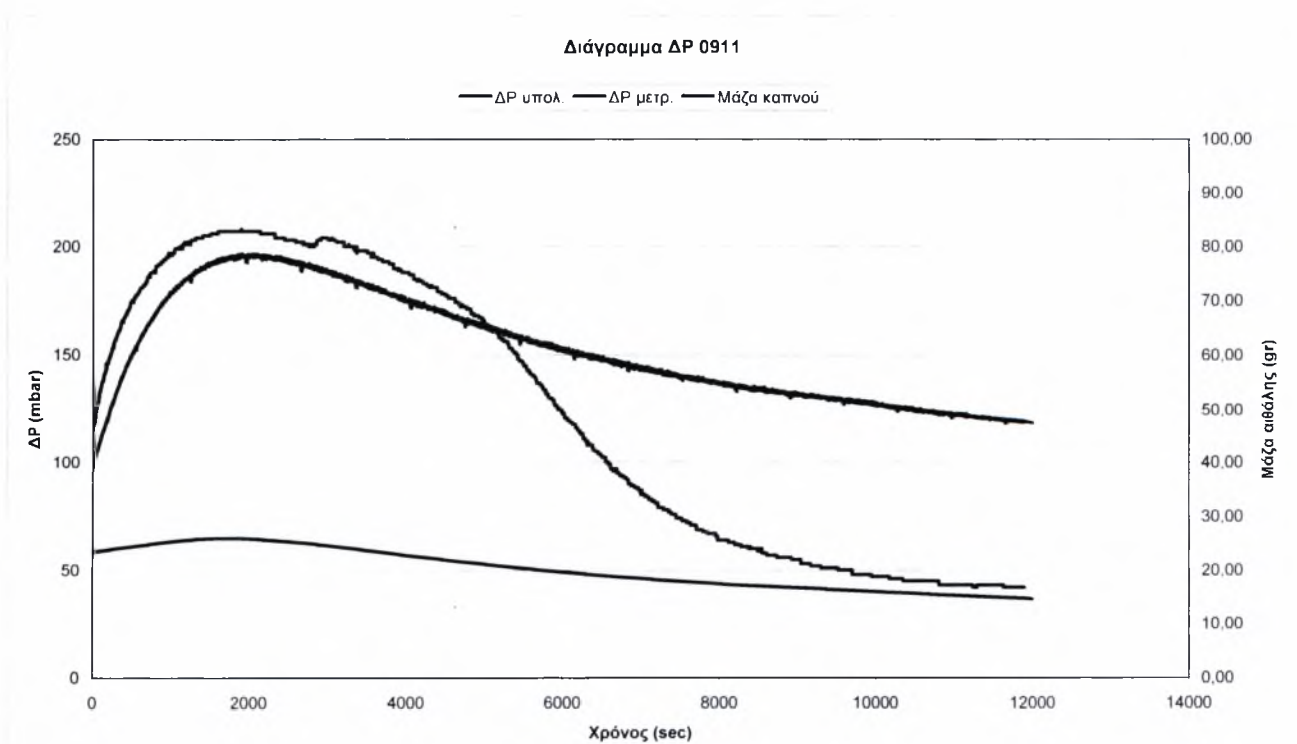
Το διάγραμμα πτώσης πίεσης της μέτρησης 0711 δείχνει ότι η αναγέννηση ξεκινάει περίπου στα 1500sec και ότι η κινητική σε αυτό το πείραμα δεν μπορεί να αποδώσει τέλεια την καύση και έτσι η προσέγγιση του ΔΡ έχει κάποιες αποκλίσεις. Θα πρέπει όμως να επαναλάβουμε ότι η επιλογή της κινητικής έγινε έτσι ώστε να μπορεί να γίνει όσο το δυνατό καλύτερος



υπολογισμός για όλες τις μετρήσεις. Μετά την αναγέννηση παραμένουν στο φίλτρο 5.79gr αιθάλης.



Σχήμα 3.9

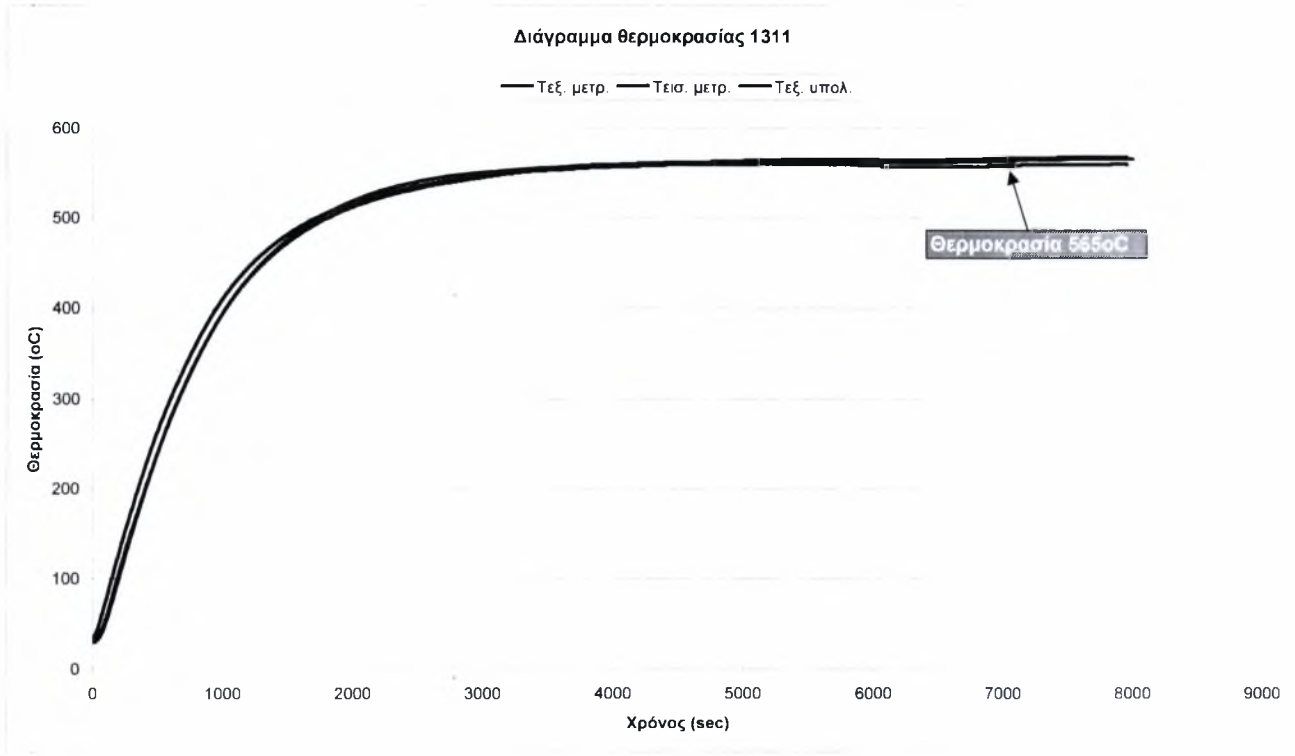


Σχήμα 3.10

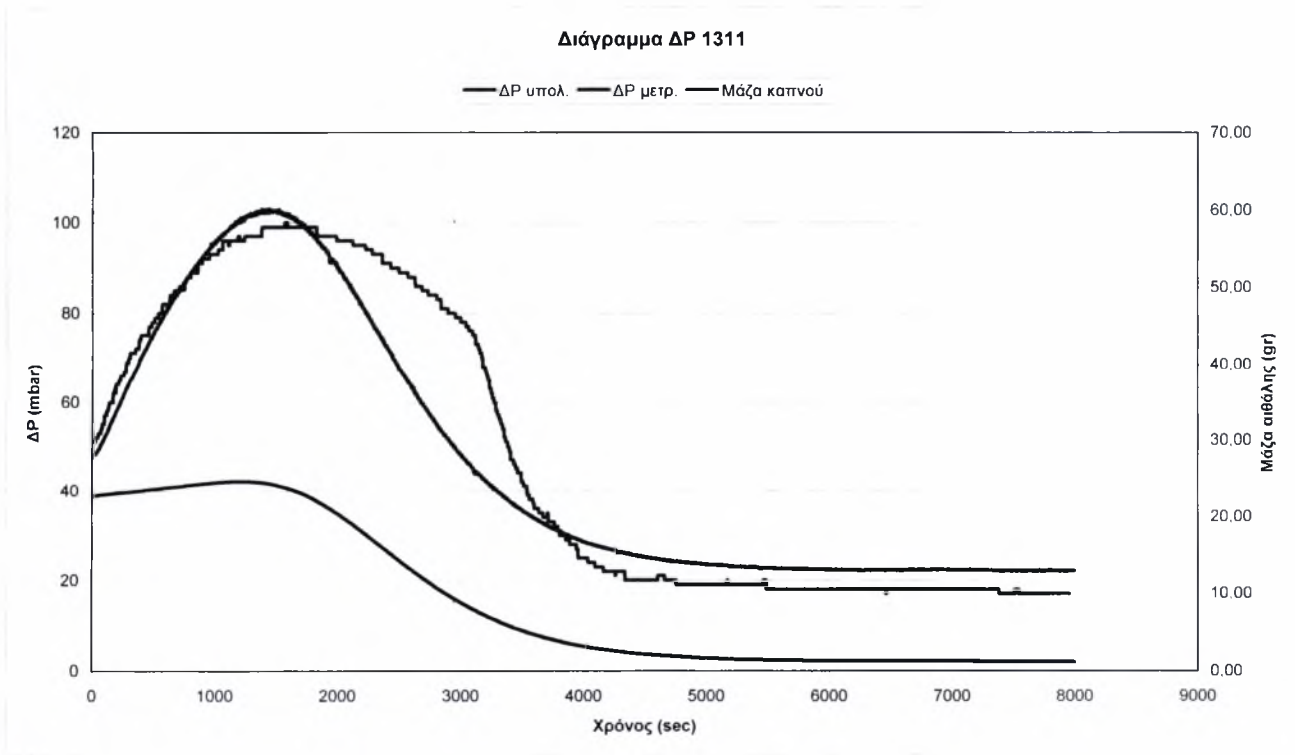
Ο υπολογισμός του ΔΡ για το πείραμα 0911 έχει απόκλιση από την μετρημένη. Η αιτία για το συγκεκριμένο πρόβλημα δεν βρέθηκε. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι στο συγκεκριμένο πείραμα, ο ρυθμός καύσης είναι πολύ



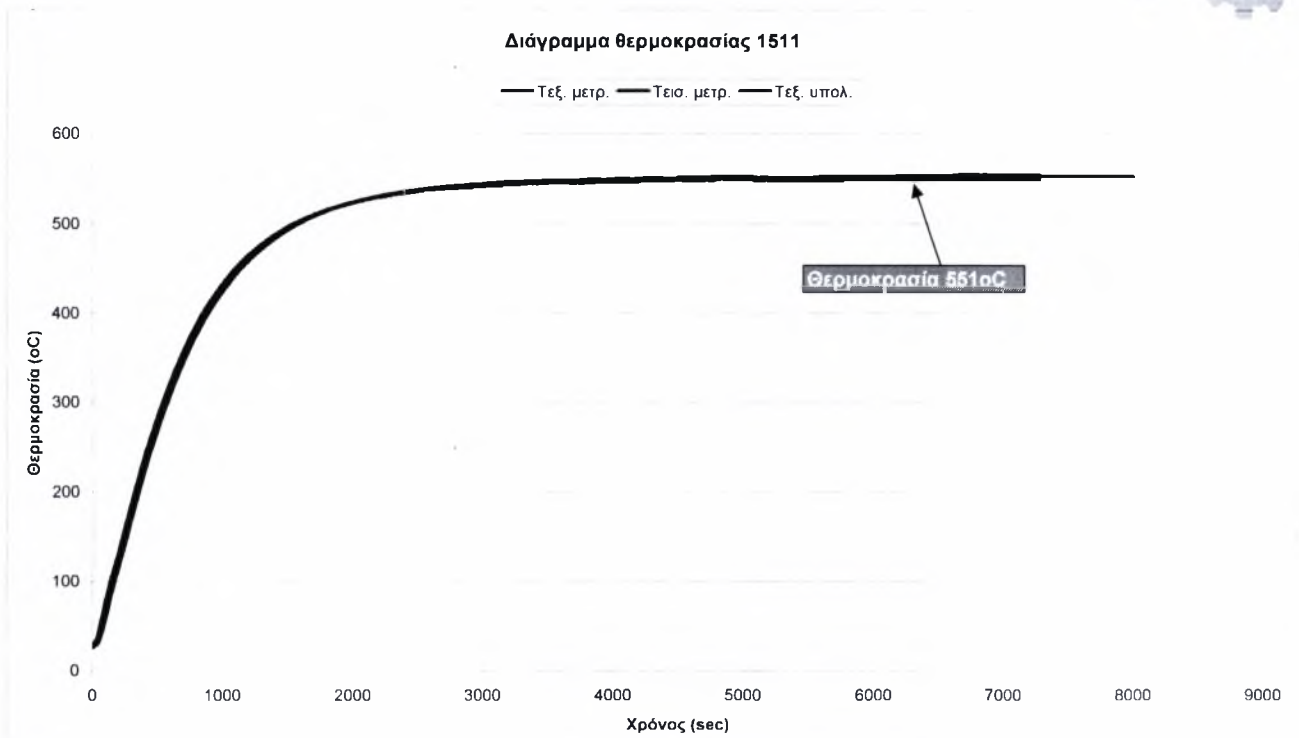
χαμηλός λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας. Έτσι οποιοδήποτε μικρό σφάλμα στην εκτίμηση κάποιων δεδομένων όπως οι εκπομπές καπνού του κινητήρα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα.



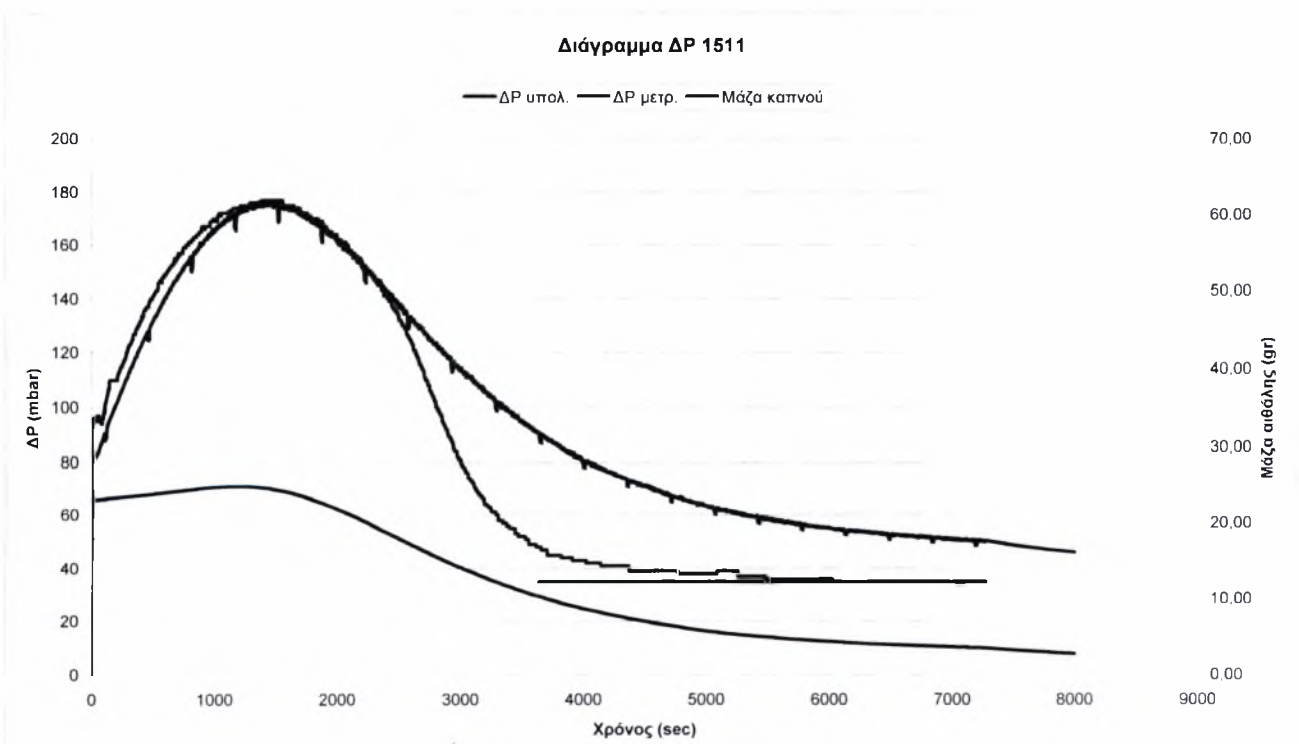
Σχήμα 3.11



Σχήμα 3.12



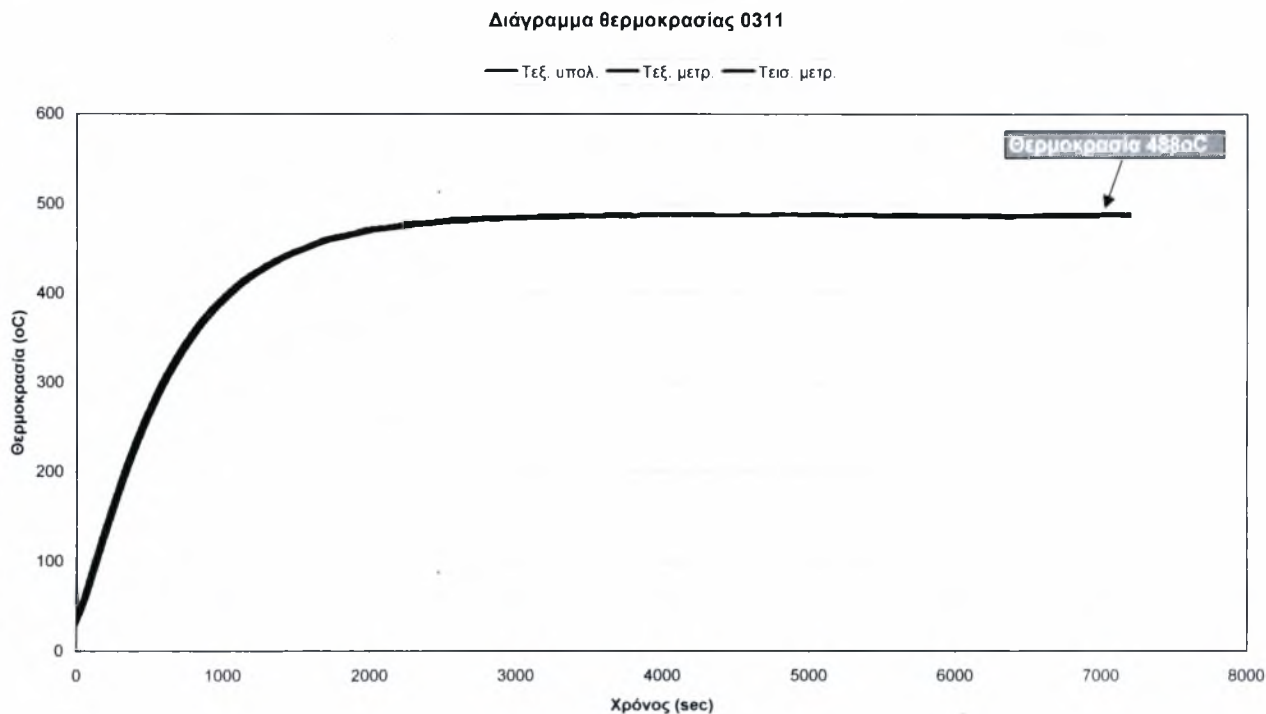
Σχήμα 3.13



Σχήμα 3.14

Από τα γραφήματα θερμοκρασίας των μετρήσεων με καπνό EUDC βλέπουμε ότι δεν υπάρχει πρόβλημα στον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου και μάλιστα τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά. Όσον αφορά τα αποτελέσματα του μοντέλου για την πτώση πίεσης μπορούμε να

πούμε ότι υπάρχουν αποκλίσεις αλλά η προσέγγιση είναι αρκετά καλή. Η αναγέννηση καθαρίζει σχεδόν πλήρως το φίλτρο στις 1311 και 1511 και η εκτίμηση της κινητικής είναι πολύ κοντά στην πραγματική. Ακολουθούν τα αποτελέσματα για τα πειράματα με καπνό από τον κύκλο ECE.

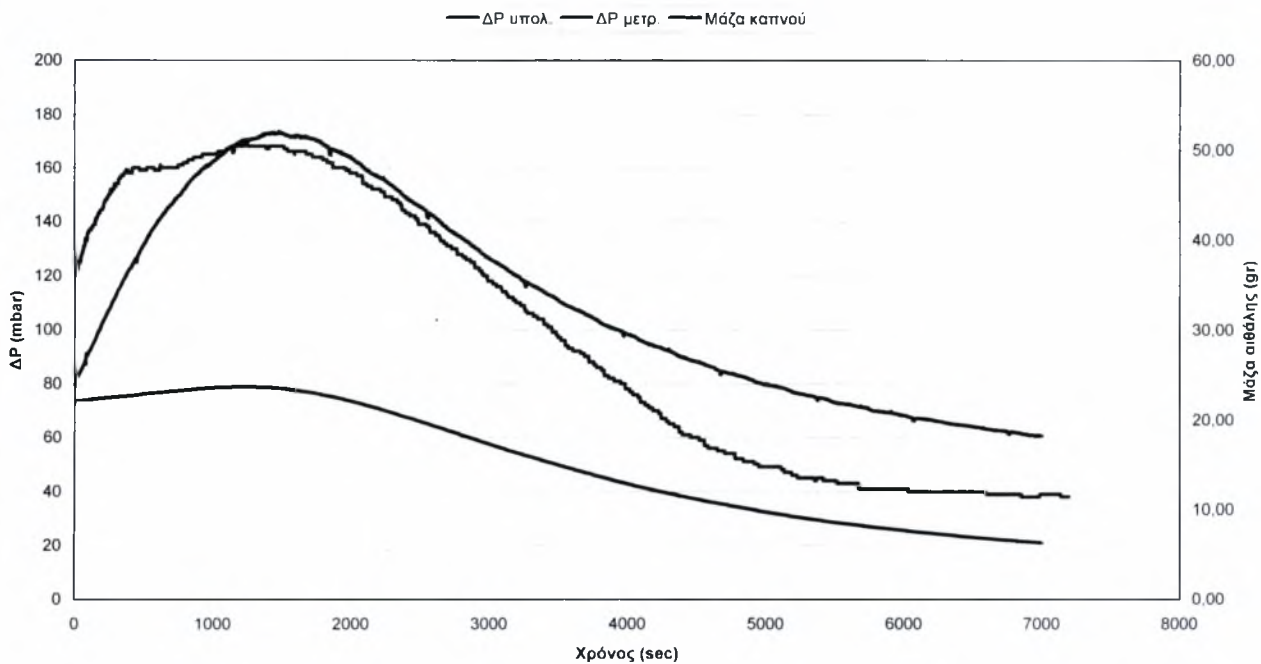


Σχήμα 3.15

Από το γράφημα θερμοκρασίας για τη μέτρηση με καπνό ECE φαίνεται ότι και εδώ δεν υπάρχει πρόβλημα στον υπολογισμό της θερμοκρασίας αλλά από το διάγραμμα ΔΡ που ακολουθεί συμπεραίνουμε ότι η προσέγγιση του ΔΡ είναι μια δύσκολη υπόθεση και δύσκολα μπορεί μια κινητική να δώσει πολύ καλά αποτελέσματα για όλα τα πειράματα. Γενικά όμως ο υπολογισμός δείχνει να είναι αρκετά κοντά στα πειραματικά δεδομένα. Παρακάτω στα διαγράμματα και για τις υπόλοιπες μετρήσεις βλέπουμε ότι ο κώδικας συμπεριφέρεται καλύτερα και η προσέγγιση της πτώσης πίεσης είναι σωστότερη.

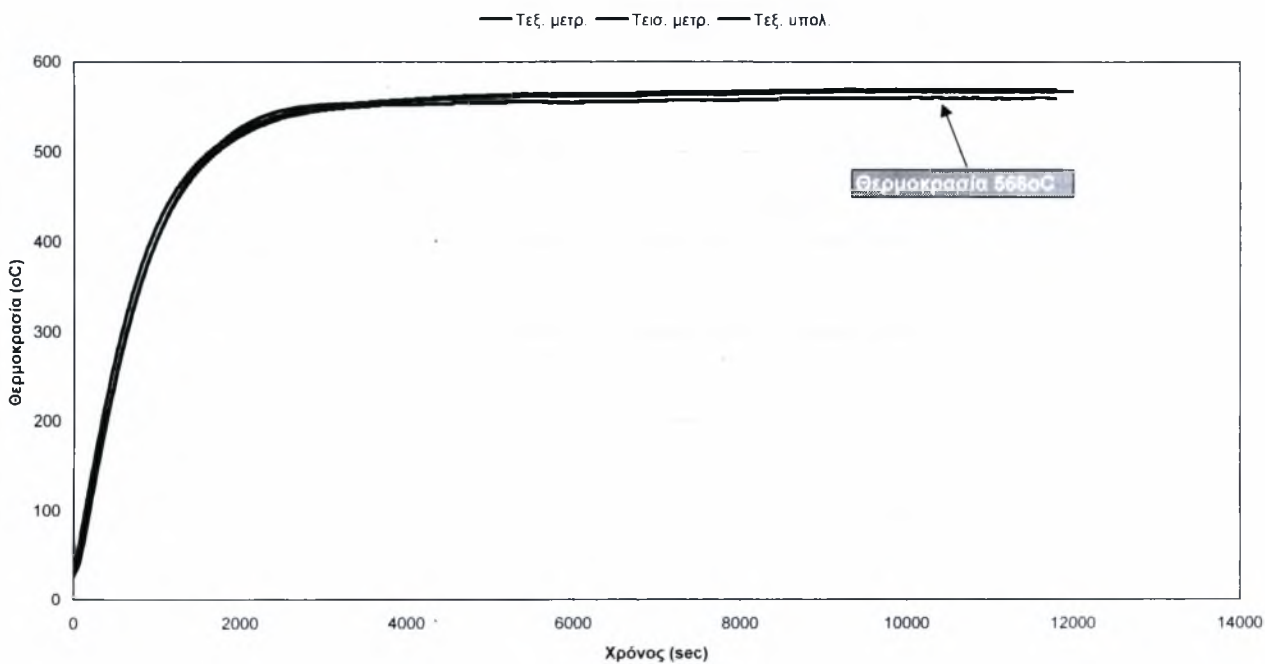


Διάγραμμα ΔΡ 0311



Σχήμα 3.16

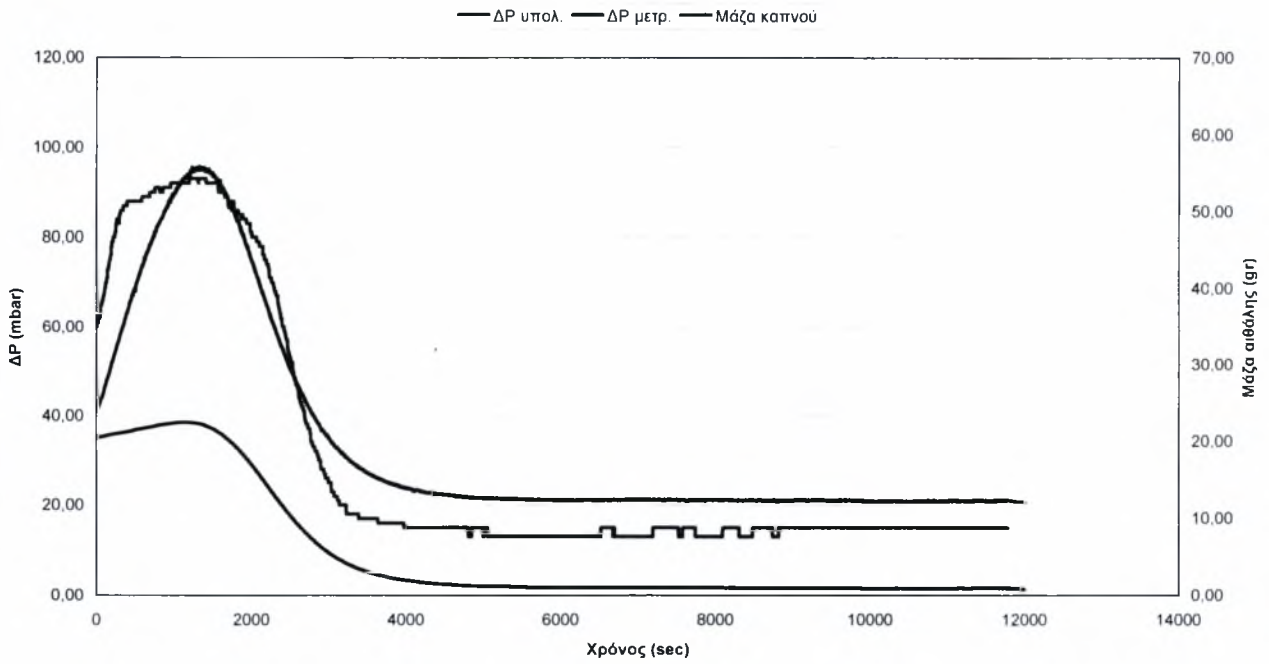
Διάγραμμα θερμοκρασίας 1711



Σχήμα 3.17

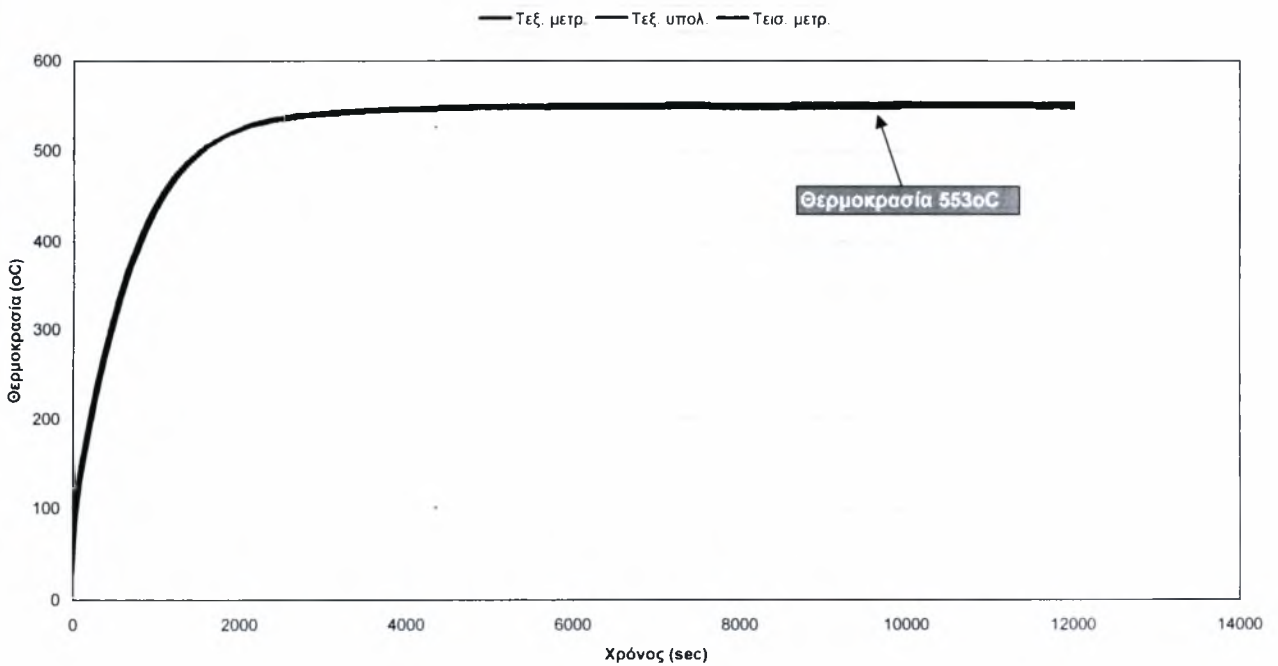


Διάγραμμα ΔΡ 1711



Σχήμα 3.18

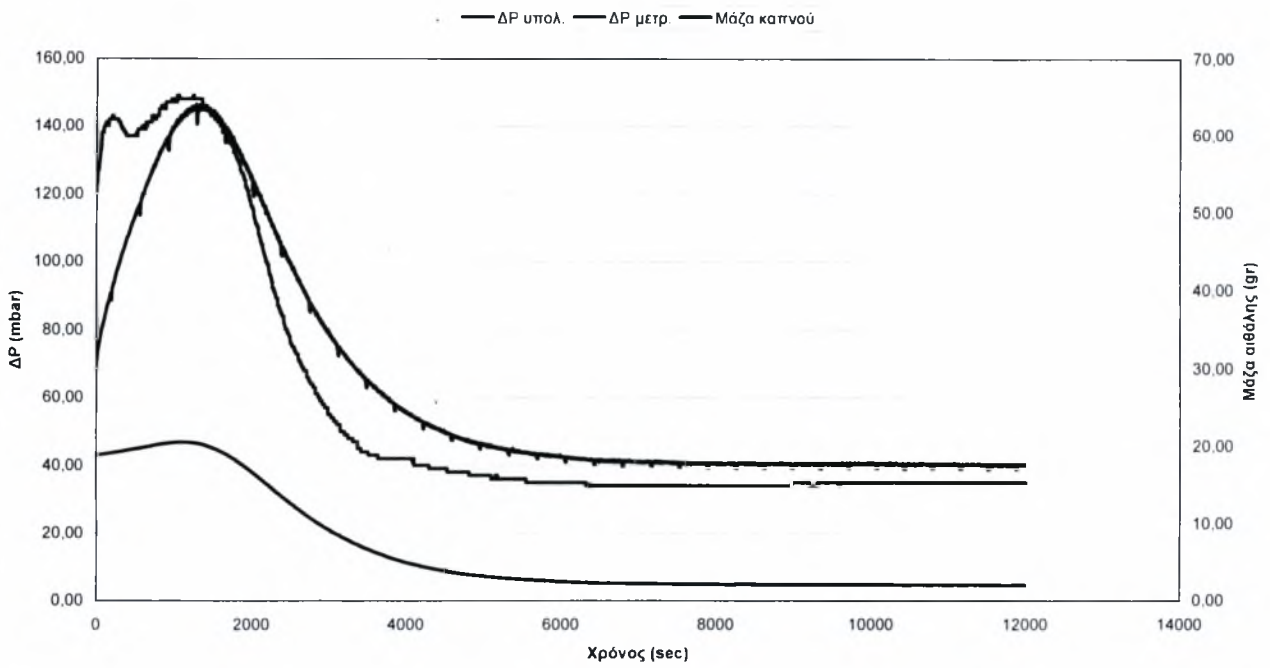
Διάγραμμα θερμοκρασίας 2111



Σχήμα 3.19

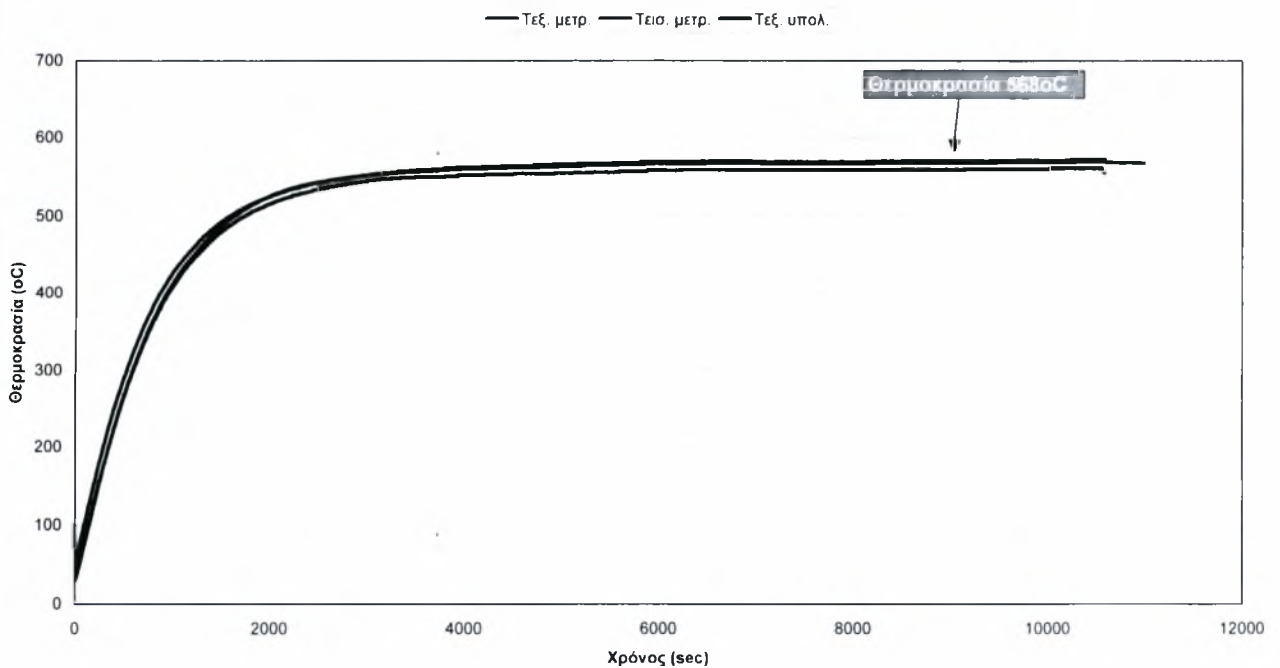


Διάγραμμα ΔΡ 2111



Σχήμα 3.20

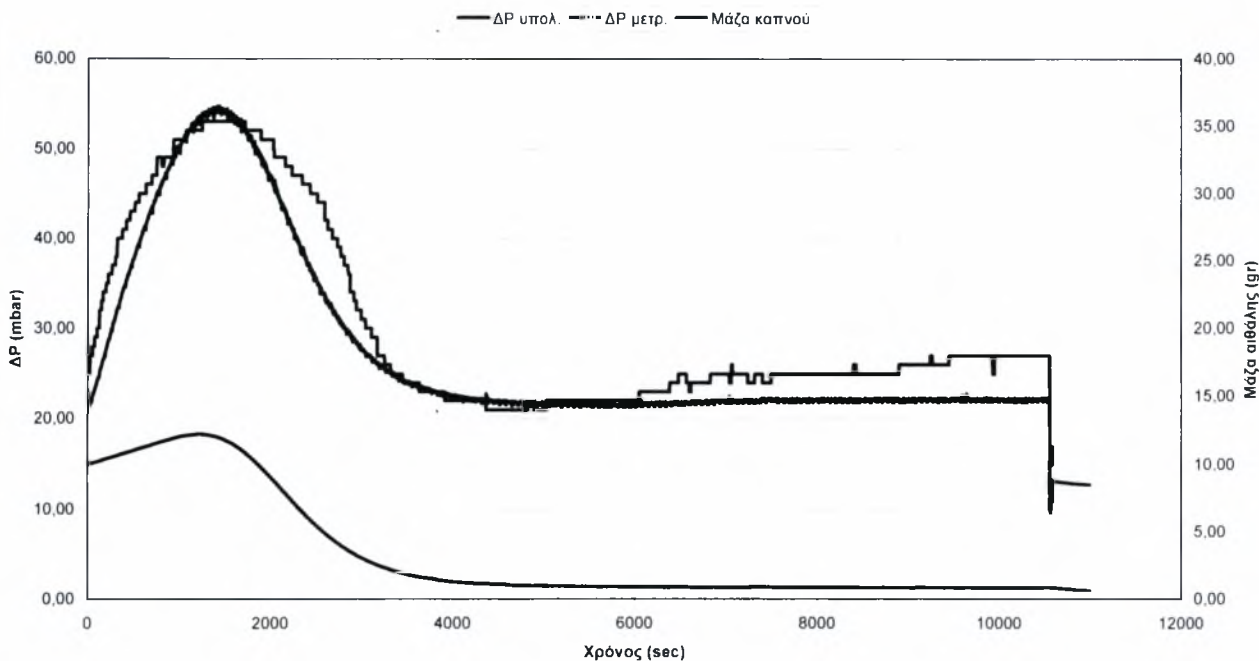
Διάγραμμα θερμοκρασίας 2311



Σχήμα 3.21

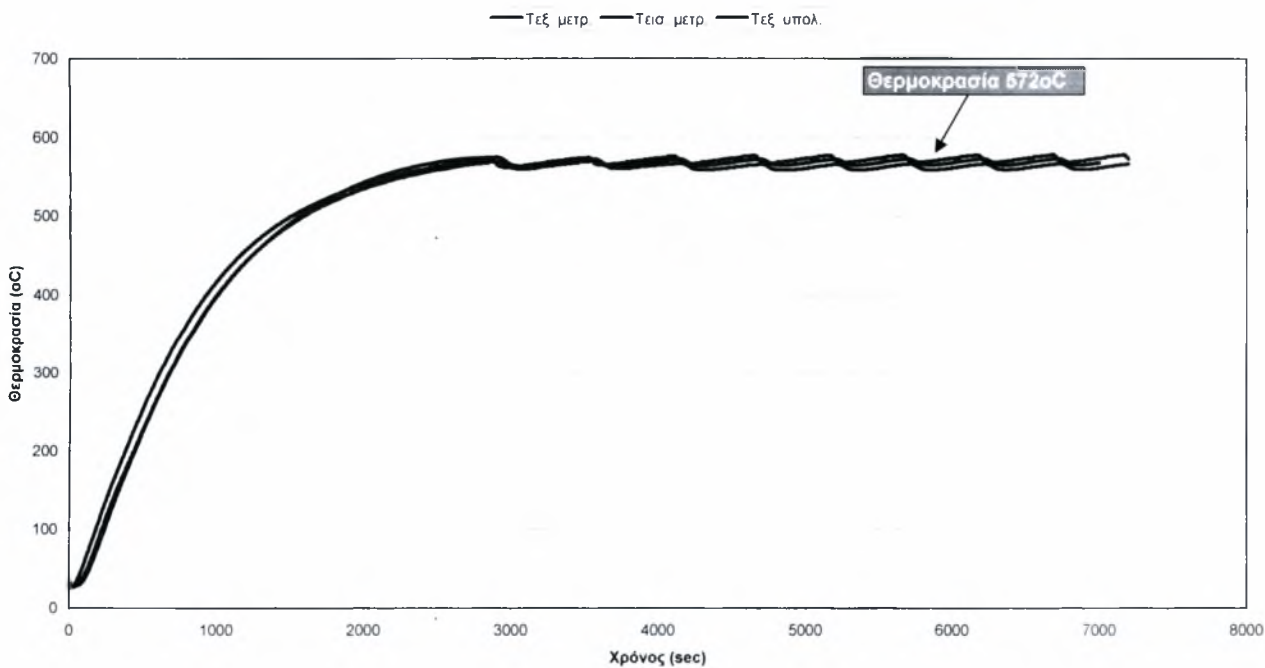


Διάγραμμα ΔΡ 2311

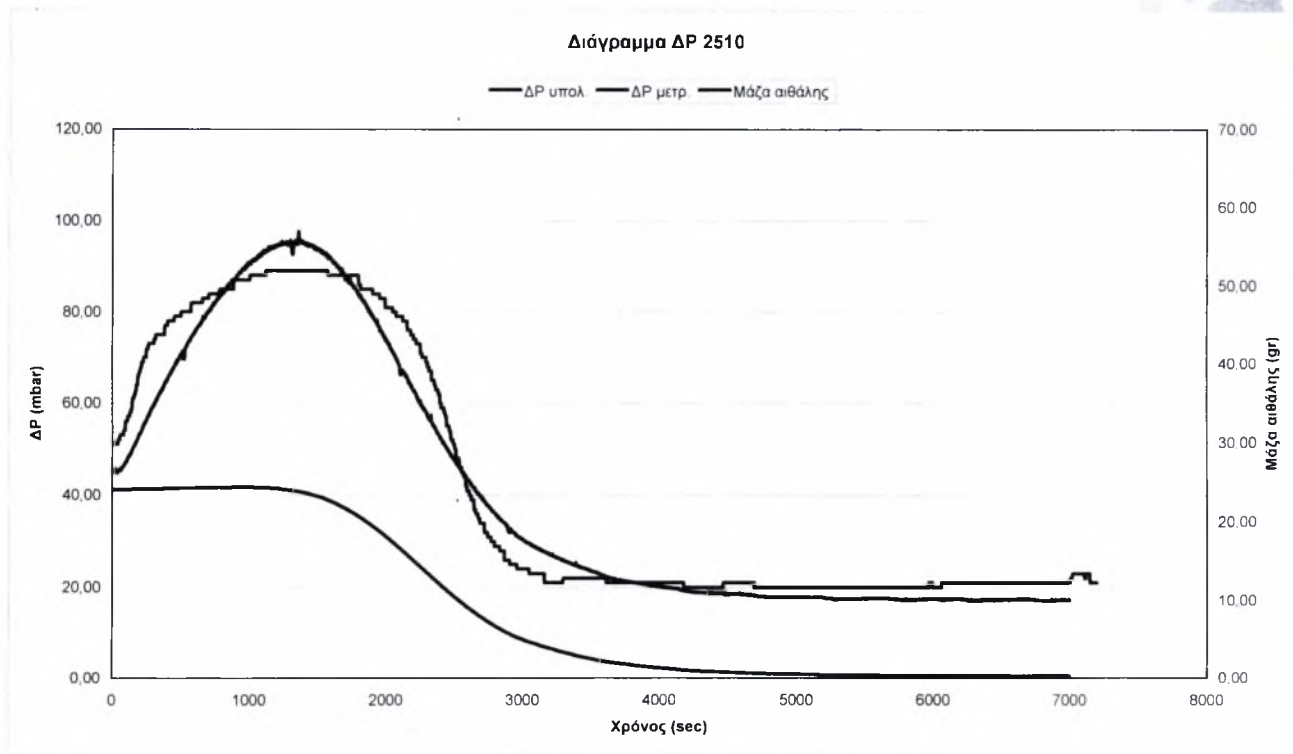


Σχήμα 3.22

Διάγραμμα θερμοκρασίας 2510

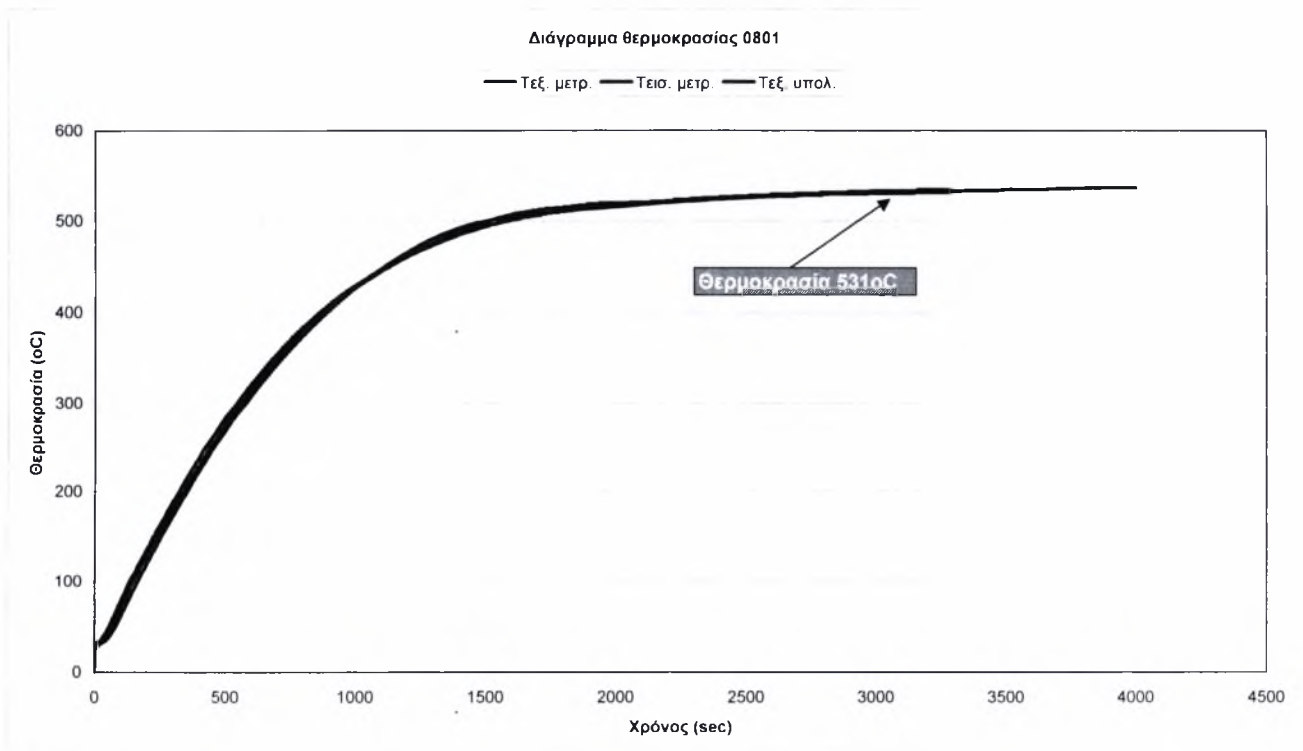


Σχήμα 3.23



Σχήμα 3.24

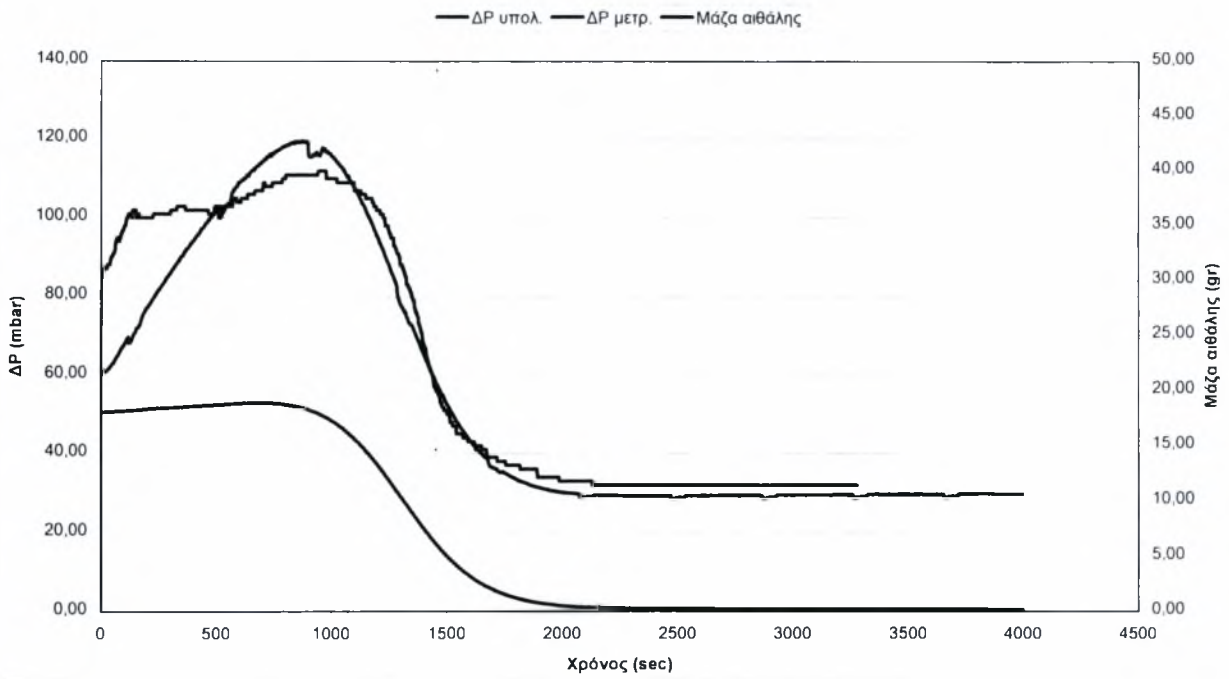
Ακολουθούν τα διαγράμματα για τις μετρήσεις με καπνό ECE και πρόσθετο.



Σχήμα 3.25

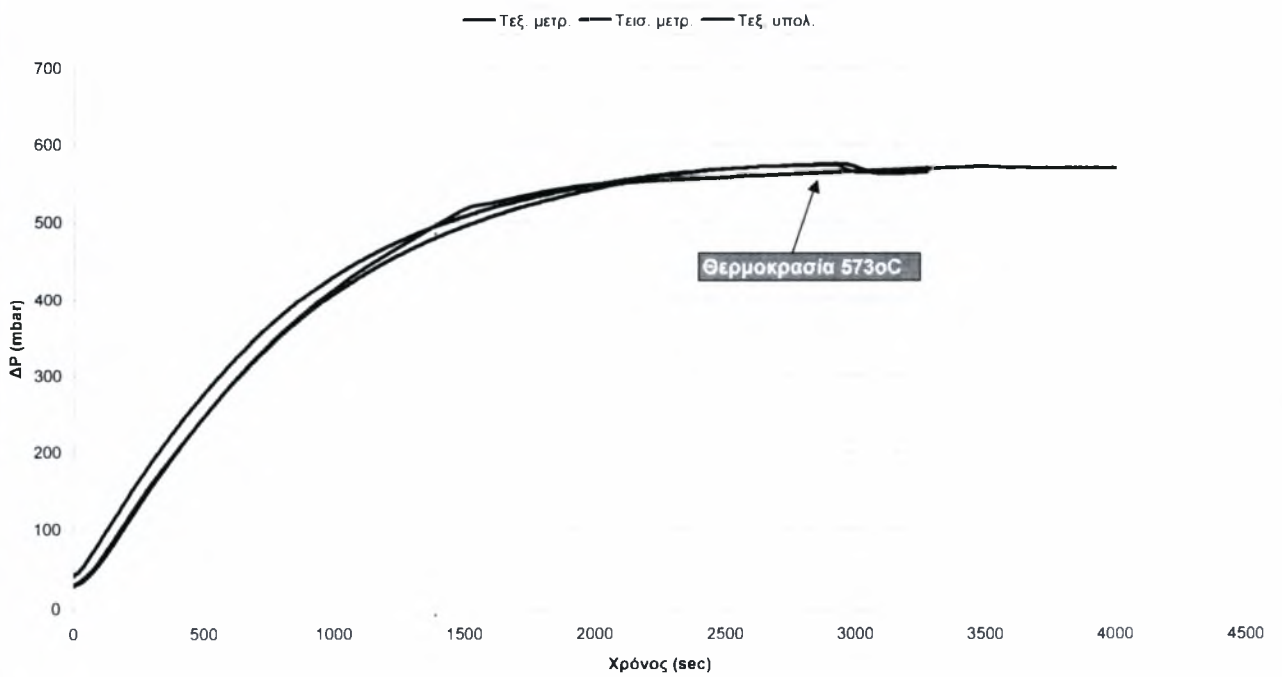


Διάγραμμα ΔΡ 0801



Σχήμα 3.26

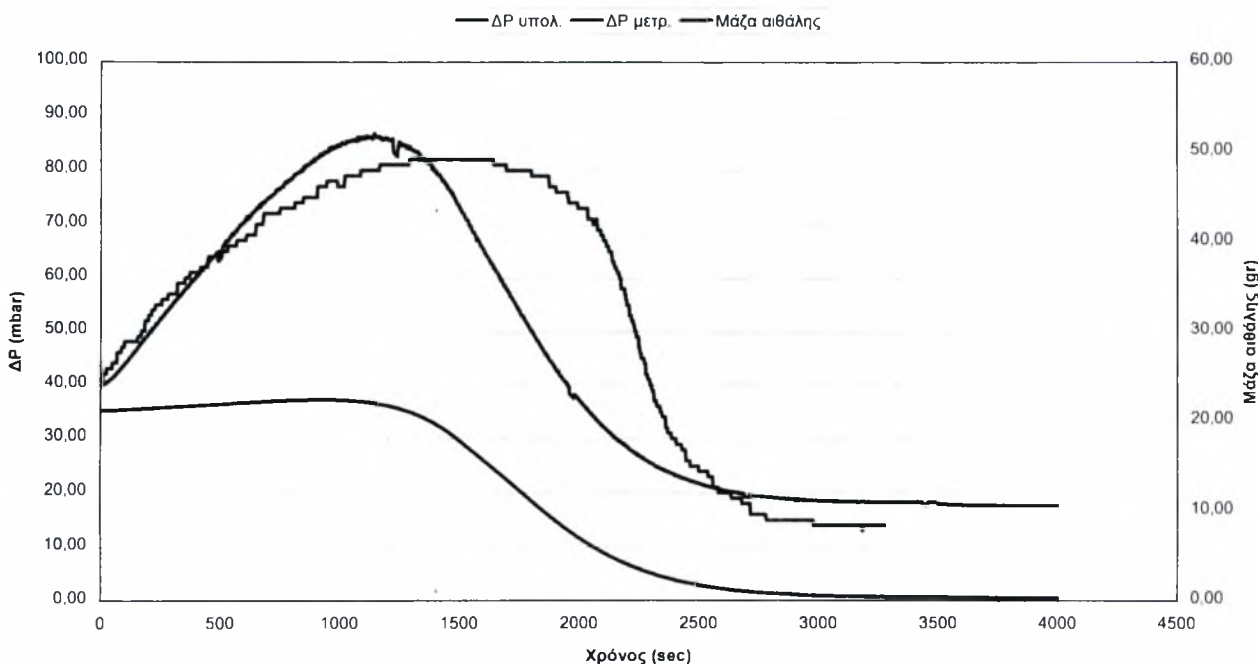
Διάγραμμα θερμοκρασίας 1912



Σχήμα 3.27



Διάγραμμα ΔΡ 1912



Σχήμα 3.28

3.4 Υπολογισμός σφάλματος υπολογισμού, λόγου αναγέννησης, ποσοστού SOF και μάζας αιθάλης.

Ο υπολογισμός του σφάλματος μεταξύ του υπολογισμένου και του μετρημένου ΔΡ και του σφάλματος για την θερμοκρασίας εξόδου έγινε χρησιμοποιώντας απλώς μια σχέση που θα έδινε μια εκτίμηση της απόκλισης. Αυτό είχε σκοπό να δώσει μια ενδεικτική τιμή για το πόσο καλά έγινε η ρύθμιση των παραμέτρων και κυρίως η κινητική. Αυτό ήταν και ένα από τα εργαλεία για την εύρεση της όσο το δυνατόν καλύτερης κινητικής της οξειδωσης του καπνού. Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε είναι

$$\text{Σφάλμα} = \frac{\Delta P_{\text{μετρ.}} - \Delta P_{\text{υπολ.}}}{\Delta P_{\text{μετρ.}}} \text{ για το } \Delta P \text{ και}$$

$$\text{Σφάλμα} = \frac{T_{\epsilon\xi_{\text{μετρ.}}} - T_{\epsilon\xi_{\text{υπολ.}}}}{T_{\epsilon\xi_{\text{μετρ.}}}} \text{ για τη θερμοκρασία}$$

στη συνέχεια αθροίζουμε το σφάλμα για κάθε χρονική στιγμή και το διαιρούμε με το χρόνο που διαρκεί το πείραμα. Αυτό μας δίνει το μέσο σφάλμα για τον υπολογισμό του ΔΡ και της θερμοκρασίας εξόδου.



Ο πίνακας 3.4 δείχνει το σφάλμα υπολογισμού της πτώσης πίεσης και της θερμοκρασίας εξόδου.

Μέτρηση	Μέσο σφάλμα υπολογισμού ΔΡ %		Μέσο σφάλμα υπολογισμού Τεξ. %	
	Πριν την αναγέννηση	Στη διάρκεια της αναγέννησης	Πριν την αναγέννηση	Στη διάρκεια της αναγέννησης
0311	11.47	29.74	2.17	0.07
0711	3.14	20.34	1.36	1.30
0911	2.49	65.64	0.86	0.34
1311	3.36	4.69	0.60	0.35
1511	1.42	12.16	0.45	0.17
1711	7.22	10.14	0.71	0.86
2111	7.19	3.41	0.75	0.21
2311	3.96	8.68	1.14	0.65
2510	4.09	8.68	0.79	0.57
0801	5.77	5.27	1.24	0.09
1912	2.43	9.48	1.34	0.58

Πίνακας 3.4

Ο λόγος αναγέννησης (Regeneration Ratio) είναι ο λόγος της μάζας αιθάλης που μένει στο φίλτρο μετά την αναγέννηση προς την αρχική και δείχνει το ποσοστό καπνού που δεν κάηκε. Όσο μικρότερος είναι ο λόγος αυτός τόσο καλύτερη είναι η αναγέννηση. Ο πίνακας 3.5 δείχνει τον λόγο αναγέννησης για όλες τις μετρήσεις.

Μέτρηση	Παροχή καυσαερίου (Kg/sec)	Αρχική μάζα καπνού (gr)	% O ₂	Κύκλος φόρτισης	Συγκέντρωση προσθέτου (ppm)	Τελική μάζα καπνού (gr)	Λόγος αναγέννησης	% καπνός που παραμένει
0311	0.054	19.5	15	ECE	0	6.34	0.325	32.5
0711	0.027	20	10	EUDC	0	5.79	0.289	28.9
0911	0.055	23.4	16	EUDC	0	14.6	0.623	62.3
1311	0.027	22.6	15	EUDC	0	1.13	0.05	5
1511	0.05	22.9	8	EUDC	0	2.77	0.12	12
1711	0.027	20.4	14	ECE	0	0.8	0.039	3.9
2111	0.051	18.8	9	ECE	0	1.97	0.104	10.4
2311	0.030	10	16	ECE	0	0.61	0.061	6.1
2510	0.026	24	9	ECE	0	0.25	0.01	1
0801	0.051	18	9	ECE	25	0.134	0.007	0.7
1912	0.027	21	9	ECE	25	0.267	0.012	1.2

Πίνακας 3.5

Στις περισσότερες μετρήσεις η παγίδα καθαρίζει σχεδόν όλη αφού παραμένει λιγότερο από το 10% της αρχικής μάζας καπνού. Δεν φαίνεται να



υπάρχει καμιά ιδιαίτερη επίδραση στο λόγο αναγέννησης από το αν ο καπνός προέρχεται από κύκλο EUDC ή ECE.

Το ποσοστό SOF στον καπνό είναι σημαντικό να εκτιμηθεί και να αφαιρεθεί από την αρχική φόρτιση επειδή η ύπαρξη υδρογονανθράκων στον καπνό επηρεάζει τη διαπερατότητα των σωματιδίων αιθάλης, προκαλεί επιπλέον ΔΡ αλλά και λανθασμένο υπολογισμό της μάζας σε κάθε χρονική στιγμή.

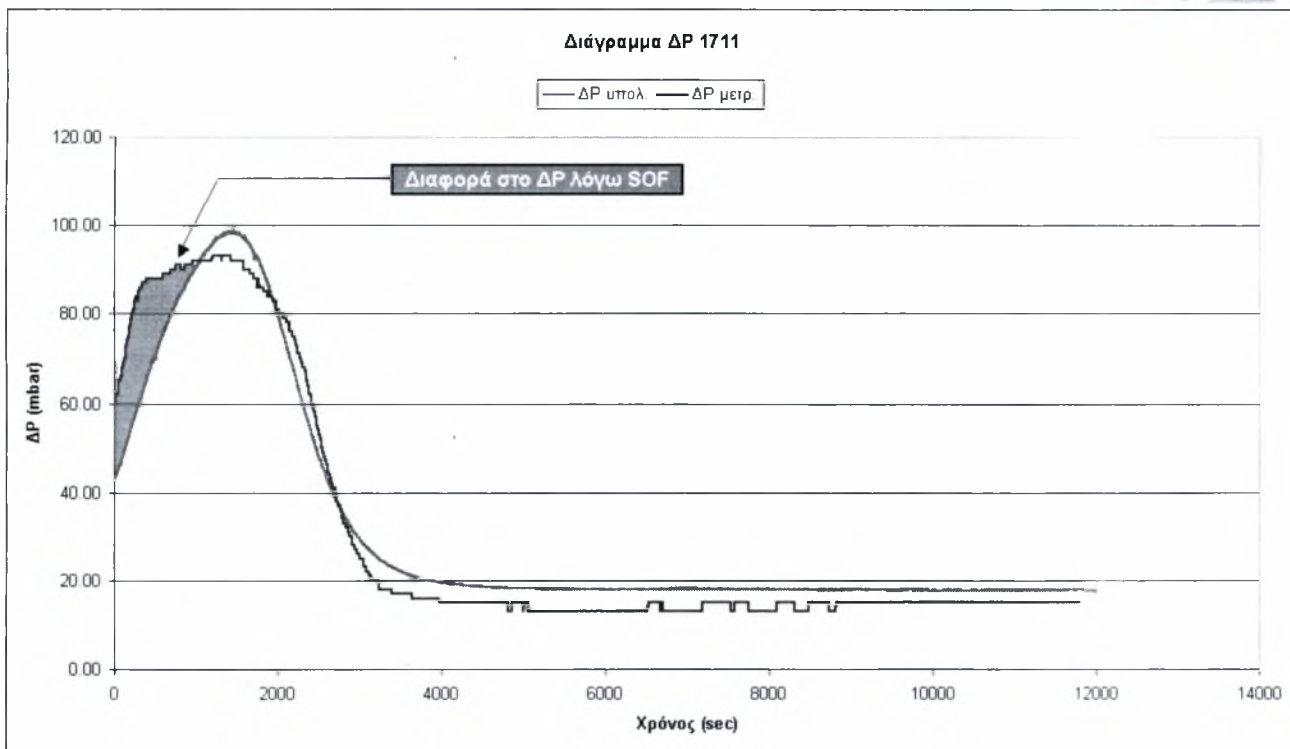
Η φόρτιση για κάθε πείραμα σύμφωνα με τα στοιχεία του IFP και η μάζα που θεωρήθηκε ώστε να λάβουμε υπόψη την ύπαρξη HC στον καπνό παρουσιάζεται στον πίνακα 3.6.

Μέτρηση	Κύκλος φόρτισης	Μάζα (gr) σύμφωνα με το IFP	Μάζα (gr) χωρίς SOF	% SOF
0311	ECE	24.6	19.5	20.7
0711	EUDC	23.9	20	16.3
0911	EUDC	24.4	23.4	4
1311	EUDC	23.6	22.6	4
1511	EUDC	23.9	22.9	4.1
1711	ECE	25.2	20.4	19
2111	ECE	25.1	18.8	25
2311	ECE	12.8	10	21.8
2510	ECE	24	24	0
0801	ECE	23.9	18	24.6
1912	ECE	29.4	21	28.5

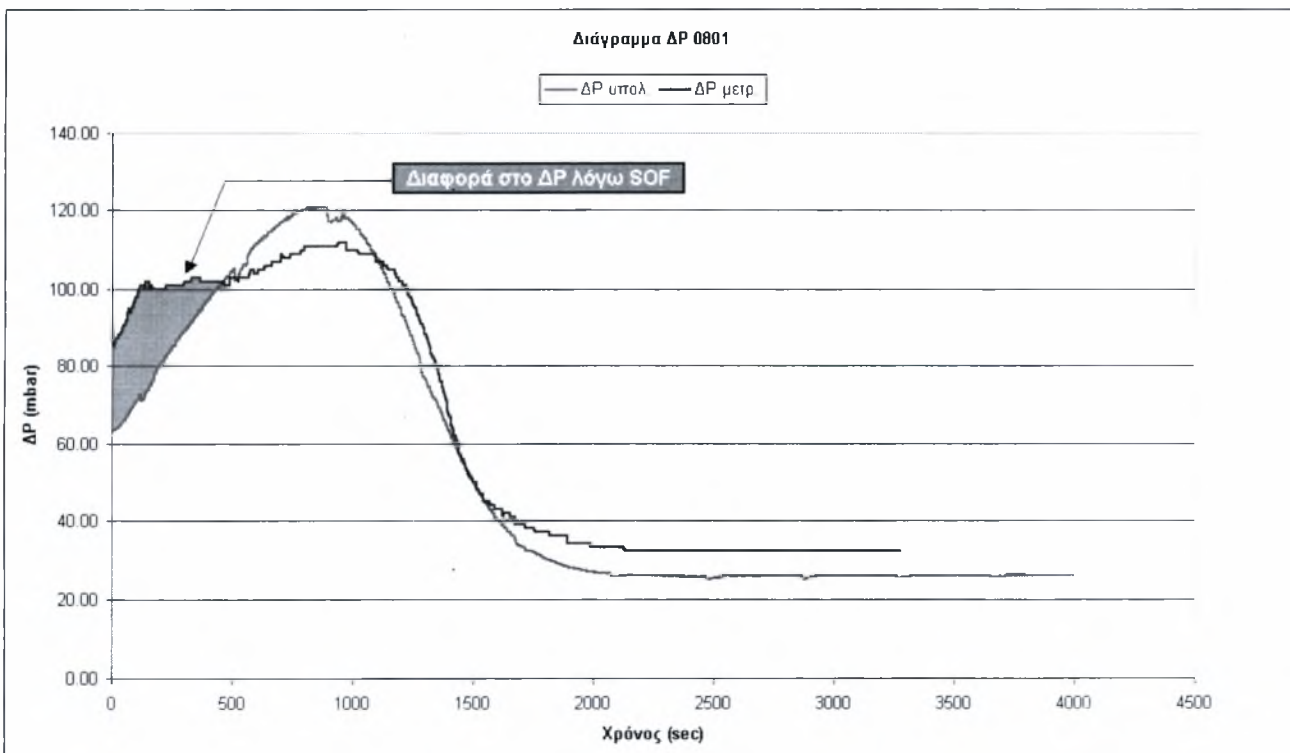
Πίνακας 3.6

Η περιεκτικότητα SOF στον καπνό από τον κύκλο EUDC φαίνεται να είναι σημαντικά μικρότερη από τον καπνό του κύκλου ECE αφού στις 3 από τις 4 μετρήσεις (η μέτρηση 0711 έχει 16.3%) με καπνό από κύκλο EUDC το ποσοστό SOF είναι 4%. Αντίθετα στον καπνό από τον κύκλο ECE ο μέσος όρος των περισσότερων μετρήσεων (ο καπνός στην μέτρηση 2510 δείχνει να μην έχει HC) του SOF είναι 23.26%.

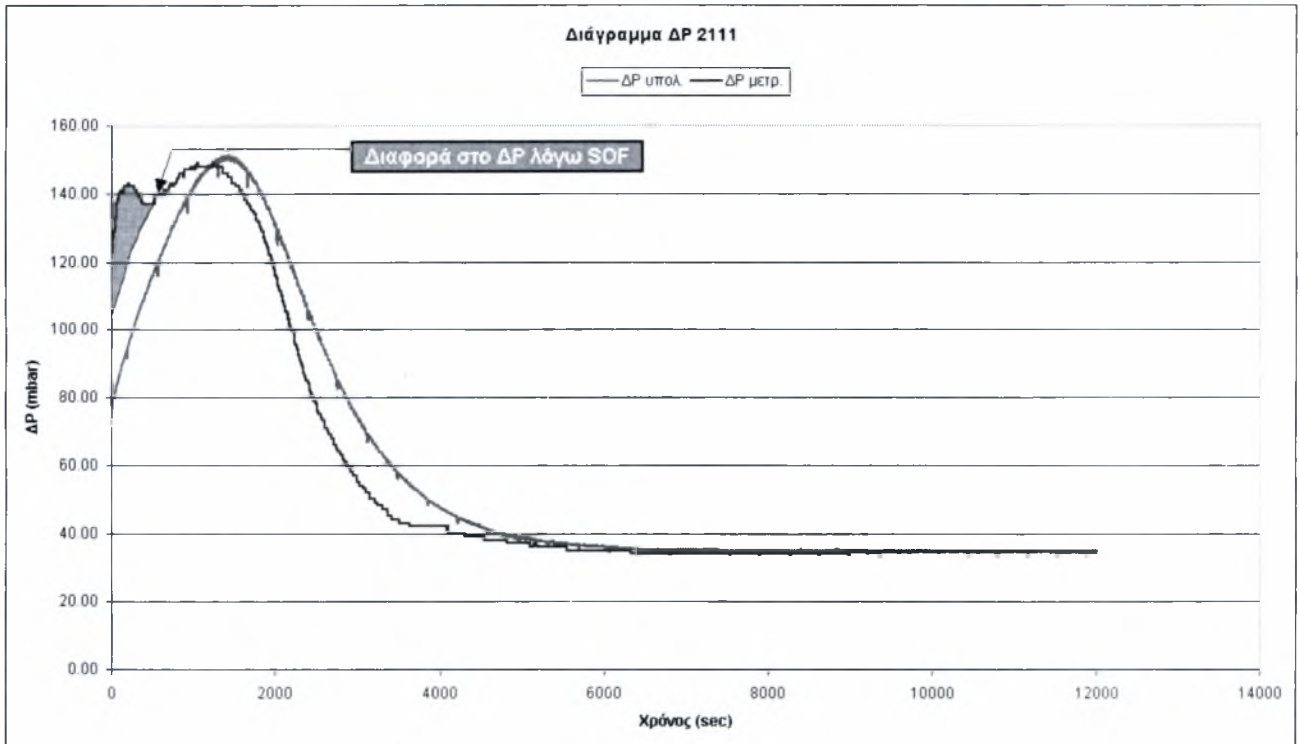
Τα σχήματα που ακολουθούν δείχνουν την διαφορά του μετρημένου ΔΡ από το υπολογισμένο το οποίο δεν λαμβάνει υπόψη του το SOF στον καπνό. Η αιθάλη πριν η θερμοκρασία ανέβει αρκετά ώστε να γίνει εκρόφηση του SOF, έχει μικρότερη διαπερατότητα και έτσι η αντίθλιψη του φίλτρου είναι μεγαλύτερη.



Σχήμα 3.29



Σχήμα 3.30



Σχήμα 3.31

Η πτώση πίεσης στο φίλτρο υπολογίζεται από το νόμο του Darcy

$$\Delta P = \frac{\mu}{k_p} v_w w + \frac{\mu}{k_s} v_w w_s$$

Όπου :

- μ το ιξώδες του καυσαερίου
- k_p η διαπερατότητα του στρώματος καπνού
- v_w η ταχύτητα στο τοίχωμα (m/sec)
- w το πάχος του στρώματος καπνού (m)
- k_s η διαπερατότητα του τοιχώματος
- w_s το πάχος του τοιχώματος (m)

ο πρώτος όρος της εξίσωσης εκφράζει την πτώση πίεσης λόγω της ροής μέσα από το στρώμα καπνού και ο δεύτερος λόγω της ροής μέσα από τοίχωμα, έτσι αν υπολογίσουμε το ΔP της καθαρής παγίδας και το αφαιρέσουμε από το συνολικό μπορούμε να βρούμε το ΔP που οφείλεται στον καπνό. Η εξίσωση που δίνει το ΔP λόγω του καπνού μπορεί να εκφραστεί με κατάλληλες μετατροπές ως προς τη μάζα καπνού.

$$\Delta P = \frac{m_g m_p \mu R T_{exh}}{p_{exh} A_f^2 \rho_p k_p}$$



Όπου :

m_g η παροχή καυσαερίου (kg/sec)

m_p η μάζα καπνού (kg)

R η σταθερά των αερίων ($m^3Pa/moleK$)

T_{exh} η θερμοκρασία του καυσαερίου στην εξαγωγή

p_{exh} η πίεση στην εξαγωγή

A_f η συνολική επιφάνεια κατακράτησης σωματιδίων

ρ_p η πυκνότητα του στρώματος καπνού

Αν λύσουμε την εξίσωση ως προς την μάζα βρίσκουμε την ποσότητα αιθάλης στο φίλτρο για κάθε χρονική στιγμή.

$$m_p = \frac{\Delta P p_{exh} A_f^2 \rho_p k_p}{m_g \mu R T_{exh}}$$

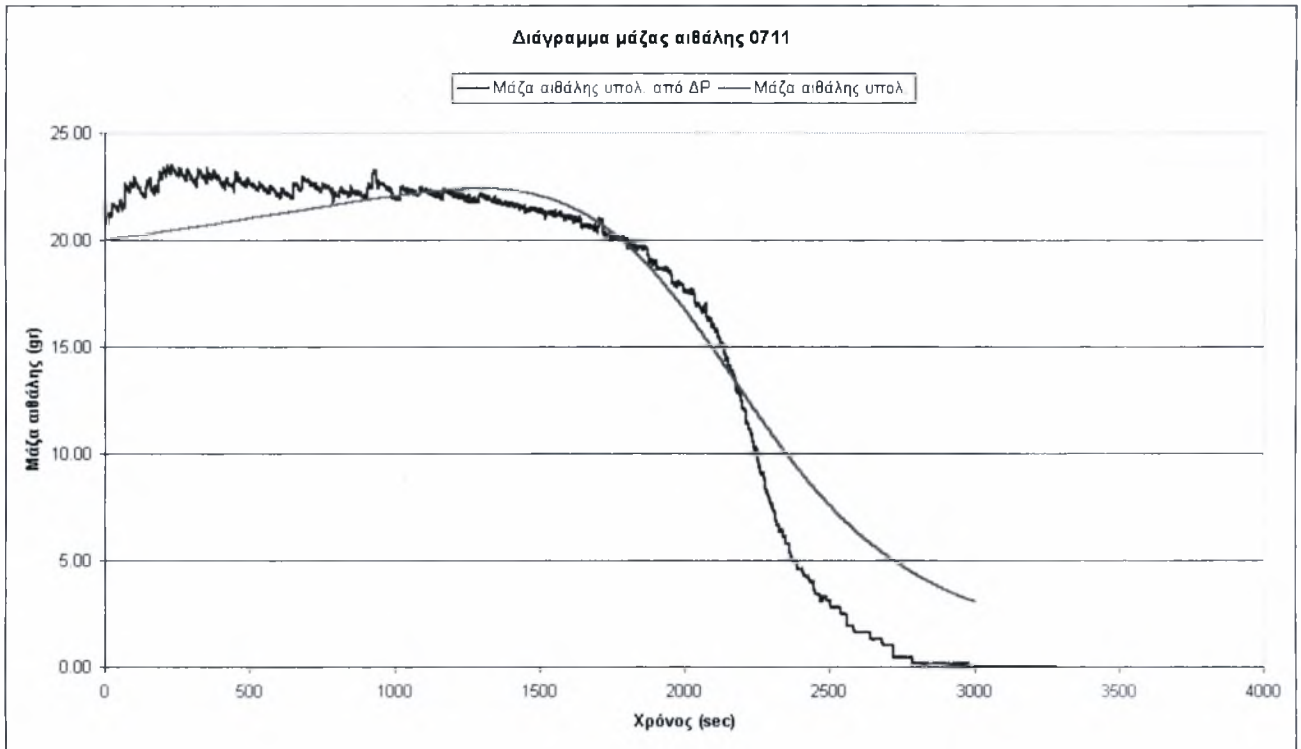
Το ιξώδες εξαρτάται από τη θερμοκρασία και ισχύει :

$$\mu = 0.355 \times 10^{-6} \times T^{0.679}$$

όπως και το γινόμενο $\rho_p k_p$ εξαρτάται από τη θερμοκρασία και είναι :

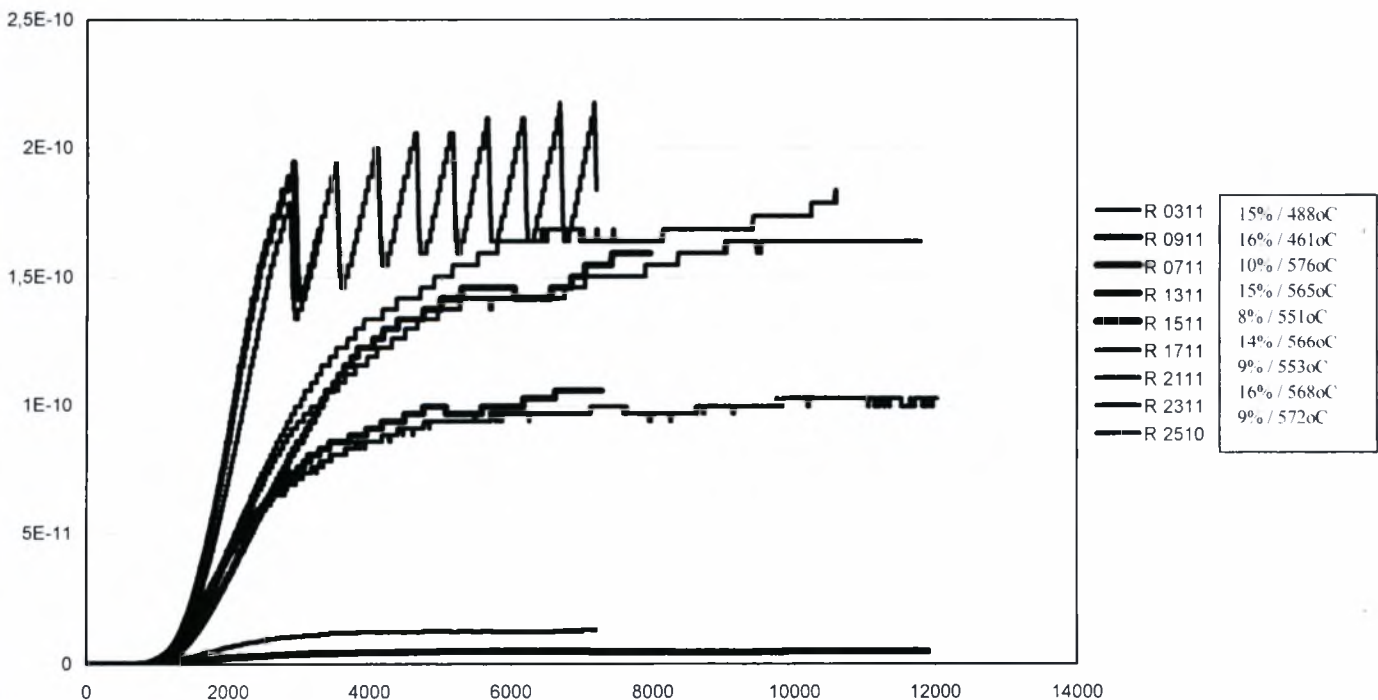
$$\rho_p k_p = 10^{-12} \times \frac{T}{400}$$

και η συνολική επιφάνεια κατακράτησης σωματιδίων είναι : $A_f = \text{αριθμός ανοιχτών καναλιών} \times \text{περίμετρος καναλιού} \times \text{μήκος καναλιού}$. Το κάθε κανάλι του φίλτρου έχει πλευρά 1.53mm και το μήκος του καναλιού είναι 152mm-10mm αν αφαιρέσουμε την τάπα και ο αριθμός των ανοιχτών καναλιών είναι μισά από τα συνολικά κανάλια. Επίσης θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε τη υπολογισμένη μάζα με ένα συντελεστή διόρθωσης λόγω της μεταβολής της ενεργής επιφάνειας λόγω της συσσώρευσης καπνού περίπου ίσο με 10. Το σχήμα δείχνει τη σύγκριση της με αυτή που υπολογίζει ο κώδικας για την μέτρηση 0711.



Σχήμα 3.32

Η σύγκριση του ρυθμού καύσης R για τις μετρήσεις χωρίς πρόσθετο φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 3.33



Η σύγκριση του ρυθμού καύσης για πειράματα χωρίς πρόσθετο δείχνει ότι ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο τον ρυθμό είναι η θερμοκρασία και έπειτα η συγκέντρωση O_2 στο καυσαέριο. Οι ρυθμοί καύσης των μετρήσεων 0711 και 2510 είναι οι μεγαλύτεροι, ακολουθούν ο ρυθμός καύσης στις περιπτώσεις 2311, 1311, 1711, στα πειράματα 1511, 2111 και στη συνέχεια 0311 και 0911. Ο πίνακας 3.8 δείχνει την θερμοκρασία αναγέννησης και την συγκέντρωση O_2 για όλες τις μετρήσεις.

Μέτρηση	Θερμοκρασία αναγέννησης (°C)	Συγκέντρωση O_2 %
0711	576	10
2510	572	9
2311	568	16
1311	565	15
1711	566	14
1511	551	8
2111	553	9
0311	488	15
0911	461	16

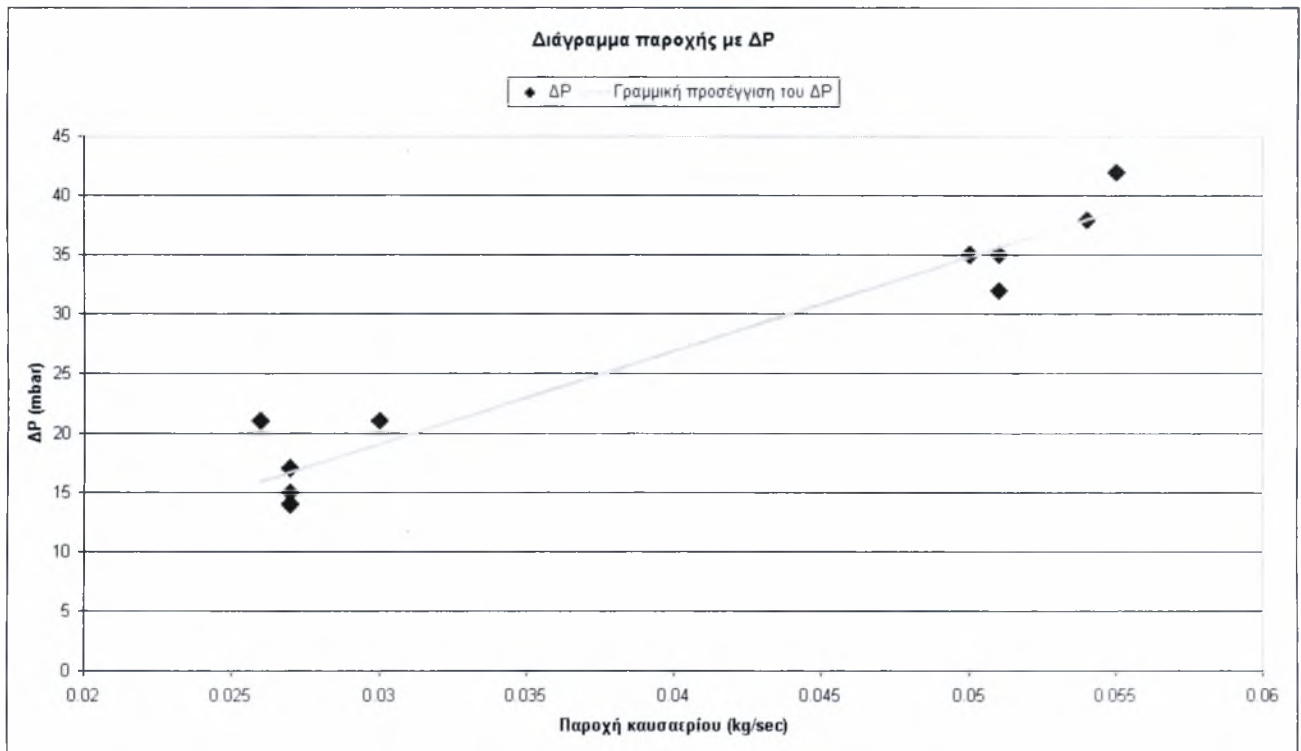
Σχήμα 3.8

Ο πίνακας 3.9 δείχνει την σχέση παροχής καυσαερίου και ΔP όταν η παγίδα είναι καθαρή για όλες τις μετρήσεις.

Μέτρηση	Παροχή καυσαερίου (Kg/sec)	ΔP (mbar)
0311	0.054	38
0711	0.027	14
0911	0.055	42
1311	0.027	17
1511	0.05	35
1711	0.027	15
2111	0.051	35
2311	0.030	21
2510	0.026	21
0801	0.051	32
1912	0.027	14

Πίνακας 3.9

Το σχήμα 3.34 δείχνει το ΔP σε σχέση με την παροχή.



Σχήμα 3.34

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η σχέση του ΔΡ και παροχής είναι γραμμική για το εύρος τιμών παροχής που μελετάται εδώ και η απεικόνιση του φαίνεται στο σχήμα 3.34. Η απεικόνιση του ΔΡ και παροχής θα ήταν καλύτερη αν υπήρχαν περισσότερα σημεία λειτουργίας με παροχή μεταξύ 0.03 και 0.05kg/sec.

3.5 Συμπεράσματα.

Στο κεφάλαιο 3 έγινε όσο το δυνατό καλύτερη επιλογή των ιδιοτήτων του υλικού του φίλτρου, της μόνωσης και του καπνού για κύκλο φόρτισης EUDC και ECE. Επίσης ο υπολογισμός της ενεργής επιφάνειας είναι πολύ κοντά στις τιμές της IBIDEN.

Η σύγκριση 4 κινητικών για την θερμική αναγέννηση έδωσε χρήσιμες πληροφορίες αφού από τις τιμές για την ενέργεια ενεργοποίησης του καπνού, $E=120000\text{J/mole}$, $E=150000\text{J/mole}$, $E=169000\text{J/mole}$, $E=210000\text{J/mole}$, η καλύτερη δείχνει να είναι η $E=120000\text{J/mole}$.

Η διαφοροποίηση στην θερμοκρασία εισόδου στην αναγέννηση είναι μεγάλη για τα πειράματα και έτσι μπορούμε να πούμε ότι η κινητική είναι κοντά στην πραγματική για διαφορετικές θερμοκρασίες αναγέννησης. Βέβαια η ευαισθησία στην θερμοκρασία εισόδου είναι μεγάλη. Αυτός είναι και ένας λόγος για τον οποίο δεν πρέπει να απορρίψουμε εντελώς τις άλλες κινητικές. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5 η μετρημένη θερμοκρασία εισόδου δείχνει να έχει διαφορά από την πραγματική. Η χρησιμοποιούμενη ως $T_{\text{εισόδου}}$ είναι η θερμοκρασία στο κέντρο του φίλτρου, που μάλλον είναι σωστότερη.



Επίσης το γεγονός ότι σε κάποια πειράματα, οι άλλες κινητικές έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα συμβάλλει στο έχουμε επιφυλάξεις για την κινητική του καπνού.

Ένας ακόμα λόγος για αυτό είναι το ότι δεν πρέπει να θεωρούμε ότι όλη η ποσότητα της αιθάλης έχει την ίδια κινητική. Η σύσταση του δεν είναι ίδια παντού και ενδέχεται κάποια μέρη του καπνού να έχουν διαφορετική κινητική. Η επιλογή της ενέργειας ενεργοποίησης είναι δύσκολη και η τιμή $E=120000\text{J/mole}$ είναι ενδεικτική και δίνει μια εικόνα για την εκτίμηση της κινητικής της θερμικής αναγέννησης.

Η επίδραση των εκπομπών καπνού του κινητήρα στην αναγέννηση είναι σημαντική και φαίνεται στο σχήμα 3.6. Η εκτίμηση των εκπομπών είναι αρκετά καλή και δίνει σωστά αποτελέσματα στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης.

Το μέσο σφάλμα δίνει μια εκτίμηση της απόκλισης και βοηθάει στην σωστή επιλογή των ιδιοτήτων και της κινητικής. Στον πίνακα 3.4 φαίνεται ότι το μέσο σφάλμα είναι μεγαλύτερο για το ΔP από ότι για την θερμοκρασία.

Όσον αφορά τον λόγο αναγέννησης, από τον πίνακα 3.5 παρατηρούμε ότι δεν έχει επίδραση το αν ο καπνός προέρχεται από κύκλο EUDC ή ECE. Η παγίδα στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αρκετά καθαρή μετά την αναγέννηση.

Η περιεκτικότητα SOF στον καπνό από κύκλο EUDC, όπως μας δείχνει και ο πίνακας 3.6 είναι σημαντικά μικρότερη από τον καπνό του κύκλου ECE. Το SOF μειώνει την διαπερατότητα του καπνού και όπως φαίνεται στα 3.29, 3.30 και 3.31, πριν την εκρόφηση του SOF υπάρχει διαφορά στο υπολογισμένο και μετρημένο ΔP .

Η μάζα που υπολογίζουμε από τη πτώση πίεσης λόγω του στρώματος καπνού είναι αρκετά κοντά σε αυτή που υπολογίζει ο κώδικας.

Στο σχήμα 3.33 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης O_2 στο ρυθμό καύσης. Στις μετρήσεις με μεγαλύτερη θερμοκρασία και συγκέντρωση O_2 η ο ρυθμός είναι μεγαλύτερος.

Τέλος, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.34 η γραμμική σχέση της πτώσης πίεσης με την παροχή καυσαερίου.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου 3.

K. N. Pattas, A. M. Stamatelos, G. C. Koltsakis, I. P. Kandyilas, W. Mustel, 'Computer Aided Engineering in the Design of Catalytically Assisted Trap Systems', SAE paper 970472, 1997.

G. C. Koltsakis, A. M. Stamatelos, P. Versaevel, H. Colas, C. Rigauveau, R. Noiro, 'Some Empirical Observations on Diesel Particulate Filter Modeling and Comparison Between Simulations and Experiments', SAE paper 2000-01-477, 2000.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4

ΠΡΟΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΙΛΤΡΩΝ ΑΙΘΑΛΗΣ SiC ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

4.1 Πειραματική διάταξη φίλτρων SiC από την οποία προήλθαν οι μετρήσεις.

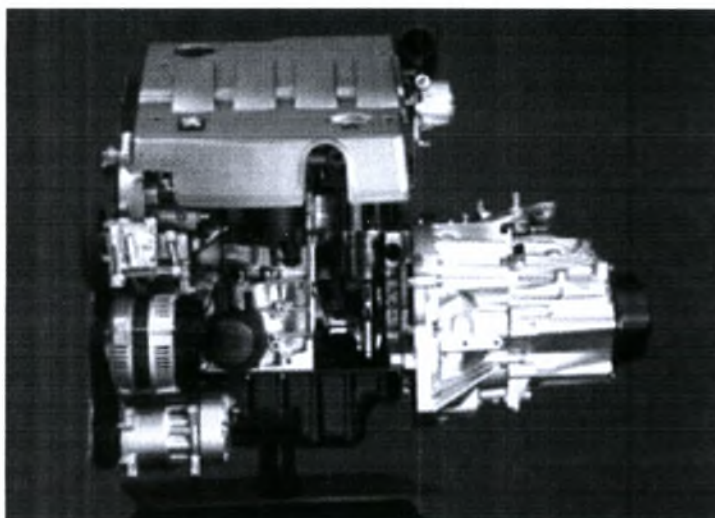
Οι μετρήσεις έγιναν στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών στο δυναμόμετρο Froude – Consine ισχύος 150kW. Ο έλεγχος γίνεται από υπολογιστή με ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου TEXCEL 100 direct digital control system (with transient testing capabilities). Ο ελεγχτής είναι συνδεδεμένος με υπολογιστή εξοπλισμένο με σύστημα ανάκτησης δεδομένων Data Acquisition system (National Instruments).

Οι μετρήσεις των εκπομπών έγιναν με αναλυτές καυσαερίων CO, CO₂, NO (Signal) και NO (JUM Engineering).

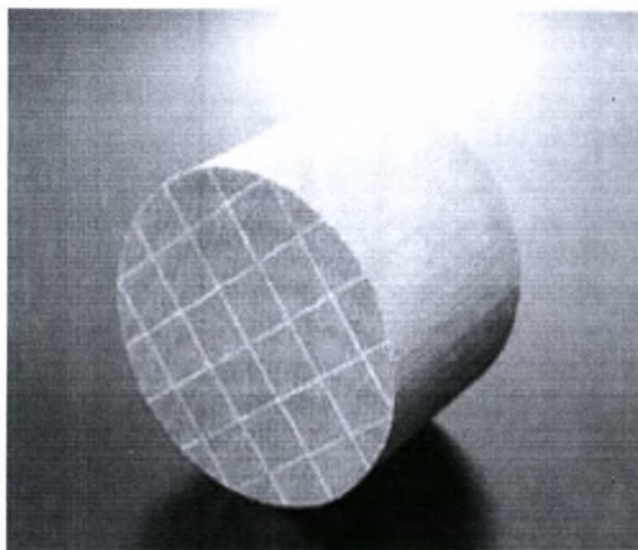
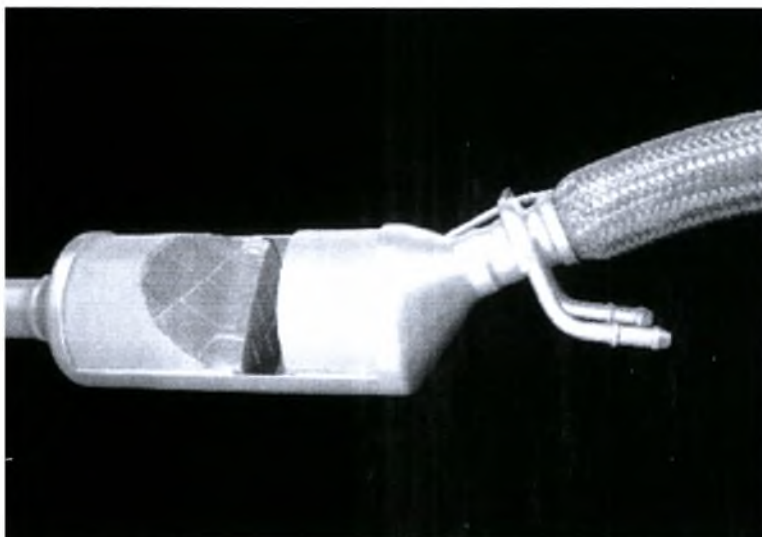
Ο κινητήρας στον οποίο έγιναν οι μετρήσεις είναι Peugeot DW10ATED είναι εγκατεστημένος στο δυναμόμετρο και τα χαρακτηριστικά του είναι :

- 4κύλινδρος σε σειρά
- κυβισμός 1997cm³
- διάμετρος και διαδρομή, 85x88mm
- υπερπληρούμενος (turbocharged) με στροβιλοσυμπιεστή KKK (υπερπίεση 1bar), με εναλλάκτη θερμότητας αέρα / αέρα (intercooler)
- χρησιμοποιεί καύσιμο diesel
- σύστημα τροφοδοσίας άμεσου ψεκασμού (direct injection) common rail (BOSCH EDC 15C2)
- σχέση συμπίεσης 18:1
- 1 εκκεντροφόρο επικεφαλή, 8 βαλβίδες
- υψηλής συμπίεσης αντλία καυσίμου
- αποδίδει μέγιστη ροπή 250Nm/2000RPM
- μέγιστος ρυθμός περιστροφής 4000RPM
- αποδίδει μέγιστη ισχύ 80kW(110HP)/4000RPM
- μέση κατανάλωση καυσίμου 5,5lt/100km
- εκπομπές CO₂ 150gr/km

Το φίλτρο αιθάλης (IBIDEN Co. Ltd.) που χρησιμοποιήθηκε είναι τοποθετημένο στην εξαγωγή και έχει 200cps (channels per square inch) και πάχος υποστρώματος 14mils. Είναι κατασκευασμένο από SiC και αποτελείται από μικρότερα τμήματα τα οποία είναι συναρμολογημένα με συνδετικό υλικό (τσιμέντο). Η διάμετρος του φίλτρου είναι 143.8mm και το μήκος του 152mm.



Σχήμα 4.1 Ο κινητήρας DW10ATED.



Σχήμα 4.2 Το φίλτρο αιθάλης (IBIDEN Co. Ltd.) που τοποθετείται στο Peugeot 607.

Οι ιδιότητες του φίλτρου φαίνονται στον πίνακα 4.1.

Φίλτρο SiC	
Διάμετρος	143.8mm
Μήκος	152mm
cps _i (channels per square inch)	200
πάχος υποστρώματος (substrate thickness)	14mils (0.3556m)
μήκος τάπας των καναλιών (plug length)	5mm
Συνδετικό υλικό (adhesive)	Τσιμέντο

Πίνακας 4.1



Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε ήταν diesel κίνησης AVIN με τις ελληνικές προδιαγραφές EN-590 για το καύσιμο diesel.

Καύσιμο diesel κίνησης (Automotive diesel) EN-590

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 άνθρακα 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/+5 max (a) από 1-10 έως 15-3 είναι -5max, από 16-3 έως 30-9 είναι +5max
Επιταχυνόμενη σταθερότητα (accelerated stability) gr/m ³	ASTM D-2274	25 max
Στάχτη (ash) % κ.β.	EN 26245	0.01 max
Διάβρωση με χαλκό (Copper strip corrosion) , 3h στους 50 °C	ISO-2160	N ^o 1 max
Δείκτης κετανίου (Cetane index)	ISO-4264	46 min
Διύλιση (Distillation)	EN ISO-3405/1988	
Ανάκτηση (Recovered) 65% Vol °C		250 min
Ανάκτηση (Recovered) 85% Vol °C		350 max
Ανάκτηση (Recovered) 95% Vol °C		360 max
Μάζα σωματιδίων gr/m ³	DIN 51419	24 max
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες % M/M	IP 391/1995	11 max
Περιεκτικότητα νερού mg/kg	ASTM D-1744	200 max
Αριθμός κετανίου	EN ISO-5165/1992	51 min

Πίνακας 4.2

Το πρόσθετο που χρησιμοποιήθηκε ήταν Ce (Rhodia Eolys DPX9) σε συγκέντρωση 25ppm στο καύσιμο.

Οι μετρήσεις από το σύστημα ανάκτησης δεδομένων δίνουν, με τη χρήση του προγράμματος LabView, τιμές για τις

- στροφές του κινητήρα
- φορτίο
- A/F στην είσοδο και στην έξοδο
- ΔΡ στο φίλτρο
- θερμοκρασία στην είσοδο και στην έξοδο του φίλτρου
- πίεση στην έξοδο του εναλλάκτη αέρα / αέρα
- μάζα καυσίμου
- πίεση στην εισαγωγή και στην εξαγωγή του κινητήρα
- θερμοκρασία περιβάλλοντος



- θερμοκρασία νερού ψύξης στην είσοδο και στην έξοδο
- θερμοκρασία στην είσοδο και στην έξοδο του εναλλάκτη αέρα / αέρα (intercooler)
- θερμοκρασία καυσαερίου μετά τον στροβιλοσυμπιεστή
- συγκέντρωση HC, CO, CO₂, NO_x στο καυσαέριο
- θερμοκρασία σε 2 σημεία στο κέντρο και σε 2 σημεία στην περιφέρεια του φίλτρου

4.2.1 Προϋπολογισμός λειτουργίας φίλτρων SiC και κορδιερίτη του εργαστηρίου.

Ο υπολογισμός της λειτουργίας του φίλτρου SiC του εργαστηρίου απαιτεί την προεπεξεργασία των δεδομένων των μετρήσεων, η οποία παρουσιάζεται στο παράρτημα II έτσι ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν τα αρχεία εισόδου του κώδικα. Η διαπερατότητα του καπνού προσδιορίστηκε από την ρύθμιση του κώδικα ίση με $0.3 \times 10^{-12} \text{m}^2$. Το κεφάλαιο περιλαμβάνει αναγεννήσεις με και χωρίς πρόσθετο, φόρτιση παγίδας και ένα σενάριο πιθανής αστοχίας του φίλτρου στο οποίο ο κινητήρας μετά από υψηλό σημείο λειτουργίας δουλεύει σε χαμηλές στροφές και χωρίς φορτίο. Έτσι η θερμοκρασία ανεβαίνει πολύ και γίνεται γρήγορη αναγέννηση. Ο πίνακας 4.3 δείχνει τις μετρήσεις για τις οποίες έγινε ο υπολογισμός λειτουργίας του φίλτρου.

Μέτρηση	Υλικό	Πρόσθετο (rpm)	Φόρτιση (gr)	Κινητική θερμικής αναγέννησης		Κινητική καταλυτικής αναγέννησης	
				A (m/secK)	E (J/mole)	A (m/secK)	E (J/mole)
1605	SiC	0	19	0.0012	120000		
2305	SiC	25	25	0.003	120000	4×10^5 4×10^9	100000 100000
2905	SiC	25	25	0.003	120000	4×10^5 4×10^9	100000 100000
3105	SiC	25	19	0.003	120000	4×10^5 4×10^9	100000 100000
1906	SiC	25	25	0.003	120000	4×10^5 4×10^9	100000 100000
2606	SiC	50	20	0.003	120000	4×10^5 4×10^9	100000 100000
2606 φόρτιση	SiC	50	5	0.003	120000	4×10^5 4×10^9	100000 100000
1202	Κορδιερίτης	0	22	0.001	120000		
1402	Κορδιερίτης	25	22	0.003	120000	5×10^5 5×10^7	100000 100000
Σενάριο αστοχίας φίλτρου	SiC	25	35	0.003	120000	4×10^5 4×10^9	100000 100000

Πίνακας 4.3

Η εκτίμηση της φόρτισης έγινε από το ΔΡ του φίλτρου και της θερμοκρασίας. Η φόρτιση ρυθμίστηκε έτσι ώστε η υπολογισμένη πτώση πίεσης να συμπίπτει με την μετρημένη αλλά και η θερμοκρασία να μην

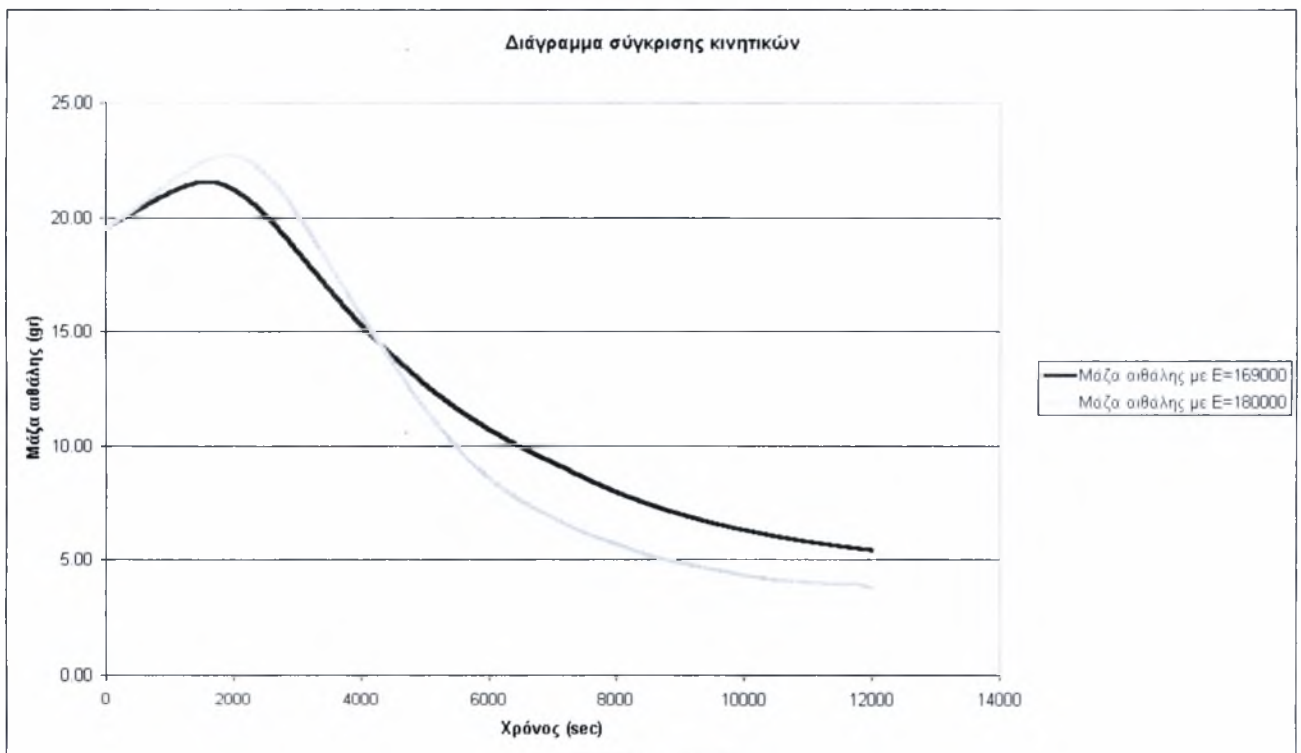


ανεβαίνει υπερβολικά κατά την αναγέννηση λόγω μεγαλύτερης αρχικής μάζας από την πραγματική. Στην περίπτωση που η συγκέντρωση του προσθέτου στο καύσιμο είναι 50ppm ρυθμίστηκε η διαπερατότητα του καπνού ίση με $0.09 \times 10^{-12} \text{m}^2$.

4.2.2 Επιλογή κινητικής της αναγέννησης.

Στη διάρκεια της διαδικασίας ρύθμισης της κινητικής παρατηρήθηκε η επίδραση της Ενέργειας Ενεργοποίησης (Activation Energy, E) στον ρυθμό

καύσης. Στον υπολογισμό του ρυθμού $R = A e^{-\frac{E}{RT}}$ η μεταβολή του E έχει αποτέλεσμα την μεταβολή του A και μπορούμε να πούμε ότι μεγαλύτερο E σημαίνει ότι η καύση γίνεται με μεγαλύτερο ρυθμό δηλαδή πιο απότομα από ότι στην περίπτωση που το E είναι μικρότερο. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.3 για αναγεννήσεις με ίδια αρχική μάζα, με $E=169000\text{J/mole}$ και $E=180000\text{J/mole}$.



Σχήμα 4.3

Η ρύθμιση της κινητικής του προσθέτου έγινε μετά από δοκιμές με τις ακόλουθες τιμές :

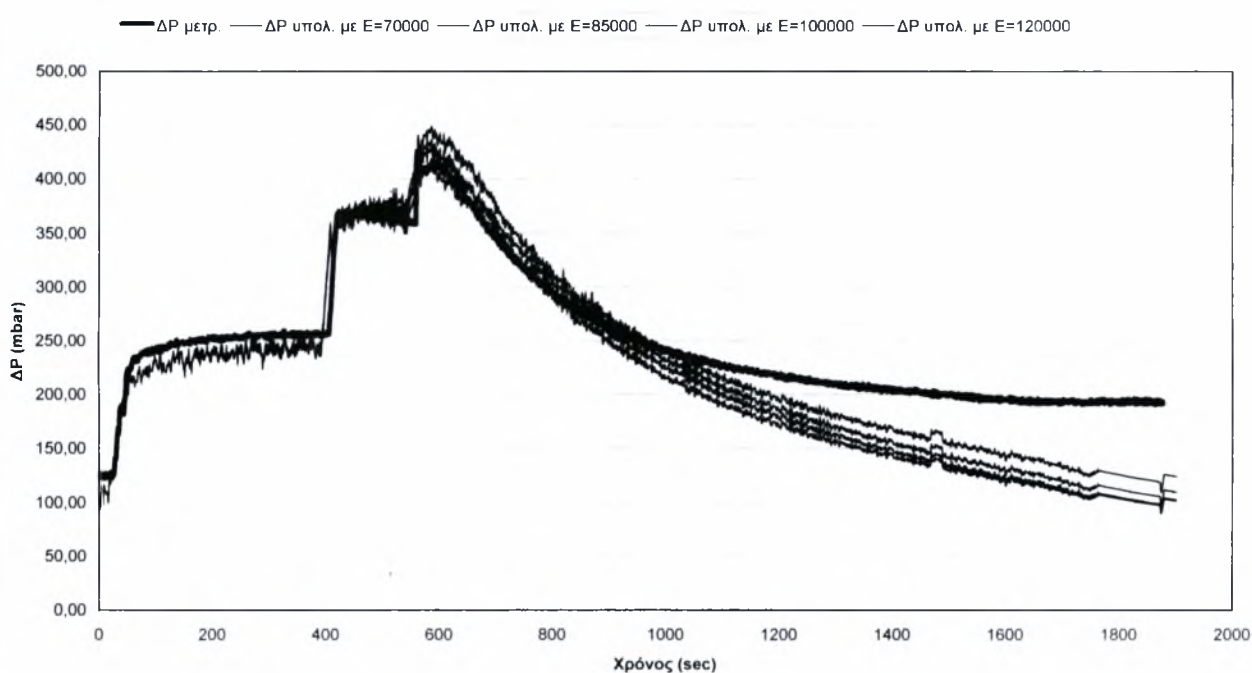
$A=2.5 \times 10^6 \text{m/secK}$ και $E=70000\text{J/mole}$, $A=2.5 \times 10^7 \text{m/secK}$ και $E=70000\text{J/mole}$, $A=3 \times 10^7 \text{m/secK}$ και $E=85000\text{J/mole}$, $A=3 \times 10^8 \text{m/secK}$ και $E=85000\text{J/mole}$, $A=4 \times 10^8 \text{m/secK}$ και $E=100000\text{J/mole}$, $A=4 \times 10^9 \text{m/secK}$ και $E=100000\text{J/mole}$, $A=1 \times 10^{10} \text{m/secK}$ και $E=120000\text{J/mole}$, $A=1 \times 10^{11} \text{m/secK}$ και $E=120000\text{J/mole}$.

Η πρώτη τιμή αναφέρεται στην αναγωγική αντίδραση του προσθέτου και η δεύτερη στην οξειδωτική. Όμως είναι πολύ δύσκολο να ξεχωρίσει κανείς ποια κινητική είναι κοντά στην πραγματική αφού αυξάνοντας την ενέργεια



ενεργοποίησης αλλά και το A τα αποτελέσματα δεν έχουν πολύ μεγάλες διαφορές. Αυτό συμβαίνει γιατί οι παραπάνω τιμές A,E δίνουν τον ίδιο ρυθμό καύσης σε μια θερμοκρασία. Η κινητική που δείχνει να προσεγγίζει καλύτερα όλες τις μετρήσεις και για διαφορετική θερμοκρασία αναγέννησης είναι για την αναγωγή $A=4 \times 10^8 \text{ m/secK}$ και $E=100000 \text{ J/mole}$ και για την οξείδωση $A=4 \times 10^9 \text{ m/secK}$ και $E=100000 \text{ J/mole}$ η οποία αναφέρεται και στη βιβλιογραφία. Οι μετρήσεις TGA του εργαστηρίου για την ενέργεια ενεργοποίησης δίνουν τιμές για το E από 80000 J/mole έως 120000 J/mole και μια τιμή που φαίνεται να ικανοποιεί όλες τις περιπτώσεις είναι η 100000 J/mole . Αυτό επιβεβαιώνει την επιλογή της κινητικής με $E=100000 \text{ J/mole}$. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ενδεικτικά η σύγκριση των 4 κινητικών για κάποια πειράματα.

Διάγραμμα ΔP σύγκρισης κινητικών 2305

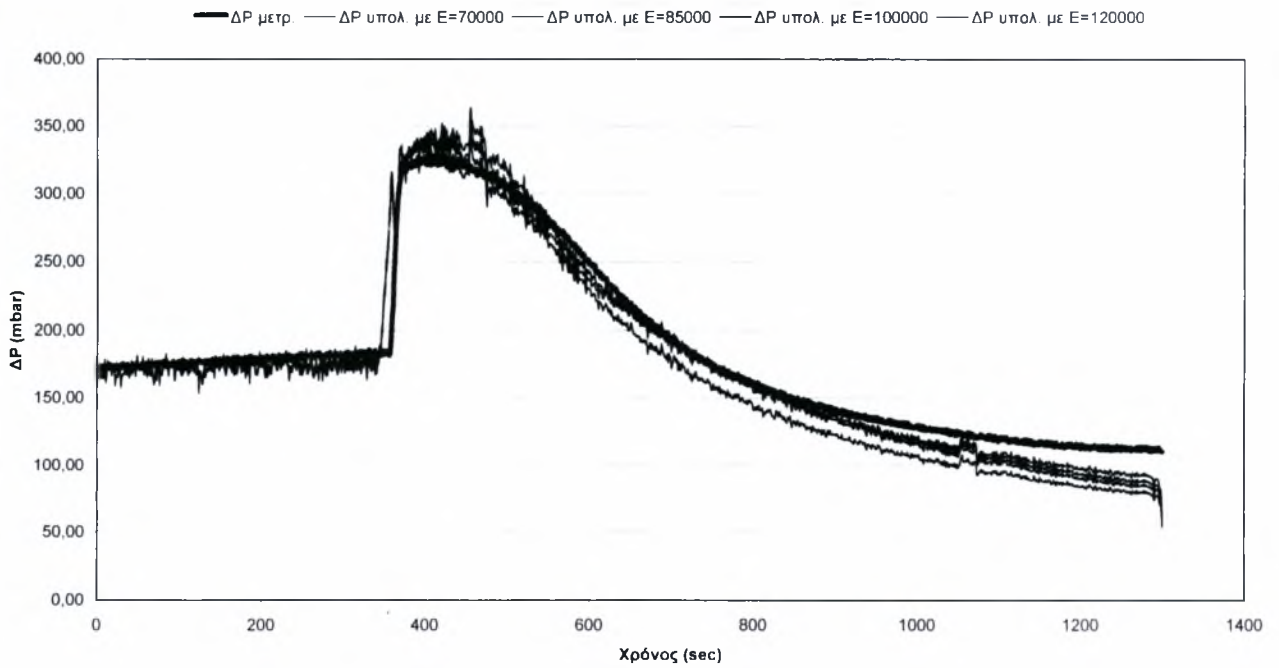


Σχήμα 4.4

Τα διαγράμματα δείχνουν ότι η κινητική με $E=100000 \text{ J/mole}$ είναι λίγο καλύτερη από τις υπόλοιπες αλλά η επιλογή της γίνεται με μεγάλη αβεβαιότητα αφού δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές.

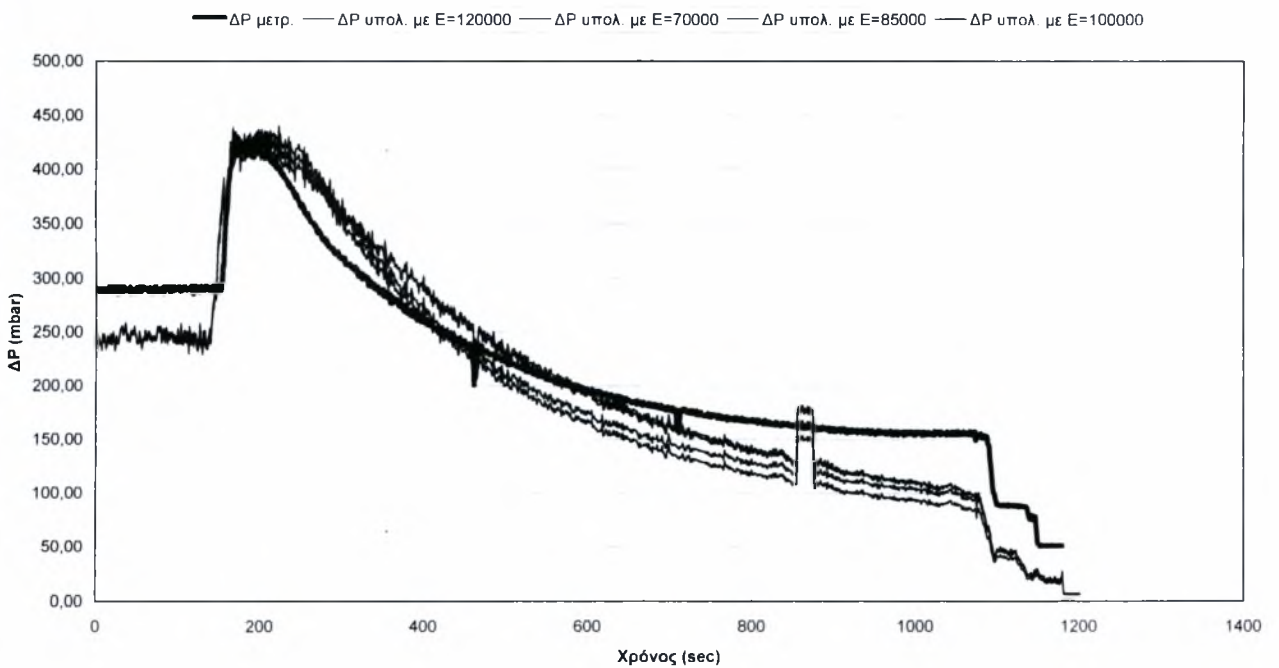


Διάγραμμα ΔΡ σύγκρισης κινητικών 3105



Σχήμα 4.5

Διάγραμμα ΔΡ σύγκρισης κινητικών 1906



Σχήμα 4.6



4.2.3 Υπολογισμός της συγκέντρωσης του προσθέτου στον καπνό.

Στις μετρήσεις με πρόσθετο υπολογίστηκε η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές καπνού στη διάρκεια της φόρτισης έτσι ώστε ο κώδικας να μπορεί να υπολογίσει με ακρίβεια την συγκέντρωση του προσθέτου στο καπνό. Αυτό είναι σημαντικό, γιατί σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο, ο ρυθμός της καταλυτικής καύσης είναι ευθέως ανάλογος της συγκέντρωσης του προσθέτου. Ο πίνακας 4.4 δείχνει την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές καπνού για κάθε πείραμα.

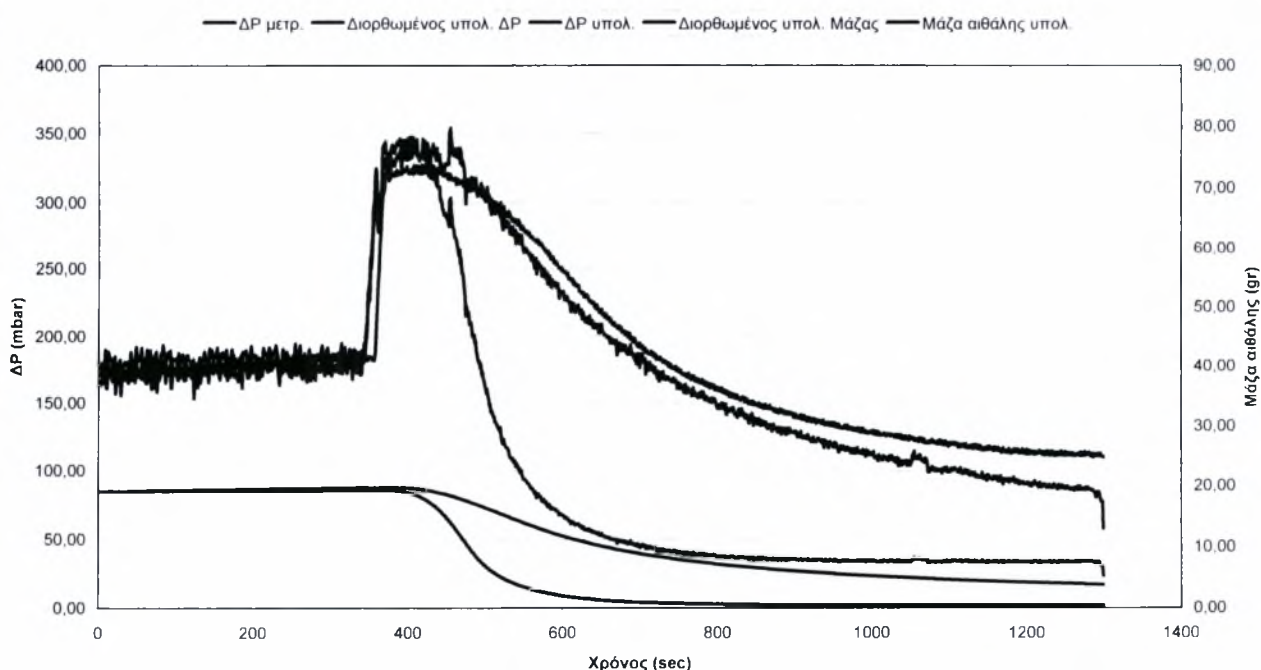
Μέτρηση	Συνολική μάζα καυσίμου (gr)	Διάρκεια φόρτισης (sec)	Κατανάλωση καυσίμου (gr/h)	Εκπομπές καπνού (gr/h)
2305	10634.7	20000	1.9	4.68
2905	6758.7	12500	1.9	8.64
3105	10285.7	9700	3.78	7.05
1906	10924.7	16100	2.43	5.6
2606	7405	7400	3.6	5.83

Πίνακας 4.4

Ο καπνός στην μέτρηση 1605 δεν περιέχει πρόσθετο και η κινητική ρυθμίστηκε να είναι $A=0.0012\text{m/secK}$ και $E=120000\text{J/mole}$.

Το σχήμα 4.7 δείχνει την σύγκριση της υπολογισμένης πτώσης πίεσης με

Διάγραμμα σύγκρισης υπολ. ΔΡ 3105



Σχήμα 4.7



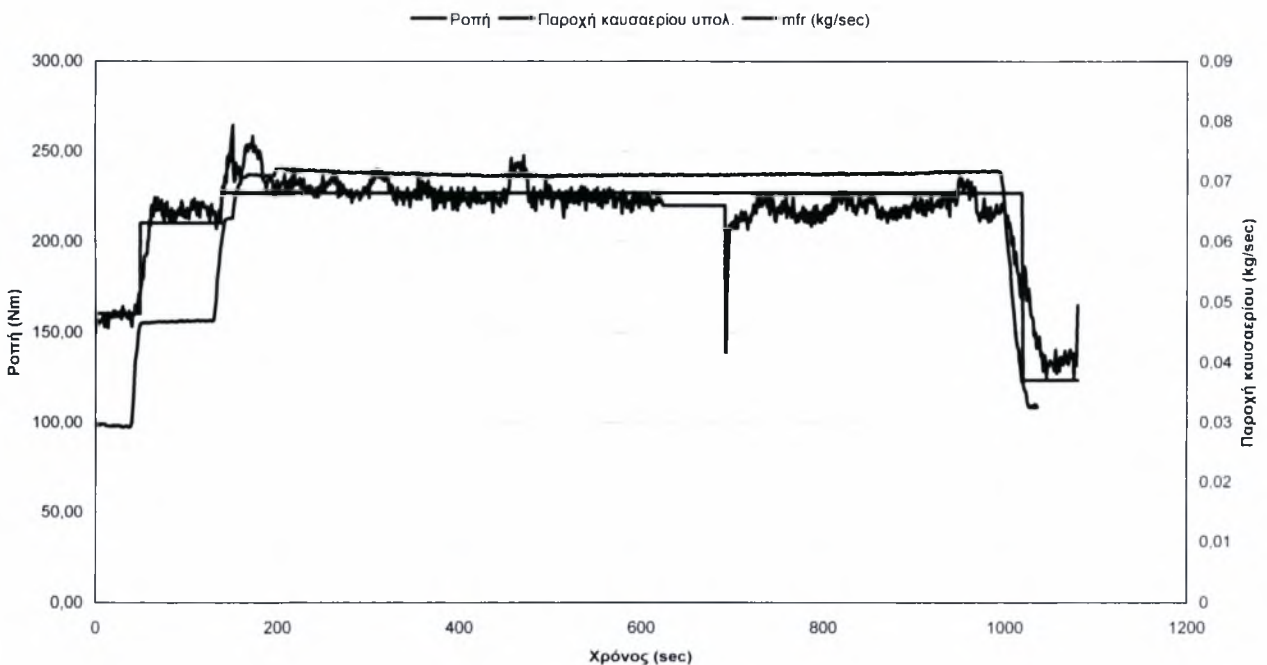
την συγκέντρωση προσθέτου στον καπνό που προκύπτει με κατανάλωση καυσίμου 7lt/h και εκπομπές καπνού 4gr/h και με κατανάλωση καυσίμου 3.78lt/h και εκπομπές καπνού 7.05gr/h (οι οποίες είναι οι σωστές για το πείραμα 3105).

Η βελτίωση του υπολογισμού είναι μεγάλη αφού πριν τη διόρθωση ο καπνός καίγεται πολύ γρηγορότερα. Οι τιμές 7lt/h και 4gr/h δίνουν μεγαλύτερη συγκέντρωση προσθέτου στον καπνό και έτσι η καύση είναι πιο γρήγορη.

4.2.4 Υπολογισμός της παροχής καυσαερίου.

Το επόμενο διάγραμμα δείχνει την υπολογισμένη παροχή από την μάζα καυσίμου και το λόγο A/F, την παροχή από τις μετρήσεις του εργαστηρίου στον κινητήρα, μαζί με τη ροπή του κινητήρα για σταθερές στροφές 2000RPM. Η σύγκριση της υπολογισμένης παροχής με την μετρημένη παροχή του κινητήρα δείχνει ότι η εκτίμηση της παροχής είναι αρκετά ικανοποιητική.

Διάγραμμα ροπής και παροχής 1605



Σχήμα 4.8

Ο υπολογισμός της παροχής καυσαερίου γίνεται στην προεπεξεργασία δεδομένων και παρουσιάζεται στο παράρτημα Ι.

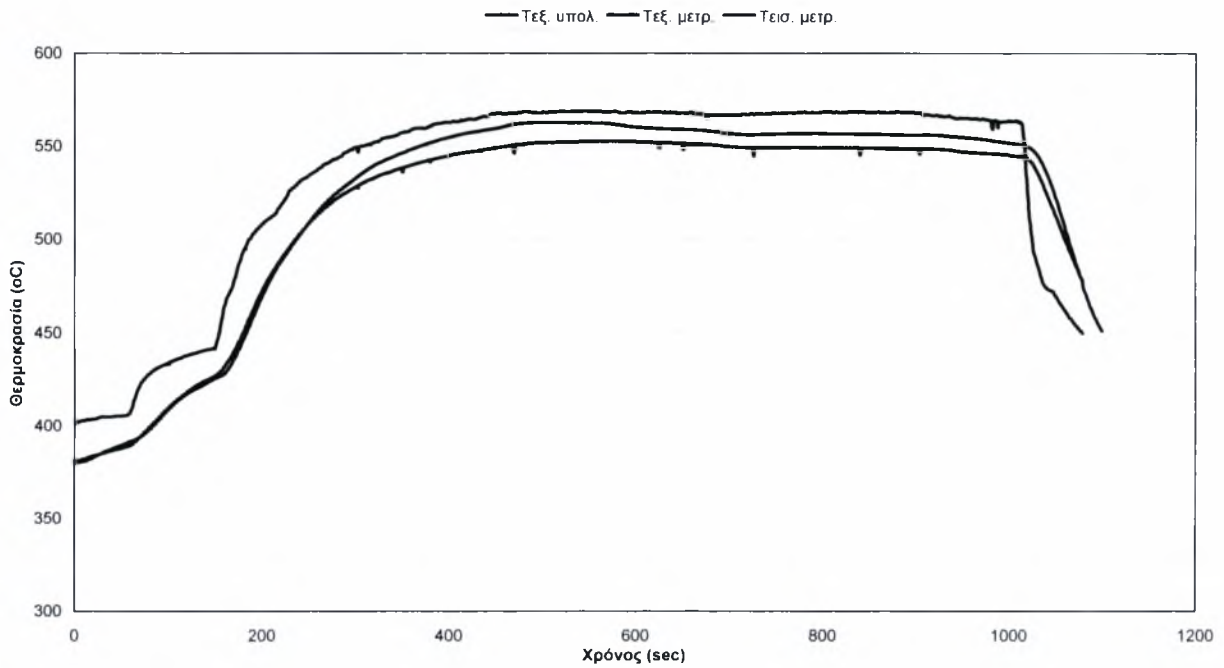
4.2.5 Προυπολογισμός λειτουργίας φίλτρων SiC του εργαστηρίου.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η υπολογισμένη και μετρημένη θερμοκρασία και ΔΡ μαζί με τη μάζα αιθάλης για τα πειράματα με φίλτρο SiC.

Όπως φαίνεται στα σχήματα 4.9 και 4.10 το μοντέλο λειτουργεί πολύ καλά στον υπολογισμό τόσο της θερμοκρασίας όσο και του ΔΡ για τη μέτρηση 1605 η οποία δεν έχει πρόσθετο.

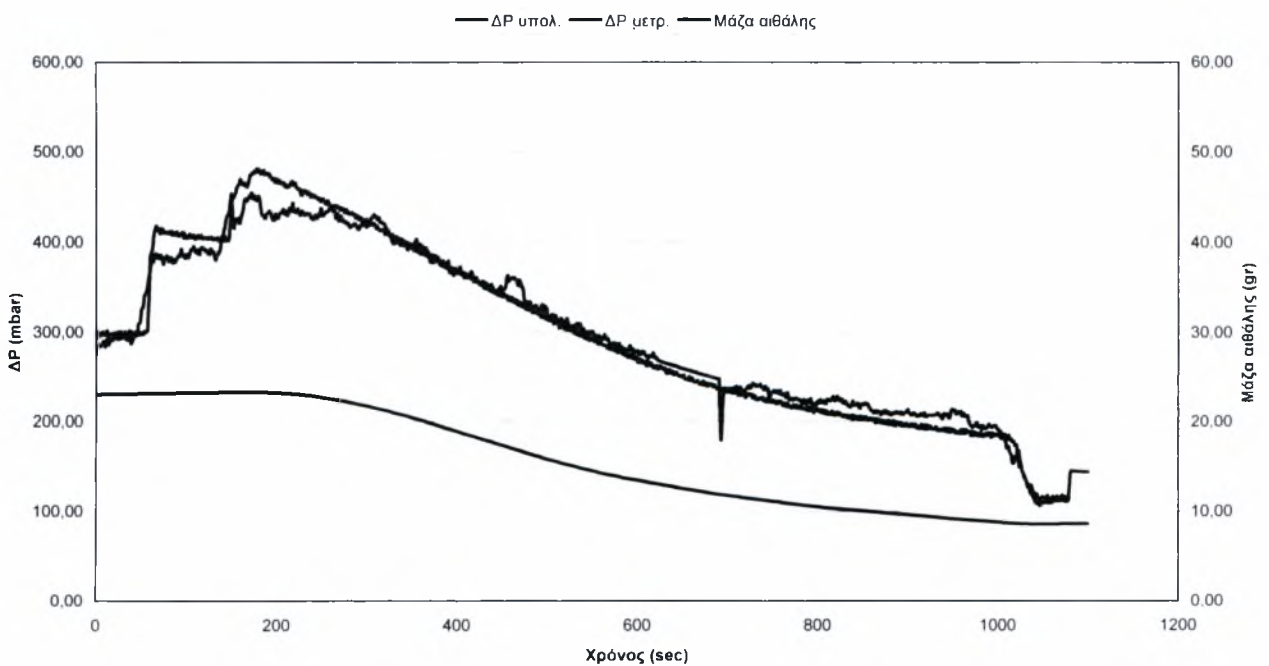


Διάγραμμα θερμοκρασίας 1605

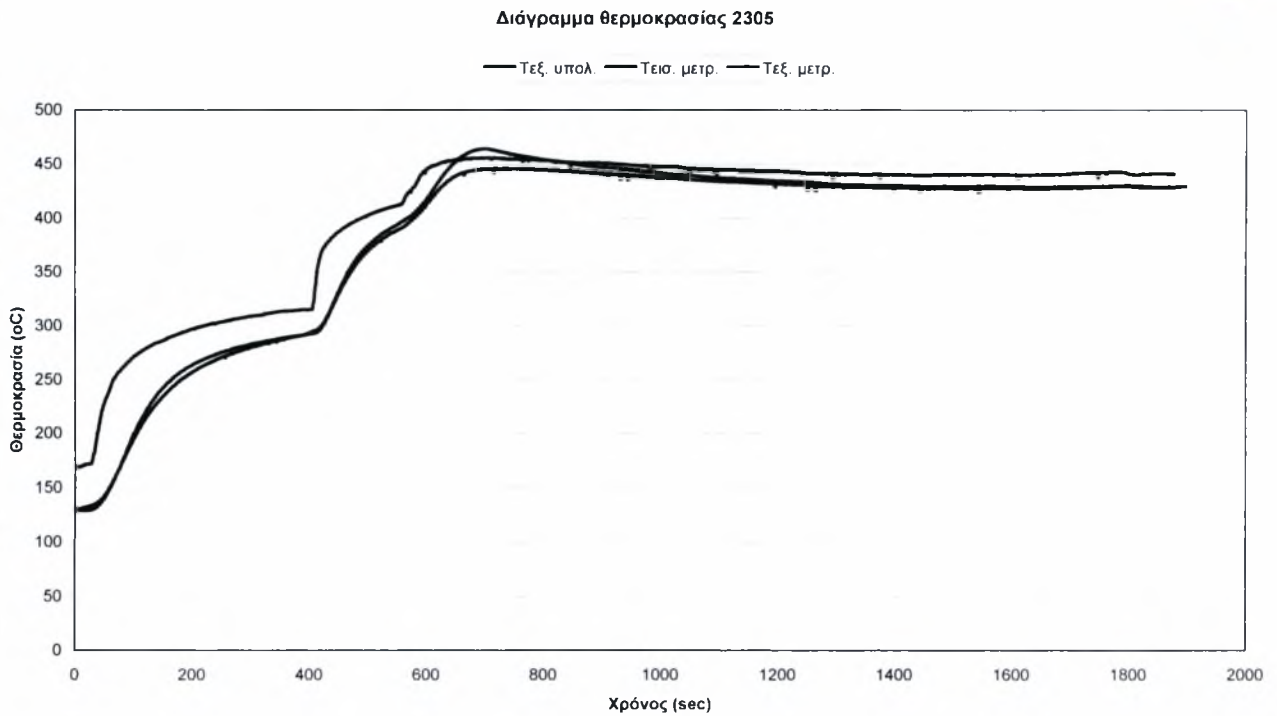


Σχήμα 4.9

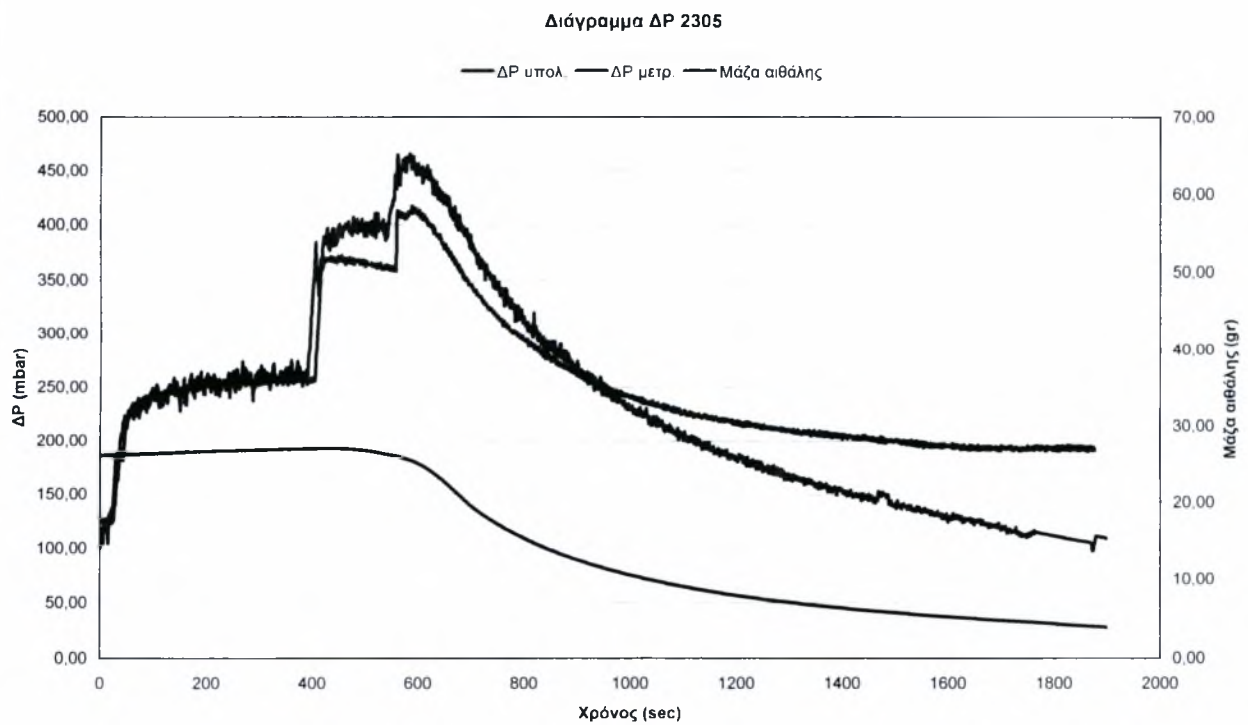
Διάγραμμα ΔΡ 1605



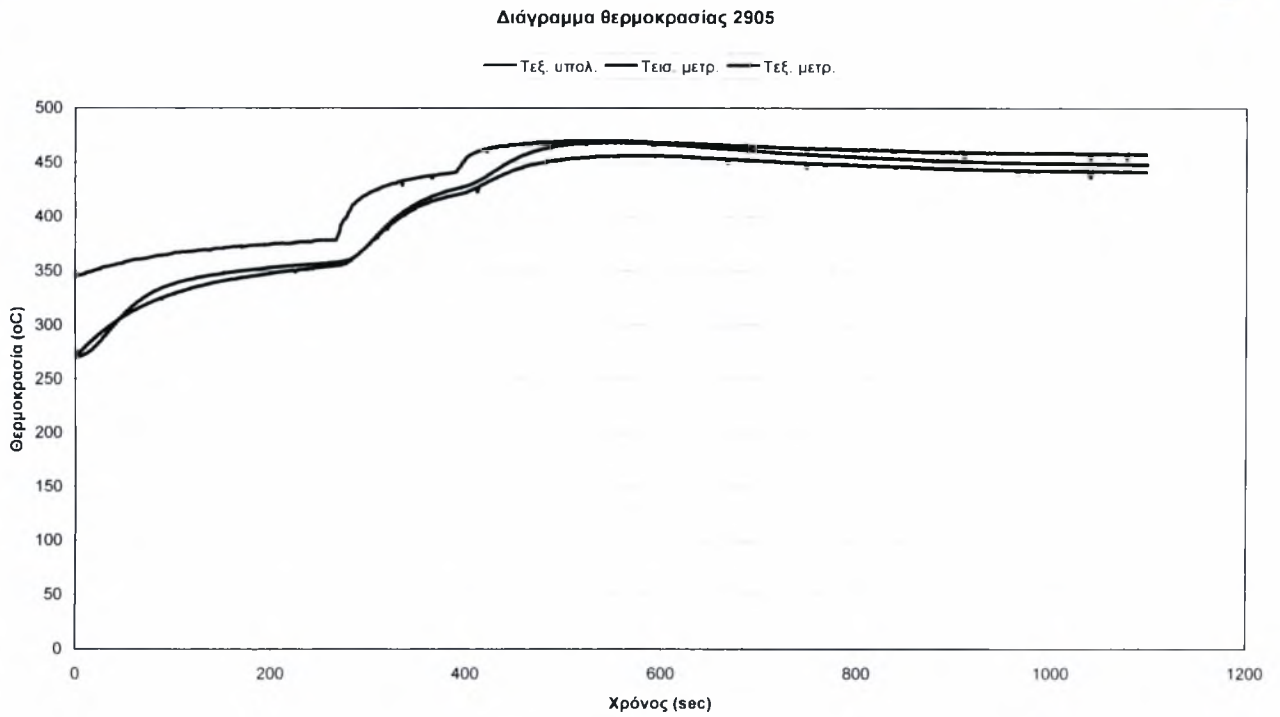
Σχήμα 4.10



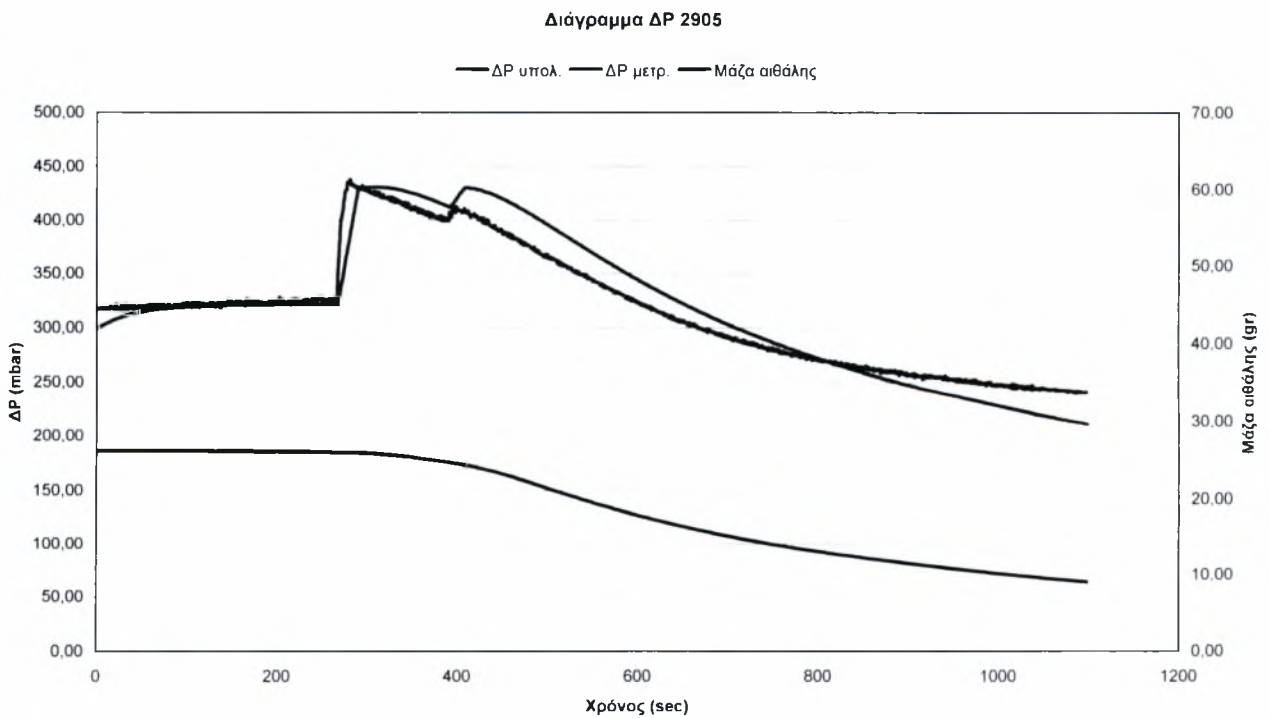
Σχήμα 4.11



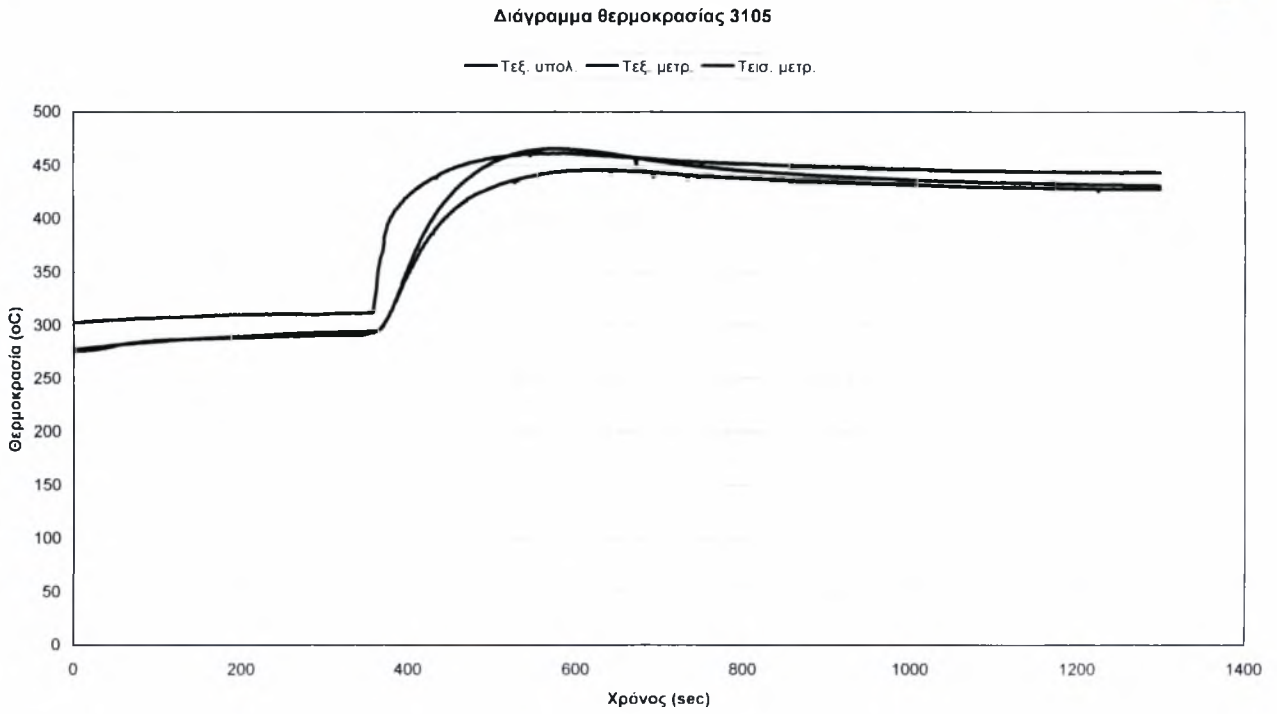
Σχήμα 4.12



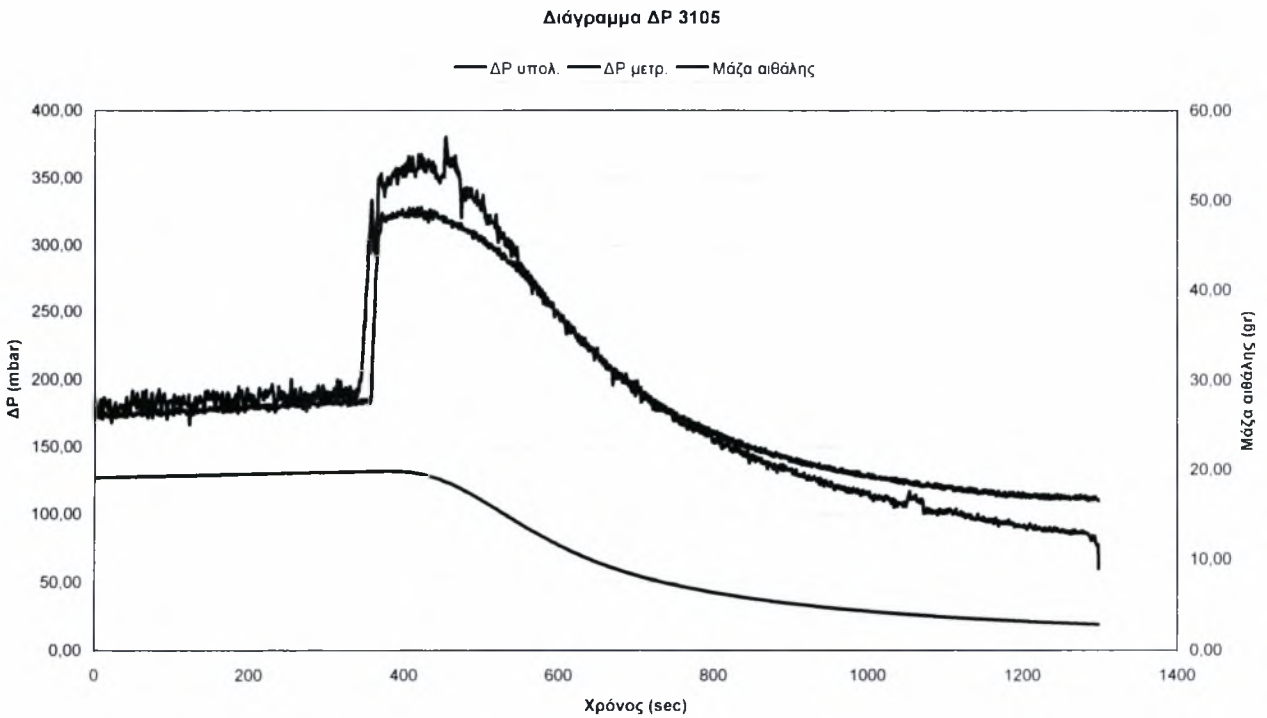
Σχήμα 4.13



Σχήμα 4.14



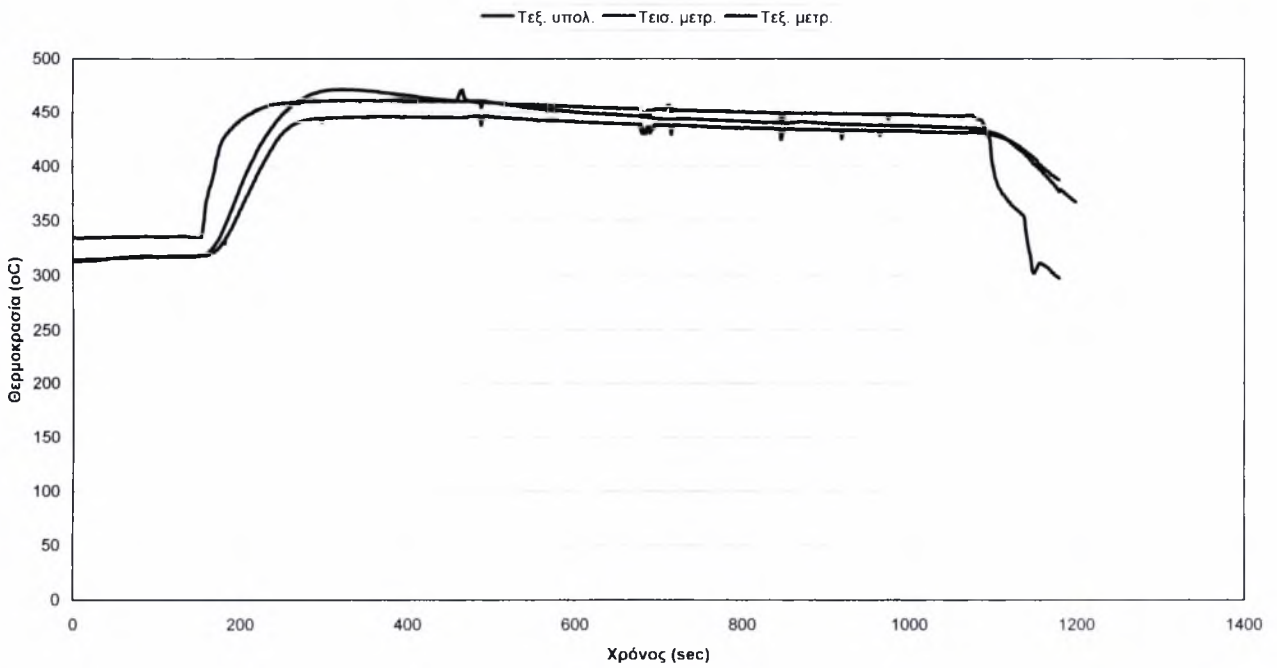
Σχήμα 4.15



Σχήμα 4.16

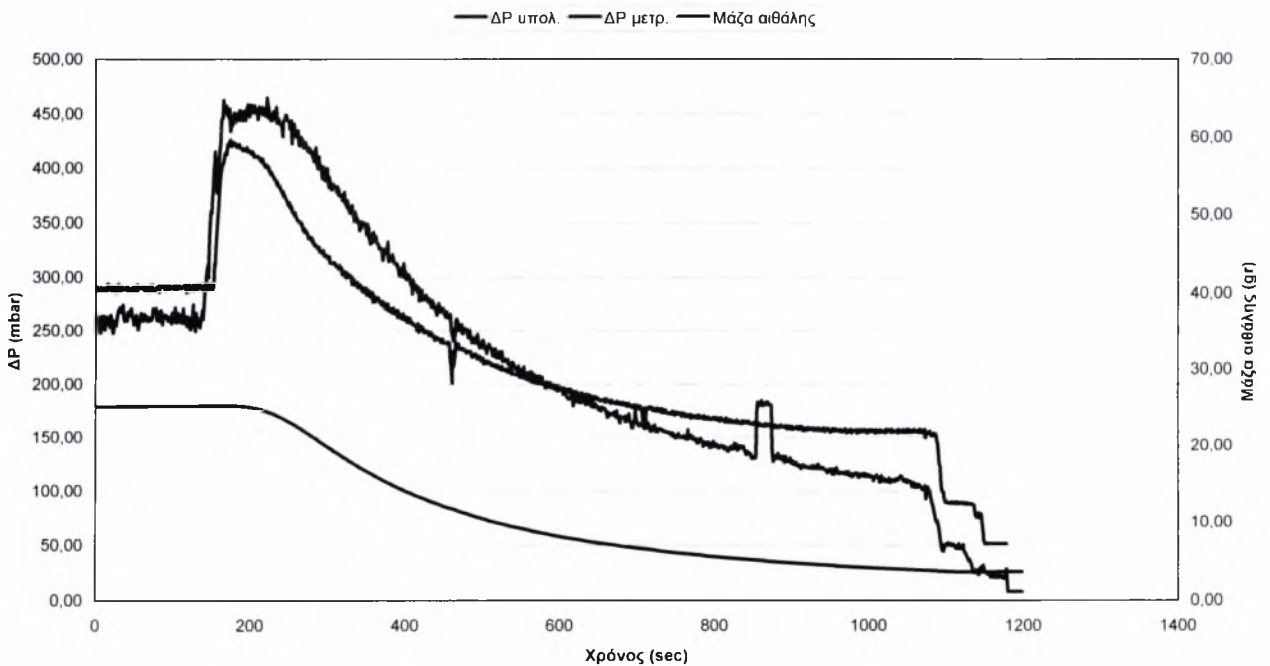


Διάγραμμα θερμοκρασίας 1906

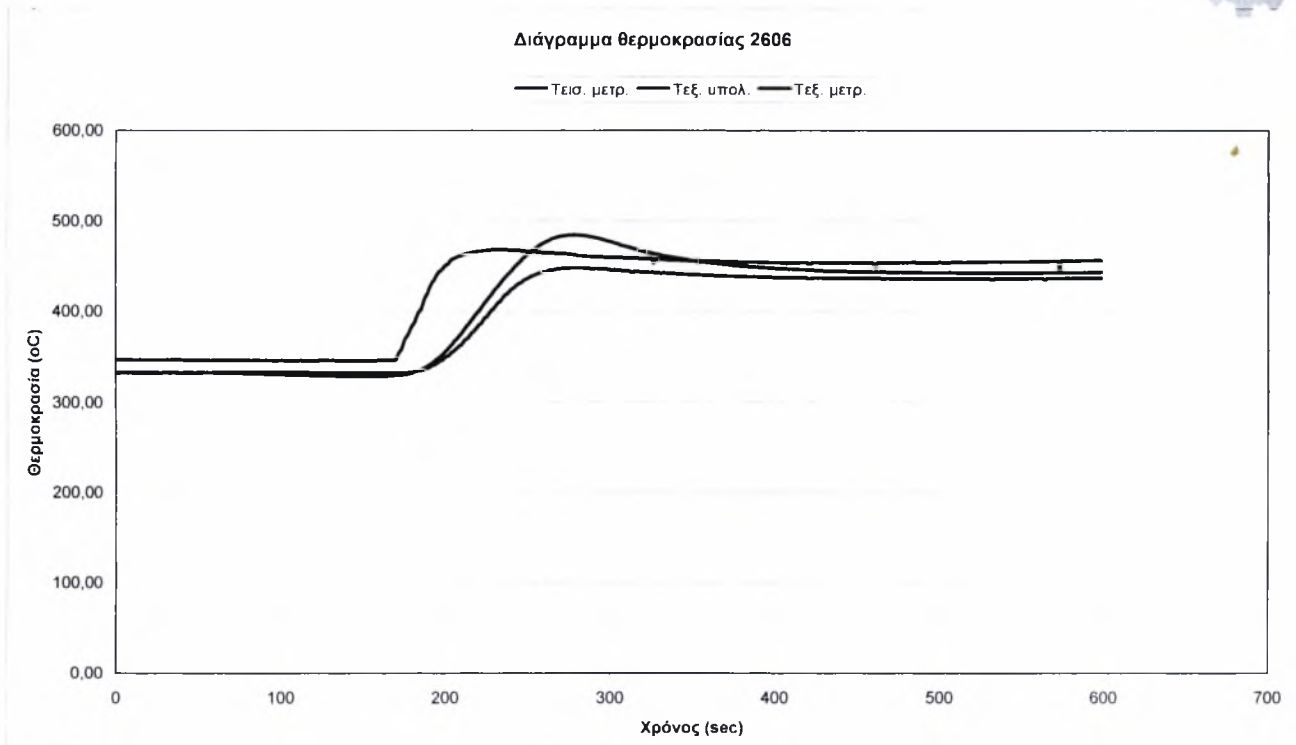


Σχήμα 4.17

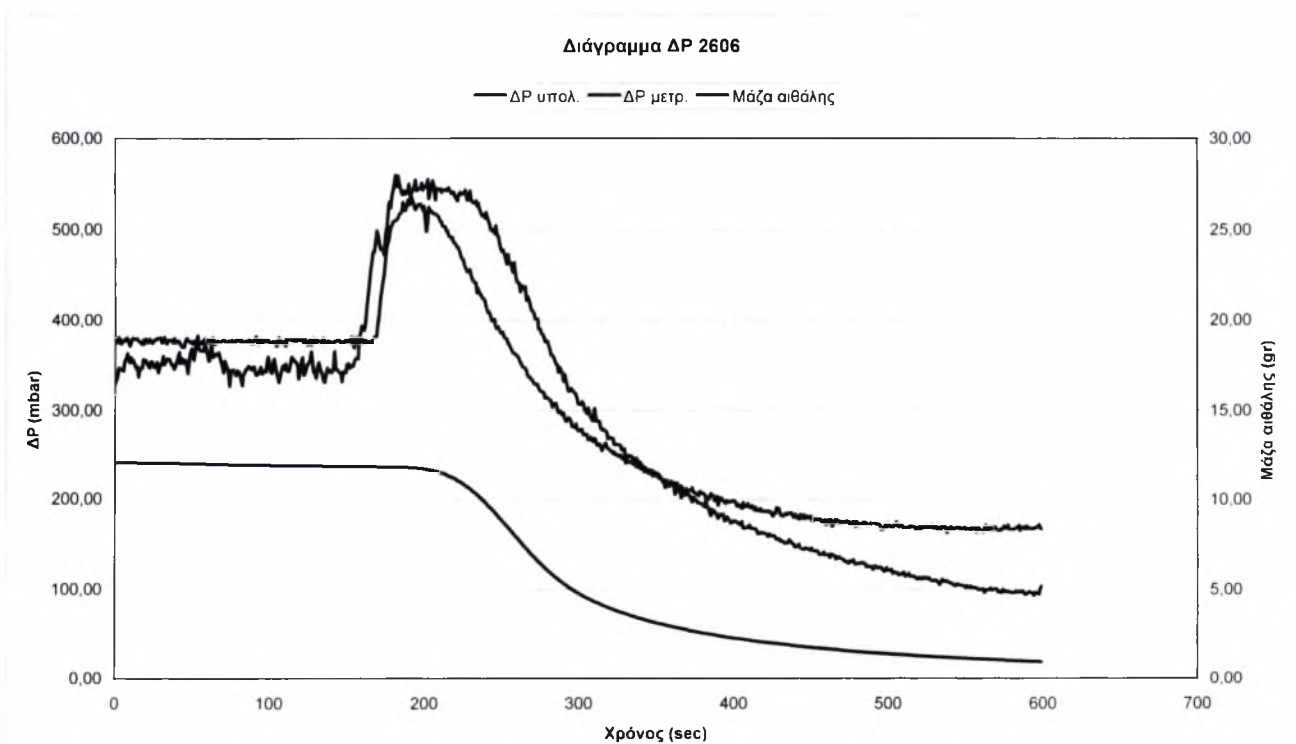
Διάγραμμα ΔΡ 1906



Σχήμα 4.18



Σχήμα 4.19

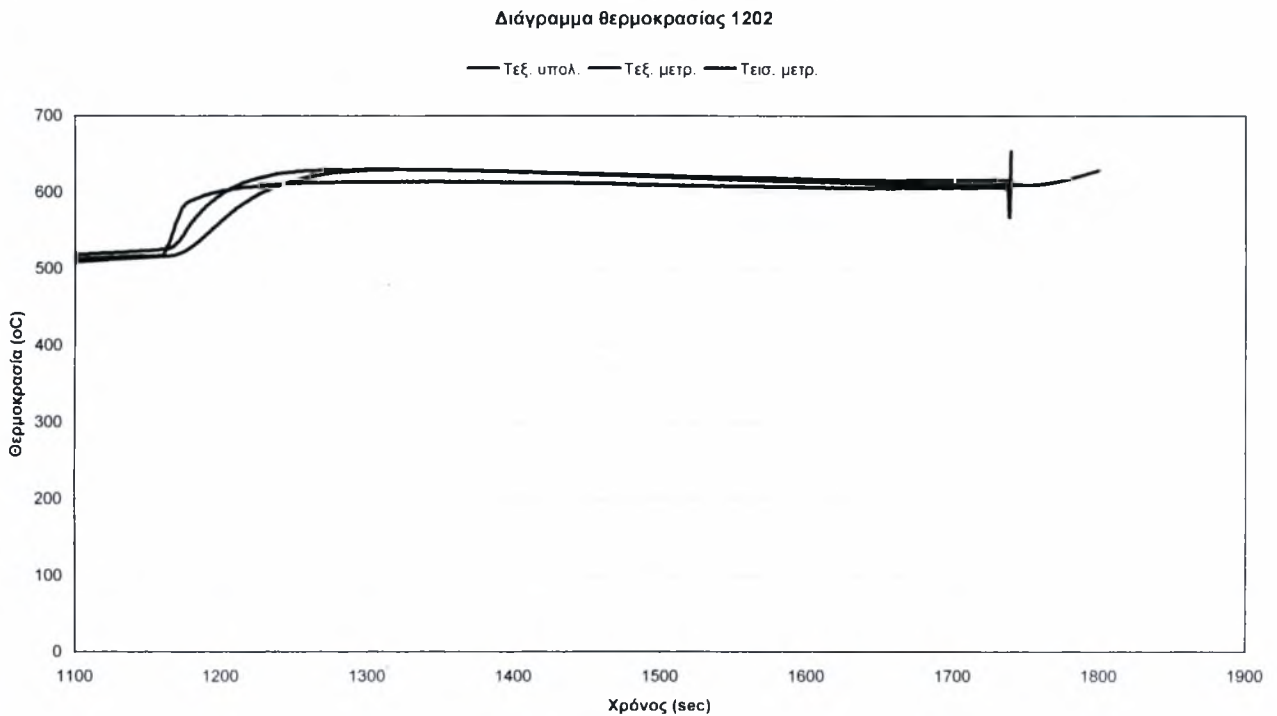


Σχήμα 4.20

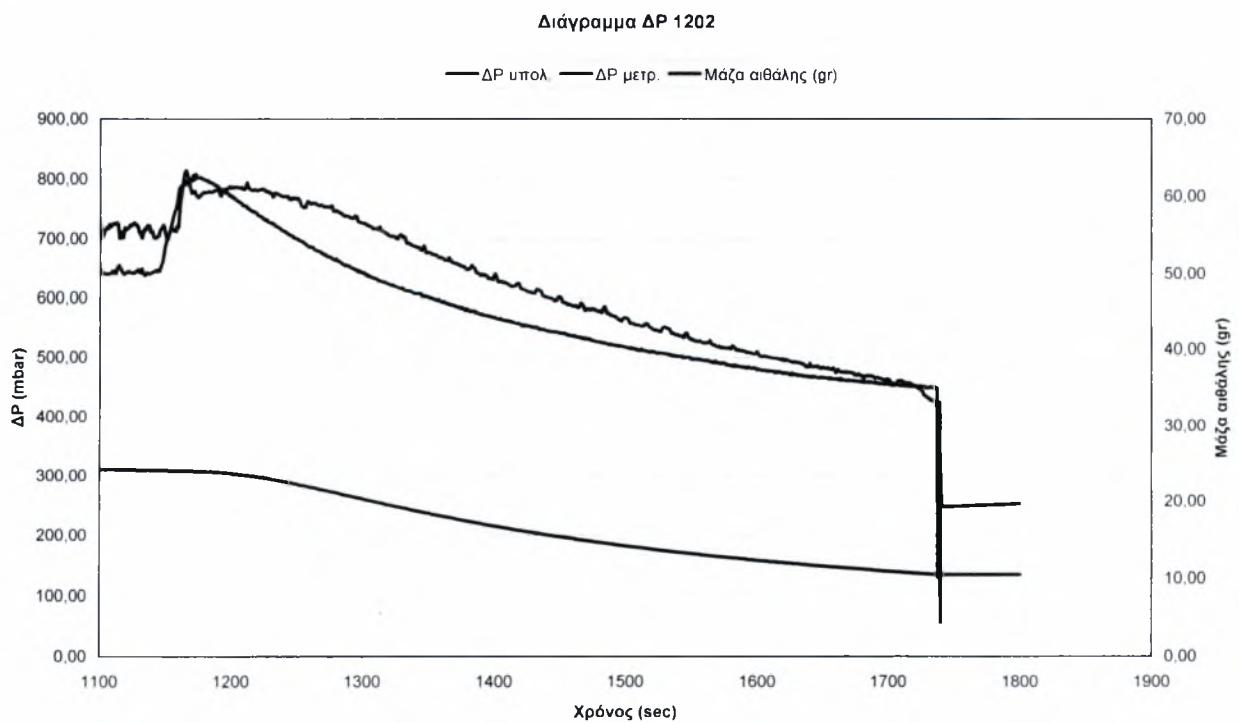


4.2.6 Προϋπολογισμός λειτουργίας φίλτρων κορδιερίτη του εργαστηρίου.

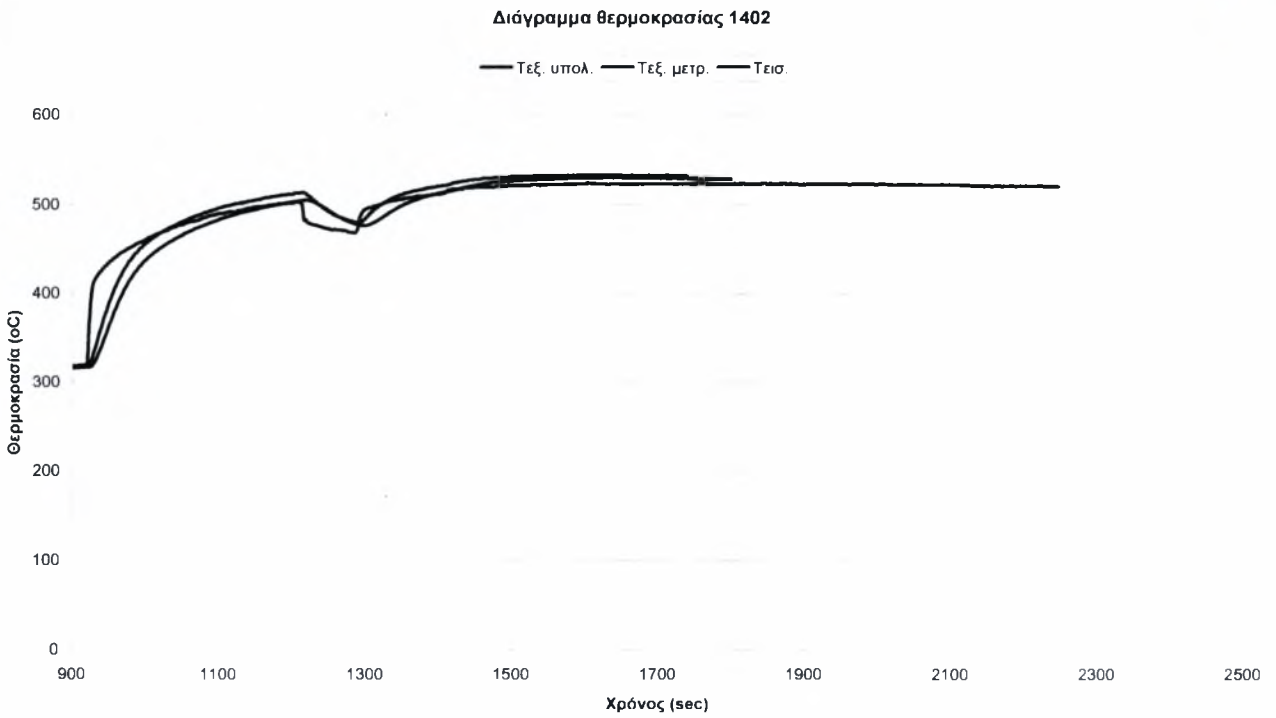
Ακολουθούν ένας υπολογισμός με φίλτρο κορδιερίτη χωρίς πρόσθετο και ένας με πρόσθετο 25ppm.



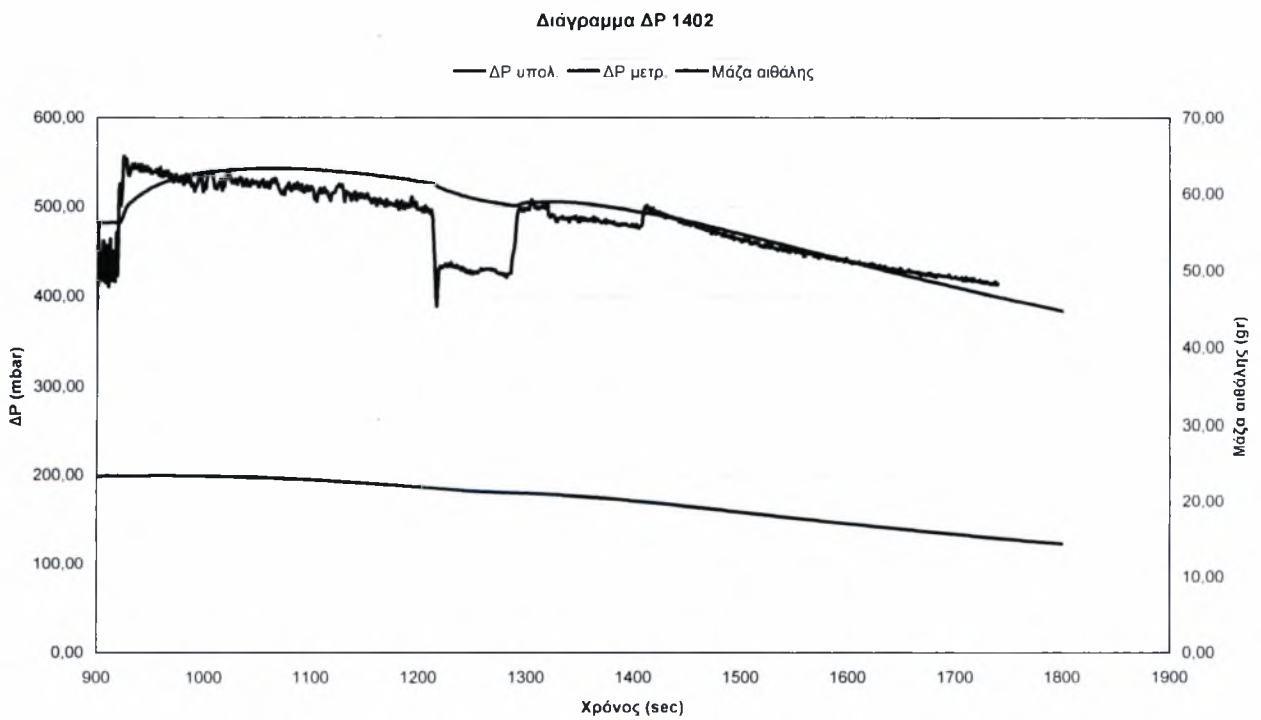
Σχήμα 4.21



Σχήμα 4.22



Σχήμα 4.23



Σχήμα 4.24

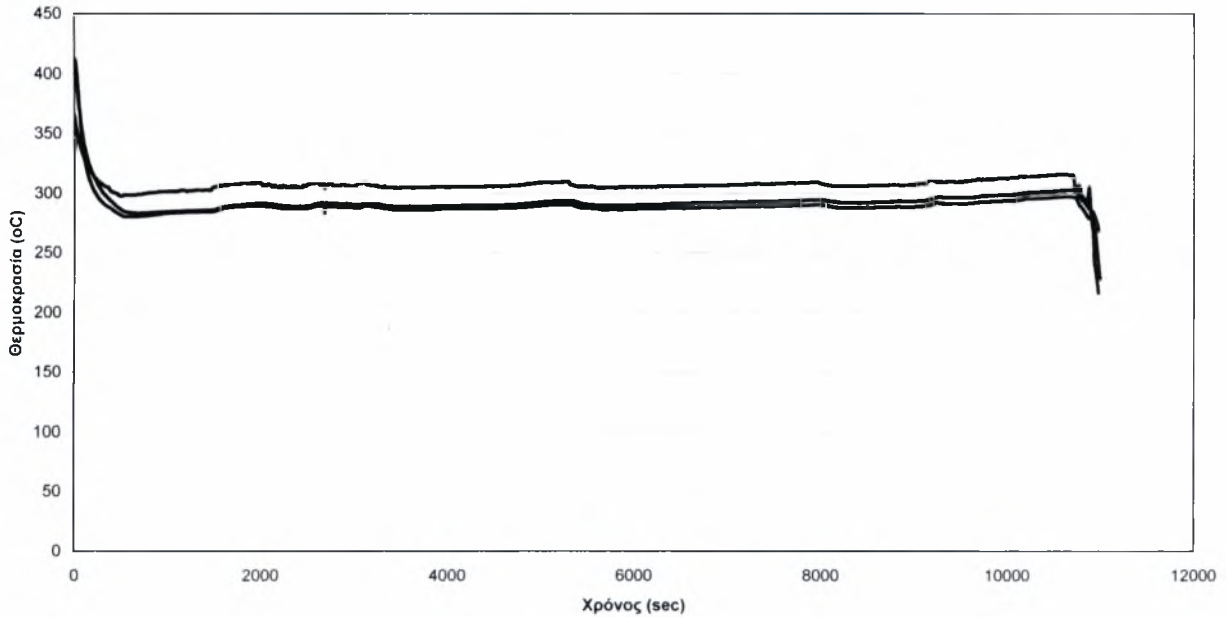


4.2.7 Προϋπολογισμός φόρτισης και σενάριο πιθανής αστοχίας του φίλτρου.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο υπολογισμός της φόρτισης 2606.

Διάγραμμα θερμοκρασίας 2606 φόρτισης

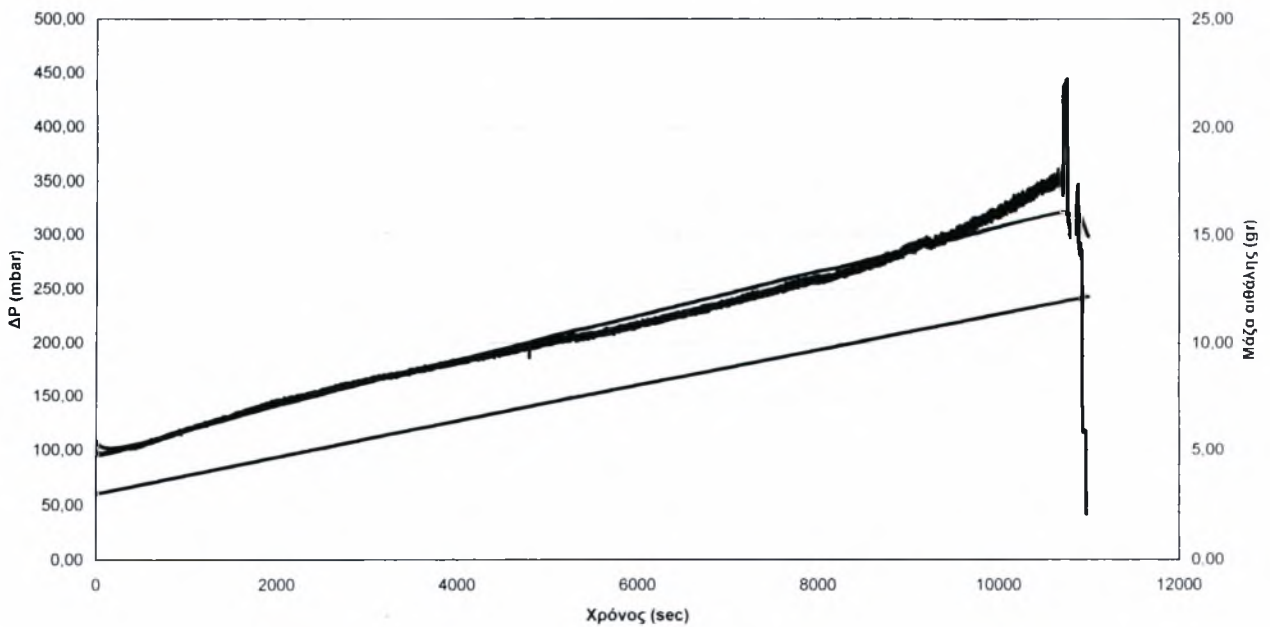
— Τεξ υπολ. — Τεισ. μετρ. — Τεξ. μετρ.



Σχήμα 4.25

Διάγραμμα 2606 φόρτισης

— ΔΡ υπολ. — ΔΡ μετρ. — Μάζα αιθάλης



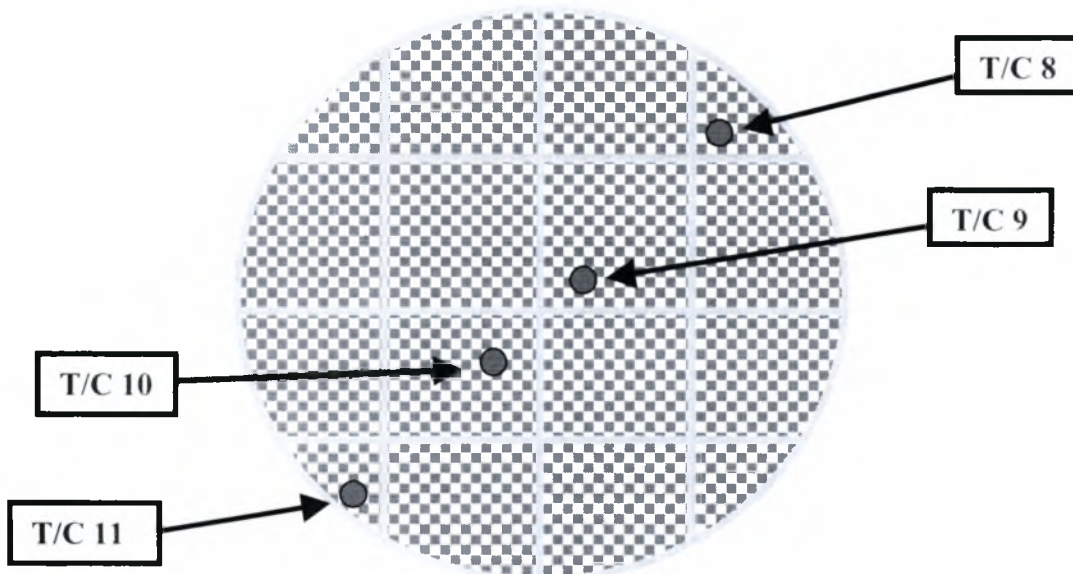
Σχήμα 4.26



Στο σχήμα 4.28 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μετρημένη θερμοκρασία από :

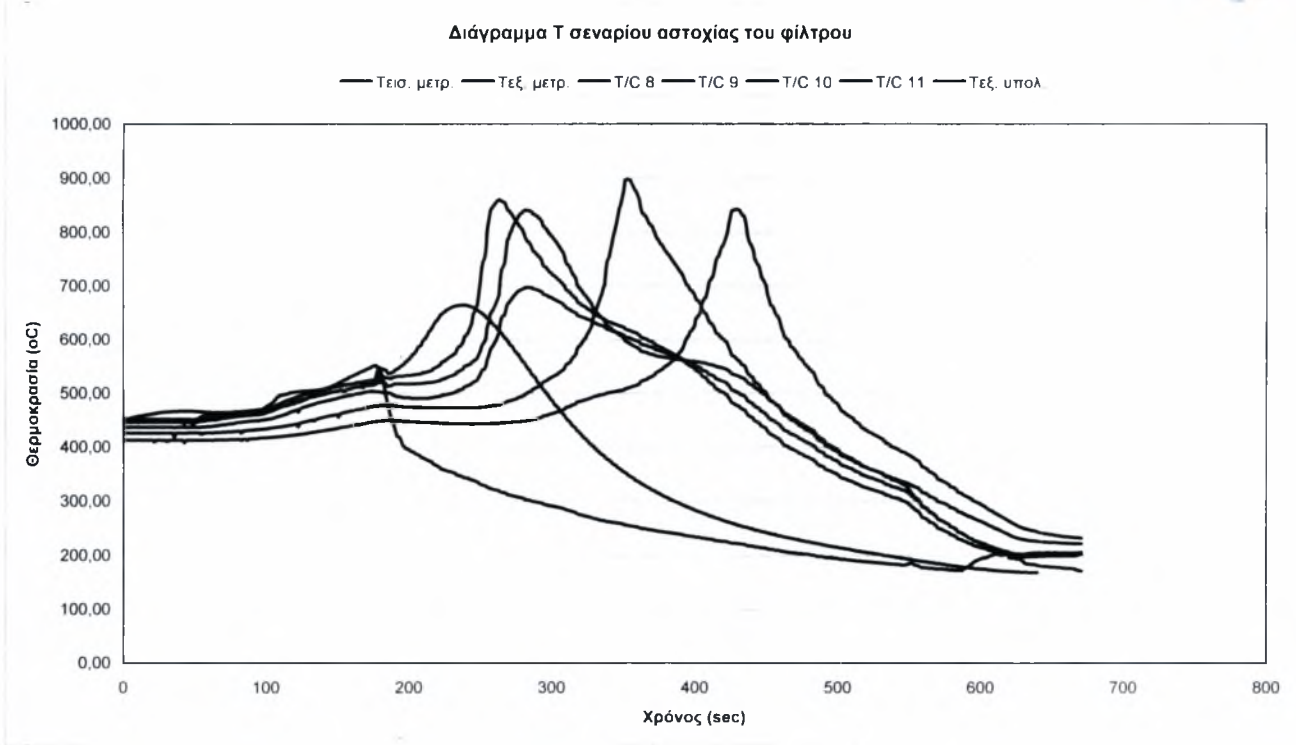
- τα θερμοστοιχεία εισόδου και εξόδου, τοποθετημένα στην είσοδο και στην έξοδο του φίλτρου
- τα θερμοστοιχεία 8 και 11, τοποθετημένα 1.5cm από την έξοδο του φίλτρου και σε ακτίνα 2.5cm (θερμοκρασία στο κέντρο)
- τα θερμοστοιχεία 9 και 10, τοποθετημένα 1.5cm από την έξοδο του φίλτρου και σε ακτίνα 6.3cm (θερμοκρασία στην περιφέρεια)

και η υπολογισμένη θερμοκρασία στην έξοδο του φίλτρου και η θερμοκρασία που υπολογίζει ο κώδικας. Το σχήμα 4.27 δείχνει την θέση των θερμοστοιχείων στο φίλτρο.

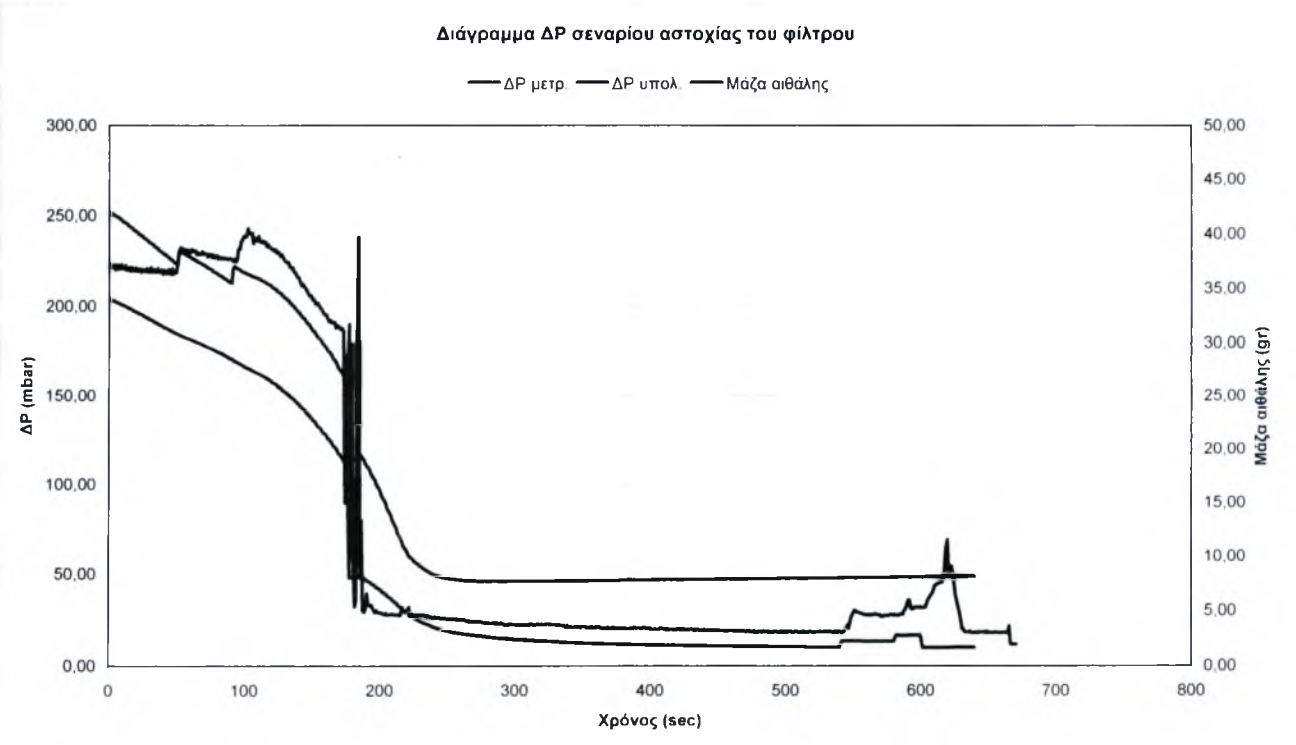


Σχήμα 4.28

Ο κινητήρας από 1860RPM/240Nm πηγαίνει σε 800RPM/10Nm. Αυτό έχει αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας στο φίλτρο. Ο κώδικας δείχνει να μην μπορεί να υπολογίσει ικανοποιητικά την αύξηση θερμοκρασίας και αυτό οφείλεται στο ότι το φαινόμενο είναι τρισδιάστατο και υπάρχει σημαντική μεταφορά θερμότητας και στις 3 διαστάσεις. Το σενάριο αυτό είναι μια περίπτωση αστοχίας του φίλτρου αφού οι υψηλή θερμοκρασία (μέχρι 900°C) και οι θερμικές τάσεις μπορούν να οδηγήσουν σε θραύση του φίλτρου.



Σχήμα 4.29



Σχήμα 4.30



4.3 Συμπεράσματα.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα πιο περίπλοκα πειράματα αφού τα φίλτρα δεν έχουν μόνωση και είναι πολύ κοντά στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Η εκτίμηση της φόρτισης είναι αρκετά δύσκολη και γίνεται από την προσέγγιση της πτώση πίεσης και της θερμοκρασίας. Έγινε προσπάθεια να επιλεγεί η σωστή κινητική, με σύγκριση 4 κινητικών του προσθέτου, όμως δεν μπορούμε να βγάλουμε σαφές συμπέρασμα. Οι δοκιμές με $E=70000\text{J/mole}$, $E=85000\text{J/mole}$, $E=100000\text{J/mole}$, $E=120000\text{J/mole}$ δείχνουν ότι η κινητική με $E=100000\text{J/mole}$ που αναφέρεται και στην βιβλιογραφία δείχνει να είναι η καλύτερη αλλά υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα αφού και οι άλλες κινητικές δίνουν πολύ καλό υπολογισμό της θερμοκρασίας και του ΔP . Επιπλέον, οι μετρήσεις TGA του εργαστηρίου για την ενέργεια ενεργοποίησης δίνουν τιμές για το E από 80000J/mole έως 120000J/mole .

Έτσι και αυτό δίνει μια εκτίμηση της κινητικής περίπου $E=100000\text{J/mole}$, όμως πρέπει να είμαστε επιφυλακτικοί για την τιμή της ενέργειας ενεργοποίησης. Επομένως προτείνεται να γίνουν περισσότερα πειράματα με διαφορετικές θερμοκρασίες αναγέννησης αλλά και με σταδιακή αύξηση του φορτίου έτσι ώστε να μπορέσουμε να βρούμε την κινητική που προσεγγίζει την καύση σε όλες τις περιπτώσεις.

Η απόκλιση του υπολογισμού του ΔP ίσως να οφείλεται στο ότι η αναγέννηση δεν γίνεται ομοιόμορφα σε όλο το φίλτρο. Είναι πιθανό ο καπνός να καίγεται περισσότερο στο κέντρο του φίλτρου λόγω ανομοιομορφίας της ροής και της θερμοκρασίας και έτσι το μονοδιάστατο μοντέλο δεν μπορεί να υπολογίσει σωστά την πτώση πίεσης.

Η συγκέντρωση προσθέτου στον καπνό επηρεάζει πολύ την αναγέννηση. Μεγάλη συγκέντρωση προσθέτου στον καπνό δίνει πιο απότομη καύση και έτσι ο σωστός υπολογισμός της έχει αποτέλεσμα για σωστότερους υπολογισμούς της θερμοκρασίας και του ΔP .

Ο υπολογισμός της παροχής από τον λόγο A/F και την μάζα καυσίμου όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8 δίνει μια αρκετά καλή εκτίμηση της.

Ο υπολογισμός για το σενάριο πιθανής αστοχίας του φίλτρου δείχνει ότι ο μονοδιάστατος κώδικας δεν μπορεί να υπολογίσει σωστά την μέτρηση αφού τα φαινόμενα είναι τρισδιάστατα. Έτσι προτείνεται η ανάπτυξη τρισδιάστατου μοντέλου για σωστότερους υπολογισμούς.

Ο υπολογισμός της φόρτισης που παρουσιάζεται στα σχήματα 4.25 και 4.26 επιβεβαιώνουν την γραμμική αύξηση του ΔP που αναφέρεται στη βιβλιογραφία, μετά από το αρχικό στάδιο φόρτισης. Ακόμα παρατηρείται γραμμική αύξηση και της μάζας καπνού αφού το σημείο λειτουργίας στη φόρτιση δεν μεταβάλλεται και οι εκπομπές καπνού.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου 4.

Vaclav Slovak, 'Determination of kinetic parameters by direct non-linear regression from TG curves', *Thermochimica Acta* 372 (2001) 175-182, 2001.



Kazushige Ohno, Koji Shimato, Noriyuki Taoka, Hong Santae, Takeshi Ninomiya, Teruo Komori, Olivier Salvat, 'Characterization of SiC-DPF for Passenger Car', SAE paper 2000-01-0185, 2000.

A. G. Konstandopoulos, E. Skarpedas, M. Masoudi, 'Inertial Contributions to the Pressure Drop of Diesel Particulate Filters', SAE paper 2001-01-0909, 2001.



Βιβλιογραφία

K. N. Pattas, A. M. Stamatelos, G. C. Koltsakis, I. P. Kandylas, W. Mustel, 'Computer Aided Engineering in the Design of Catalytically Assisted Trap Systems', SAE paper 970472, 1997.

G. C. Koltsakis, A. M. Stamatelos, P. Versaevel, H. Colas, C. Rigaudeau, R. Noiro, 'Some Empirical Observations on Diesel Particulate Filter Modeling and Comparison Between Simulations and Experiments', SAE paper 2000-01-477, 2000.

S. C. Sorenson, Jakob W. Hoj, Per Stobbe, 'Flow Characteristics of SiC Diesel Particulate Filter Materials', SAE paper, 940236, 1994.

Vaclav Slovak, 'Determination of kinetic parameters by direct non-linear regression from TG curves', *Thermochimica Acta* 372 (2001) 175-182, 2001.

Kazushige Ohno, Koji Shimato, Noriyuki Taoka, Hong Santae, Takeshi Ninomiya, Teruo Komori, Olivier Salvat, 'Characterization of SiC-DPF for Passenger Car', SAE paper 2000-01-0185, 2000.

A. G. Konstandopoulos, E. Skarpedas, M. Masoudi, 'Inertial Contributions to the Pressure Drop of Diesel Particulate Filters', SAE paper 2001-01-0909, 2001.

G. C. Koltsakis, Anastasios M. Stamatelos, 'Modeling Thermal Regeneration of Wall Flow Diesel Particulate Traps', *AIChE Journal*, 1995.

G. C. Koltsakis, A. M. Stamatelos, 'Modes of Catalytic Regeneration in Diesel Particulate Filters', *Ind. Eng. Chem. Res.* 1997, 36, 4155-4165, 1997.

G. C. Koltsakis, A. M. Stamatelos, 'Modeling Catalytic Regeneration of Diesel Particulate Traps', *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1996, (35), 1996.

Y. Miyairi, S. Miwa, F. Abe, Z. Xu, Y. Nakasuji, 'Numerical Study on Forced Regeneration of Wall Flow Diesel Particulate Filters', SAE paper 2001-01-0912, 2001.

A. M. Σταματέλος, 'Διδακτικές σημειώσεις στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης', Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, 2000.

John B. Heywood, 'Internal Combustion Fundamentals', McGraw Hill, 1988.

Y. A. Cengel, M. A. Boles, 'Θερμοδυναμική για μηχανικούς', Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε., Θεσσαλονίκη, 1998.



Γ. Α. Στρατάκης, 'Σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία του βενζινοκινητήρα', Εκδόσεις Άνωση, Αθήνα, 2000.

Johannes Winterhagen, 'Peugeot 607', ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 102 (2000) 5, 2000.

DieselNet Technology Guide, 'What is diesel fuel', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'The Case for the Diesel Engine', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'What are Diesel Emissions', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

Emission Standards, <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'Diesel Particulate Matter', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'Diesel Trap Concepts', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'Diesel Filter Regeneration', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'Wall-Flow Monoliths', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

DieselNet Technology Guide, 'Traps with Fuel Additives', <http://www.dieselnet.com>, 2001.

Peugeot Citroen, 'Technologies', http://www.psa.fr/en_index_diesel.html, 2001.

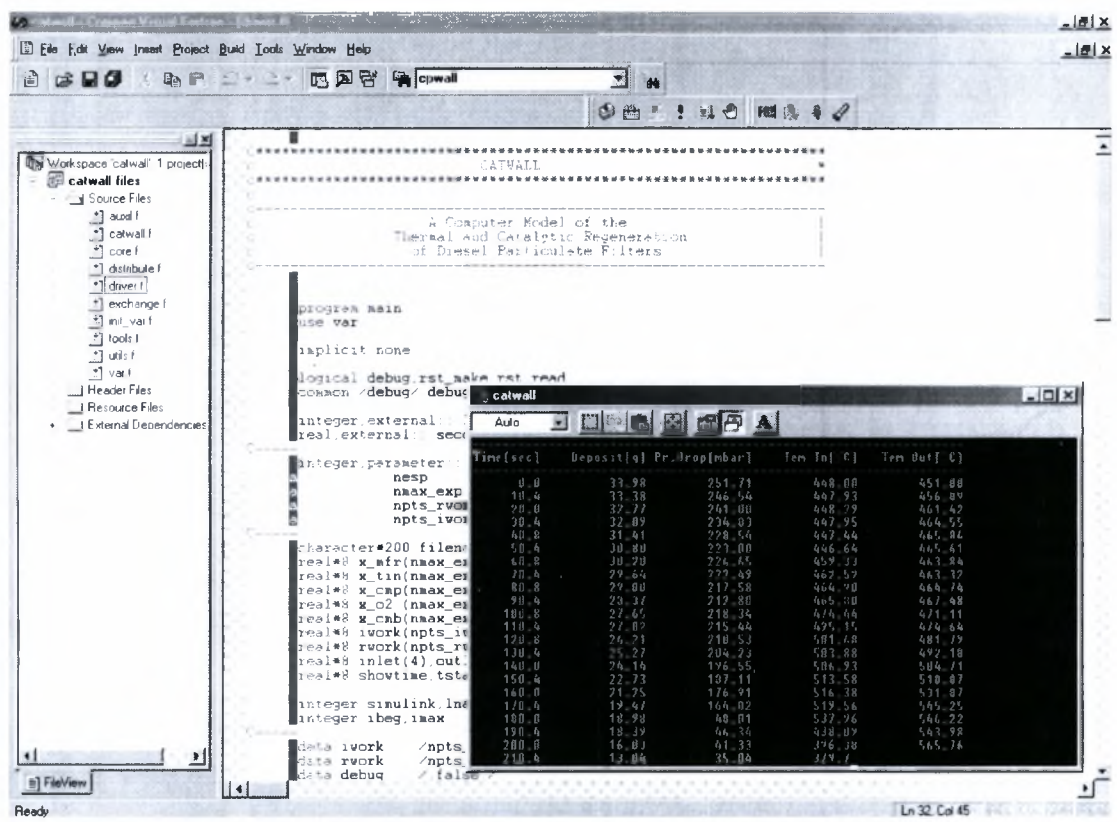


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ CATWALL

I.1 Λειτουργία του κώδικα Catwall.

Το Catwall είναι λογισμικό προσομοίωσης λειτουργίας φίλτρων αιθάλης και μπορεί να υπολογίσει θερμοκρασία, ΔP , μάζα αιθάλης και άλλα στοιχεία της ροής του καυσαερίου μέσα από το φίλτρο. Στον κώδικα Visual Fortran του Catwall δίνονται αρχικές και οριακές συνθήκες του φίλτρου και της ροής καυσαερίου και γίνεται ο υπολογισμός της λειτουργίας της παγίδας. Το σχήμα I.1 δείχνει το περιβάλλον εργασίας του κώδικα.



Σχήμα I.1

I.2 Υπολογισμοί για την θερμική αναγέννηση.

Το μοντέλο θεωρεί ότι η ροή περνάει διαμέσου του στρώματος καπνού που μειώνεται με το χρόνο κατά τη διάρκεια της αναγέννησης και του πορώδους τοιχώματος του φίλτρου. Ο υπολογισμός γίνεται σε δύο διαστάσεις κατά τον άξονα x και ακτινικά, οι μεταβολές κατά τη γωνία θ αγνοούνται. Θεωρείται ότι η απόθεση του καπνού στο κανάλι είναι ανάλογη της τοπικής ταχύτητας της ροής μέσω του καναλιού. Με άλλα λόγια, τα σωματίδια ακολουθούν πάντοτε τις ροϊκές γραμμές.

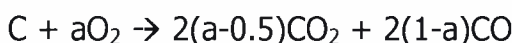
Τα σωματίδια αιθάλης περιέχουν και άκαυστους υδρογονάνθρακες και ενώσεις του θείου σε ποσοστό που κυμαίνεται από 5% ως 30% ανάλογα με



τον κινητήρα και το σημείο λειτουργίας του. Το μεγαλύτερο μέρος από τους άκαυστους υδρογονάνθρακες αεριοποιείται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτές που απαιτούνται για την οξειδωση της αιθάλης. Για λόγους απλοποίησης, θεωρείται ότι η οξειδωση του άνθρακα αντιπροσωπεύει πλήρως την οξειδωση των σωματιδίων καπνού. Η ποσότητα CO στα προϊόντα καύσης του καπνού είναι σημαντική για τον υπολογισμό της θερμότητας που εκλύεται κατά την διάρκεια της καύσης αφού η ενθαλπία οξειδωσης του CO είναι μεγάλη. Η οξειδωση του καπνού θεωρείται ότι γίνεται με δύο αντιδράσεις :



που μπορεί να γραφεί και ως εξής :



Όπου a ο βαθμός απόδοσης της καύσης και οι τιμές του a είναι από 0.5 έως 1 και μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά.

Η διατήρηση μάζας στο καυσαέριο είναι : $\rho v = \frac{F(t)}{A}$

όπου ρ η πυκνότητα του καυσαερίου, v η ταχύτητα, A η επιφάνεια της ροής και F(t) η παροχή καυσαερίου.

Το ισοζύγιο για το O₂ είναι :

$$\frac{d(\rho v y)}{dx} = -s_j k_j \rho y \quad j=1,2 \quad (1)$$

όπου 1 είναι η περιοχή του στρώματος καπνού και 2 η περιοχή του πορώδους τοιχώματος και k₂=0. Ο συντελεστής k₁ υπολογίζεται από τη σχέση :

$$k_1 = k e^{-\frac{E}{RT}}$$

Ακόμα γίνεται η παραδοχή ότι η θερμοκρασία καυσαερίου είναι ίση με αυτή της επιφάνειας του στρώματος καπνού και ότι οι απώλεια θερμότητας είναι αμελητέα. Έτσι το ισοζύγιο ενέργειας είναι :

$$\rho_j C_{pj} \frac{dT}{dt} = s_j \left(-\frac{\Delta H}{M_\alpha}\right) k_j \rho y + \frac{d}{dx} \left(\lambda_j \frac{dT}{dx}\right) - \rho v C_{pg} \frac{dT}{dx} \quad j=1,2 \quad (2)$$

όπου ΔH είναι η ενθαλπία της οξειδωσης του άνθρακα και εκφράζεται με την σχέση :

$$\Delta H = 2(a-0.5)\Delta H_1 + 2(1-a)\Delta H_2$$



Ο ρυθμός της μείωσης του πάχους του στρώματος καπνού είναι ανάλογος με το ρυθμό κατανάλωσης O_2 και αντιστρόφως ανάλογος με την απόδοση της οξειδωσης a έτσι είναι :

$$\rho_1 \frac{dw}{dt} = \frac{Mc}{Ma} \frac{F(t)}{A} [y(x=0) - y(x=-w)] \frac{1}{a} \quad (3)$$

οι αρχικές συνθήκες για το σύστημα (1), (2), (3) είναι :

$$T(x, t=0) = T_b$$

$$w(t=0) = w_b$$

οι οριακές συνθήκες :

$$y = y_i(t)$$

$$\lambda_1 \frac{dT}{dx} = \rho v C_{pg} [T - T_i(t)]$$

$$\text{και για } x = w_s \text{ είναι } \frac{dT}{dx} = 0$$

Η εκτίμηση της μάζας αιθάλης στο φίλτρο δεν είναι εύκολη αλλά είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη φόρτιση αφού επηρεάζει την θερμοκρασία και τη διάρκεια της αναγέννησης. Οι τρόποι εκτίμησης της μάζας καπνού είναι :

- Μέτρηση του βάρους του φίλτρου όταν είναι καθαρό και με φόρτιση.
- Μέτρηση των εκπομπών σωματιδίων πριν και μετά την παγίδα κατά τη διάρκεια της φόρτισης και γίνεται με ισοζύγιο μάζας της αιθάλης.
- Υπολογισμός της φόρτισης από την πτώση πίεσης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της παγίδας στο όχημα για να αποφύγουμε την υπερβολική φόρτιση του φίλτρου. Η πτώση πίεσης είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση της φόρτισης, της παροχής καυσαερίου και της θερμοκρασίας. Ακόμα σημαντική είναι και η σύσταση των σωματιδίων. Επειδή δεν είναι εύκολο να γνωρίζουμε τη σύσταση του καπνού η μέθοδος δεν έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια.
- Υπολογισμός της καιόμενης μάζας από ισοζύγιο άνθρακα, με μέτρηση των εκπομπών CO , CO_2 στην είσοδο και έξοδο της παγίδας. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε εργαστηριακές συνθήκες με συνθετικό καυσαέριο, όταν οι συγκεντρώσεις CO , CO_2 στην είσοδο είναι ορισμένες με ακρίβεια.

1.3 Υπολογισμοί για την καταλυτική αναγέννηση.

Ο καπνός που δεν περιέχει πρόσθετο οξειδώνεται σε υψηλή θερμοκρασία και κατάλληλη παροχή και συγκέντρωση O_2 . Ο αριθμός Damkohehler δίνει πληροφορίες για τον τύπο της αναγέννησης (regeneration mode) και είναι :

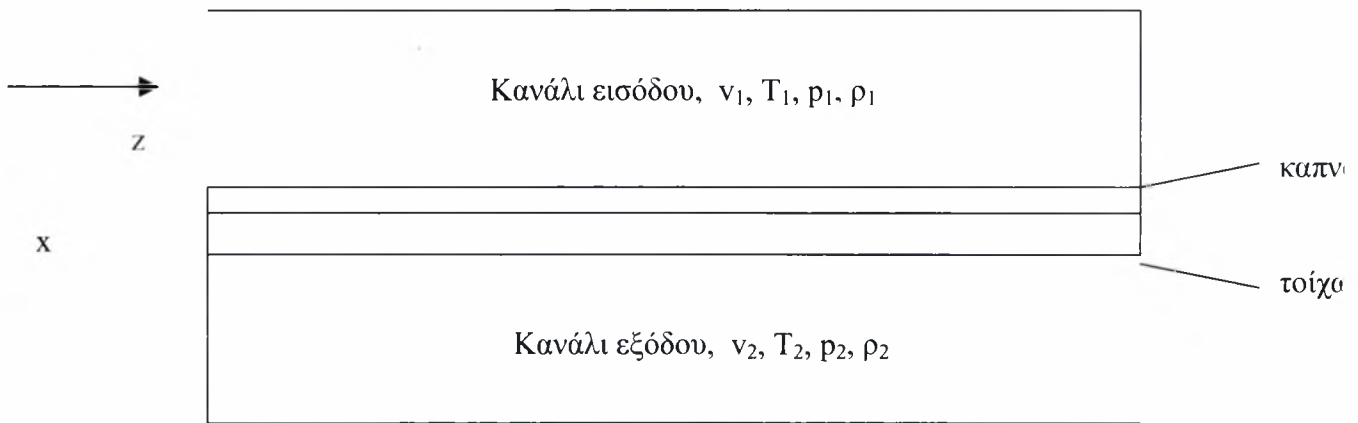
$$Da = \frac{t_{flow}}{t_{reaction}} = \frac{W \rho_g y S_p k_1 T_w}{V_w \rho_p}$$



Όταν ο αριθμός Da είναι μικρότερος από μια συγκεκριμένη τιμή δεν γίνεται οξειδωση του καπνού. Οι έντονες αναγεννήσεις χαρακτηρίζονται από υψηλούς αριθμούς Da.

Η επίδραση του προσθέτου περιγράφεται από 2 θεωρίες, την θεωρία μεταφοράς ηλεκτρονίων και την θεωρία μεταφοράς O₂. Σύμφωνα με την πρώτη θεωρία γίνεται ανταλλαγή ηλεκτρονίων ανάμεσα στα άτομα του προσθέτου και του άνθρακα με αποτέλεσμα οι δεσμοί των ατόμων C στην επιφάνεια του να είναι ασθενέστεροι και έτσι ευνοείται η αντίδραση με το O₂. Σύμφωνα με τη δεύτερη θεωρία το πρόσθετο αποθηκεύει και ανταλλάσσει άτομα O₂ με τα άτομα C και το καυσαέριο.

Το μοντέλο βασίζεται στη δεύτερη θεωρία και είναι μονοδιάστατο έτσι ώστε να μπορεί να υπολογίζει τις μεταβολές θερμοκρασίας και ροής κατά μήκος του καναλιού. Το σχήμα I.2 δείχνει τα κανάλια εισόδου και εξόδου, το τοίχωμα και το στρώμα καπνού.



Σχήμα I.2

Οι τιμές της θερμοκρασίας καυσαερίου, πυκνότητας, ταχύτητας και πίεσης είναι ο μέσος όρος των τιμών της ακτινικής διεύθυνσης. Η αγωγή κατά την διεύθυνση x στο τοίχωμα κυριαρχεί και έτσι η θερμοκρασία του τοιχώματος μπορεί να εκφραστεί ανεξάρτητη του x παρόλο που η θερμότητα της καύσης παράγεται μόνο στο στρώμα καπνού. Η μεταφορά θερμότητας διαμέσου του τοιχώματος είναι τόσο μεγάλη ώστε η θερμοκρασία του καυσαερίου και του τοιχώματος μπορούν να θεωρηθούν ίσες εκτός από ένα λεπτό στρώμα στην επιφάνεια προς το κανάλι εισαγωγής.

Η διατήρηση μάζας στο κανάλι είναι :

$$\frac{d(\rho_i v_i^2)}{dz} = (-1)^i \frac{4}{D} \rho_w v_w \quad (5)$$

Η διατήρηση ορμής στο κανάλι στη διεύθυνση z είναι :

$$\frac{d\rho_i}{dz} (\rho_i v_i^2) = -\frac{\alpha_i \mu v_i}{D^2} \quad (6)$$



το δεξιό μέρος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει την πτώση πίεσης αξονικά λόγω των δυνάμεων του ιξώδους. Η μάζα που περνάει μέσα από το τοίχωμα είναι πολύ μικρότερη από την αξονική ροή η ταχύτητα μοιάζει με αυτή σε ροή σε κλειστούς αγωγούς. Έτσι η πτώση πίεσης υπολογίζεται από τις εξισώσεις για τη ροή σε αγωγούς τετραγωνικής διατομής.

Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας στο κανάλι περιλαμβάνει την μετάδοση θερμότητας με συναγωγή ανάμεσα στο καυσαέριο και το τοίχωμα του φίλτρου και την ενθαλπία από ή προς το τοίχωμα.

Στο κανάλι εισόδου το καυσαέριο βγαίνει από τον όγκο ελέγχου με θερμοκρασία T_1 και έτσι έχουμε :

$$C_{pg}[D^2\rho_1u_1T_{1(z+\Delta z)} - D^2\rho_1u_1T_{1(z)} + 4D\Delta z\rho_wu_wT_{1(z)}] = h_1[4D\Delta z(T_w - T_1)] \quad (7)$$

Από τις εξισώσεις (5),(7) έχουμε :

$$C_{pg}(\rho_1u_1)_{(z+\Delta z)} \frac{dT}{dz} = h_1 \frac{4}{D} (T_w - T_1) \quad (8)$$

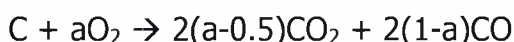
Στο κανάλι εξόδου το καυσαέριο μπαίνει με θερμοκρασία T_w και έτσι έχουμε :

$$C_{pg}[D^2\rho_2u_2T_{2(z+\Delta z)} - D^2\rho_2u_2T_{2(z)} + 4D\Delta z\rho_wu_wT_{2(z)}] = h_2[4D\Delta z(T_w - T_2)] \quad (9)$$

Από τις εξισώσεις (5), (9) έχουμε :

$$C_{pg}(\rho_2u_2)_{(z)} \frac{dT}{dz} = (h_2 + C_{pg}\rho_wu_w) \frac{4}{D} (T_w - T_2) \quad (10)$$

Η οξειδωση του καπνού περιγράφεται και σε αυτή τη περίπτωση από την εξίσωση :



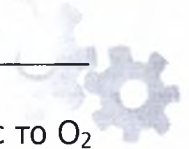
Και η ενθαλπία της οξειδωσης του καπνού είναι :

$$\Delta H = 2(a-0.5)\Delta H_1 + 2(1-a)\Delta H_2$$

Ο ρυθμός της αντίδρασης περιγράφεται από το νόμο του Arrhenius και είναι :

$$k_1 = k e^{-\frac{E}{RT}}$$

Το πρόσθετο σχηματίζει διάφορα οξειδία και έτσι το πρόσθετο μπορεί να βρίσκεται σε υψηλή ή χαμηλή κατάσταση οξειδωσης. Το μοντέλο θεωρεί ότι στα σωματίδια καπνού κάθε άτομο προσθέτου είναι ενωμένο με κάποια άτομα C ή υδρογονάνθρακα. Έτσι στο φίλτρο το πρόσθετο είναι στην υψηλή κατάσταση οξειδωσης. Όταν η θερμοκρασία φτάσει μια συγκεκριμένη τιμή το οξείδιο του προσθέτου απελευθερώνει ένα άτομο που αντιδρά με τον καπνό και έτσι φτάνει στην χαμηλή κατάσταση οξειδωσης. Τα προϊόντα της αναγωγής μπορούν να αντιδράσουν με το O_2 και έτσι αυτή η διαδικασία



οξειδωσης και αναγωγής έχει αποτέλεσμα την αντίδραση του καπνού με το O₂ διαμέσου του προσθέτου.

Η συγκέντρωση του καταλύτη στο στρώμα καπνού υπολογίζεται από τη σχέση :

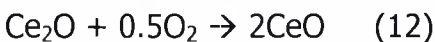
$\xi = (\text{αριθμός moles οξειδίου προσθέτου στον καπνό}) / (\text{αριθμός moles άνθρακα στον καπνό})$

και το ξ εξαρτάται από τη συγκέντρωση προσθέτου στο καύσιμο και από τις εκπομπές καπνού του κινητήρα κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

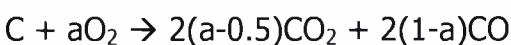
Τα οξειδία του προσθέτου μπορούν να βρίσκονται σε υψηλή ή χαμηλή κατάσταση οξειδωσης στο στρώμα καπνού, έτσι έχουμε :

$\psi = (\text{αριθμός οξειδίων στον καπνό σε υψηλή κατάσταση οξειδωσης}) / (\text{συνολικό αριθμό οξειδίων στον καπνό})$

Στην καταλυτική αναγέννηση η κατάσταση των οξειδίων μετάλλου (προσθέτου) μπορεί να αλλάξει αντιδρώντας είτε με το O₂ του καυσαερίου είτε με τα άτομα C που υπάρχουν στον καπνό. Έτσι αν υποθέσουμε ότι το πρόσθετο με σθένος -1 και -2 σχηματίζει οξειδία οι ακόλουθες αντιδράσεις οξειδοαναγωγής γίνονται :



Όπου a_{cat} είναι ο βαθμός της καταλυτικής οξειδωσης του καπνού. Αυτές οι 2 αντιδράσεις μαζί με την



αντιπροσωπεύουν την καταλυτική οξειδωση του καπνού. Ο ρυθμός της αντίδρασης (11) εκφράζεται από τον νόμο του Arrhenius και εξαρτάται από τη θερμοκρασία σύμφωνα με τη σχέση :

$$R_{αναγωγής} = k_{αναγωγής} \psi e^{-E_{αναγωγής}/RT} \quad (13)$$

Ο ρυθμός της αντίδρασης (12) είναι ανάλογος της συγκέντρωσης O₂ στο καυσαέριο και του αριθμού οξειδίων σε χαμηλή κατάσταση οξειδωσης που είναι 1- ψ . Έτσι και ο ρυθμός της αντίδρασης (12) είναι :

$$R_{οξειδωσης} = k_{οξειδωσης} [O_2] (1-\psi) e^{-E_{οξειδωσης}/RT} \quad (14)$$

και ο ρυθμός αλλαγής του ψ είναι :

$$\frac{d\psi}{dt} = R_{οξειδωσης} - R_{αναγωγής} \quad (15)$$

Επομένως η στοιχειομετρία της αναγωγικής αντίδρασης, η διατήρηση της μάζας στο στρώμα καπνού και αν υποθέσουμε η ποσότητα καπνού μειώνεται είναι :



$$\rho_p \frac{dw}{dt} = -\frac{M_c}{M_{O_2}} \rho_w u_w \gamma \frac{1}{a} (1 - \exp(-\frac{S_p k_1 T_w w}{\nu_w} \alpha)) - \frac{1}{2\alpha_{cat}} \rho_p w \xi R_{αναγωγής} \quad (16)$$

Το ισοζύγιο ενέργειας στο τοίχωμα είναι :

$$\frac{d}{dt} (\rho_p C_{p,p} T_w + \rho_s C_{p,s} T_w) = h_1 (T_1 - T_w) + h_2 (T_2 - T_w) + \rho_w u_w C_{p,g} (T_1 - T_w) + H_{αντιδρασης} + H_{αγωγής}$$

από την εξίσωση (16) μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμότητα που εκλύεται από την αντίδραση ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας έτσι έχουμε :

$$H_{αντιδρασης} = (-\frac{\Delta H}{M_{O_2}}) \rho_w u_w \gamma \frac{1}{a} (1 - \exp(-\frac{S_p k_1 T_w w}{\nu_w} \alpha)) - \frac{1}{4\alpha_{cat} M_c} \rho_p w \Delta H \xi R_{αναγωγής}$$

και η θερμότητα που μεταφέρεται με αγωγή είναι :

$$H_{αγωγής} = -\lambda_p \frac{d}{dz} (w \frac{dT_w}{dz}) - \lambda_s w_s \frac{d^2 T_w}{dz^2}$$

Ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης διαμέσου του στρώματος καπνού και του τοιχώματος γίνεται θεωρώντας ότι η ροή περνάει μέσα από 2 πορώδες υλικά χρησιμοποιώντας το νόμο του Darcy και έτσι είναι :

$$p_1 - p_2 = \frac{\mu}{k_p} u_w w + \frac{\mu}{k_s} u_s w_s \quad (17)$$

Οι αρχικές συνθήκες που πρέπει να καθοριστούν είναι η αρχική θερμοκρασία, φόρτιση και συγκέντρωση του προσθέτου κατά μήκος του καναλιού. Οι οριακές συνθήκες είναι η θερμοκρασία καυσαερίου, παροχή και συγκέντρωση O₂ σε σχέση με το χρόνο και η πίεση στην έξοδο του φίλτρου.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του φίλτρου λύνονται αριθμητικά με μεθόδους πεπερασμένων διαφορών με επαναληπτική διαδικασία ώστε να εξασφαλίζεται μηδενική αξονική ταχύτητα στο τέλος του καναλιού εισόδου και ατμοσφαιρική πίεση στο τέλος του καναλιού εξόδου.

Η διαδικασία επίλυσης αποτελείται από τα εξής μέρη :

- Υπολογισμός των μεγεθών της ροής (πίεση, αξονική ταχύτητα και ταχύτητα στο τοίχωμα, κατανομή θερμοκρασίας) στα κανάλια εισόδου και εξόδου με επαναληπτική διαδικασία. Θεωρούμε μια τιμή πίεσης στον πρώτο κόμβο στο κανάλι εξόδου, μια αυθαίρετη τιμή πίεσης στο πρώτο τμήμα του καναλιού εισόδου και η ταχύτητα στο τοίχωμα υπολογίζεται από τη σχέση (17). Στη συνέχεια ολοκληρώνουμε αριθμητικά την εξίσωση (5) αφού η ταχύτητα στο τοίχωμα είναι γνωστή και έτσι παίρνουμε την ταχύτητα καυσαερίου για το επόμενο βήμα. Η εξίσωση (8) δίνει την θερμοκρασία στον επόμενο κόμβο. Με βάση την μεταβολή της παροχής στην διεύθυνση z και γνωστές τις σχέσεις για τη πτώση πίεσης σε γραμμική ροή, η πίεση στον επόμενο κόμβο μπορεί να υπολογιστεί αν

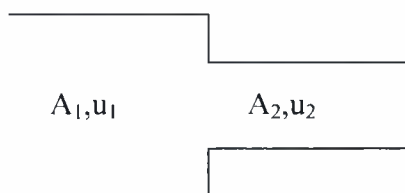


ολοκληρώσουμε την εξίσωση (6). Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να συνεχιστεί κατά μήκος του καναλιού και έτσι προσδιορίζεται η τιμή της αξονικής ταχύτητας στον τελευταίο κόμβο. Αν αυτή η τιμή δεν είναι αρκετά μικρή (μικρότερη από το 0.01 της ταχύτητας στον πρώτο κόμβο), η εκτίμηση της αρχικής πίεσης εισόδου διορθώνεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Το δεύτερο κριτήριο που πρέπει να ικανοποιηθεί είναι ότι η πίεση στον τελευταίο κόμβο του καναλιού εξόδου θα πρέπει να είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Αν αυτό δεν ισχύει θεωρούμε μια άλλη τιμή στον πρώτο κόμβο του καναλιού εξόδου και επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς. Οι διορθώσεις γίνονται με μέθοδο της τέμνουσας για να επιτύχουμε γρηγορότερη σύγκλιση.

- Οι εξισώσεις (15),(16) αφού τα μεγέθη της ροής είναι γνωστά, επιλύονται για κάθε κόμβο με τη μέθοδο Runge-Kutta 4^{ης} τάξης για να βρούμε τις μεταβολές του w και του ψ . Με τον ίδιο τρόπο η εξίσωση της $H_{\text{αντιδρασης}}$ δίνει την θερμότητα που εκλύεται από την καύση του καπνού. Έτσι η εξίσωση του ισοζυγίου ενέργειας στο τοίχωμα μπορεί να λυθεί για να πάρουμε τις νέες τιμές θερμοκρασιών κατά μήκος του καναλιού.

Η πτώση πίεσης οφείλεται σε 4 μηχανισμούς :

- ΔP_1 λόγω αλλαγής της διατομής της ροής.



Το ΔP_1 είναι

$$\Delta P_1 = \rho g h_1 = \rho (1 - A_2/A_1) \frac{u_2^2}{2}$$

- ΔP_2 λόγω τριβής στο τοίχωμα.

Η εξίσωση Darcy-Weibach

$$\Delta P_2 = \rho g h_2 = \rho g \left(f \frac{L u_c^2}{H 2g} \right)$$

Όπου

f ο συντελεστής τριβής

L το μήκος του φίλτρου

H το πλάτος του καναλιού

u_c η μέση ταχύτητα στο κανάλι

- ΔP_3 λόγω της ροής διαμέσου του τοιχώματος.

Η διαπερατότητα του τοιχώματος εξαρτάται από το πορώδες και το μέγεθος των πόρων και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$\Delta P_3 = \frac{1}{k_0} \mu_s w$$

Όπου



$$k_0 = \frac{\varepsilon^{5.5}}{5.6} D_f^2 \text{ η διαπερατότητα του τοιχώματος}$$

μ το ιξώδες

u_s η ταχύτητα

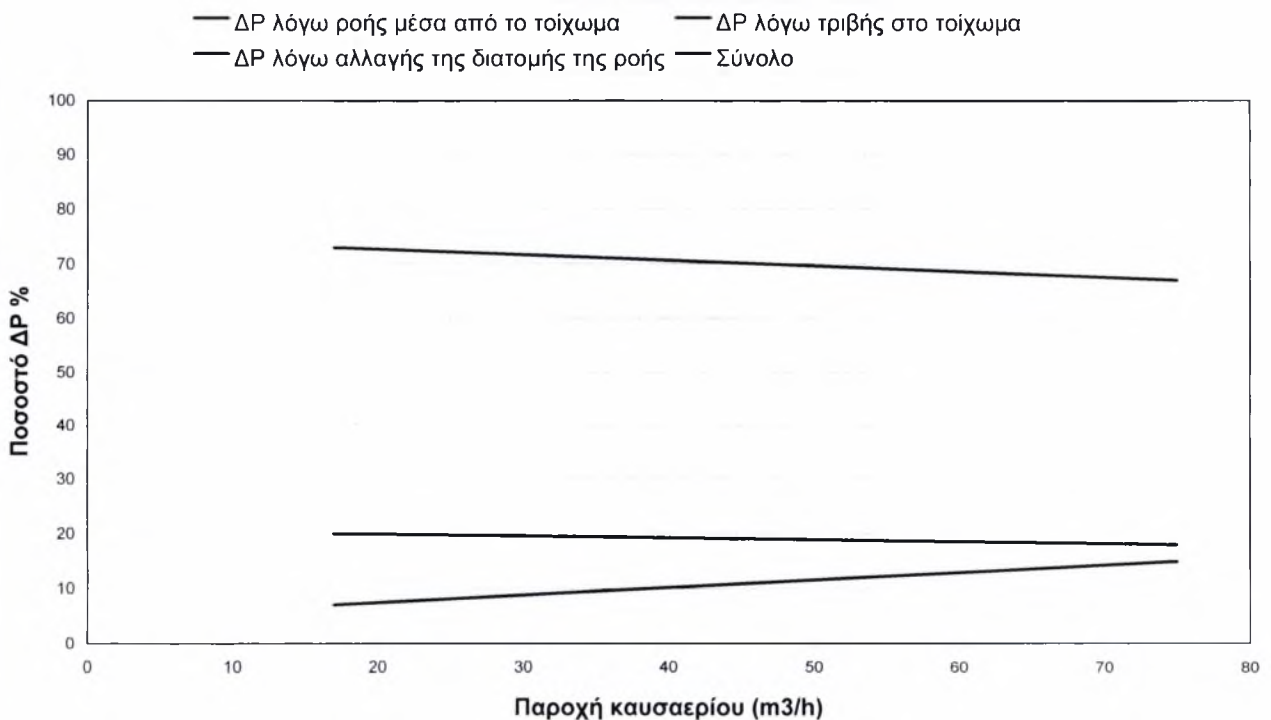
ε το πορώδες του υλικού

D_f η διάμετρος των πόρων

- ΔP_4 λόγω της ροής μέσα από το στρώμα καπνού και στάχτης

Αν θεωρήσουμε ότι το στρώμα καπνού είναι ομοιόμορφο κατά μήκος του καναλιού και ότι η στάχτη συγκεντρώνεται από το πίσω μέρος του φίλτρου προς τα εμπρός, μπορούμε να υπολογίσουμε το μήκος του στρώματος καπνού και στάχτης. Αυτό αλλάζει το ενεργό μήκος και πλάτος του καναλιού και από τις παραπάνω εξισώσεις βρίσκουμε το ΔP_4 αν αλλάξουμε το πάχος του καπνού και το μήκος του φίλτρου.

Το ποσοστό συνεισφοράς στο συνολικό ΔP του φίλτρου όταν είναι καθαρό φαίνεται στο παρακάτω ενδεικτικό σχήμα.

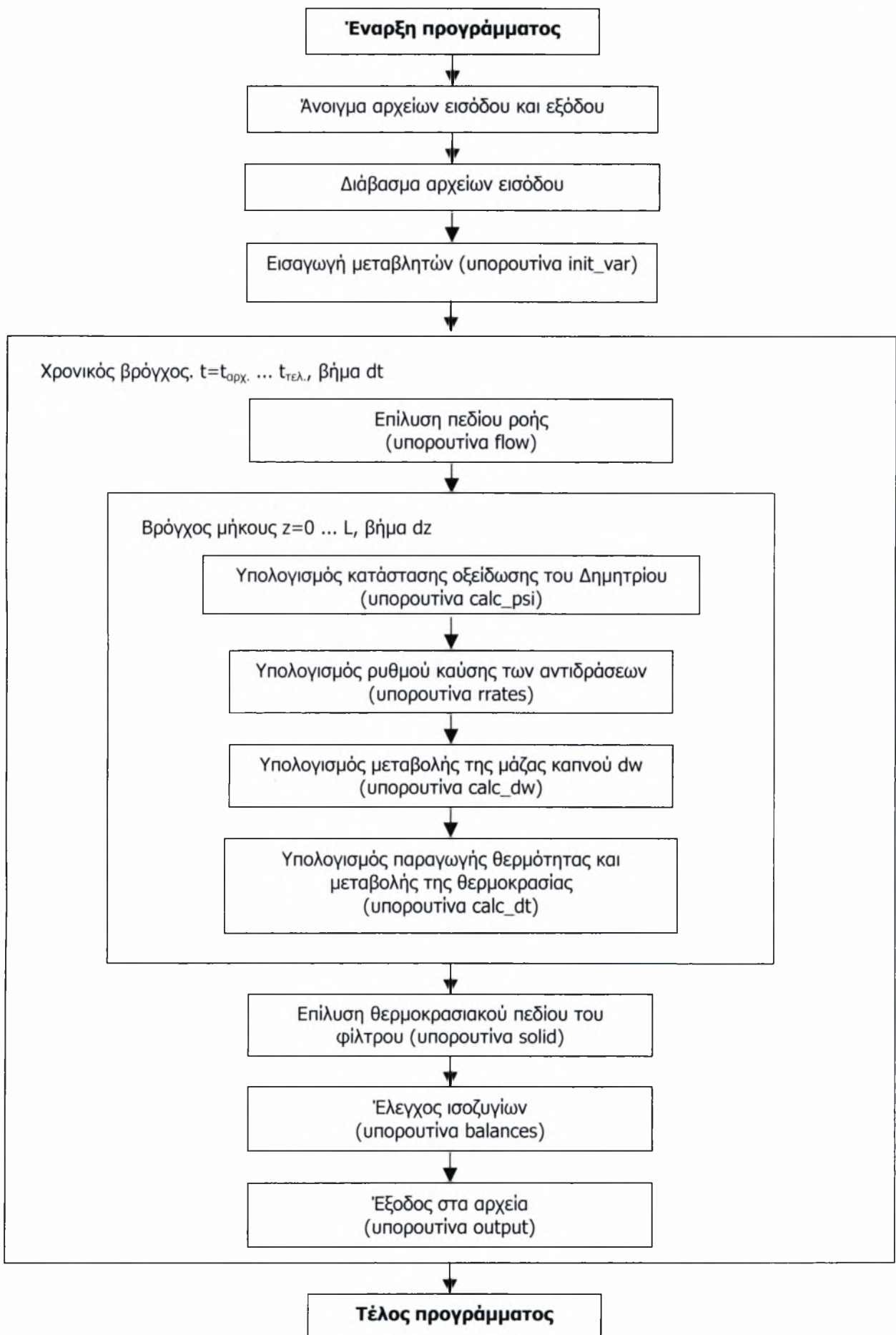


Σχήμα Ι.3

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα για μεγάλη παροχή καυσαερίου το ΔP λόγω αλλαγής της διατομής της ροής γίνεται σημαντικό και φτάνει το 15%.



Ι.4 Λογικό διάγραμμα του κώδικα.





I.5 Αρχεία εισόδου και αρχεία εξόδου.

Τα αρχεία εισόδου του Catwall είναι :

.tin

Το αρχείο .tin έχει 2 στήλες. Στην πρώτη είναι ο χρόνος (sec) και η δεύτερη είναι η θερμοκρασία (K) του καυσαερίου στην είσοδο του φίλτρου αιθάλης.

.mfr

Το αρχείο .mfr έχει 2 στήλες. Στην πρώτη είναι ο χρόνος (sec) και η δεύτερη είναι η παροχή μάζας (kg/sec) του καυσαερίου.

.cmp

Το αρχείο .cmp έχει 16 στήλες. Στην πρώτη είναι ο χρόνος (sec) και οι υπόλοιπες είναι το μοριακό κλάσμα των 16 ειδών αερίου στην είσοδο του φίλτρου.

.tim

Το αρχείο .tim περιέχει το χρόνο (sec) έναρξης και το χρόνο (sec) ολοκλήρωσης του υπολογισμού, το βήμα του υπολογισμού και τις ρυθμίσεις για επανέναρξη του υπολογισμού.

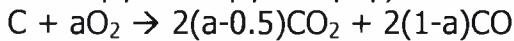
.dpf

Το αρχείο .dpf περιέχει τις ιδιότητες του φίλτρου και άλλες παράμετρος απαραίτητους για τον υπολογισμό. Ετσι στο αρχείο .dpf εισάγονται :

- ο αριθμός των κόμβων υπολογισμού
- η διάμετρος και το μήκος του φίλτρου
- η διάμετρος του διαχύτη στην εξαγωγή, σταθερές πτώσης πίεσης στο διαχύτη
- ο αριθμός των καναλιών ανά τετραγωνική ίντσα (channels per square inch, cpsi)
- το μήκος της τάπας των καναλιών (m)
- η ειδική θερμότητα του καπνού (J/kgK)
- η πυκνότητα του καπνού (kg/m³)
- η πυκνότητα του τοιχώματος (kg/m³)
- η αγωγιμότητα του καπνού (W/mK)
- η διαπερατότητα του καπνού (m²)
- η διαπερατότητα του τοιχώματος (m²)
- η αρχική φόρτιση της παγίδας (gr)
- το πάχος του υποστρώματος (m)
- η αρχική θερμοκρασία του φίλτρου (°C)
- η θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)
- η πίεση περιβάλλοντος (Pa)
- το πάχος της μόνωσης του φίλτρου (m)
- η θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης (W/mK)
- η πυκνότητα της μόνωσης (kg/m³)
- η θερμοχωρητικότητα της μόνωσης
- η σταθερά απωλειών θερμότητας στο περιβάλλον



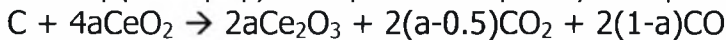
- οι εκπομπές αιθάλης του κινητήρα (gr/h)
- η αξονική ανομοιομορφία απόθεσης του καπνού (από 0 έως 1)
- η κινητική της καύσης της αιθάλης, ο προεκθετικός παράγοντας και η ενέργεια ενεργοποίησης του καπνού για την αντίδραση :



Σύμφωνα με το νόμο του Arrhenius $R = K e^{-\frac{E}{RT}}$

Όπου R ο ρυθμός της αντίδρασης, K ο προεκθετικός παράγοντας και E η ενέργεια ενεργοποίησης (activation energy).

- η κινητική του προσθέτου, ο προεκθετικός παράγοντας και η ενέργεια ενεργοποίησης του προσθέτου για τις αντιδράσεις :



- το a που καθορίζει το ποσοστό του άνθρακα που μετατρέπεται σε CO και CO₂
- Την περιεκτικότητα του προσθέτου στο καύσιμο (ppm).

Τα αρχεία εξόδου του Catwall είναι :

.mp

Το αρχείο .mp περιέχει την συνολική μάζα καπνού στο φίλτρο και την πτώση πίεσης στο φίλτρο σε σχέση με το χρόνο.

.tex

Το αρχείο .tex περιέχει την θερμοκρασία καυσαερίου στην είσοδο και στην έξοδο του φίλτρου και την μέγιστη θερμοκρασία του.

.tem

Το αρχείο .tem περιέχει τη θερμοκρασία σε κάθε κόμβο σε σχέση με το χρόνο (°C).

.pre

Το αρχείο .pre περιέχει την πίεση σε κάθε κόμβο και σχέση με το χρόνο (Pa).

.wz

Το αρχείο .wz περιέχει το πάχος του στρώματος καπνού σε κάθε κόμβο σε σχέση με το χρόνο (m).

.t1

Το αρχείο .t1 περιέχει την αξονική κατανομή της θερμοκρασίας του καναλιού εισόδου σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

.t2

Το αρχείο .t2 περιέχει την αξονική κατανομή της θερμοκρασίας του καναλιού εξόδου σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

.f1



Το αρχείο .f1 περιέχει την αξονική κατανομή της αξονικής παροχής καυσαερίου του καναλιού εισόδου σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

.f2

Το αρχείο .f2 περιέχει την αξονική κατανομή της αξονικής παροχής καυσαερίου του καναλιού εξόδου σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

.fw

Το αρχείο .fw περιέχει την αξονική κατανομή της παροχής καυσαερίου διαμέσου του τοιχώματος σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

.p1

Το αρχείο .p1 περιέχει την αξονική κατανομή της πίεσης στο κανάλι εισόδου σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

.p2

Το αρχείο .p2 περιέχει την αξονική κατανομή της πίεσης στο κανάλι εξόδου σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

.tw

Το αρχείο .tw περιέχει την αξονική κατανομή της θερμοκρασίας του τοιχώματος σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

.dep

Το αρχείο .dep περιέχει την αξονική κατανομή του πάχους του στρώματος καπνού σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

.psi

Το αρχείο .psi περιέχει την αξονική κατανομή του λόγου ψ σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

.chk

Το αρχείο .chk περιέχει την είσοδο, την έξοδο και την συσσώρευση ενέργειας στο καυσαέριο σε σχέση με το χρόνο.

.cum

Το αρχείο .cum περιέχει την συνολική είσοδο, την έξοδο και την συσσώρευση ενέργειας στο καυσαέριο σε σχέση με το χρόνο.

.mch

Το αρχείο .mch περιέχει την παροχή καυσαερίου στην είσοδο και στην έξοδο του φίλτρου και τη συνολική παροχή καυσαερίου διαμέσου του τοιχώματος.

Οι προσθήκες που έγιναν στον κώδικα δίνουν τη δυνατότητα να γίνει υπολογισμός λειτουργίας φίλτρων κορδιερίτη και SiC. Έτσι εισάχθηκαν στον κώδικα του Catwall η ειδική θερμότητα του SiC και η μεταβολή με την



θερμοκρασία $C_{pwall_{SiC}}=2e-7T^3-0.001*T^2+1.6186*T+320.17$ και η αγωγιμότητα του και η μεταβολή με τη θερμοκρασία.

1.6 Δυνατότητες ανάπτυξης του κώδικα.

Το μονοδιάστατο μοντέλο υπολογίζει ικανοποιητικά την θερμοκρασία κατά μήκος του φίλτρου στις περιπτώσεις χαμηλής και υψηλής ταχύτητας καυσαερίου. Η κινητική της καταλυτικής οξειδωσης του καπνού επηρεάζει αρκετά τους υπολογισμούς και θα πρέπει οι παράμετροι της κινητικής να ρυθμιστούν σωστά (tuning) έτσι ώστε να είναι κοντά στις πραγματικές συνθήκες αναγέννησης. Επίσης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και κάποιοι άλλοι βαθμοί ελευθερίας όπως είναι :

- Οι μεταβολές της φόρτισης κατά μήκος του καναλιού. Θα πρέπει να συμπεριλάβουμε στο μοντέλο την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων στην εξαγωγή και την επιρροή της εισόδου του καυσαερίου στο φίλτρο. Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να προβλέπει την ανομοιομορφία της απόθεσης καπνού στο κανάλι αφού αποτελεί δεδομένο εισόδου.
- Οι μεταβολές στην ταχύτητα καυσαερίου στην είσοδο σε διάφορα κανάλια στο φίλτρο. Η κατανομή της ροής είναι ανομοιόμορφη στην είσοδο του φίλτρου σε σταθερά και μεταβατικά σημεία λειτουργίας του κινητήρα. Συχνά μπορεί να παρατηρηθεί μέχρι 30% μεγαλύτερη ταχύτητα στο κέντρο από την περιφέρεια.

Οι μεταβολές της φόρτισης σε διάφορα κανάλια του φίλτρου. Οι διαφορές στην φόρτιση έχουν αποτέλεσμα διαφορετική θερμοκρασία στην αναγέννηση.

Υπάρχει μια έκδοση του Catwall που τρέχει σε 2 διαστάσεις αλλά θα πρέπει να αναπτυχθεί ώστε να μπορεί να υπολογίζει τις μεταβολές των μεγεθών και στις 3 διαστάσεις. Αυτό θα δώσει την δυνατότητα σωστών υπολογισμών όπως του σεναρίου αστοχίας του φίλτρου που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4. Επίσης θα ήταν χρήσιμη η προσθήκη του υπολογισμού του λόγου αναγέννησης από τον κώδικα. Ακόμα θα ήταν πολύ χρήσιμη η βελτίωση του περιβάλλοντος εργασίας του Catwall ώστε να γίνει πιο εύχρηστο και λειτουργικό.



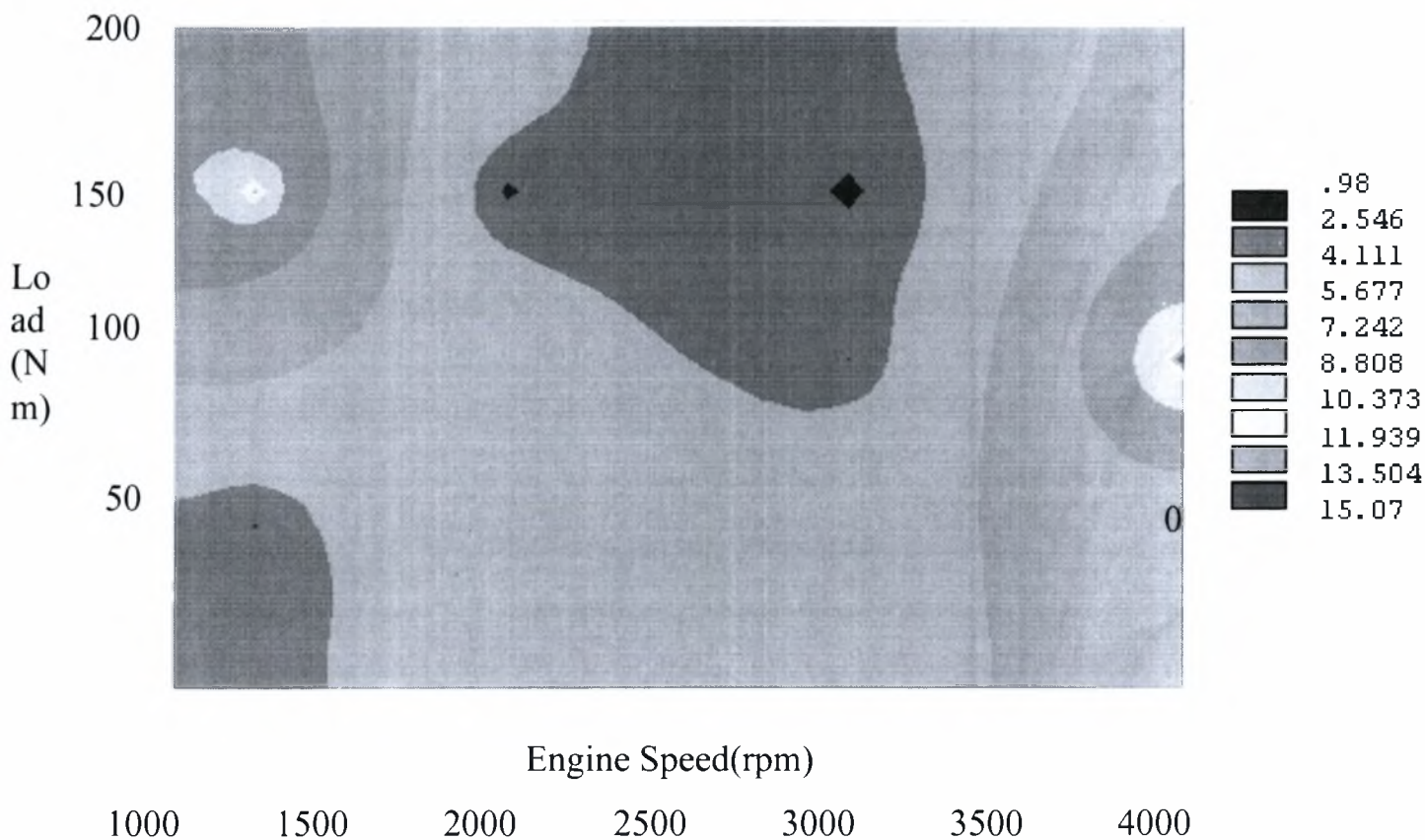
<h1>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</h1>	<h2>II</h2>	ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
--------------------	-------------	--

II.1 Προεπεξεργασία δεδομένων Catwall.

Τα δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων θα πρέπει να επεξεργαστούν έτσι ώστε να αποτελέσουν δεδομένα εισόδου (preprocessing) για το Catwall. Οι μετρήσεις που έχουν σχέση με τα αρχεία εισόδου είναι :

- στροφές του κινητήρα
- φορτίο
- A/F στην είσοδο
- θερμοκρασία στην είσοδο
- μάζα καυσίμου
- συγκέντρωση HC, CO, CO₂, NO_x στο καυσαέριο

Οι στροφές του κινητήρα και το φορτίο δίνουν είναι απαραίτητα για το προσδιορισμό του ρυθμού συσσώρευσης αιθάλης στο φίλτρο από πειραματικές μετρήσεις. Το σχήμα δείχνει τις διάφορες περιοχές με τον ρυθμό συσσώρευσης σε gr/h σε διάφορα σημεία λειτουργίας.



Σχήμα II.1



Οι εκπομπές καπνού του κινητήρα είναι σημαντικές για τον υπολογισμό της μάζας αιθάλης του φίλτρου και εισάγονται στο αρχείο .dpf.

Ο λόγος A/F στην είσοδο ή την έξοδο του φίλτρου και η μάζα καυσίμου είναι χρήσιμα στον υπολογισμό της παροχής καυσαερίου. Έτσι γνωρίζοντας την μάζα στο δοχείο καυσίμου στη χρονική στιγμή I-1 και I μπορούμε να υπολογίσουμε την παροχή καυσίμου με την σχέση :

$$m_f = \frac{M_{καυσ.}(I-1) - M_{καυσ.}(I)}{\Delta t}$$

Η παροχή καυσίμου που χρησιμοποιείται υπολογίζεται με moving average 20 τιμών για να είναι πιο ομαλή.

Ακόμα από το λόγο A/F υπολογίζουμε την παροχή αέρα m_a .

$$\frac{A}{F} = \frac{m_a}{m_f} \text{ και } m_a = m_f \frac{A}{F}$$

έτσι η συνολική παροχή καυσαερίου είναι $m_{fr} = m_a + m_f$.

Η παροχή καυσαερίου απαιτείται για το αρχείο εισόδου .mfr του Catwall.

Η θερμοκρασία καυσαερίου στην είσοδο πρέπει να μετατραπεί σε K και εισάγεται στο αρχείο .tin.

Η σύσταση του καυσαερίου είναι χρήσιμη για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας O_2 έτσι ώστε να εισαχθεί στο αρχείο .cmp. Οι τιμές της συγκέντρωσης HC, CO και NOx δίνονται σε ppm και του CO_2 σε ποσοστό % και πρέπει η συγκέντρωση του κάθε αερίου να μετατραπεί σε γραμμομοριακό κλάσμα. Έτσι οι συγκεντρώσεις HC, CO και NOx διαιρούνται με 1000000 και η συγκέντρωση CO_2 με 100.

II.2 Μετεπεξεργασία δεδομένων Catwall.

Τα αρχεία εξόδου του Catwall θα πρέπει να επεξεργαστούν έτσι ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να ερμηνευτούν και να γίνει γραφική απεικόνιση της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου, του ΔP , της μάζας αιθάλης στο φίλτρο και άλλα.

Η ενημέρωση των φύλλων εργασίας κάθε φορά που το Catwall τρέχει μια μέτρηση και βγάζει τα αποτελέσματα γίνεται στο Excel με τη λειτουργία Get External Data και Refresh. Έτσι γίνεται γραφική παράσταση της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου που μετρήθηκαν σε σχέση με το χρόνο και ακόμα της υπολογισμένης θερμοκρασίας εξόδου. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η σύγκριση της υπολογισμένης με την μετρημένη $T_{εξ}$ για να μπορέσουμε να δούμε αν οι τιμές που έχουν εισαχθεί στα αρχεία εισόδου είναι σωστές. Οι ιδιότητες που επηρεάζουν την θερμοκρασία εξηγούνται στην Διαδικασία Ρύθμισης του Catwall.

Στη συνέχεια γίνεται γραφική απεικόνιση της πτώσης πίεσης στο φίλτρο που μετρήθηκε σε σχέση με το χρόνο με την υπολογισμένη και έτσι συγκρίνονται για να δούμε αν οι τιμές που έχουν εισαχθεί στα αρχεία εισόδου είναι σωστές. Οι ιδιότητες που επηρεάζουν το ΔP εξηγούνται στην Διαδικασία



Ρύθμισης του Catwall. Ακόμα στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζεται η μάζα αιθάλης στο φίλτρο σε σχέση με το χρόνο για να δούμε τη συσχέτιση φόρτισης και ΔP αλλά και στη διάρκεια μιας αναγέννησης κατά πόσο άδειασε η παγίδα.

II.3 Διαδικασία ρύθμισης του Catwall.

Ο υπολογισμός της λειτουργίας της παγίδας αιθάλης απαιτεί την εισαγωγή των κατάλληλων τιμών στο αρχείο εισόδου .drp για την προσέγγιση των μετρήσεων. Κάποιες τιμές είναι σταθερές και γνωστές και δεν πρέπει να αλλάζουν για τον υπολογισμό. Για τις τιμές που επηρεάζουν τον υπολογισμό της θερμοκρασίας, του ΔP ή και των δύο θα πρέπει να γίνει επιλογή των τιμών αυτών για σωστότερο υπολογισμό της λειτουργίας του φίλτρου.

Οι ιδιότητες που είναι σταθερές είναι :

- η διάμετρος και το μήκος του φίλτρου
- η διάμετρος του διαχύτη στην εξαγωγή, σταθερές πτώσης πίεσης στο διαχύτη
- ο αριθμός των καναλιών ανά τετραγωνική ίντσα (channels per square inch, cpsi)
- το μήκος της τάπας των καναλιών (m)
- η πυκνότητα του τοιχώματος (kg/m^3)
- η διαπερατότητα του καπνού (m^2)
- η αρχική φόρτιση της παγίδας (gr)
- το πάχος του υποστρώματος (m)
- η αρχική θερμοκρασία του φίλτρου ($^{\circ}\text{C}$)
- η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^{\circ}\text{C}$)
- η πίεση περιβάλλοντος (Pa)
- το πάχος της μόνωσης του φίλτρου (m)
- η θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης (W/mK)
- η πυκνότητα της μόνωσης (kg/m^3)
- η θερμοχωρητικότητα της μόνωσης
- οι εκπομπές αιθάλης του κινητήρα (gr/h)
- η αξονική ανομοιομορφία απόθεσης του καπνού (από 0 έως 1)

Οι τιμές που μπορούν να ρυθμιστούν και επηρεάζουν τον υπολογισμό της θερμοκρασίας είναι :

- η ειδική θερμότητα του καπνού (J/kgK)
- η αγωγιμότητα του καπνού (W/mK)

Οι τιμές που μπορούν να ρυθμιστούν και επηρεάζουν τον υπολογισμό του ΔP είναι :

- η διαπερατότητα του καπνού (m^2), μεγαλύτερη διαπερατότητα σημαίνει μικρότερο ΔP

Οι τιμές που μπορούν να ρυθμιστούν και επηρεάζουν τον υπολογισμό της θερμοκρασίας και του ΔP είναι :

- η πυκνότητα του καπνού (kg/m^3), αύξηση της τιμής της μειώνει το υπολογισμένο ΔP

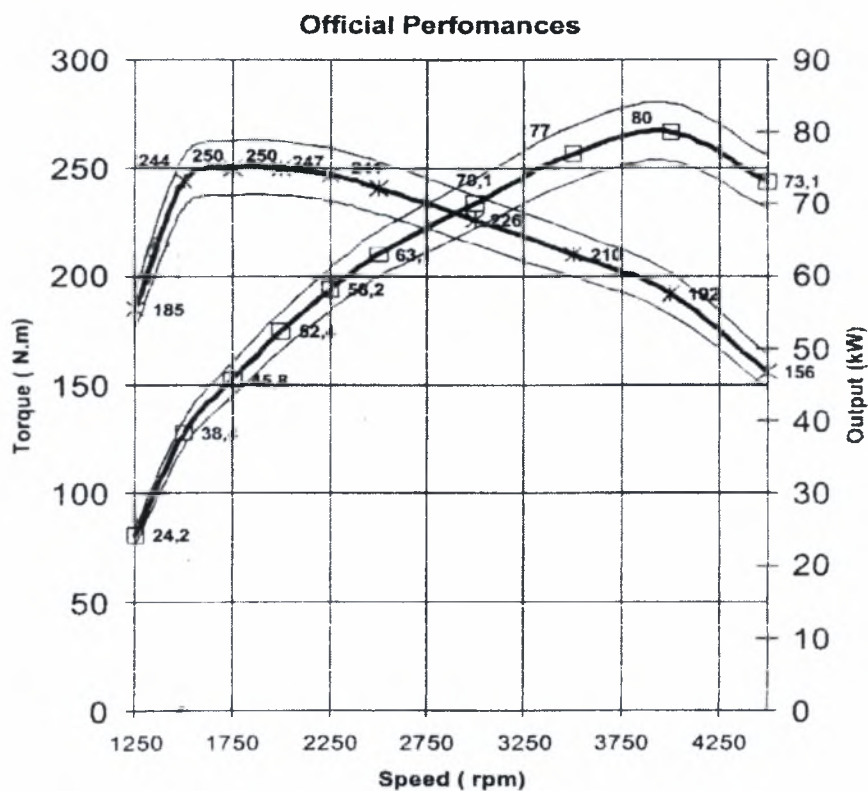


- η κινητική της καύσης της αιθάλης, μεγαλύτερη ενέργεια ενεργοποίησης σημαίνει ότι ο καπνός καίγεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία, σε μεγαλύτερο χρόνο και με μικρότερο ρυθμό και μεγαλύτερος προεκθετικός παράγοντας σημαίνει ότι ο καπνός καίγεται σε μεγαλύτερο χρόνο και με μεγαλύτερο ρυθμό. Έτσι επηρεάζεται η φόρτιση σε κάθε χρονική στιγμή δηλαδή ο ρυθμός καύσης και το ΔP
- η κινητική του προσθέτου, μεγαλύτερη ενέργεια ενεργοποίησης σημαίνει ότι το πρόσθετο αντιδρά σε μεγαλύτερη θερμοκρασία, σε μεγαλύτερο χρόνο και με μικρότερο ρυθμό και μεγαλύτερος προεκθετικός παράγοντας σημαίνει ότι το πρόσθετο αντιδρά σε μεγαλύτερο χρόνο και με μεγαλύτερο ρυθμό
- το α που καθορίζει το ποσοστό του άνθρακα που μετατρέπεται σε CO και CO₂

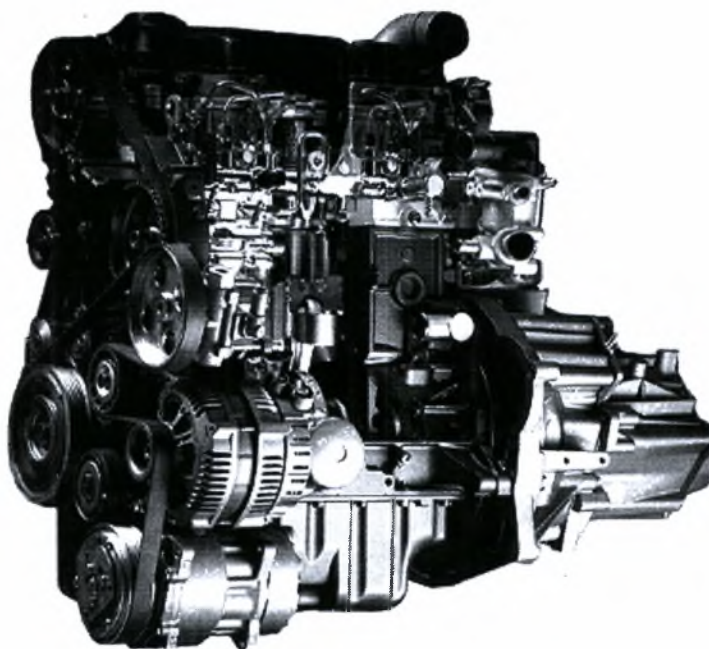


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΕΣ

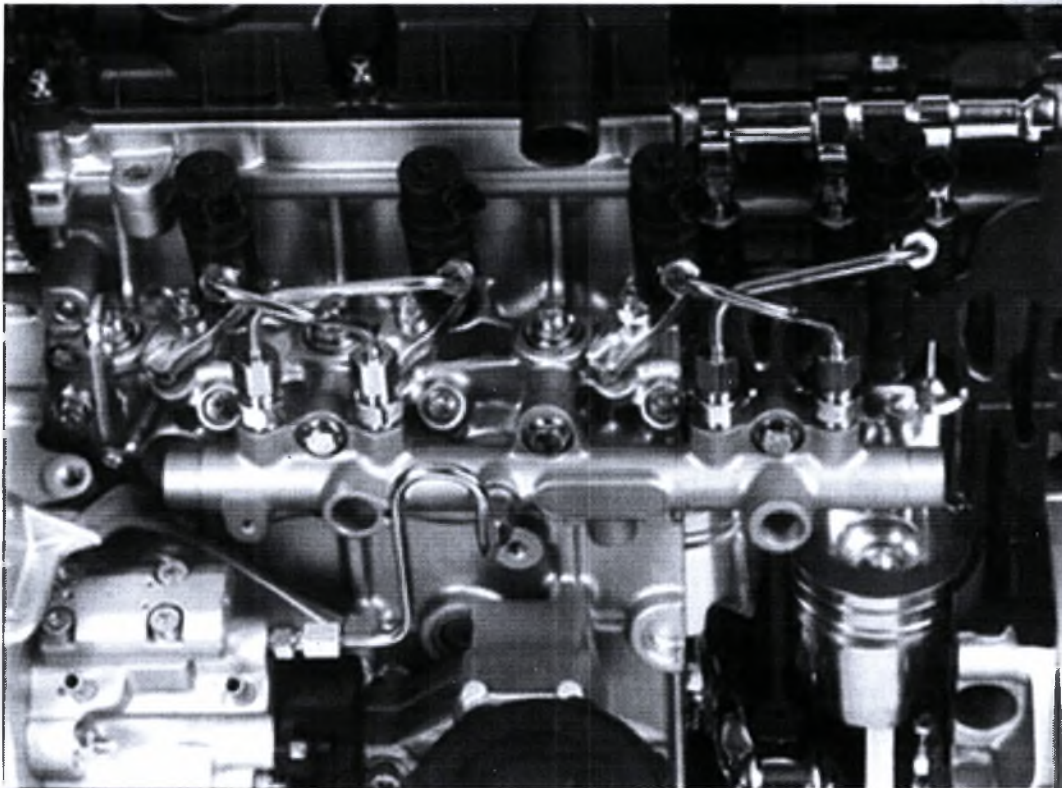
III.1 Σχήματα και εικόνες.



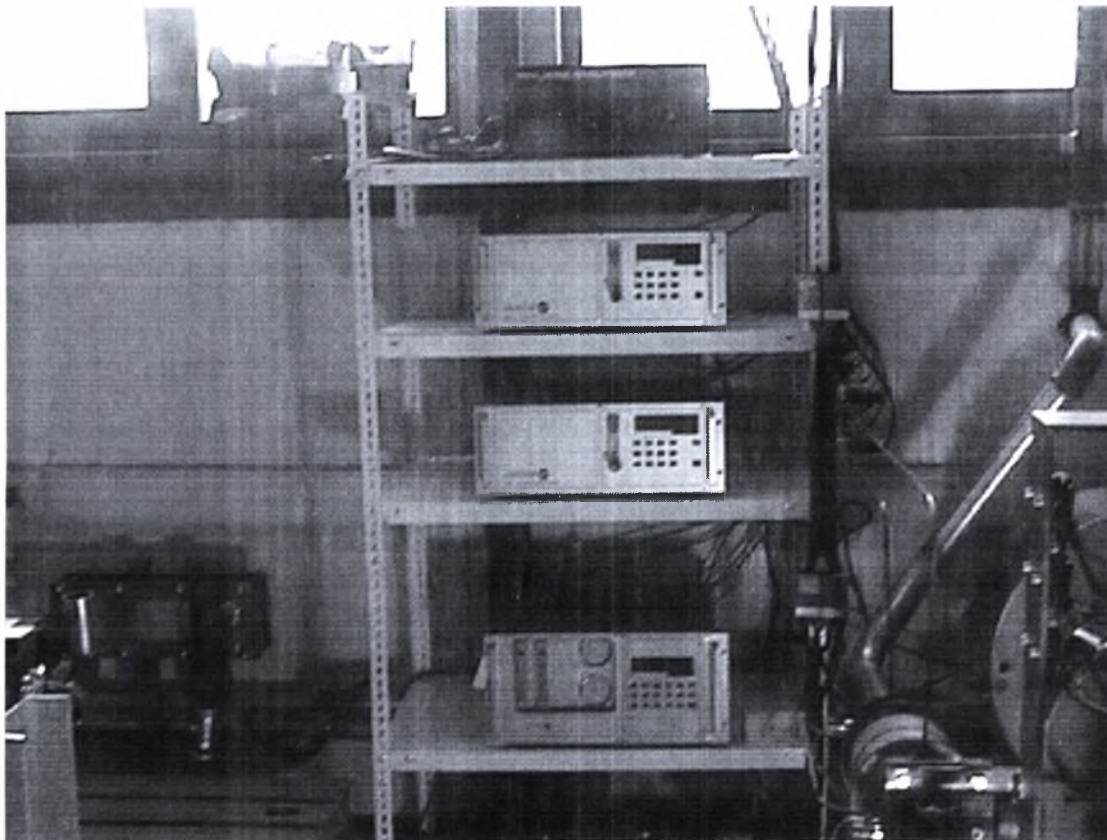
Σχήμα III.1 Το διάγραμμα ροπής ισχύος του κινητήρα Peugeot DW10ATED



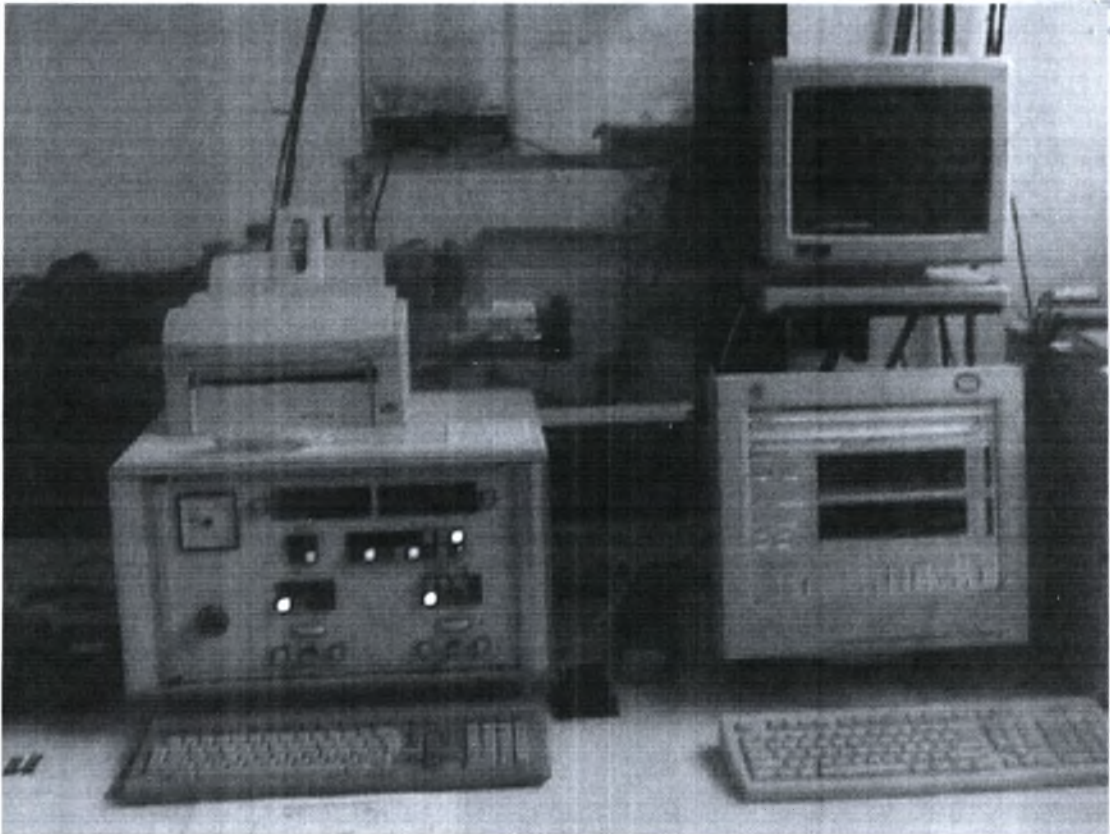
Σχήμα III.2 Ο κινητήρας Peugeot DW10ATED



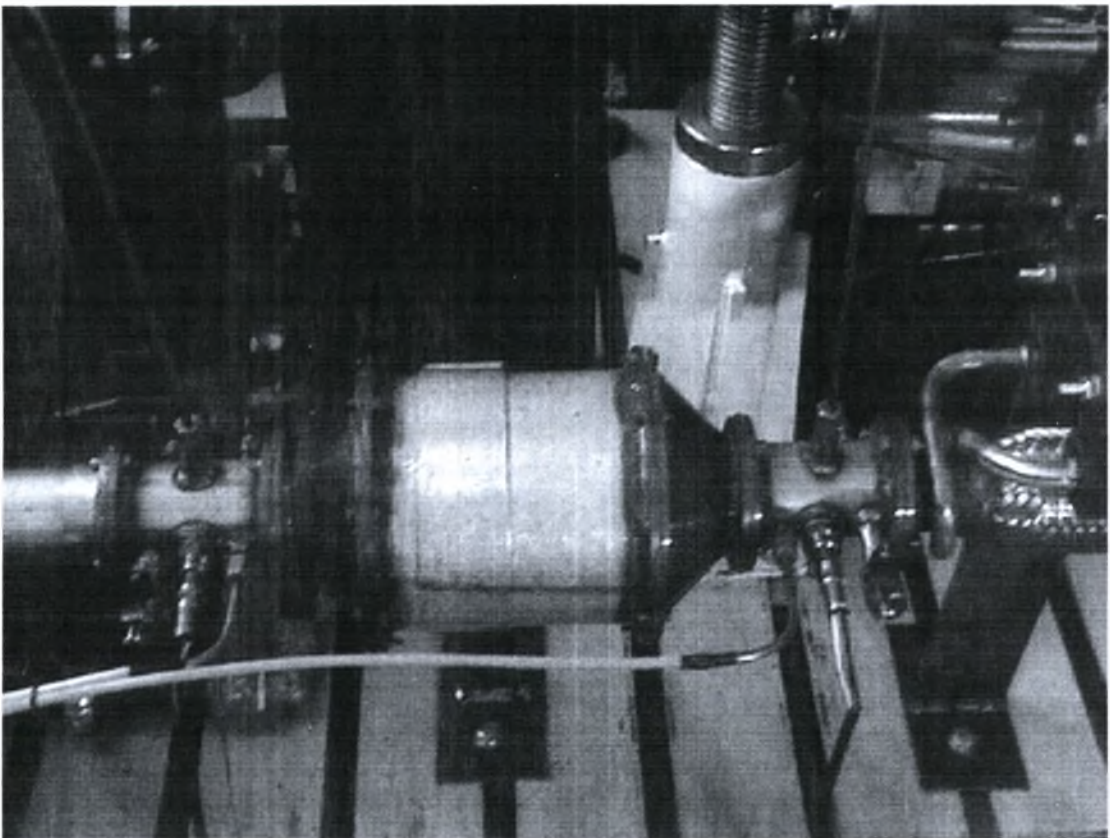
Σχήμα III.3 Το σύστημα τροφοδοσίας common rail του κινητήρα Peugeot DW10ATED



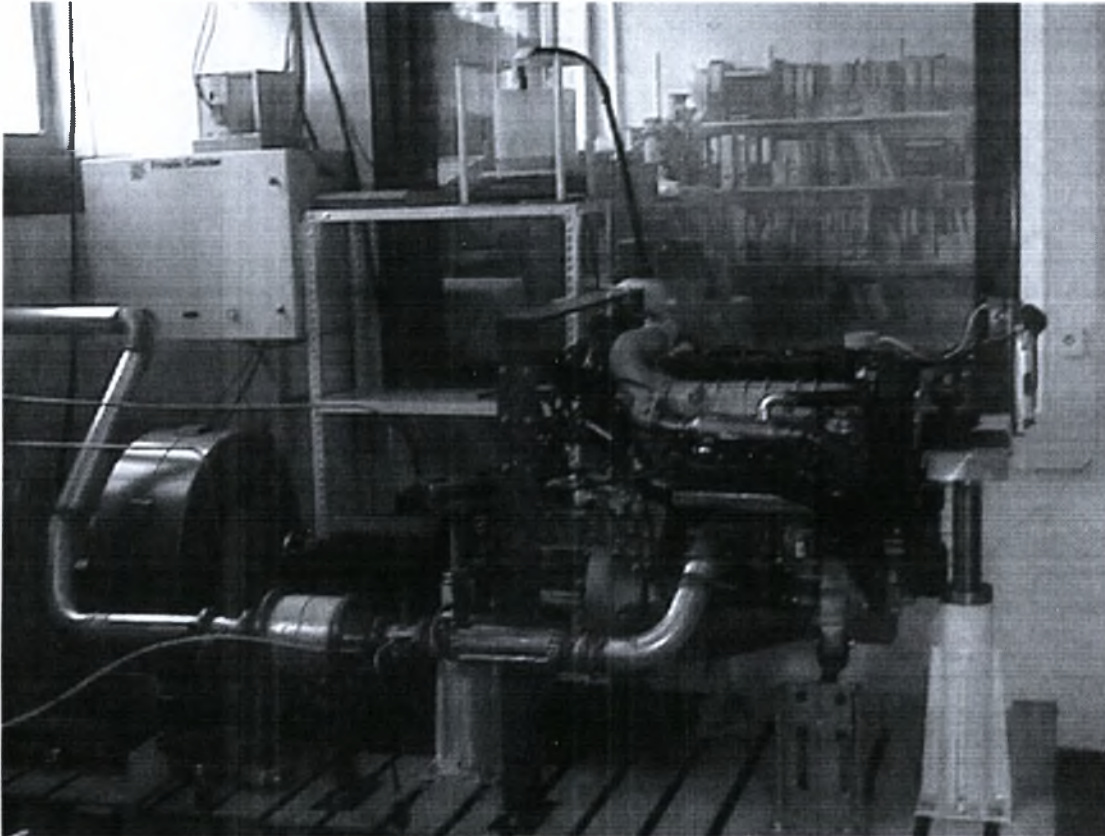
Σχήμα III.4 Οι αναλυτές καυσαερίου που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις του εργαστηρίου



Σχήμα III.5 Το σύστημα ελέγχου του δυναμόμετρου και το σύστημα ανάκτησης δεδομένων του εργαστηρίου



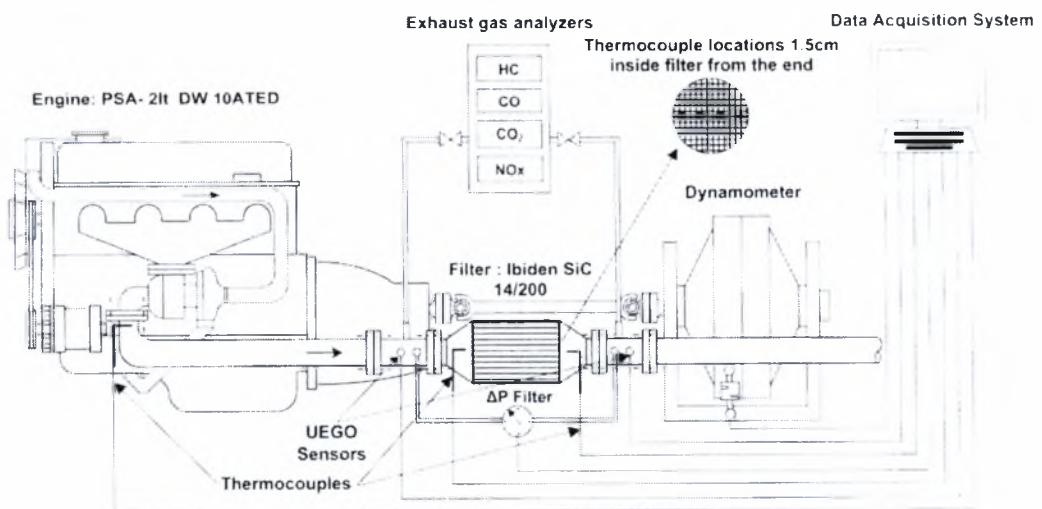
Σχήμα III.6 Το φίλτρο αιθάλης του εργαστηρίου



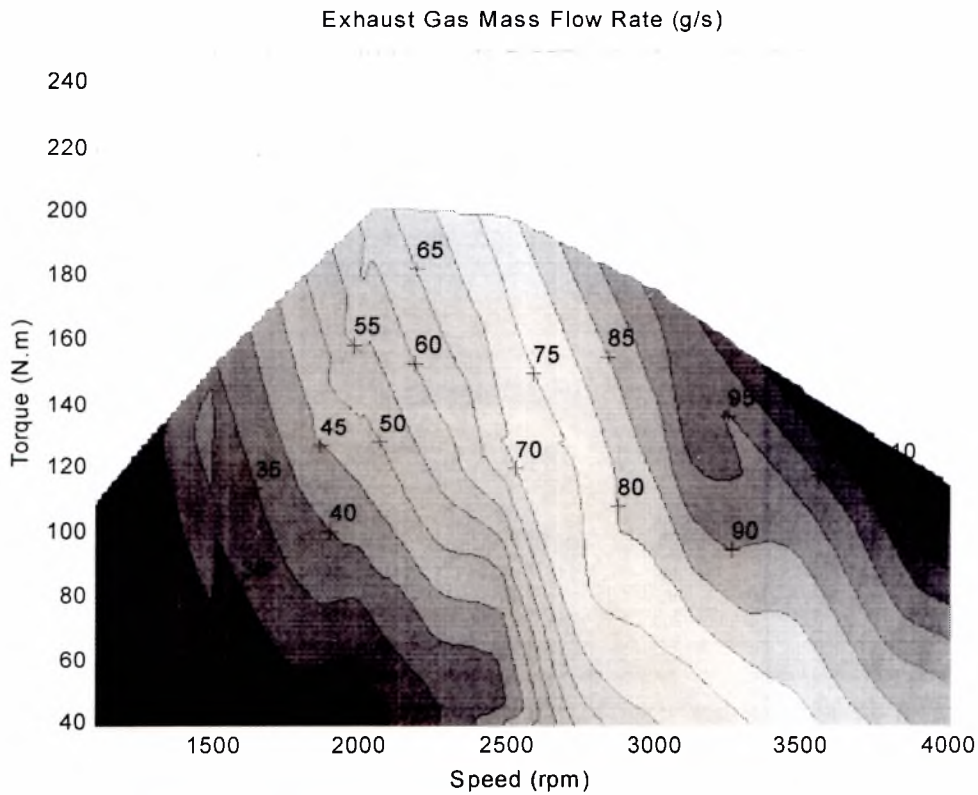
Σχήμα III.7 Ο κινητήρας Peugeot DW10ATED, το φίλτρο αιθάλης και το δυναμόμετρο του εργαστηρίου

Στα σχήματα III.5, III.6, III.7, III.8 φαίνονται οι αναλυτές καυσαερίων, το σύστημα ανάκτησης δεδομένων, το δυναμόμετρο και ο κινητήρας Peugeot DW10ATED και το φίλτρο SiC IBIDEN που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών.

Το σχήμα III.8 δείχνει την πειραματική διάταξη του κεφαλαίου 4.



Σχήμα III.8 Πειραματική διάταξη κεφαλαίου 4



Σχήμα III.9 Η παροχή καυσαερίου του κινητήρα Peugeot DW10ATED για διάφορα σημεία λειτουργίας

Το σχήμα III.9 δείχνει το διάγραμμα παροχής καυσαερίου για διάφορα σημεία λειτουργίας του κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε για την επιβεβαίωση του υπολογισμού της παροχής καυσαερίου.

ΕΥΓΡΑΦΕΑΣ	
ΤΙΤΛΟΣ	
ΛΗΞΗ	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ
22.8.03	ΣΙΣΜΑΝΙΔΗΣ
16.9.03	—

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
 Τηλ.: 74.760 -61

