

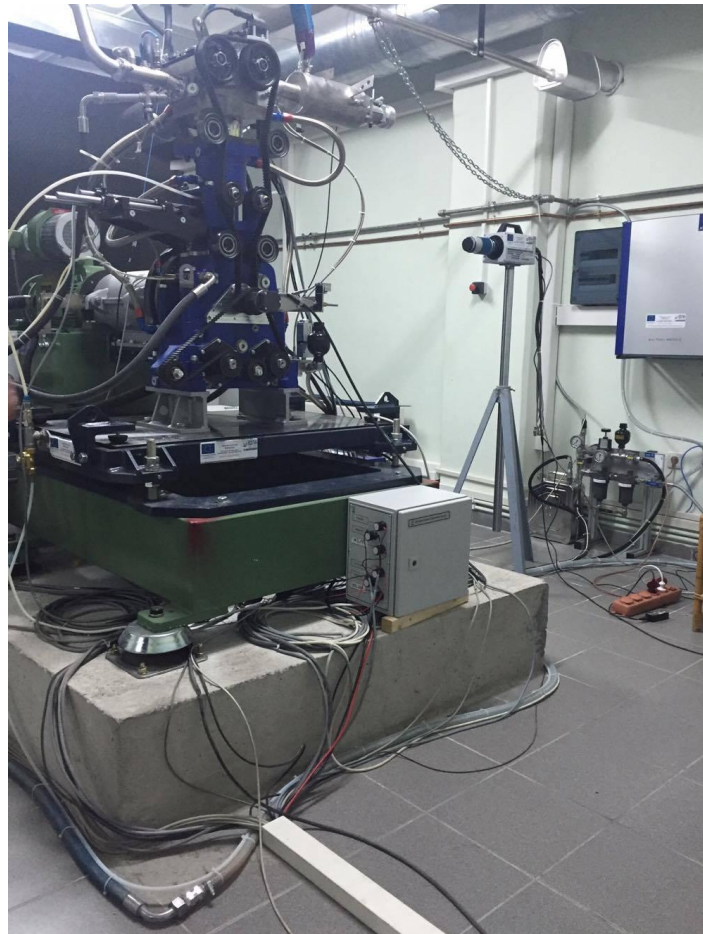


Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Πολυτεχνική Σχολή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΙ ΑΜΕΣΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΚΑΥΣΗΣ ΣΕ ΟΠΤΙΚΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ
ΚΑΥΣΗΣ**



ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ
ΜΑΝΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε.ΔΙ.Π.

ΚΟΖΑΝΗ (ΙΟΥΛΙΟΣ, 2016)

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια ερευνητική δραστηριότητα του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Στόχος της είναι η δημιουργία ενός προγράμματος, που μέσα από βασικά μεγέθη όπως είναι το ίχνος πίεσης και το σήμα του εγκεφάλου προς τον πολλαπλασιαστή, θα μπορεί να υπολογίζει και να καταγράφει τη μέγιστη πίεση συμπίεσης, τη μέγιστη πίεση λειτουργίας, την ενδεικνύμενη μέση πραγματική πίεση και το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται. Οι υπολογισμοί αυτοί θα γίνονται σε άμεσο χρόνο και τα αποτελέσματα θα παρουσιάζονται με σκοπό να δίνουν στο χρήστη μια αντιπροσωπευτική εικόνα για την λειτουργία. Μέσα από βιβλιογραφική έρευνα προσδιορίσαμε τη μεθοδολογία για τον υπολογισμό των μεγεθών με βάση τα δεδομένα που μπορούμε να αντλήσουμε από την πειραματική διάταξη. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά ο προγραμματισμός και η μεθοδολογία του. Για την επαλήθευση του προγράμματος διεξήχθησαν πειράματα και καταγράφησαν τα δεδομένα πίεσης και του σήματος της μονάδας διαχείρισης του κινητήρα προς τον πολλαπλασιαστή. Βάσει των καταγραφών αυτών υπολογίσαμε τα συγκεκριμένα μεγέθη και συγκρίναμε τα αποτελέσματα με εκείνα που υπολογίζει το πρόγραμμα.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο, θεωρώ σκόπιμο να ευχαριστήσω όσους στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας, διότι παραδίδοντας τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, καθώς μου έδωσε τη δυνατότητα να σπουδάσω παρά τις δύσκολες οικονομικές συγκυρίες της εποχής και επειδή πάντα μου παρείχε αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη στις επιλογές μου.

Επίσης, πρέπει να αποδωθούν ευχαριστίες στα πρόσωπα που αποτελούν το ανθρώπινο δυναμικό της σχολής, τα οποία με όρεξη και υπομονή μεταδίδουν τις γνώσεις και τις εμπειρίες τους στους φοιτητές.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω το Γεώργιο Κορτσαρίδη, φοιτητή του τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Π.Δ.Μ. ο οποίος με βοήθησε προσφέροντάς μου τις γνώσεις του περί του προγραμματισμού για τη διεκπαιρέωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τον διδάσκοντα κύριο Δημήτριο Γιαγκόπουλο για την υποστήριξη του ως προς την επίλυση αποριών καθώς και για την παροχή του αρχικού κώδικα του προγράμματος.

Κλείνοντας, να ευχαριστήσω τον διδάσκοντα κύριο Δημήτριο Κολοκοτρώνη, γιατί στάθηκε αρωγός πλάι μου και έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην υλοποίηση της Διπλωματικής Εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	<u>1</u>
<u>2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ-ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ</u>	<u>12</u>
2.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	12
2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	15
2.2.1 Εξοπλισμός εργαστηρίου.....	15
2.2.2 Προγραμματισμός	18
<u>3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ</u>	<u>41</u>
3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ 1.000 RPM ΜΕ ΠΙΕΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ -410ΜΒΑΡ.....	42
3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ 1.000 RPM ΜΕ ΠΙΕΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ -90ΜΒΑΡ.....	48
3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ 1.500 RPM ΜΕ ΠΙΕΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ -400 ΜΒΑΡ	54
3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ 1500 RPM ΜΕ ΠΙΕΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ -100 ΜΒΑΡ	59
3.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ 2.000 RPM ΜΕ ΠΙΕΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ -390 ΜΒΑΡ	64
3.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ 2000 RPM ΜΕ ΠΙΕΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ -210 ΜΒΑΡ	69
3.7 ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΟΛΕΣ ΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	74
<u>4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ</u>	<u>78</u>
<u>5.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	<u>80</u>

1. Εισαγωγή

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης, από την αρχή της δημιουργίας τους, αποτέλεσαν θέμα έρευνας και μελετών λόγω της ευρείας εφαρμογής τους στην ανθρώπινη ζωή. Το ενδεχόμενο εξέλιξής τους προκάλεσε έντονο ενδιαφέρον σε πολλούς επιστήμονες, οι οποίοι εργάστηκαν και τελικά πέτυχαν την προοδευτική μεταβολή και εξέλιξη των κινητήρων σε όλους τους τομείς τους (απόδοση-επίδοση, ρύποι, σχεδιασμός κ.α.). Εκτός από τις εφαρμογές στην καθημερινότητα, έχουν δημιουργηθεί κινητήρες για τη διεξαγωγή πειραμάτων και ερευνών, με στόχο να συμβάλουν στην ανάπτυξή τους. Για τον έλεγχο της λειτουργίας τους προτάθηκαν κάποια μεγέθη με βάση τα θερμοδυναμικά αξιώματα που ισχύουν και αποτελούν μέτρο σύγκρισης και αφορμή για εξέλιξη. Χαρακτηριστικά, τέτοια μεγέθη είναι η ισχύς, η πίεση λειτουργίας, η απόδοση κ.ά. Με βάση αυτά αναπτύχθηκαν επιπλέον μεγέθη που προσδιορίζουν αναλυτικότερα τη λειτουργία ενός κινητήρα. Όπως οι κινητήρες, έτσι και αυτά συνιστούν αντικείμενο έρευνας για πολλούς, είτε σχετικά με τον τρόπο υπολογισμού τους είτε ως προς τον εξοπλισμό με τον οποίο θα μπορούσαμε να τα μετρήσουμε.

Στόχος της εργασίας είναι η δημιουργία ενός προγράμματος με σκοπό την καταγραφή και τον υπολογισμό τέτοιων μεγεθών. Η συνεργασία του προγράμματος με τα επιμέρους συστήματα του κινητήρα θα μας δίνουν μια πλήρη και ολοκληρωμένη εικόνα της λειτουργίας του κινητήρα σε άμεσο χρόνο. Τα μεγέθη που υπολογίζονται είναι βασικά γνωρίσματα για την απόδοση του κινητήρα. Για την παρούσα εργασία τα μεγέθη που θα εξεταστούν είναι η μέση ενδεικνύμενη πραγματική πίεση, η μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται μέσα στον κύλινδρο, η μέγιστη πίεση κατά το χρόνο συμπίεσης καθώς και το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται.

Ένας πειραματικός οπτικός κινητήρας αποτελεί την εξέλιξη του θερμικού πειραματικού, στον οποίο διεξήχθησαν τα πρώτα πειράματα όπως προαναφέραμε. Ένας τέτοιος κινητήρας προσφέρει και τη δυνατότητα της οπτικής μελέτης πολλαπλασιάζοντας έτσι τα πεδία έρευνας και προόδου, προσφέροντας ακρίβεια και περισσότερα αποτελέσματα. Με τη χρήση του οπτικού κινητήρα μπορούμε να δούμε και να μετρήσουμε επιπλέον μεγέθη, τα οποία ως τώρα απλά προσομοιώναμε. Ένα

τέτοιο μέγεθος αποτελεί η εξέλιξη της φλόγας μέσα στον κύλινδρο που μέσω κάμερας μπορούμε να την παρακολουθήσουμε και να τη μελετήσουμε και οπτικά.

Ένας τέτοιος πειραματικός οπτικός κινητήρας βρίσκεται στα εργαστήρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και αποτελεί το αντικείμενο έρευνας της παρούσας εργασίας. Η μηχανή είναι μια οπτική πειραματική της AVL και διαθέτει το βασικό μετρητικό εξοπλισμό (δυναμόμετρο, αισθητήρες πίεσης κ.α.). Επίσης το εργαστήριο παρέχει και κάμερα υψηλής ταχύτητας αποτύπωσης εικόνων για την οπτική έρευνα. Στα πλαίσια της εν λόγω εργασίας δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα που στόχος του είναι η μέτρηση των προαναφερθέντων πιέσεων, της IMEP και του κλάσματος μάζας καυσίμου που καίγεται (MFB). Το πρόγραμμα δημιουργήθηκε με σκοπό την άμεση προβολή των αποτελεσμάτων μέσα από γραφήματα και παράθυρα αποτελεσμάτων, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος του κινητήρα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το LabView, το οποίο είναι ένα πρόγραμμα δημιουργίας εικονικών οργάνων που φέρει τη δυνατότητα επικοινωνίας του υπολογιστή με τον κινητήρα και τους αισθητήρες μέσω του κατάλληλου ειδικού υλικού. Πίσω από αυτά τα εικονικά όργανα εντοπίζονται οι κατάλληλοι υπολογισμοί και οι ανάλογες μαθηματικές σχέσεις για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Αναγκαία για την αξιολόγηση του προγράμματος ήταν και η διεξαγωγή πειραμάτων για να εξετάσουμε κατά πόσο ο προγραμματισμός ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της έρευνας. Οι μετρήσεις έγιναν σε συνθήκες λειτουργίας και βασίστηκαν σε προγενέστερη εργασία [28] στο συγκεκριμένο κινητήρα. Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του προγράμματος από τα πειραματικά δεδομένα πραγματοποιήθηκε σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από τα μέσα μεγέθη που προκύπτουν από όλη την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων.

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας που αποτελείται από ένα προγραμματιστικό και ένα πειραματικό κομμάτι χρειάζεται αρχικά να κατανοήσουμε το θεωρητικό υπόβαθρο. Με βάση τη βιβλιογραφική έρευνα καταλήγουμε στις μαθηματικές πράξεις, οι οποίες συντάσσονται προγραμματιστικά στο LabView. Τα μεγέθη, τα οποία υπολογίζονται είναι η μέγιστη πίεση κατά το χρόνο συμπίεσης (Peak compression Pressure, PcP), η μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται εντός του κυλίνδρου (Peak firing Pressure, PfP), η μέση ενδεικνύμενη πίεση (IMEP) και το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται (Mass Fraction Burned, MFB) κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας. Στη συνέχεια αναλύουμε τα παραπάνω μεγέθη ξεχωριστά,

μέσα από την απαιτούμενη μελέτη της βιβλιογραφίας που έγινε με σκοπό τον προσδιορισμό της μεθοδολογίας που θα ακολουθήσουμε.

Μέγιστη πίεση κατά το χρόνο συμπίεσης (PcP)

Η παρακολούθηση της πίεσης κατά τον χρόνο συμπίεσης καταδεικνύει την κατάσταση του κινητήρα. Η μείωση της πίεσης κατά τη συμπίεση μας φανερώνει ότι το έμβολο έχει υποστεί φθορά ή πως η βαλβίδα εξόδου των καυσαερίων είναι ανοιχτή λόγω επικαθίσεων. Το συγκεκριμένο μέγεθος χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στους κινητήρες Diesel, που η συμπίεση παίζει σημαντικό ρόλο για την ανάφλεξη [8,9]. Για την πειραματική μας διάταξη, αποτελεί επίσης μία παράμετρο για να εξετάσουμε την κατάσταση του κινητήρα. Το έμβολο του κινητήρα στεγανοποιείται σε σχέση με τον κύλινδρο χάρη στη χρήση δαχτυλίων από τεφλόν [12], το οποίο φθείρεται εύκολα. Αυτό μπορεί να επιφέρει φθορά του κινητήρα καθώς και λανθασμένα πειραματικά δεδομένα.

Κατά το χρόνο συμπίεσης οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής είναι κλειστές, έτσι ώστε τα αέρια να παραμένουν στον κύλινδρο. Το έμβολο κινείται προς τα πάνω και γι' αυτό ο όγκος του κυλίνδρου μειώνεται. Ακόμη, από τη στιγμή που το αέριο συμπιέζεται στον κύλινδρο, η πίεση αυξάνεται. Η συμπίεση του αέρα και του καυσίμου προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του μίγματος και βοηθά την εξάτμιση του καυσίμου για κινητήρες προανάμειξης και έμμεσου ψεκασμού (PFI). Κατά τη διεργασία αυτή, μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει μικρή αλλαγή της εντροπίας και η συμπεριφορά του μίγματος μπορεί να περιγραφεί με την εξίσωση:

$$P \cdot V^\gamma = \text{const} \quad (1)$$

Η εξίσωση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της σταθεράς γ (λόγος ειδικών θερμοτήτων c_p/c_v [31]), θεωρώντας ότι έχουμε ιδανικό κύκλο Otto. Τα σημεία τόσο στην αρχική θέση (πίεσης και όγκου) όσο και στη θέση που έχουμε την μέγιστη συμπίεση είναι γνωστά για την περίπτωση μας.

Αρά, η εξίσωση μετασχηματίζεται στη μορφή :

$$\gamma = \frac{\log\left(\frac{P_{cP}/P_{min}}{V_1/V_2}\right)}{\log(V_1/V_2)} \quad (2)$$

P_{cP} : η μέγιστη πίεση στο χρόνο της συμπίεσης

P_{min} : η πίεση που επικρατεί στην αρχή της διεργασίας της συμπίεσης

V_1 : ο μέγιστος όγκος, στον οποίο το έμβολο βρίσκεται στο κάτω νεκρό σημείο

V_2 : ο ελάχιστος όγκος, στον οποίο το έμβολο βρίσκεται στο άνω νεκρό σημείο

Μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου (PfP)

Η παρακολούθηση της μέγιστης πίεσης ενδέχεται να βοηθήσει στη διατήρηση της αξιοπιστίας του πειραματικού κινητήρα. Για έναν πειραματικό κινητήρα, το να παρατηρήσουμε τη μέγιστη πίεση είναι σημαντικό, ώστε να μην ξεπεράσουμε τα όρια αντοχής των υλικών με αποτέλεσμα τη βλάβη ή ακόμα και την καταστροφή του κινητήρα [12]. Για την εν λόγω εργασία, η οποία χρησιμοποιεί τα οπτικά μέσα (γυάλινο έμβολο και κύλινδρο) για τη διεξαγωγή πειραμάτων, είναι αναγκαία η παρακολούθησή της, εξαιτίας της ευαισθησίας του υλικού. Εκτεταμένες έρευνες έχουν δείξει ότι η μέγιστη καύση πίεσης (Peak Firing Pressure) παρέχει τη βέλτιστη τεχνική για τη μέτρηση της ισορροπίας καύσης για εμβολοφόρους κινητήρες [10, 12].

Ενδεικνύμενη μέση πραγματική πίεση ή IMEP

Η εκτίμηση της ενδεικνύμενης μέσης πραγματικής πίεσης (IMEP) του κινητήρα είναι ένα ιδιαίτερος σημαντικό μέγεθος καθώς αυτό παρουσιάζει το καθαρό έργο ανά μονάδα όγκου εμβολισμού του αερίου. Έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές για να προβλεφθεί η ενδεικνύμενη μέση πραγματική πίεση. Ο απλούστερος, αλλά όχι αρκετά ακριβής, τρόπος υπολογισμού της IMEP είναι μέσα από το δυναμόμετρο. Το δυναμόμετρο αποτελεί ένα βασικό εργαλείο για τη διάταξη ενός πειραματικού κινητήρα. Η βασική λειτουργία του δυναμομέτρου είναι να μετράει τη ροπή του κινητήρα καθώς μέσω αυτού μπορούμε να προσδιορίσουμε την IMEP ως εξής:

$$IMEP = \frac{P_i}{V_d \cdot \frac{N}{n}} \quad (3)$$

P_i είναι η ισχύς που υπολογίζεται από το διάγραμμα πίεσης-όγκου

$$P_i = P_b + P_f \quad (4)$$

P_b είναι η πραγματική ισχύς στο στροφαλοφόρο και δίνεται από την εξίσωση

$$P_b = 2\pi \cdot N \cdot T \quad (5)$$

P_f : η ισχύς των τριβών

V_d : ο όγκος εμβολισμού

N : οι στροφές λειτουργίας του κινητήρα

n : οι στροφές που απαιτούνται για να ολοκληρωθεί ένας πλήρης θερμοδυναμικός κύκλος (που για τους 4-χρονους είναι $n=2$ και για τους 2-χρονους $n=1$)

T : η ροπή του κινητήρα

Πολλοί ερευνητές στις εργασίες τους προσδιορίζουν την IMEP μέσα από την εξίσωση (1). Ο Georing [1] στην εργασία του αναλύει την ισχύ του καυσίμου με βάση την εξίσωση (6).

$$P_{fuel} = P_i + Q \quad (6)$$

Q : η απορριπτόμενη θερμότητα

$$P_{fuel} = \dot{m}_{fuel} \cdot H_u \quad (7)$$

m_{fuel} : η παροχή μάζας καυσίμου

H_u : η θερμογόνο δύναμη του καυσίμου

Μέσα από την ανάλυσή του προσδιορίζει την P_i , και στη συνέχεια με την εξίσωση (3) υπολογίζει την IMEP.

Η ακρίβεια του υπολογισμού αυτού δεν είναι αντιπροσωπευτική για τη λειτουργία του κινητήρα, επομένως ορισμένοι ερευνητές ανέπτυξαν υπολογιστικά μοντέλα για τη διερεύνηση της IMEP. Οι περισσότεροι ερευνητές για τον υπολογισμό της IMEP χρησιμοποιούν το ίχνος πίεσης του κυλίνδρου, όπως αυτό μετράται κατά τη λειτουργία της μηχανής. Ο τρόπος υπολογισμού με αυτή τη μέθοδο υιοθετήθηκε από πολλούς ερευνητές, εξελίχθηκε και προσαρμόστηκε στις εκάστοτε ανάγκες τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ερευνών με αυτήν την μέθοδο παρατίθενται στη συνέχεια, αποτελώντας μαζί και τη βιβλιογραφική έρευνα.

Στην εργασία [2] υπολογίζεται η μέση ενδεικνύμενη πραγματική πίεση IMEP για ένα δίχρονο πειραματικό κινητήρα με οπτική πρόσβαση, μέσα από τα δεδομένα της πίεσης και του όγκου. Ο Lei Tian [3] στην εργασία του υπολογίζει για την πειραματική του διάταξη την IMEP μέσα από την εξίσωση (8).

$$IMEP = \frac{\Delta\theta}{V_d} \cdot \sum_0^{720} P \cdot \frac{\Delta V}{\Delta\theta} \quad (8)$$

Ο Labreuche G. [4] χρησιμοποιεί την εξίσωση (8) στην εργασία του, για τον υπολογισμό της IMEP. Ο William J. Rice [5] στην εργασία του για τη δημιουργία ενός μετρητικού οργάνου που θα μετράει τη μέση ενδυνκνείμενη πίεση, κάνει χρήση της εξίσωσης (8).

Στην εργασία του ο Benjamin R. Brown [6], με την ανάλυση δεδομένων καύσης προσδιορίζει την IMEP μέσα από ένα σύνολο διακριτοποιημένων σημείων πίεσης και όγκου ανά κύκλο λειτουργίας για ένα κινητήρα με σπινθηριστή (SI) με την εξίσωση (9). Με βάση την ίδια μεθοδολογία στην εργασία [7] υπολογίζεται η τιμή της IMEP μέσω των εξισώσεων (9) και (10). Στην εργασία του Wei-Chin Chang [8], που παρουσιάζει μια βελτιωμένη μέθοδο διερεύνησης των παραμέτρων της καύσης υπολογίζεται η ενδεικνύμενη μέση πραγματική πίεση χάρη στις εξισώσεις (9, 10).

$$IMEP = \frac{W}{V_d} \quad (9)$$

W : το συνολικό έργο

V_d : ο όγκος εμβολισμού

Το συνολικό έργο W που δημιουργεί ο κύκλος είναι:

$$W = \sum_0^{720} W_i \quad (10)$$

V_d είναι ο όγκος εμβολισμού του κινητήρα, δηλαδή η διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη και στην ελάχιστη τιμή του όγκου.

$$V_d = V_1 - V_2 \quad (11)$$

Χαρακτηριστικά ισχύει ότι :

$$IMEP = BMEP + FMEP \quad (12)$$

Ο προσδιορισμός της IMEP με βάση τις πιέσεις [4,5,6,7] που επικρατούν, είναι η απλούστερη μέθοδος υπολογισμού. Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις (9),(10),(11) με σκοπό να υπολογίσουμε την τιμή της IMEP, βάσει του ίχνους πίεσης.

Επίσης ένα ακόμα μέγεθος, στο οποίο θα αναφερθούμε και παρακάτω είναι το μέγεθος COV_{IMEP} , που αποτελεί ένα στατιστικό μέγεθος για τον προσδιορισμό της έντασης των κυκλικών μεταβολών στον κινητήρα. Ο συντελεστής αυτός, που βασίζεται στην IMEP, είναι ένα κοινώς αποδεκτό μέτρο για τη σταθερότητα λειτουργίας του κινητήρα και σύμφωνα με τις εργασίες [3,4,5,7], ορίζεται από την εξίσωση (13) :

$$COV_{IMEP} = \frac{\sigma_{IMEP}}{\mu_{IMEP}} \quad (13)$$

σ και μ είναι αντίστοιχα η τυπική απόκλιση και η μέση τιμή, σε ένα σύνολο διαδοχικών κύκλων καύσης.

Η μέση τιμή είναι ο μέσος όρος των τιμών της IMEP :

$$\mu = \frac{\sum IMEP}{N} \quad (14)$$

Η τυπική απόκλιση υπολογίζεται ως:

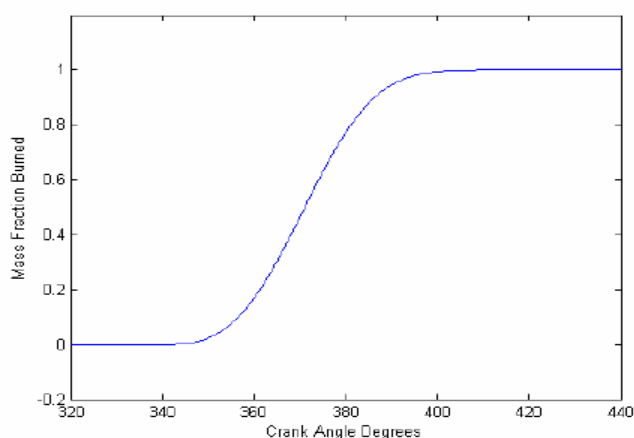
$$\sigma = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{(\sum IMEP - \mu)^2} \quad (15)$$

N : το σύνολο του δείγματος, δηλαδή το σύνολο των κύκλων.

Το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται (Mass Fraction Burned)

Η διαδικασία της καύσης μπορεί να εξεταστεί τόσο ως χημική όσο και ως φυσική διεργασία που περιγράφεται από το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται (Mass Fraction Burned) στον κύλινδρο. Η πιο κοινή μέθοδος καθορισμού της καύσης είναι με τη βοήθεια της καμπύλης της μάζας που καίγεται (MFB-curve) [12]. Με την έννοια κλάσμα μάζας που καίγεται γίνεται λόγος ουσιαστικά στην αναλογία της σωρευτικής έκλυσης θερμότητας προς την συνολική θερμότητα που απελευθερώνεται από το καύσιμο κατά την διάρκεια ενός κύκλου. Το MFB σημαίνει απλά πόσο πολύ και πόσο γρήγορα απελευθερώνεται χημική ενέργεια κατά τη διεργασία καύσης και μπορεί να παραμετροποιηθεί εύκολα από τη συνάρτηση Wiebe.

Με τη θεώρηση ότι σε έναν κύκλο Otto η έκλυση θερμότητας γίνεται ακαριαία [14], αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσδιορισμού της έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα. Η εξίσωση Wiebe (16), γραφικά έχει τη μορφή χαρακτηριστικής καμπύλης σχήματος S, όπως στο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Διάγραμμα κλάσματος μάζας καυσίμου που καίγεται (MFB) συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα [15]

Το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται αυξάνεται από το μηδέν, κατά την έναρξη της καύσης, και τείνει εκθετικά και ασυμπτωτικά στην τιμή ένα προς το τέλος της καύσης. Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο άκρων σε γωνία του στροφαλοφόρου άξονα είναι γνωστή ως η διάρκεια της καύσης. Απεικονίζει ουσιαστικά, το ποσοστό της μάζας καυσίμου που καίγεται συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα.

Η εξίσωση Wiebe, αποτελεί μια καλή προσέγγιση για τους κινητήρες που λειτουργούν, κάτω από σταθερές συνθήκες λειτουργίας, επειδή το μοντέλο καύσης έχει σχετικά μικρή διακύμανση.

$$MFB(\theta) = 1 - \exp \left[-a \cdot \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{(m+1)} \right] \quad (16)$$

θ : η τρέχουσα γωνία του στροφαλοφόρου

θ_0 : η αρχή έκλυσης θερμότητας ή η γωνία έναυσης του σπινθηριστή

$\Delta\theta$: η διάρκεια έκλυσης θερμότητας σε μοίρες του στροφαλοφόρου ή διάρκεια της καύσης σε μοίρες του στροφαλοφόρου

a : ο συντελεστής απόδοσης και τον προσδιορίζουμε με βάση τα πειραματικά δεδομένα

m : ο συντελεστής μορφής της καμπύλης που προσδιορίζουμε με βάση τα πειραματικά δεδομένα

Ως εκ τούτου, οι τιμές των συντελεστών a και m (16) μπορεί να υποθεθεί ότι είναι σταθερές για αυτές τις συνθήκες, διευκολύνοντας τον προσδιορισμό του κλάσματος της μάζας καυσίμου που καίγεται.

Σε πολλές εργασίες ο προσδιορισμός και η απεικόνιση του κλάσματος της μάζας καυσίμου γίνεται με την εξίσωση Wiebe και τη χρήση συντελεστών με βάση τη βιβλιογραφία του κάθε ερευνητή. Τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εργασία του Mohammad J. Nekooei [16], στην οποία για τους συντελεστές a και m (16) χρησιμοποιούνται τιμές άλλης έρευνας. Με την ίδια φιλοσοφία η Paulina S. Kuo [17] χρησιμοποιεί σταθερές τιμές για την εξίσωση Wiebe και προσδιορίζει το MFB. Από τα αποτελέσματα των παραπάνω εργασιών εκλείπει η ακρίβεια, ωστόσο τα ίδια αποτελούν μια καλή προσέγγιση.

Ένας από τους λόγους που οι συντελεστές παραμένουν αμετάβλητοι είναι το γεγονός ότι η δυναμική αλλαγή του κινητήρα είναι πολύ μικρή από σημείο λειτουργίας σε σημείο λειτουργίας [18]. Στις υψηλότερες ταχύτητες του κινητήρα η καύση

συμβαίνει πιο γρήγορα, αλλά διατηρεί ένα σταθερό ρυθμό καύσης σε σχέση με τις μοίρες του στροφαλοφόρου άξονα. Όταν το φορτίο αυξάνεται, περισσότερο καύσιμο και αέρας προστίθενται στο θάλαμο καύσης, αλλά ο λόγος τους είναι πάντα στοιχειομετρικός. Ως εκ τούτου, όσο το καύσιμο δεν αυτοαναφλέγεται, οι ιδιότητες της καύσης παραμένουν οι ίδιες.

Στην εργασία του ο Jason Meyer [13] προσδιορίζει το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται μέσω της εξίσωσης (17).

$$MFB(\theta) = \frac{Q(\theta)}{Q_{total}} \quad (17)$$

Q_{total} είναι η προσδιδόμενη ενέργεια από το καύσιμο, δηλαδή η ροή μάζας του καυσίμου επί τη θερμογόνο δύναμη.

Την έκλυση θερμότητας συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου, την υπολογίζει με ολοκλήρωση της εξίσωσης (19).

$$\frac{dQ}{d\theta} = \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) \cdot P \cdot \frac{dV}{d\theta} + \left(\frac{1}{\gamma-1}\right) \cdot V \cdot \frac{dP}{d\theta} \quad (18)$$

Ο υπολογισμός της γίνεται μέσα από πειραματικά δεδομένα πίεσης, τα οποία κατέγραψε με βάση τη λειτουργία του κινητήρα της διάταξής του. Προσδιορίζει στη συνέχεια την ποσότητα θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση και υπολογίζει το MFB. Για την απεικόνισή του χρησιμοποιεί την εξίσωση Wiebe (16).

Για τον υπολογισμό των συντελεστών a και m χρησιμοποιεί τα υπολογισμένα, σύμφωνα με τη θερμοδυναμική ανάλυση, δεδομένα για την ταύτιση σημείων.

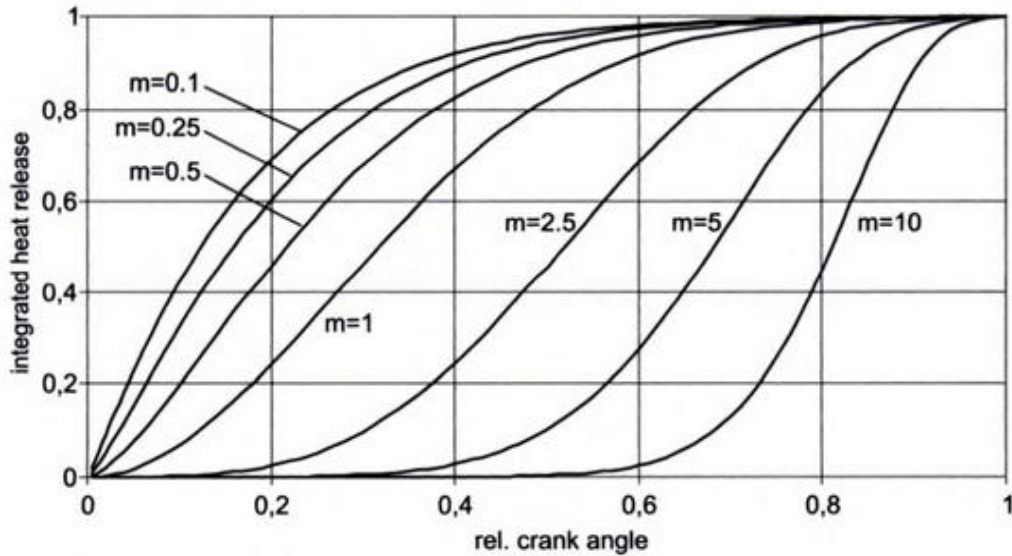
Η ανάλυση του κλάσματος μάζας καυσίμου μέσα από το άρθρο [19] γίνεται με την ίδια μεθοδολογία της εργασίας [13]. Με βάση την ανάλυσή του με παραμετρικές λύσεις προσδιορίζεται ότι ο συντελεστής a στη συνάρτηση Wiebe (16) έχει άμεση σχέση με τη απόδοση της καύσης. Συμπερασματικά μπορούμε να προσδιορίσουμε το a με βάση την εξίσωση Wiebe για το τέλος της διεργασίας.

$$n_{conv} = 1 - e^{-a} \quad (19)$$

Άρα η παράμετρος a μπορεί να εκφραστεί :

$$a = -\ln(1 - n_{conv}) \quad (20)$$

Επίσης, μέσα από το άρθρο του προσδιορίζει τη σημασία του συντελεστή m (συντελεστής μορφής της καμπύλης Wiebe) η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2: Διάγραμμα μορφής της καμπύλης MFB ανάλογα με το συντελεστή m [19]

Με ανάλογη προσέγγιση στην εργασία [15] γίνεται διερεύνηση του 50% του κλάσματος μάζας καυσίμου που κάηκε. Η μεθοδολογία που ακολούθησε είναι παρόμοια με την εργασία [13], αλλά το ρυθμό έκλυσης θερμότητας τον υπολόγισε με βάση την εξίσωση (21).

$$\frac{dQ}{d\theta} = P \cdot V \cdot \left[\frac{1}{\gamma-1} \cdot \left(\frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{d\theta} \right) + \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{d\theta} \right] \quad (21)$$

T : θερμοκρασία

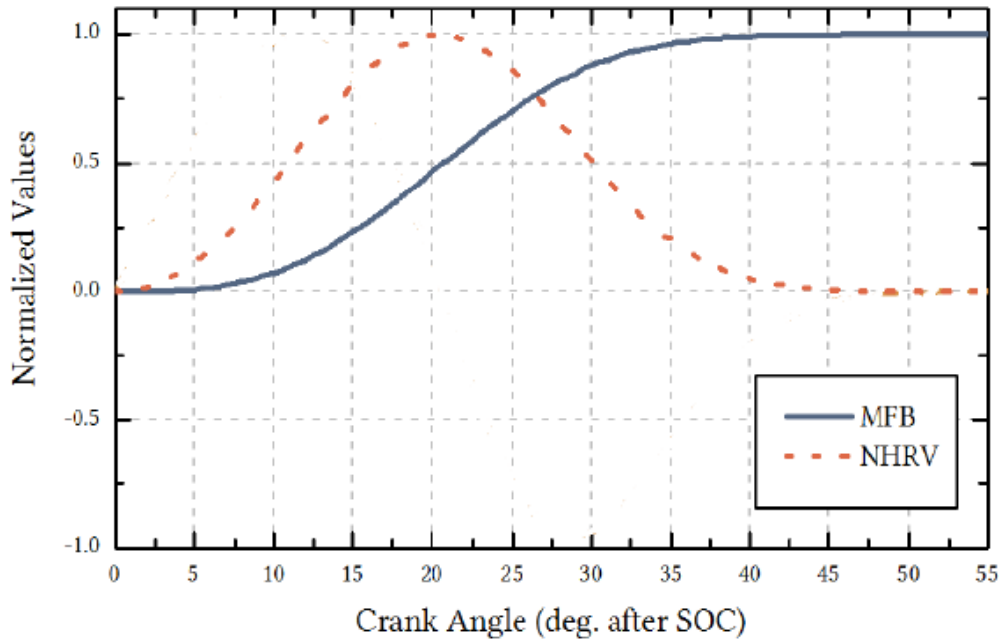
dT : μεταβολή της θερμοκρασίας

γ : λόγος ειδικών θερμότητων

P : πίεση

V : όγκος

Από τη συγκεκριμένη έρευνα, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η μέγιστη έκλυση θερμότητας βρίσκεται κοντά στο σημείο που έχουμε το 50% της καύσης (CA50). Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται διαγραμματικά η εξίσωση έκλυσης θερμότητας και το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται.



Σχήμα 3: Διάγραμμα συσχέτισης της εξίσωσης έκλυσης θερμότητας και της εξίσωσης Wiebe [15]

Ο υπολογισμός και η απεικόνιση του κλάσματος μάζας καυσίμου διαφέρει ως προς τον τρόπο υπολογισμού, ανάλογα με τη μεθοδολογία που ακολουθεί ο ερευνητής. Στην εργασία [8] το MFB προσδιορίζεται με την εξίσωση 22.

$$MFB = \frac{mb_i}{mb_e} = \frac{\sum_s^i \Delta P_{cn}}{\sum_s^e \Delta P_{cn}} \quad (22)$$

ΔP_{cn} : η αύξηση πίεσης που οφείλεται στην καύση

mb : η μάζα καίγεται συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου

ο δείκτης i δηλώνει την τρέχουσα θέση υπολογισμού

ο δείκτης s την αρχή της καύσης

ο δείκτης e το τέλος της καύσης.

Με την ίδια μεθολογία ο M.Mittal [20] υπολογίζει στην εργασία του το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται. Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί είναι το ίχνος πίεσης από πειράματα με τη χρήση μιας θερμικής μηχανής εσωτερικής καύσης. Σημαντικός παράγοντας για την μεταβολή του κλάσματος μάζας που καίγεται, είναι ο χρονισμός των βαλβίδων του κινητήρα καθώς μεταβάλλουν τη ροή. Με την έννοια του χρονισμού, αναφερόμαστε στον χρόνο για τον οποίο οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής είναι ανοιχτές. Κατά το χρονικό διάστημα αυτό, αποτρέπεται η διαφυγή μερικού μέρους των καυσαερίων από τον κύλινδρο. Έτσι, έχουμε την αλλαγή στην

ποιότητα της καύσης. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την μορφή της εξίσωσης είναι το ίδιο το καύσιμο, ο χρόνος ανάφλεξης του και ο λόγος αέρα καυσίμου.

Στη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής βρίσκεται η μεθοδολογία για τους υπολογισμούς των μεγεθών καθώς και ο λόγος που επιλέγουμε το συγκεκριμένο τρόπο. Παρουσιάζεται επίσης ο εξοπλισμός που μας ήταν απαραίτητος, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του. Αναλυτικά περιγράφεται και ο προγραμματισμός που έγινε, με σκοπό τον υπολογισμό των μεγεθών. Για την επαλήθευση του προγράμματος χρειάστηκαν και πειραματικές μετρήσεις. Στις μετρήσεις της εν λόγω εργασίας χρησιμοποιήθηκε ισοοκτάνιο. Η καύση μελετήθηκε σε χαμηλά και ψηλά φορτία, σε 3 διαφορετικά φάσματα στροφών του κινητήρα, 1000, 1500 και 2000 στροφών ανά λεπτό, σε στοιχειομετρικό μίγμα καύσης. Τέλος, έχουμε την ανάδειξη των αποτελεσμάτων, την αξιολόγηση και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

2. Μεθοδολογία και Εξοπλισμός-Προγραμματισμός

2.1 Μεθοδολογία

Για να καταλήξουμε στην μεθοδολογία, με την οποία θα υπολογίσουμε τα μεγέθη της εργασίας, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τις δυνατότητες του εργαστηρίου. Το εργαστήριο παρέχει τον πειραματικό κινητήρα με οπτική πρόσβαση. Σημαντικό χαρακτηριστικό και καθοριστικό για την επιλογή της μεθοδολογίας είναι ο αισθητήρας πίεσης που διαθέτει. Ο αισθητήρας αυτός μας δίνει στοιχεία για την πίεση εντός του κυλίνδρου. Σαν δεδομένο έχουμε και τον όγκο μέσα από αρχείο, το οποίο διαθέτει αναλυτικά τις τιμές συναρτήσεως της γωνίας του στροφαλοφόρου. Τα μεγέθη που πρέπει να υπολογίσουμε, μέσα από μαθηματικές πράξεις και συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι η IMEP, το στατιστικό μέγεθος COV_{IMEP} και το MFB. Αναλυτικά προβάλλουμε τη μεθοδολογία και τους τύπους που χρησιμοποιήσαμε για τον υπολογισμό τους.

Με βάση τη βιβλιογραφική έρευνα καθώς και τις δυνατότητες του εργαστηρίου ο υπολογισμός της IMEP γίνεται με την εξίσωση (9).

$$IMEP = \frac{W}{V_d} \quad (9)$$

W : το συνολικό έργο

V_d : ο όγκος εμβολισμού

Το συνολικό έργο W που δημιουργεί ο κύκλος προσδιορίζεται ως:

$$W = \oint P \cdot dV \quad (23)$$

V_d είναι ο όγκος εμβολισμού του κινητήρα (11), δηλαδή η διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη και ελάχιστη τιμή του όγκου.

$$V_d = V_1 - V_2 \quad (11)$$

Οπότε για την περίπτωση της εργασίας, το έργο W είναι το σύνολο του W_i για κάθε σημείο του κύκλου λειτουργίας, δηλαδή και για τις 720 μοίρες που διαγράφει ο στροφαλοφόρος άξονας και υπολογίζεται με την εξίσωση (23).

Ο υπολογισμός του μεγέθους COV_{IMEP} παρουσιάζεται στις εξισώσεις (13, 14, 15).

$$COV_{IMEP} = \frac{\sigma_{IMEP}}{\mu_{IMEP}} \quad (13)$$

σ και μ είναι η τυπική απόκλιση και η μέση τιμή αντίστοιχα, σε ένα αριθμό διαδοχικών κύκλων καύσης.

Η μέση τιμή είναι ο μέσος όρος των τιμών της IMEP:

$$\mu = \frac{\sum IMEP}{N} \quad (14)$$

Η τυπική απόκλιση δίνεται από τον τύπο (17):

$$\sigma = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{(\sum IMEP - \mu)^2} \quad (15)$$

N : το σύνολο του δείγματος, δηλαδή το σύνολο των κύκλων.

Για τον υπολογισμό του κλάσματος μάζας καυσίμου που καίγεται, χρησιμοποιούμε την εξίσωση Wiebe (16)

$$MFB(\theta) = 1 - \exp \left[-a \cdot \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{(m+1)} \right] \quad (16)$$

Το a στη συνάρτηση Wiebe έχει άμεση σχέση με τη απόδοση της καύσης και δεν αποτελεί ανεξάρτητη παράμετρο. Με την παραδοχή ότι η ποιότητα της καύσης είναι $\eta_{conv}=99\%$, αφού έχουμε σαν καύσιμο καθαρό ισοοκτάνιο και ο κινητήρας είναι πειραματικός, μπορούμε να προσδιορίσουμε το a βάσει της εξίσωσης Wiebe για το τέλος της διεργασίας.

$$n_{conv} = 1 - e^{-a} \quad (19)$$

Άρα η παράμετρος a μπορεί να εκφραστεί :

$$a = -\ln(1 - n_{conv}) \quad (20)$$

Οπότε για τα παραπάνω στοιχεία ($n_{conv}=99\%$), η τιμή του συντελεστή a είναι 4,6051 και είναι σταθερή για όλες τις συνθήκες λειτουργίας για σταθερό n_{conv} .

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή m κάνουμε πλήρη θερμοδυναμική ανάλυση του κύκλου λειτουργίας. Υπολογίζουμε την έκλυση θερμότητας μέσω της εξίσωσης (21) που αποτελεί την ιδανική λύση για τα δεδομένα που καταγράφουμε.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) \cdot P \cdot \frac{dV}{d\theta} + \left(\frac{1}{\gamma-1}\right) \cdot V \cdot \frac{dP}{d\theta} \quad (18)$$

Η ειδική θερμοχωρητικότητα γ προσδιορίζεται από την εξίσωση (2).

Στη συνέχεια προσδιορίζουμε την συνολική θερμότητα (Q_{total}) που εκλύεται κατά την καύση. Η θερμότητα αυτή αποτελείται από το άθροισμα των βηματικών τιμών της (Q_i) μέχρι το σημείο, για το οποίο ο ρυθμός έκλυσης έχει την τελευταία θετική τιμή. Σ' εκείνο το σημείο έχουμε και το τέλος της καύσης.

$$Q_i = \sum_{\theta_0}^{\theta_e} dQ \quad (24)$$

Και

$$Q_{total} = \sum_{\theta_0}^{\theta_e} Q_i \quad (25)$$

Βάσει της εξίσωσης (25) βρίσκουμε την αθροιστική έκλυση θερμότητας μέχρι την γωνία που μας ενδιαφέρει.

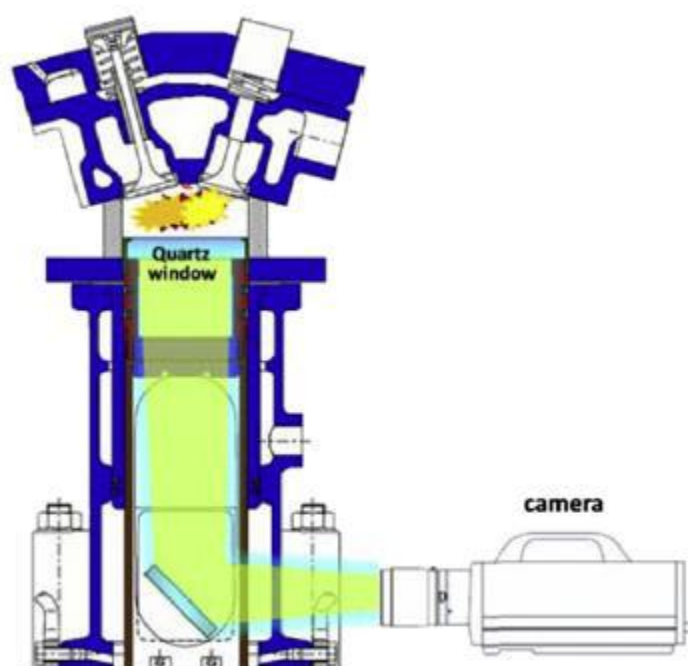
$$Q(\theta) = \sum_{\theta_0}^{\theta_e} q_i = \sum_{\theta_0}^{\theta_e-1} q_i + Q_i \quad (26)$$

Με βάση την εξίσωση (26) βρίσκουμε την έκλυση σωρευτικής θερμότητας. Άρα μέσα από τον αρχικό τύπο του MFB (17), υπολογίζουμε το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται. Επομένως, με βάση τους τύπους (24), (25) και (26), ως θ_0 ορίζεται η αρχή έναυσης της καύσης και ως θ_e ορίζεται το πέρας αυτής. Έτσι, μπορούμε να προσδιορίσουμε το κλάσμα μάζας που καίγεται συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα με βάση τις θερμοδυναμικές εξισώσεις. Η χρήση αυτών των εξισώσεων έγινε, ώστε να προσδιορίσουμε τον συντελεστή m .

2.2 Πειραματική Διάταξη

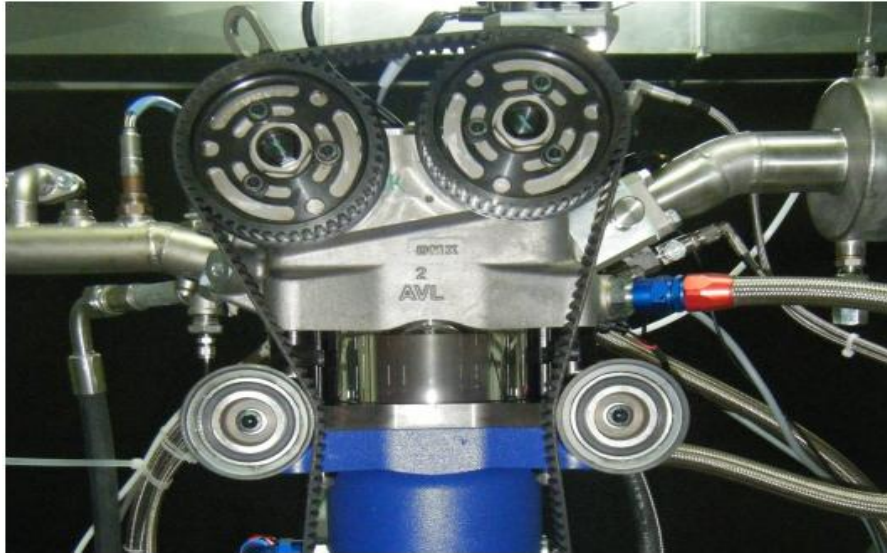
2.2.1 Εξοπλισμός εργαστηρίου

Μια πειραματική οπτική μηχανή με σπινθηριστή συνιστά εργαλείο για την διεξαγωγή μελετών διαφόρων αντικειμένων. Βασικό χαρακτηριστικό είναι η ευκολία στη χρήση οπτικών μέσων (χρήση laser, θερμικής κάμερας κ.α.) για τον υπολογισμό μεγεθών, ανάλογα με το θέμα της έρευνας. Παράδειγμα μιας τέτοιας διάταξης βρίσκεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4: Διάταξη οπτικής MEK και κάμερας υψηλής ευκρίνειας [26]

Επιπροσθέτως, μείζον θέμα είναι η συνδεσιμότητά της με διάφορα μετρητικά και λειτουργικά όργανα, που μπορούν να δώσουν κάποια από τα βασικά μεγέθη (πίεση, όγκος κ.ά). Ένα από αυτά, είναι το δυναμόμετρο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ροπής και τον υπολογισμό μεγεθών όπως η BMEP, η FMEP, η ισχύς κ.ά. Σε μια τέτοια μηχανή μπορούμε μέσω λογισμικού καθώς, επίσης και με τη χρήση ορισμένων μετρητικών οργάνων (αισθητήρας πίεσης και ηλεκτρικής εκκένωσης στον σπινθηριστή κ.α.) να δημιουργήσουμε ένα πρόγραμμα, υπεύθυνο για τον υπολογισμό των μεγεθών της εργασίας. Πρόκειται για έναν οπτικό πειραματικό κινητήρα με ανάφλεξη μέσω σπινθηριστή (SI) της AVL του σχήματος 5, ο οποίος διαθέτει οπτικά προσβάσιμο κύλινδρο και έμβολο για τη μελέτη της φλόγας.



Σχήμα 5: Απεικόνιση της πειραματικής μηχανής [28]

Οι προδιαγραφές του κινητήρα δίνονται στον πίνακα 1:

Πίνακας 1: Προδιαγραφές κινητήρα

Διάμετρος εμβόλου	Διαδρομή εμβόλου	Όγκος εμβολισμού
82 mm	90 mm	475 cm ³

Επιπλέον, διαθέτει και τους δύο τρόπους ψεκασμού, τον GDI (Gasoline Direct Injection), όπου ο εγχυτήρας βρίσκεται μέσα στο θάλαμο καύσης και είναι για τον άμεσο ψεκασμό, αποκλειστικά για υγρά καύσιμα, ενώ ο δεύτερος είναι ο PFI (Port Fuel Injection), όπου έχουμε τον εγχυτήρα έμμεσου ψεκασμού τοποθετημένο στην εισαγωγή ακριβώς πριν τις βαλβίδες εισαγωγής.

Απαραίτητη για τη λειτουργία του κινητήρα καθώς και για την επικοινωνία του με τον χρήστη είναι η μονάδα χρονισμού της μηχανής. Η μονάδα αυτή είναι ο AVL ETU 247 (Engine Timing Unit) του σχήματος 6, από την οποία μπορούμε να ρυθμίσουμε πότε επιθυμούμε να ξεκινήσει η έγχυση και για πόσο χρονικό διάστημα ή μέχρι ποιές μοίρες του στροφαλοφόρου άξονα, θα ψεκάζει ο εγχυτήρας, αλλά και τον χρόνο ή τη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα, που θα γίνει η έναυση από τον σπινθηριστή. Είναι ανάγκη να αναφερθεί ότι η ETU έχει αρκετές εξόδους, με αποτέλεσμα να μπορούμε να δώσουμε εντολή είτε σε μια κάμερα υψηλής ταχύτητας καταγραφής, όπως θα αναφερθεί ακολούθως, είτε σε κάποια διάταξη με λέιζερ (Laser Induced Fluorescence και Particle Image Velocimetry).



Σχήμα 6: Απεικόνιση της μονάδας χρονισμού της μηχανής [28]

Αναπόσπαστο κομμάτι για την ερευνητική διάταξη είναι ο αισθητήρας πίεσης που συνοδεύει τον κινητήρα της AVL με κωδικό μοντέλου GU22C [29]. Ο αισθητήρας πίεσης, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ακρίβεια μέτρησης, είναι εφοδιασμένος με έναν αναστολέα φλόγας ή αλλιώς με θερμική προστασία, που μειώνει την κυκλική ολίσθηση κατά 50% και προστατεύει τον αισθητήρα σε περίπτωση που δημιουργηθούν εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Επιπλέον, ο GU22C έχει ελαχιστοποιημένες μηχανικές επαφές μεταξύ του σημείου έδρασης και περιβλήματος του αισθητήρα, ώστε να μην υπάρχει, όσο είναι εφικτό, επίδραση στις μετρήσεις που παίρνουμε από τις δονήσεις του κινητήρα. Το σήμα του παραπάνω αισθητήρα οδηγείται σε έναν ενισχυτή σήματος της KISTLER [30]. Η κύρια λειτουργία του είναι η μετατροπή του πιεζοηλεκτρικού σήματος που δέχεται από τον αισθητήρα σε αναλογικό ηλεκτρικό σήμα, με στόχο να μπορούμε να καταγράψουμε την πίεση. Η μορφή με την οποία λαμβάνουμε τα δεδομένα είναι σε ηλεκτρικό σήμα, τα οποία μεταφράζονται και μετατρέπονται σε δεδομένα μέσω ενός κωδικοποιητή της National Instruments, τον NI 9215 [25].

Για τη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ο κινητήρας με τη χρήση των οπτικών μέσων (γυάλινος κύλινδρος και έμβολο) και με σύστημα άμεσου ψεκασμού (GDI) με καύσιμο το ισοοκτάνιο. Η καταγραφή της εικόνας της καύσης έγινε με τη χρήση μιας κάμερας υψηλής συχνότητας αποτύπωσης εικόνων (FASTCAM-SA3 120K, σχήμα 7) [21] και η επεξεργασία της έγινε με το πρόγραμμα PFV της εταιρίας PHOTRON. Η κάμερα είναι σχεδιασμένη, ώστε να μπορεί να αποτυπώσει μέχρι και 120.000 καρέ το δευτερόλεπτο (fps) με μεγάλη ευκρίνεια, γεγονός που την κατατάσσει στα πλέον απαραίτητα μέσα για την εργασία.



Σχήμα 7: Απεικόνιση FASTCAM-SA3 Model 120k [27]

Η ταχύτητα λήψης ρυθμίστηκε στα 15.000 fps και η αρχή της λήψης γίνεται μέσω της γωνίας της ανάφλεξης του σπινθηριστή. Η εντολή για την έναρξη της καταγραφής δίνεται αυτόματα, μέσω της μονάδας διαχείρισης της μηχανής (ETU) και καταγράφεται ο μέγιστος αριθμός εικόνων που μπορούν να συμπεριληφθούν στη μνήμη της κάμερας.

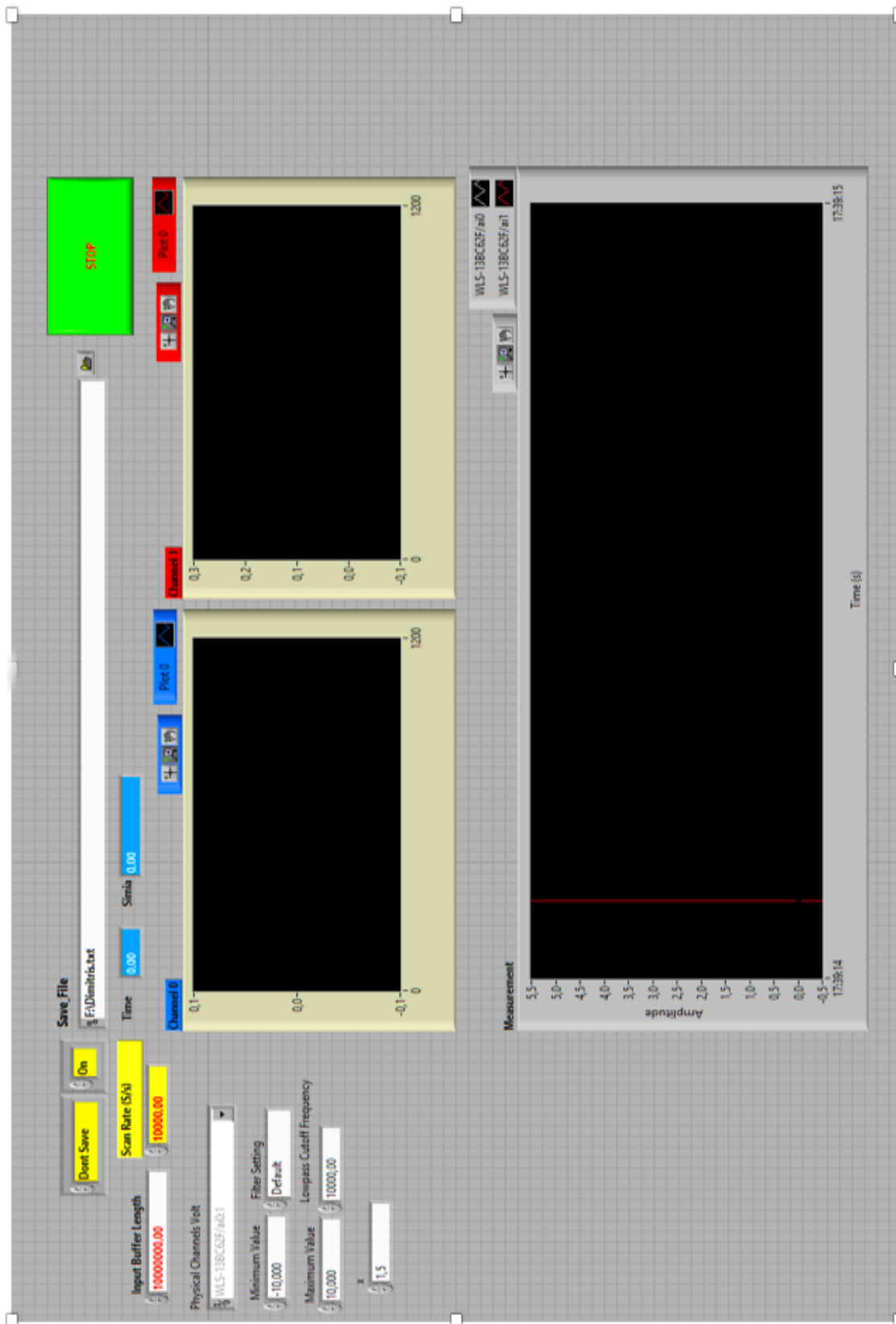
2.2.2 Προγραμματισμός

Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε για τον υπολογισμό των μεγεθών έγινε στην πλατφόρμα LabView. Το λογισμικό αυτό έγκειται στην κατηγορία του Virtual Instrumentation (εικονικών οργάνων), δηλαδή μέσα από βασικά μεγέθη -εύκολα μετρήσιμα- δημιουργούμε μαθηματικές σχέσεις για τον υπολογισμό νέων μεγεθών και την απεικόνισή τους.

Η αρχική εκμάθηση χρήσης του λογισμικού έγινε μέσω βίντεο [22, 23] και παραδειγμάτων [24], τα οποία υπάρχουν μέσα στο πρόγραμμα καθώς, επίσης και μέσα από το διαδίκτυο, αφού το LabView αποτελεί ένα ευρέως διαδεδομένο πρόγραμμα προσομοίωσης μετρητικών οργάνων.

Στο σχήμα 8 απεικονίζεται η οθόνη λειτουργίας του αρχικού προγράμματος, το οποίο δημιουργήθηκε από τον κύριο Δ. Γιαγκόπουλο, καθηγητή του Π.Δ.Μ. Σκοπός του προγράμματος αυτού ήταν η απεικόνιση και η καταγραφή της πίεσης και της εντολής της ETU προς τον πολλαπλασιαστή, συναρτήσει των σημείων δειγματοληψίας.

Κατά την πρώτη επαφή με το πρόγραμμα, ήταν αναγκαία η κατανόηση του αρχικού κώδικα και των διεργασιών που εκτελεί, για τον υπομνηματισμό και την προβολή των αποτελεσμάτων. Στο σχήμα 9 έχουμε το διάγραμμα λειτουργίας του αρχικού προγράμματος. Στην αρχή του τοποθετούμε την είσοδο των δεδομένων, μέσα από ένα φυσικό κανάλι (physical channel), το οποίο περιέχει το αναλογικό σήμα της πίεσης και το σήμα του εγκεφάλου για τον σπινθηριστή, σε μορφή ηλεκτρικού σήματος σε Volt. Στη συνέχεια, το σήμα περνάει από ένα DAQ assistant για την ψηφιοποίησή του και έπειτα σε ένα φίλτρο για την εξομάλυνση των τιμών. Το σήμα συντονίζεται με το χρόνο και μέσα απ' το ρυθμό σάρωσης επιτυγχάνεται η δημιουργία των σημείων. Ύστερα, μέσα από εντολές οδηγούμαστε στην εμφάνιση δύο καναλιών με δεδομένα από το προαναφερθέν, ψηφιοποιημένο σήμα. Στο πρώτο κανάλι έχουμε την πίεση και στο δεύτερο το σήμα του εγκεφάλου προς τον σπινθηριστή. Από εκεί, με την εντολή `index array` παίρνουμε σαν αποτέλεσμα δύο ξεχωριστές σειρές δεδομένων (`array`) ιδίου μεγέθους. Τη σειρά δεδομένων της πίεσης, την πολλαπλασιάζουμε με μία σταθερά ($\times 25$), η οποία μας μετατρέπει τα Volt του σήματος σε bar. Έπειτα, τα δύο σήματα απεικονίζονται μέσα από γραφικές παραστάσεις, συναρτήσει των σημείων δειγματοληψίας καθώς και σε ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα, τα οποία είναι σε πραγματικό χρόνο. Για την αποθήκευσή τους χρειαζόμαστε την ένωσή τους σε ένα πίνακα και τη μορφοποίησή του σε «n» γραμμές και δύο στήλες. Μετά, μέσα από κατάλληλους βρόχους καταφέρνουμε τη δημιουργία του αρχείου με τη μορφή `.txt` (που έχει τους πίνακες που αναφέρουμε πιο πάνω).

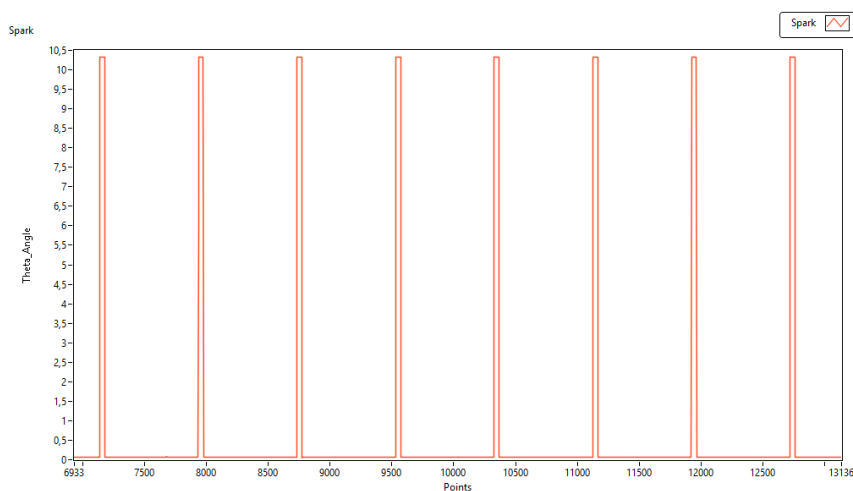


Σχήμα 8: Απεικόνιση της οθόνης λειτουργίας του αρχικού κώδικα

Στην παρούσα εργασία, τα μεγέθη που υπολογίσαμε είναι η μέγιστη συμπίεση, η μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται μέσα στον κύλινδρο, καθώς και η γωνία του στροφαλοφόρου που έχουμε τις παραπάνω τιμές, όπως επίσης η IMEP (μέση πραγματική πίεση) και το κλάσμα μάζας που καίγεται (MFB).

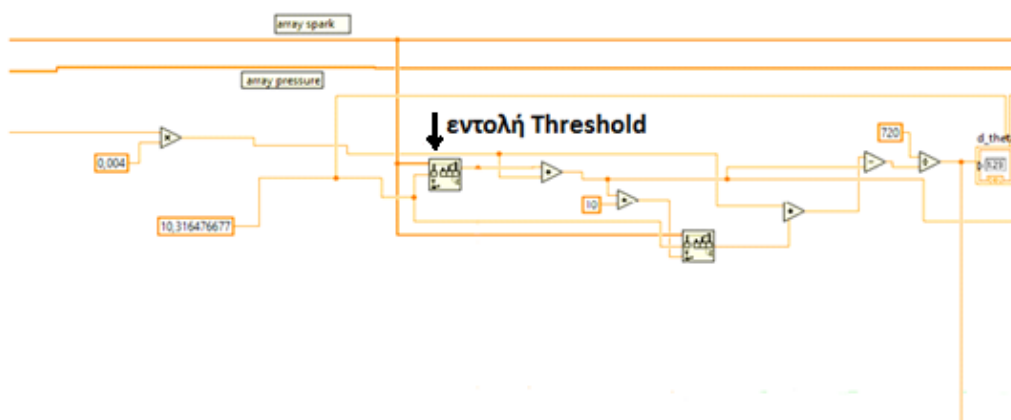
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ

Σύμφωνα με τον αρχικό κώδικα τα δεδομένα που είναι η πίεση και το σήμα του εγκεφάλου προς τον σπινθηριστή, τα λαμβάνουμε σε μορφή σειράς σε πραγματικό χρόνο. Αρχικά, μετά την κατανόηση του προγράμματος και την εκμάθηση των εντολών και της φιλοσοφίας, κύριο μέλημά μας ήταν η δημιουργία μιας ακόμα σειράς τιμών ιδίου μεγέθους που να αντιστοιχίζει τιμές της γωνίας του στροφαλοφόρου, δηλαδή από 0 μέχρι και 720 μοίρες (διότι ο κινητήρας είναι 4-χρονος, δηλαδή πραγματοποιεί δύο στροφές, ώστε να ολοκληρωθεί ο θερμοδυναμικός κύκλος). Στηριζόμενοι στη μονάδα διαχείρισης μπορέσαμε να βρούμε ένα γνωστό σημείο από όπου πετύχαμε να έχουμε μια αρχικοποίηση, ώστε σαν αποτέλεσμα να δημιουργήσουμε τον παραπάνω πίνακα. Η μονάδα διαχείρισης του κινητήρα μας δίνει τη γωνία για την οποία έχουμε την ηλεκτρική εκκένωση του σπινθηριστή που βέβαια, αλλάζει ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, γνωρίζουμε ότι στην τελευταία τιμή για την οποία έχουμε την μονάδα διαχείρισης του κινητήρα να δίνει το σήμα στον πολλαπλασιαστή, είναι η γνωστή μας γωνία. Επειδή, όπως αναφέρθηκε στο πρόγραμμα, που λειτουργεί κατά βάση με σειρές δεδομένων, μπορούμε να έχουμε πλήρη αντιστοιχία τιμών με βάση τον δείκτη της θέσης τους. Αυτό θεωρείται βασικό κομμάτι του υπολογισμού που αναλάβαμε για τη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα. Στο σχήμα 10 έχουμε την απεικόνιση του σήματος της μονάδας διαχείρισης του κινητήρα συναρτήσει των σημείων.



Σχήμα 10: Απεικόνιση του σήματος προς τον πολλαπλασιαστή

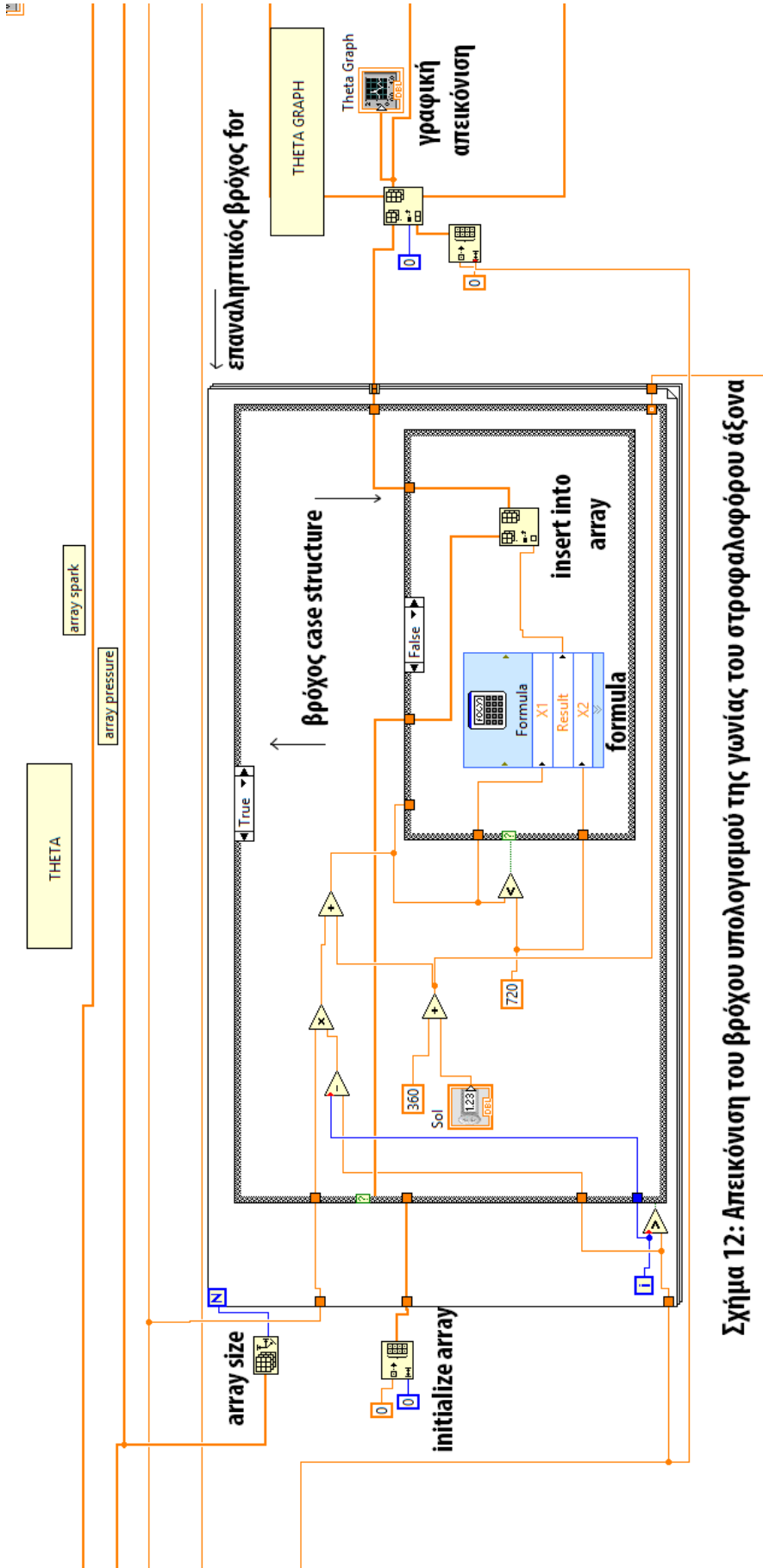
Γνωρίζουμε λοιπόν, ότι η μορφή του σήματος προς τον πολλαπλασιαστή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 10 (περίπου από 0 μέχρι και 10,3 που αναφερόμαστε, δηλαδή στα Volt) έχει μια μορφή τετραγωνικού παλμού με σταθερές τιμές και διάρκεια. Συνεπώς, μπορέσαμε να βρούμε το μέγεθος των σημείων για τα οποία έχουμε τους δύο κύκλους του στροφαλοφόρου άξονα, αφού γνωρίζουμε ότι ανάμεσα σε δύο κορυφές του σχήματος 10 υπάρχουν τόσα σημεία, όσα θα εντοπίζαμε σε έναν πλήρη θερμοδυναμικό κύκλο. Με βάση το πρόγραμμα, η παραπάνω διαδικασία γίνεται μέσα από δύο εντολές threshold, που σκοπός τους είναι να βρουν μέσα στη σειρά δεδομένων την τιμή 10,3 και να κρατήσουν τον δείκτη της θέσης του. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 11, χρησιμοποιούμε δύο φορές αυτήν την εντολή. Με την αρχική εντολή βρίσκουμε τον πρώτο δείκτη του σημείου που μας ενδιαφέρει και προσθέτουμε στον δείκτη αυτό το σύνολο των σημείων, για τα οποία δίνει η ETU το σήμα, το προσδιορίζουμε μέσα από τον πολλαπλασιασμό του ρυθμού σάρωσης και του χρόνου που λειτουργεί ο σπινθηριστής (0,004 δευτερόλεπτα). Στη συνέχεια προσθέτουμε μία σταθερά στο δείκτη αυτό, προκειμένου να είμαστε σίγουροι ότι η δεύτερη εντολή threshold θα αρχίσει να ψάχνει την επόμενη τιμή 10,3, ενώ έχουμε ξεπεράσει τον πρώτο παλμό. Κρίνεται αναγκαίο και σε αυτή την τιμή να προσθέσουμε το σύνολο των σημείων, για τα οποία δίνει η μονάδα χρονισμού το σήμα, ώστε οι δύο δείκτες να είναι τα τελευταία σημεία του παλμού. Διαιρώντας τις 720 μοίρες με το σύνολο των παραπάνω σημείων προσδιορίζουμε ένα dθ που ουσιαστικά είναι το βήμα της γωνίας από σημείο σε σημείο.



Σχήμα 11: Απεικόνιση του βρόχου υπολογισμού του βήματος γωνίας

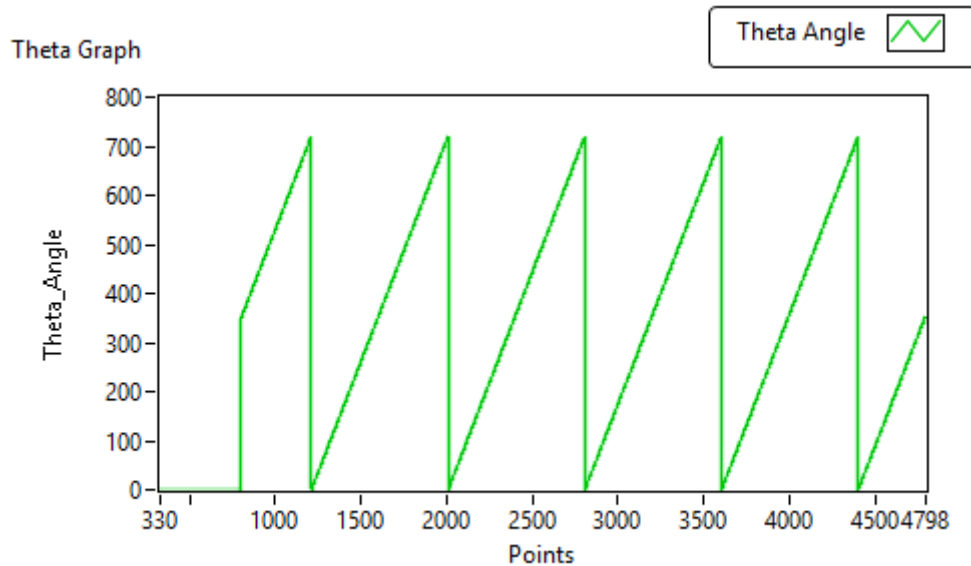
Στη συνέχεια, στο σχήμα 12 βλέπουμε τον τρόπο υπολογισμού της γωνίας συναρτήσεως των σημείων. Δημιουργήσαμε σε πρώτο στάδιο ένα μηδενικό πίνακα, ο οποίος θα πάρει το μέγεθος των παραπάνω πινάκων. Αυτό θα γίνει μέσα από την επαναληπτική εντολή for, μέσα στην οποία έχουμε τον υπολογισμό της γωνίας. Ο υπολογισμός της γωνίας γίνεται με τη χρήση δύο εντολών case structure. Από τον

προηγούμενο βρόχο υπολογίσαμε το δείκτη, για τον οποίο ξέρουμε τη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα και τον χρησιμοποιούμε σαν αρχική τιμή του πίνακα. Στην πρώτη case structure έχουμε την άυξηση της τιμής της γωνίας, δηλαδή όσο αυξάνονται οι επαναλήψεις προστίθεται στην αρχική γωνία το $d\theta$. Για να μην ξεπεράσουμε όμως τις 720 μοίρες, που αποτελεί το θερμοδυναμικό κύκλο, έπρεπε να βρούμε μια μαθηματική σχέση που θα σταματάει τη γωνία στην τιμή αυτή και θα αναγκάζει τον υπολογισμό να ξεκινήσει από το μηδέν. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση της δεύτερης εντολής case structure που έχει μια λογική μεταβλητή Boolean (αληθής ή ψευδής συνθήκη), με βάση την μαθηματική εξίσωση που στην περίπτωσή μας είναι η mod (μας δίνει το ακέραιο υπόλοιπο της διαίρεσης δύο αριθμών) και τη χρησιμοποιούμε έτσι ώστε όταν η τιμή της γωνίας φτάσει στις 720 μοίρες, να μηδενίζει πάλι την τιμή και να αρχίζει ξανά από τις 0 μοίρες.



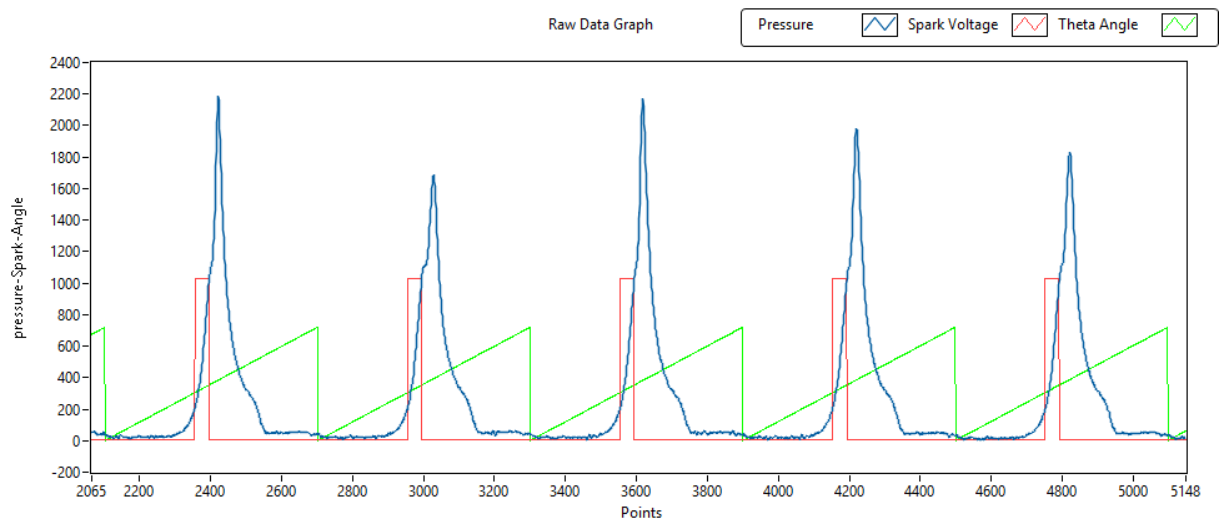
Σχήμα 12: Απεικόνιση του βρόχου υπολογισμού της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα

Η απεικόνιση της γωνίας γίνεται με ένα γράφημα, όπως φαίνεται στο σχήμα 13 και σαν άξονες έχει τις τιμές της γωνίας σε σχέση με τα σημεία.



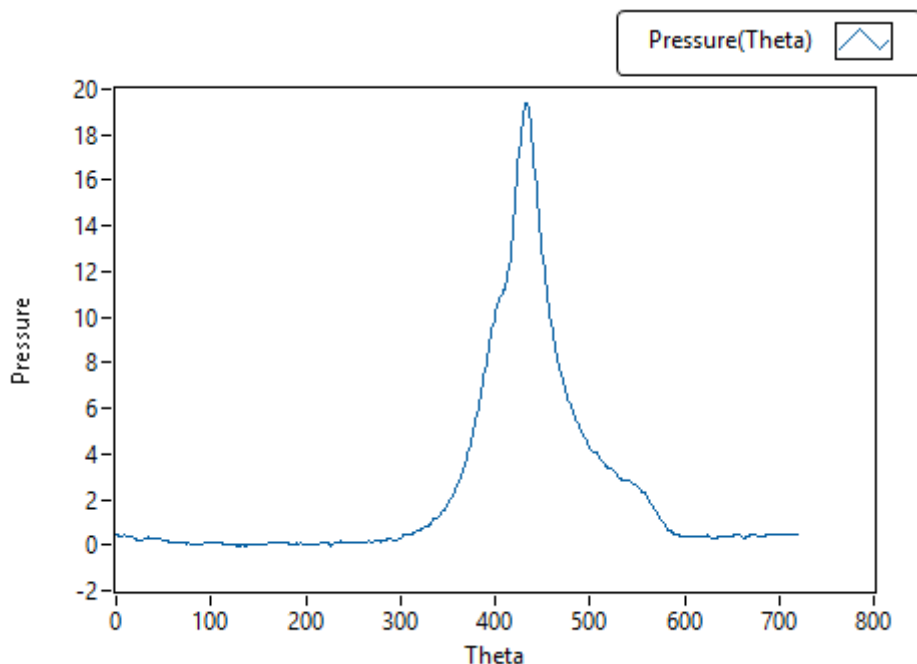
Σχήμα 13: Απεικόνιση της υπολογισμένης γωνίας συναρτήσει των σημείων

Συγκεντρωτικά, δίνεται ένα διάγραμμα που αποτελείται από την πίεση, το σήμα στον πολλαπλασιαστή, καθώς και τη γωνία που υπολογίζεται μέσα από το πρόγραμμα σε συνάρτηση με τα σημεία δειγματοληψίας, όπως αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 14.



Σχήμα 14: Απεικόνιση της πίεσης, του σήματος στον πολλαπλασιαστή και της γωνίας σε συνάρτηση των σημείων

Επίσης, δίνεται και γράφημα όπως αυτό του σχήματος 15 που έχει την πίεση συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα.

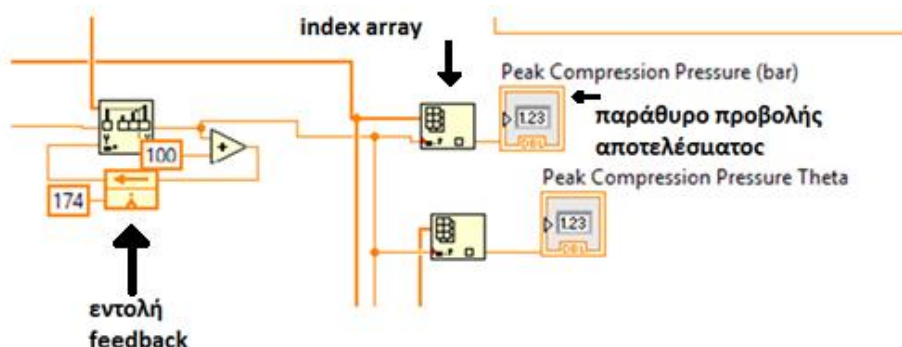


Σχήμα 15: Διάγραμμα πίεσης συναρτήσει της γωνίας

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΚΑΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ

Για να βρούμε την τιμή της μέγιστης συμπίεσης μέσα στον κύλινδρο, έπρεπε να βρούμε ένα τρόπο ώστε να πληρείται μια βασική προϋπόθεση: να μην έχουμε την έναυση της φλόγας. Αυτό συνεπάγεται ότι έπρεπε να βρούμε ένα τρόπο ώστε να παίρνουμε το μέγιστο από τη σειρά δεδομένων της πίεσης, αλλά πριν, να είχε πραγματοποιηθεί η εκκένωση του σπινθηριστή. Ο βρόχος που είχαμε στην αρχή με την εντολή threshold (που ψάχναμε την πρώτη τιμή του σήματος προς τον πολλαπλασιαστή) μας δίνει αυτόν το δείκτη της θέσης του σημείου στη σειρά δεδομένων. Για να έχουμε όμως την απεικόνιση αυτού του σημείου για κάθε θερμοδυναμικό κύκλο, έπρεπε να προηγηθεί η παραπάνω εντολή εύρεσης, χρησιμοποιώντας ωστόσο και τη λειτουργία του βρόχου feedback, η οποία αποθηκεύει τον αριθμό του δείκτη και τον χρησιμοποιεί ξανά σαν αρχική τιμή για την εντολή threshold. Για να λειτουργήσει σωστά ο βρόχος αυτός, στο αποτέλεσμά του έχει προστεθεί μια σταθερά, την οποία καθορίσαμε εμείς μετά από έρευνα για όλες τις συνθήκες λειτουργίας, όπως βλέπουμε στο σχήμα 16, που δείχνει ολόκληρο τον βρόχο υπολογισμού του δείκτη. Η σταθερά προστίθεται στον δείκτη με σκοπό να προσπεράσει τη διάρκεια της καύσης και να αρχίσει να ψάχνει την τιμή για τον

επόμενο κύκλο λειτουργίας. Για να βρούμε την πίεση και την αντίστοιχη γωνία χρησιμοποιούμε τον παραπάνω δείκτη στην εντολή `index array`, η οποία μας δίνει τις τιμές που ψάχνουμε.

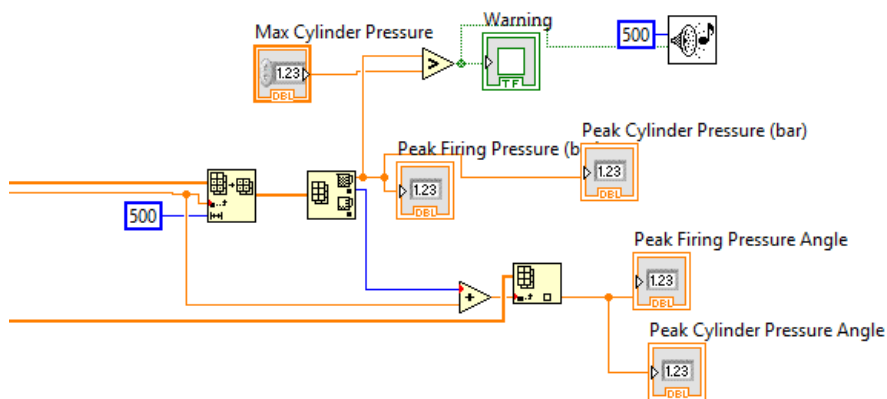


Σχήμα 16: Απεικόνιση του βρόχου υπολογισμού μέγιστης συμπίεσης και της γωνίας της

Η απεικόνισή τους γίνεται με ένδειξη σε παράθυρο της οθόνης του χρήστη, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 19.

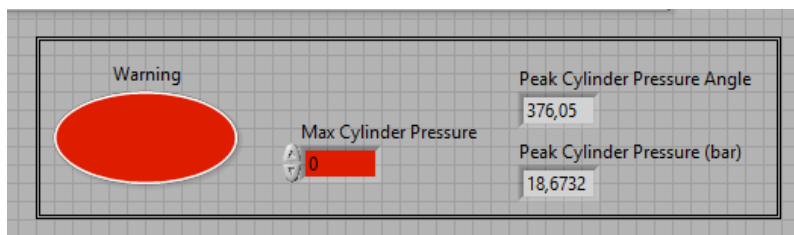
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ

Σε αυτή την ενότητα ουσιαστικά, ψάχνουμε τη μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται μέσα στον κύλινδρο και τη γωνία που αυτή εμφανίζεται. Έπειτα, μας απασχολεί η σειρά με τις τιμές της πίεσης που παίρνουμε από τον αρχικό κώδικα λειτουργίας, την οποία χωρίζουμε σε υποσύνολα, τα οποία περιλαμβάνουν ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων, που μέσα από παρατήρηση για τις συνθήκες, δηλαδή τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα, διαπιστώσαμε ότι πάντα θα προκύπτει το κομμάτι που περιλαμβάνει τη μέγιστη πίεση. Τον δείκτη της θέσης της μέγιστης πίεσης καθώς και την τιμή της, τα βρίσκουμε με την εντολή `array max&min` όπως αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 17. Χρησιμοποιούμε πεπερασμένο αριθμό σημείων, γιατί ο υπολογισμός τους απλοποιείται και γίνεται πιο γρήγορος. Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων του βρόχου γίνεται με τον ίδιο τρόπο, όπως στο σχήμα 19 .

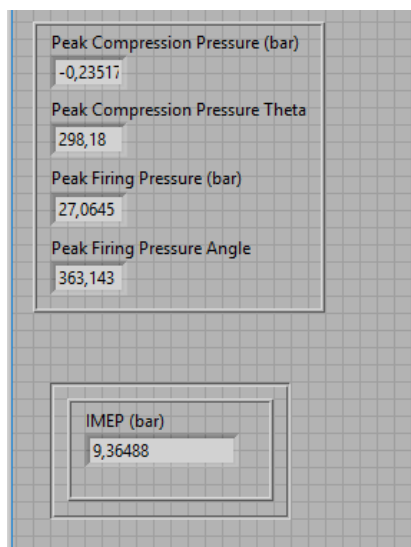


Σχήμα 17: Απεικόνιση του βρόχου μέγιστης πίεσης και της γωνίας

Επίσης, για λόγους ασφαλείας σε αυτό το κομμάτι υπάρχει και μια ασφαλιστική δικλείδα με φωτεινή ένδειξη και ηχητικό σήμα, όταν η μέγιστη πίεση ξεπερνάει το όριο που έχουμε εισάγει εμείς και φαίνεται στο σχήμα 18. Στο παράθυρο του σχήματος 18 απεικονίζεται ακόμη και η μέγιστη πίεση, σε συνδυασμό με τη γωνία στην οποία εμφανίζεται. Ο έλεγχος αυτός, γίνεται μέσα από τη λογική συνθήκη που συγκρίνει την τιμή της τρέχουσας μέγιστης πίεσης με την τιμή που έχουμε εισάγει εμείς. Ο κώδικάς της απεικονίζεται στο σχήμα 17.



Σχήμα 18: Απεικόνιση της οθόνης ασφαλείας της μέγιστης πίεσης

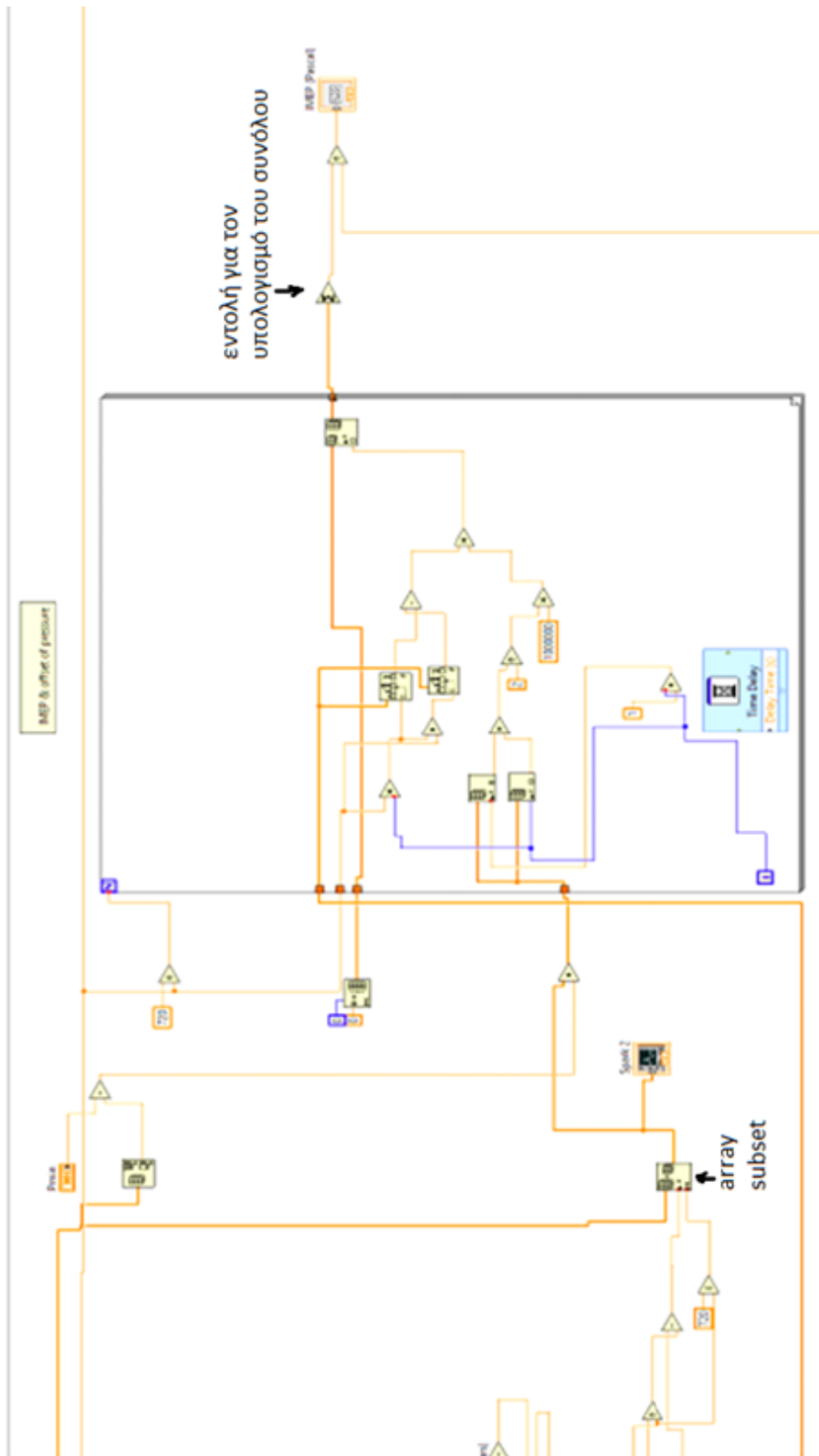


Σχήμα 19: Απεικόνιση αποτελεσμάτων στην οθόνη λειτουργίας

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΔΕΙΚΝΥΜΕΝΗΣ ΜΕΣΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ Η΄ ΙΜΕΡ

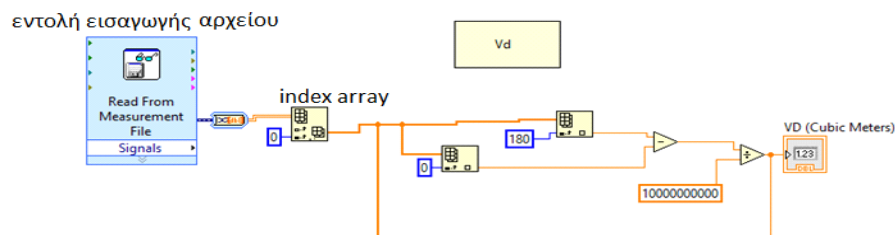
Στηριζόμενοι στην εξίσωση (9) που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας, η ΙΜΕΡ υπολογίζεται μέσα από τη μέση πίεση μεταξύ δύο σημείων μετρήσεων, την μεταβολή του όγκου και τον όγκο εμβολισμού ανά κύκλο λειτουργίας. Αρχικά λοιπόν, στόχος ήταν η δημιουργία ενός βρόχου που απομονώνει τα σημεία, για τα οποία πραγματοποιείται ο θερμοδυναμικός κύκλος με την εντολή `array subset` και επαναλαμβάνεται για όλους τους κύκλους, δίνοντας μας όλες τις τιμές της ΙΜΕΡ ανά κύκλο. Γι' αυτό το βρόχο, χρησιμοποιήθηκε η εντολή `for`, αλλά ο αριθμός των επαναλήψεων δίνεται από την διαίρεση των 720 μοιρών με το $d\theta$. Το σημείο απ' το οποίο θα αρχίσει ο βρόχος τους υπολογισμούς, δηλαδή η αρχή της μερικής σειράς δεδομένων, θα είναι κάθε φορά ο δείκτης της γωνίας έναυσης αφαιρούμενος το πλήθος των σημείων μέχρι την αρχή του θερμοδυναμικού κύκλου. Αυτό συμβαίνει γιατί η συνθήκη έναυσης διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.

Όσον αφορά το μέγεθος της σειράς δεδομένων, γίνεται και αυτό αυτόματα, με το σύνολο των σημείων να ορίζεται ως το πηλίκο της διαίρεσης των 720 μοιρών προς το $d\theta$. Η εισαγωγή του όγκου γίνεται μέσα από μια εντολή που διαβάσει ένα αρχείο με τις τιμές του όγκου ανά μια μοίρα και ανάλογα με τις τιμές της γωνίας κάνει γραμμική παρεμβολή και βρίσκει την αντίστοιχη τιμή. Στη συνέχεια, από την εξίσωση (11) υπολογίζεται το έργο ανά σημείο. Το άθροισμα των παραπάνω, μας δίνει το συνολικό έργο (9). Οι υπολογισμένες τιμές του έργου ανά σημείο, αποθηκεύονται σε έναν μηδενικό πίνακα, ο οποίος έχει αρχικοποιηθεί εκτός του βρόχου `for` και οι τιμές εισέρχονται με την εντολή `insert into array`. Αυτή καθορίζει και το μέγεθος του μηδενικού πίνακα. Αναλυτικά η προαναφερθείσα διαδικασία παρουσιάζεται στο σχήμα 20.



Σχήμα 20: Απεικόνιση του βρόχου υπολογισμού της IMEP

Τέλος, για τον υπολογισμό του όγκου εμβολισμού V_d αφαιρούμε το μεγαλύτερο από το μικρότερο όγκο, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 21. Η διαίρεση του αποτελέσματος αποτελεί τη μετατροπή του από mm^3 σε m^3 .

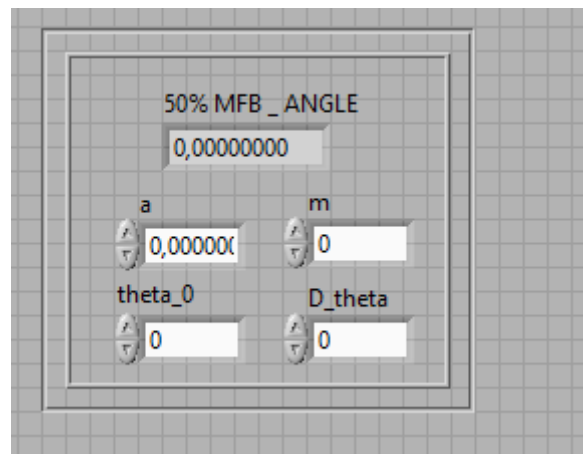


Σχήμα 21: Απεικόνιση του βρόχου υπολογισμού του όγκου εμβολισμού

Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων γίνεται σε παράθυρο στην οθόνη λειτουργίας όπως φαίνεται στο σχήμα 19.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΑΖΑΣ ΠΟΥ ΚΑΙΓΕΤΑΙ (MFB)

Ο υπολογισμός του κλάσματος μάζας που καίγεται, γίνεται με βάση την εξίσωση Wiebe, οπότε κατά το θεωρητικό μέρος της εργασίας γνωρίζουμε ότι το MFB εξαρτάται από τις παραμέτρους a (20), m καθώς και από το $\Delta\theta$ (η διάρκεια της καύσης σε γωνία του στροφαλοφόρου άξονα) και θ_0 (η γωνία της αρχής της καύσης). Άρα προγραμματιστικά για αυτά τα δεδομένα, εφόσον δεν μπορούμε να τα υπολογίσουμε εύκολα, αποτελούν στοιχεία προς εισαγωγή και τίθενται από τον χρήστη, όπως δείχνει το σχήμα 22.



Σχήμα 22: Απεικόνιση της οθόνης λειτουργίας του κλάσματος μάζας που καίγεται (MFB)

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, η εντολή for του σχήματος 23 που χρησιμοποιήσαμε δέχεται σαν δεδομένα τους συντελεστές a και m (σχήμα 22). Οι επαναλήψεις της εντολής for υπολογίζονται βάσει της διαίρεσης των 720 μοιρών με το $d\theta$. Χαρακτηριστικό είναι ότι οι επαναλήψεις εξαρτώνται από το $d\theta$, όπως και στον υπολογισμό της IMEP. Τα αποτελέσματα από την εξίσωση (16) λόγω της

πολυπλοκότητας της μαθηματικής συνάρτησης υπολογίζονται μέσα από την εντολή `formula`, που διαθέτει τις απαιτούμενες μαθηματικές πράξεις. Έχοντας αρχικοποιήσει έναν πίνακα μηδενικών στοιχείων, στον ίδιο εντάσσουμε τις υπολογισμένες τιμές του MFB με όμοιες εντολές όπως και στον υπολογισμό της IMEP. Η απεικόνιση του κλάσματος μάζας καυσίμου που καίγεται, γίνεται συναρτήσει της γωνίας η οποία υπολογίζεται στον ίδιο βρόχο, όπως δείχνει το σχήμα 23. Στην πορεία, έχουμε τη δημιουργία του γραφήματος.

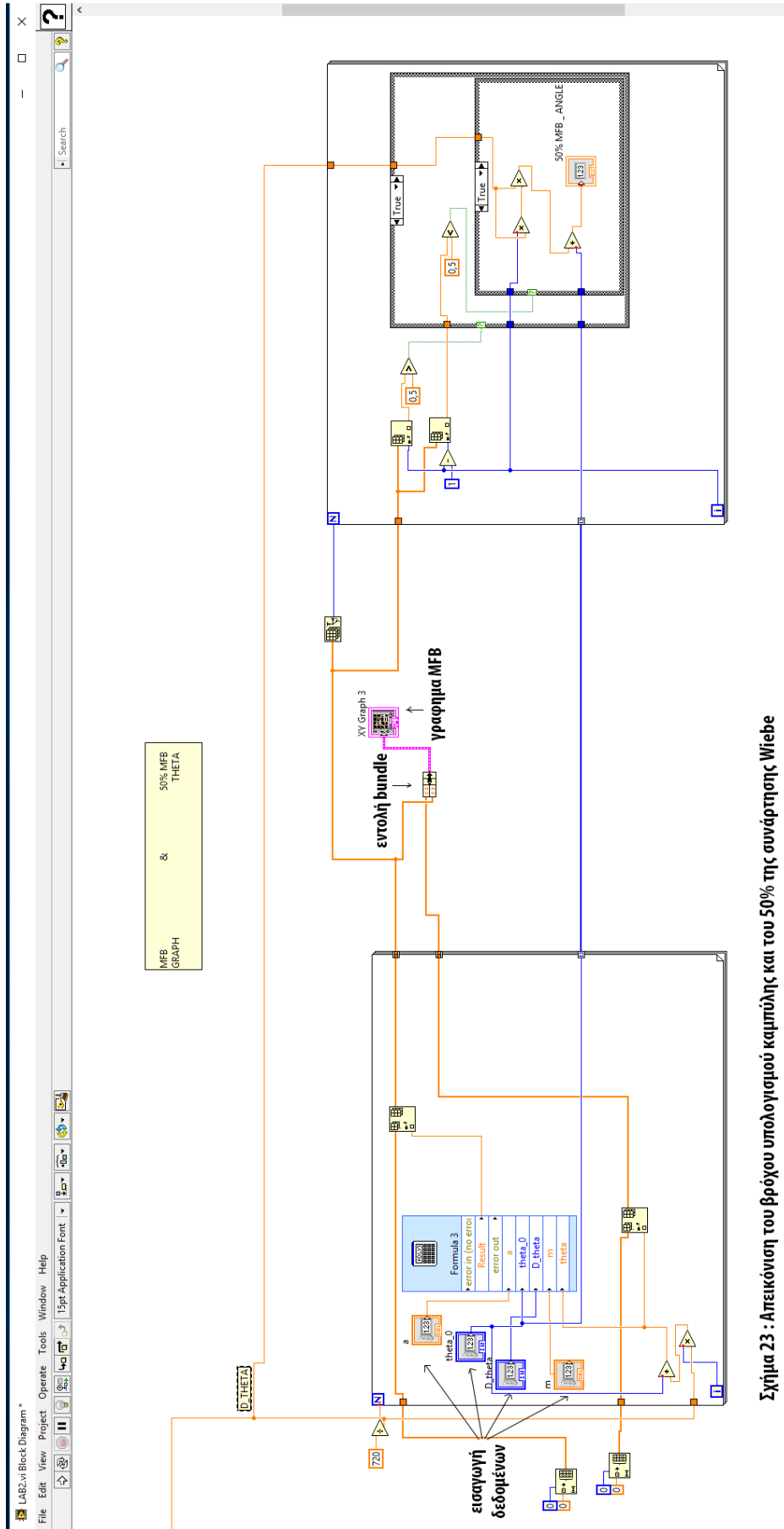
Για την εύρεση της γωνίας του 50% του MFB θα πρέπει να γίνει μια γραμμική παρεμβολή στον πίνακα, με τις τιμές που υπολογίσαμε πιο πάνω για την τιμή αυτή. Ο προσδιορισμός της γίνεται με μία επαναληπτική `for`, μεγέθους όσο ο πίνακας γωνιών που υπολογίστηκαν στον προηγούμενο βρόχο υπολογισμού της εξίσωσης Wiebe, που δίνεται με την εντολή `array size` που δημιουργήσαμε και σαρώνει όλο τον πίνακα, ψάχνοντας τη γωνία για την τιμή 0,5. Η γωνία του αποτελέσματος αναπαρίσταται στο σχήμα 22 (πάνω από τα δεδομένα εισαγωγής).

Η αρχική ιδέα για το πρόγραμμα ήταν να δημιουργηθεί, έτσι ώστε να υπολογίζει όλα τα παραπάνω μεγέθη σε πραγματικό χρόνο. Δυστυχώς όμως, λόγω των υπολογισμών που γίνονται για να βγουν τα αποτελέσματα, δημιουργούνται προβλήματα που κάνουν το πρόγραμμα να μην μπορεί να ανταποκριθεί. Όπως είδαμε στο κομμάτι που περιγράφουμε το σχεδιασμό του προγράμματος, αρκετά τμήματά του εξαρτώνται από το σήμα της μονάδας χρονισμού προς το σπινθηριστή. Το συγκεκριμένο σήμα δε δίνεται συνέχεια με τη μορφή του τετραγωνικού παλμού του σχήματος 10. Επομένως, οι δείκτες που απαιτούνται για τον υπολογισμό της γωνίας δε μπορούν να βρεθούν.

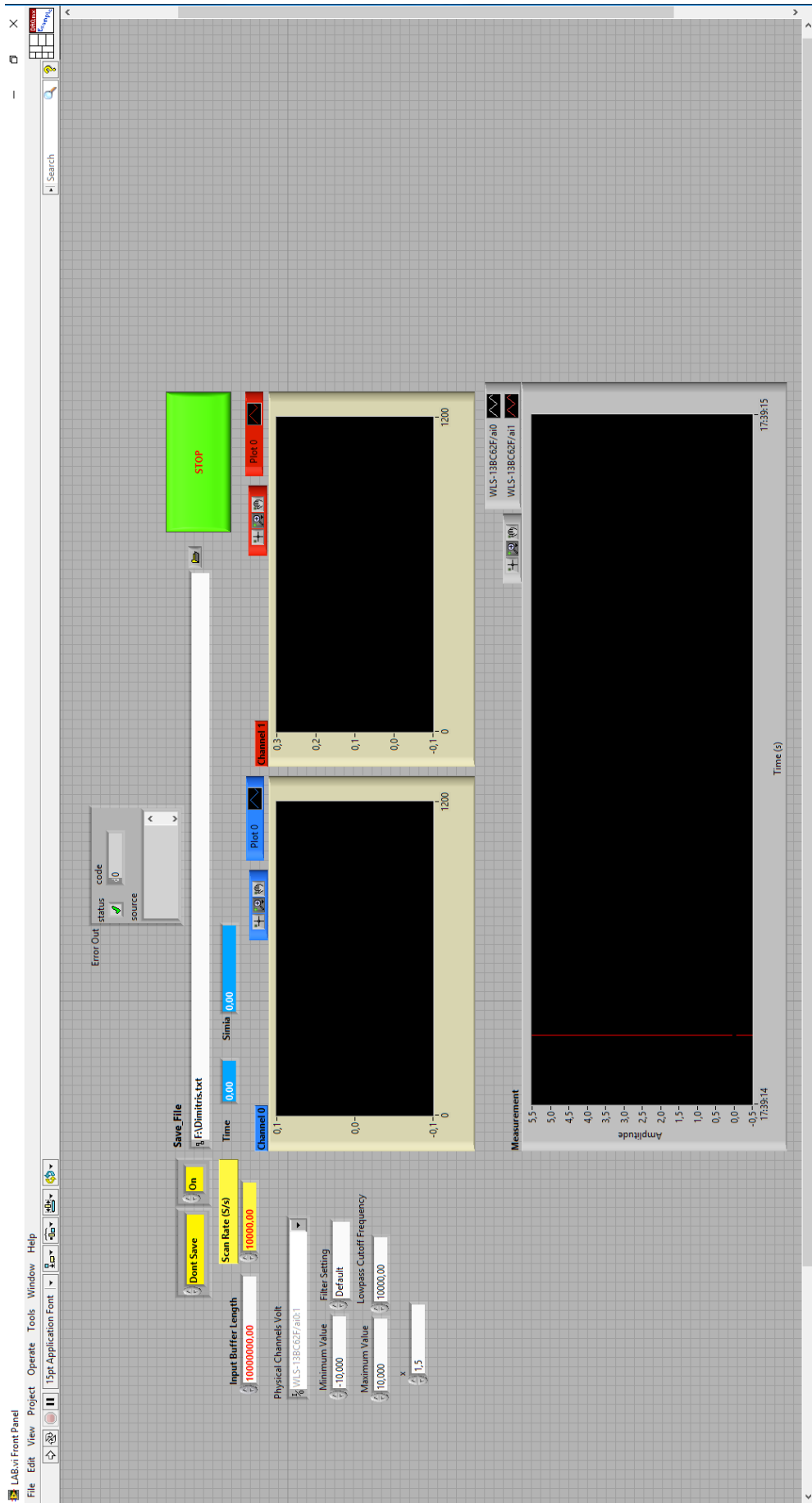
Το πρόβλημα που εμφανίστηκε μας οδήγησε στην αλλαγή του προγραμματισμού, για να μπορέσουμε να κάνουμε ένα λειτουργικό πρόγραμμα που να τελεσφορεί, καταλήγοντας στα επιθυμητά αποτελέσματα. Η αλλαγή έγινε κάνοντας το χρήστη, με εντολή του, να βγάζει τα αποτελέσματα μέσω του προγράμματος. Με την εντολή αυτή, ουσιαστικά, σταματάει η απεικόνιση και καταγραφή των δεδομένων, στέλνοντας ένα μέρος τους στο κομμάτι των υπολογισμών και της απεικόνισης. Το πρόγραμμα στέλνει τα δεδομένα για το τελευταίο δευτερόλεπτο λειτουργίας, που είναι ένας ικανοποιητικός αριθμός σημείων. Στο τελευταίο δευτερόλεπτο λειτουργίας έχουμε 10.000 σημεία, τα οποία αντιστοιχούν σε 10 με 20 θερμοδυναμικούς κύκλους, ανάλογα με τις στροφές λειτουργίας. Η δυνατότητα για την υλοποίηση της αρχικής ιδέας θα ήταν εφικτή, εάν

μαζί με τα δύο κανάλια δεδομένων υπήρχε τρόπος να έχουμε ένα ακόμα, που να μας δίνει άμεσα τις τιμές της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα ανά σημείο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, έχουμε καταστρώσει ένα πρόγραμμα που στόχος του είναι να υπολογίζει άμεσα τα αποτελέσματα με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Η εντολή για τον υπολογισμό δίνεται από το χρήστη μέσω ενός κουμπιού που βρίσκεται στην αρχική οθόνη λειτουργίας, όπως βλέπει κανείς στο σχήμα 25. Τα δεδομένα που επεξεργάζεται το πρόγραμμα είναι το τελευταίο δευτερόλεπτο λειτουργίας του κινητήρα, το οποίο παρόλο που σαν χρονικό διάστημα φαίνεται μικρό, περιέχει 10.000 σημεία για να κάνουμε τους υπολογισμούς, να προβούμε σε αποτελέσματα και σε συμπεράσματα, όπως θα δούμε και αναλυτικότερα εν συνεχεία.



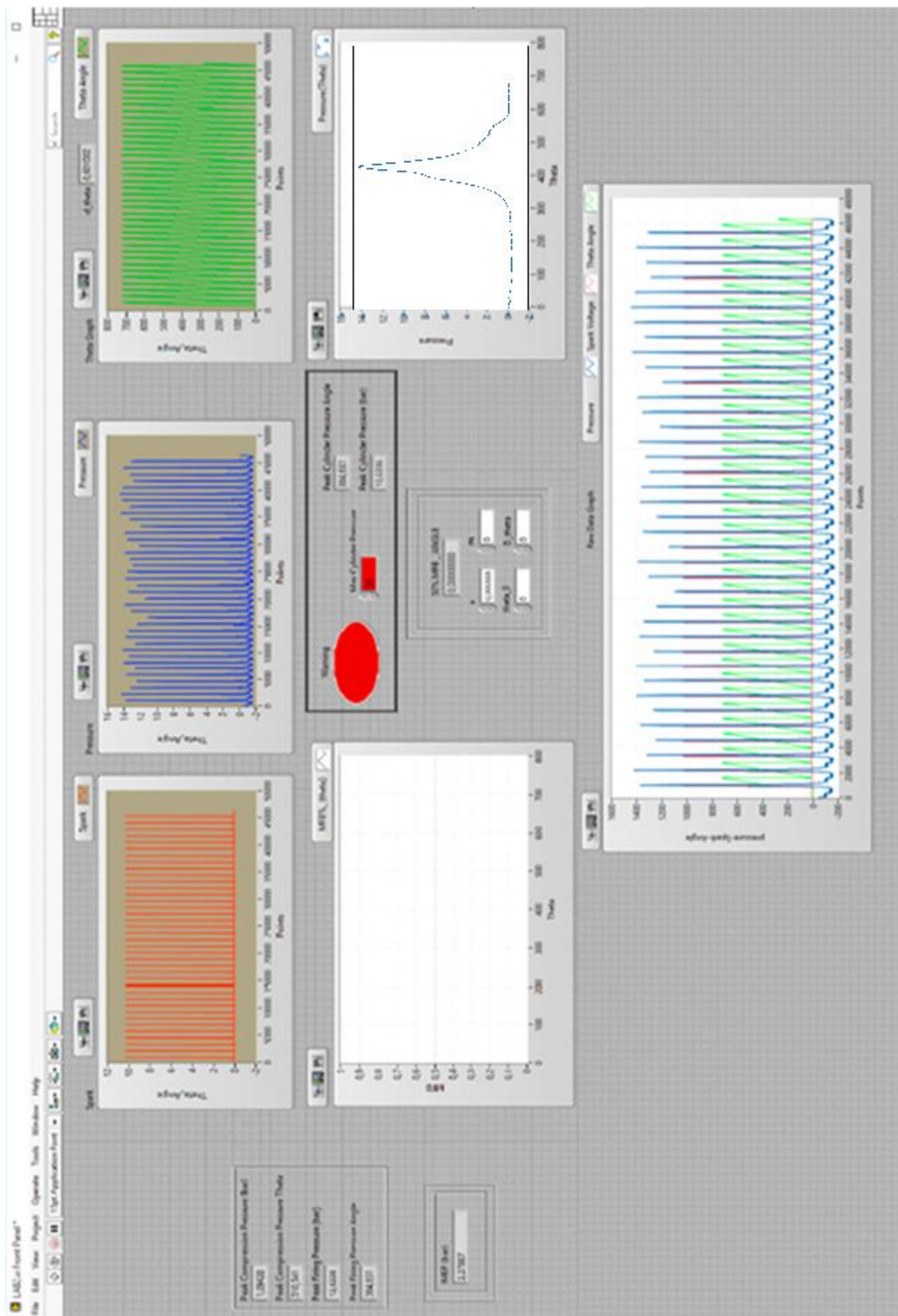
Σχήμα 23 : Απεικόνιση του βρόχου υπολογισμού καμπύλης και του 50% της συνάρτησης Wiebe



Σχήμα 24 : Απεικόνιση της αρχικής οθόνης λειτουργίας με τα αποτελέσματα πραγματικού χρόνου

Πρέπει να αναφέρουμε ότι το πρόγραμμα μπορεί εκτός από τον άμεσο υπολογισμό των παραπάνω αποτελεσμάτων να μας δώσει και κάποια αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο. Αυτά είναι η πίεση, το σήμα της μονάδας χρονισμού του κινητήρα προς τον πολλαπλασιαστή, συναρτήσε των σημείων καθώς και η μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται μέσα στον κύλινδρο κατά την λειτουργία του κινητήρα. Το τελευταίο αποτέλεσμα παρουσιάζεται πάνω από το διάγραμμα της πίεσης. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην αρχική οθόνη λειτουργίας, η απεικόνιση της οποίας βρίσκεται στο σχήμα 25. Έπειτα, τα αποτελέσματα που υπολογίζονται, φανερώνονται στην οθόνη με την μορφή που προείπαμε στο σχήμα 26.












Όπως βλέπουμε η οθόνη άμεσων αποτελεσμάτων αποτελείται από έξι διαγράμματα και τέσσερις πίνακες, που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των πράξεων για το τελευταίο δευτερόλεπτο λειτουργίας. Στα διαγράμματα απεικονίζονται το σήμα της μονάδας χρονισμού του κινητήρα προς τον πολλαπλασιαστή (σχήμα 10), η πίεση που αναπτύσσεται και η υπολογισμένη γωνία συναρτήσε των σημείων δειγματοληψίας (σχημα 13). Στην οθόνη έχουμε και το διάγραμμα της μάζας του καυσίμου που καίγεται (σχήμα 1), αλλά και τα δεδομένα εισαγωγής που χρειάζονται για τον υπολογισμό του και το αποτέλεσμα (σχήμα 22). Επίσης, υπάρχει το διάγραμμα της πίεσης συναρτήσε της γωνίας (σχήμα 15) και τέλος το συγκεντρωτικό διάγραμμα συναρτήσε του χρόνου, που περιέχει την πίεση, το σήμα της μονάδας χρονισμού του κινητήρα και τη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα (σχήμα 14). Ως προς τα παράθυρα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, στο κέντρο της οθόνης βρίσκεται το παράθυρο με την ένδειξη φωτεινού σήματος για την υπέρβαση της πίεσης. Στην οθόνη έχουμε επίσης και το παράθυρο με τα αποτελέσματα των υπολογισμών των πιέσεων και των γωνιών τους και από κάτω την απεικόνιση της ενδεικνύμενης μέσης πραγματικής πίεσης IMEP (σχήμα 19).




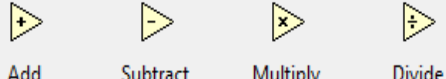
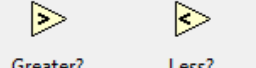

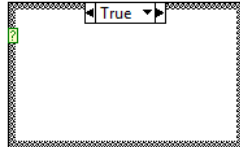

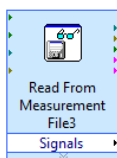
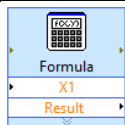




Σχήμα 25: Απεικόνιση της οθόνης με τα αποτελέσματα άμεσου υπολογισμού

Παρακάτω παρουσιάζεται συγκεντρωτικός πίνακας 2 με όλες τις εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του προγράμματος στο λογισμικό LabView, καθώς και μια σύντομη περιγραφή της κάθε εντολής ως προς την λειτουργία της.

Πίνακας 2: Εντολές Labview με σχηματική απεικόνιση και περιγραφή λειτουργίας

ΕΝΤΟΛΕΣ LabView (ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
	Add Array Elements: Προσθέτει τα στοιχεία της σειράς δεδομένων
	Interpolate 1D Array: Μέσω γραμμικής παρεμβολής υπολογίζει την τιμή μίας σειράς δεδομένων που αναζητάμε για ένα δείκτη (μη ακέραιο αριθμό)
	Insert into Array: σε μια σειρά δεδομένων αντικαθιστά τα στοιχεία με βάση τον δείκτη της θέσης τους
	Build Array: συνδέει τις σειρές δεδομένων δημιουργώντας μια σειρά n-διαστάσεων
	Array max & min: παρουσιάζει την μέγιστη και ελάχιστη τιμή της σειράς δεδομένων καθώς και τους δείκτες της θέσης τους
	Threshold 1D Array: με βάση μια τιμή που δέχεται σαν εισαγωγή ψαχνει τον δείκτη της θέσης του σε μια σειρά δεδομένων
	Initialize Array: δημιουργεί μια σειρά δεδομένων
	Index Array: ανάλογα με τον δείκτη θέσης βγάζει σαν αποτέλεσμα την τιμή από μία σειρά δεδομένων
	Array Size: υπολογίζει το μέγεθος μιας σειράς δεδομένων
	Bundle: συνδέει 2 διαφορετικές σειρές δεδομένων για την γραφική τους απεικόνιση
	Graph: δημιουργία γραφήματος με την χρήση μίας σειράς δεδομένων

<p>XY Graph</p> 	<p>XY Graph: δημιουργία γραφήματος με την χρήση 2 σειρών δεδομένων (αναγκαία εντολή το Bundle)</p>
<p>element</p> 	<p>Indicator: αριθμητική απεικόνιση αποτελέσματος</p>
<p>element</p> 	<p>Control: αριθμητικό στοιχείο προς εισαγωγή</p>
	<p>Μαθηματικές πράξεις (πρόσθεσης, αφαίρεσης, πολλαπλασιασμού διαίρεσης)</p>
	<p>Συγκριτικές πράξεις (λογική μεταβλητής Boolean αληθής – ψευδής)</p>
	<p>for loop: επαναλαμβάνει τις εντολές που υπάρχουν μέσα σε αυτή N φορές. Ο δείκτης i είναι ο αριθμός της επανάληψης</p>
	<p>Case Structure: ανάλογα με την συνθήκη (αληθής-ψευδής) εκτελούνται οι εντολές που περικλείονται</p>
	<p>Convert to Array: μετασχηματίζει σε σειρά δεδομένων</p>
	<p>Read from Measurement File: εισάγει δεδομένα μέσα από ξεχωριστό αρχείο εκτός προγράμματος (αναγκαία εντολή το Convert to Array)</p>
	<p>Formula: χρησιμοποιείται για την σύνταξη μαθηματικών συναρτήσεων</p>
<p>Warning</p> 	<p>Οπτική ένδειξη (led)</p>
	<p>Ηχητική ένδειξη</p>

3. Μετρήσεις- αποτελέσματα σε διάφορα σημεία λειτουργίας

Οι μετρήσεις που διεξήχθησαν στην πειραματική διάταξη, ήταν σε έξι σημεία λειτουργίας για τρεις διαφορετικούς αριθμούς στροφών του στροφαλοφόρου άξονα στις 1.000 rpm, 1.500 rpm και 2.000 rpm. Για το κάθε φάσμα στροφών, δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής. Οι μετρήσεις έγιναν μόνο με τη χρήση του άμεσου ψεκασμού (GDI). Τα συγκεκριμένα σημεία λειτουργίας τέθηκαν ως σημεία αναφοράς από προηγούμενη εργασία [28]. Σε κάθε περίπτωση, διεξήχθησαν μετρήσεις με χαμηλό και με υψηλό φορτίο. Για χαμηλό φορτίο έχουμε μικρό άνοιγμα εισαγωγής αέρα, οπότε και μικρή παροχή αέρα, ενώ στο μεγάλο φορτίο έχουμε μεγάλο ποσοστό ανοιγμένης εισαγωγής αέρα, με αποτέλεσμα και αρκετή παροχή αέρα. Χαρακτηριστικό είναι ότι για να έχουμε καλή καύση και όσο γίνεται πιο κοντά στη στοιχειομετρία ($\lambda=1$), αυξομειώναμε το χρόνο ψεκασμού του εγχυτήρα ανάλογα με την τιμή του λ που τη λαμβάναμε από αισθητήρα. Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται τα διάφορα ζεύγη τιμών του αριθμού στροφών του κινητήρα και των πιέσεων εισαγωγής αέρα.

Πίνακας 3: Τα έξι σημεία λειτουργίας του κινητήρα που μελετηθήκαν

RPM	1.000	1.000	1.500	1.500	2.000	2.000
P_{intake} [mbar]	-410	-90	-400	-90	-390	-210

Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε λεπτομερώς τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε περίπτωση, παρουσιάζοντάς τα μέσα από διαγράμματα και πίνακες αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν είναι με βάση τη διορθωμένη πίεση. Η διόρθωση της πίεσης γίνεται μέσα από την πρόσθεση, σε όλες τις τιμές της πίεσης, της διαφοράς της πίεσης εισαγωγής και της ελάχιστης πίεσης που καταγράφηκε από τον αισθητήρα. Η καταγραφή των μετρήσεων (διάρκειας λίγων δευτερολέπτων) μας δίνει έναν ικανοποιητικό αριθμό κύκλων για να έχουμε μια αξιόπιστη εικόνα, σχετικά με τη λειτουργία της μηχανής. Ανάλογα με τις συνθήκες που γινόταν η μέτρηση, έχουμε από 30 μέχρι και 60 κύκλους. Επίσης, θα παρουσιαστούν και φωτογραφίες από την καύση, αλλά και υπολογισμοί για να βρούμε τη διάρκεια της καύσης .

Τα αποτελέσματα, τα οποία θα καταδειχθούν είναι τα καταγεγραμμένα από το πρόγραμμα για τον άμεσο υπολογισμό τους, δηλαδή τα αποτελέσματα της οθόνης λειτουργίας, και θα συγκριθούν με τα υπολογισμένα μεγέθη βάσει των θεωρητικών λύσεων από τους μαθηματικούς τύπους, καθώς και με τα υπολογισμένα μεγέθη που προκύπτουν από τη μέση τιμή μεγεθών των κύκλων λειτουργίας ανά συνθήκη. Σκοπός μας είναι να δούμε αν και κατά πόσο τα αποτελέσματα συμφωνούν μεταξύ τους, έτσι ώστε να έχουμε μία ολοκληρωμένη εικόνα για τη λειτουργία της μηχανής.

Τα αποτελέσματα, τα οποία θα παρουσιαστούν, είναι η πίεση εντός του κυλίνδρου, όπως επίσης και το διάγραμμα της πίεσης συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα, οι μέγιστες πιέσεις και οι μοίρες τους ανά κύκλο, καθώς και η μέγιστη συμπίεση και η γωνία της ανά κύκλο. Θα προβληθεί η μέση ενδεικνύμενη πίεση (IMEP), αντιπροσωπευτικά ανά συνθήκη (δηλαδή, η μέση τιμή της IMEP από όλους τους κύκλους για σταθερές συνθήκες λειτουργίας), καθώς επίσης, και το μέγεθος COV_{IMEP}. Επίσης, θα ακολουθήσουν οι υπολογισμοί για το κλάσμα μάζας που καίγεται, αναλύοντας την εύρεση των συντελεστών της εξίσωσης Wiebe και τα διαγράμματα με πίνακες που θα περιέχουν τα αποτελέσματα.

3.1 Αποτελέσματα για 1.000 rpm με πίεση εισαγωγής - 410mbar

Στην πρώτη μέτρηση έχουμε 1.000 rpm και είναι για μικρό φορτίο με $P_{\text{intake}} = -410 \text{ mbar}$. Για να επιτευχθεί στοιχειομετρική καύση, οι ρυθμίσεις της μονάδας διαχείρισης έπονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4: οι ρυθμίσεις της ETU για 1000 rpm και χαμηλό φορτίο

RPM	P intake [mbar]	SA [°]	SOI_1 [°]	DOI_1 [ms]
1000	-410	-13	-280	1.45

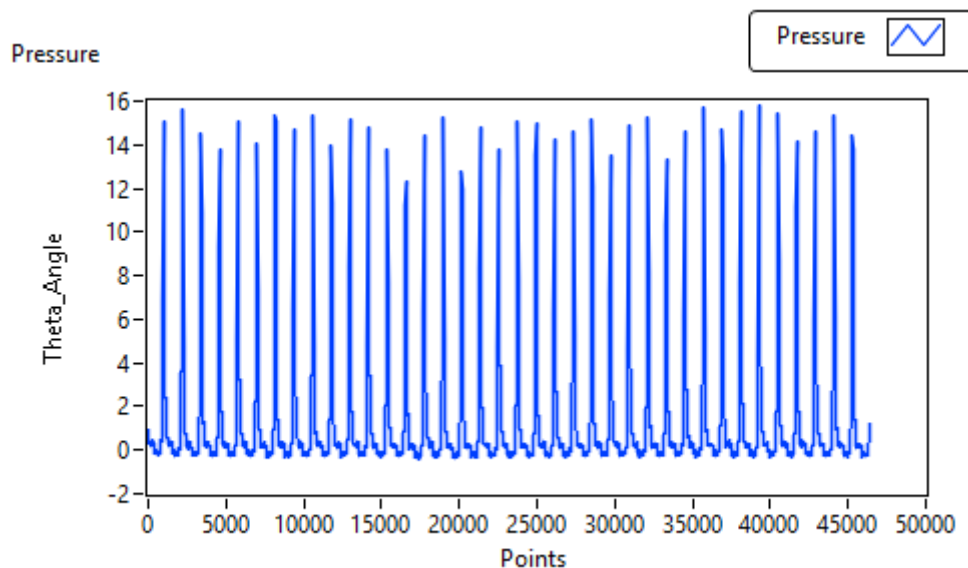
SA (spark advance) : η προπορεία έναυσης

SOI (start of injection) : η γωνία του στροφαλοφόρου άξονα, στην οποία ξεκινάει η έγχυση

DOI (duration of injection): η διάρκεια έγχυσης καυσίμου

Με βάση λοιπόν τον πίνακα 4 υπάρχει προπορεία έναυσης του σπινθηριστή στις -13 μοίρες σε σχέση με το άνω νεκρό σημείο, καθώς και η αρχή της έγχυσης

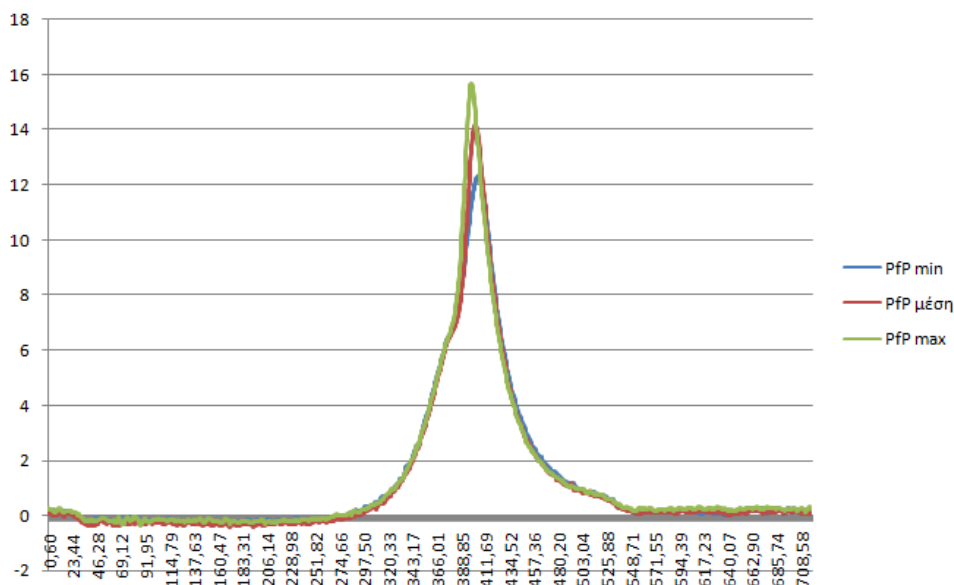
στις -280 μοίρες και πάλι σε σχέση με το άνω νεκρό σημείο με διάρκεια 1,45 ms. Με βάση λοιπόν τα αρχικά δεδομένα, έχουμε το διάγραμμα της πίεσης του σχήματος 26, συναρτήσει των σημείων δειγματοληψίας, όπως τα λαμβάνουμε από την πειραματική διάταξη μέσω του αισθητήρα πίεσης.



Σχήμα 26: Απεικόνιση όλων των κύκλων για 1.000 rpm με χαμηλό φορτίο

Στο διάγραμμα του σχήματος 26 βλέπουμε τους κύκλους λειτουργίας που εξετάζουμε, οι οποίοι αποτελούν και τη βάση για τους υπολογισμούς. Το σύνολο των κύκλων μπορούμε να το προσδιορίσουμε και από τις κορυφές του διαγράμματος στο σχήμα 26. Οι κύκλοι που εξετάζουμε είναι 38 στο σύνολό τους. Η μέση μέγιστη πίεση P_{fP} είναι περίπου στα 14,1 bar και η μέγιστη πίεση φτάνει στα 15,6 bar. Όπως βλέπουμε και από το διάγραμμα που προηγήθηκε, έχουμε αυξομειώσεις στη μέγιστη πίεση ανά κύκλο. Αυτή η διακύμανση οφείλεται στις κυκλικές μεταβολές, οι οποίες προκαλούνται από 3 κύριους λόγους. Σε κάθε κύκλο υπάρχει μεταβλητότητα στην κίνηση του μίγματος μέσα στον κύλινδρο τη στιγμή της ανάφλεξης. Ακόμη, η ποσότητα αέρα και καυσίμου που μπαίνει στον κύλινδρο σε κάθε κύκλο δεν είναι σταθερή και αυτό το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο σε κινητήρες με έγχυση PFI, όπου υπάρχουν επικαθίσεις στις βαλβίδες. Ένας ακόμη λόγος για τον οποίο παρατηρείται το συγκεκριμένο φαινόμενο, είναι η μεταβλητότητα στη μείξη φρέσκου μίγματος και εναπομεινάντων καυσαερίων μέσα στον κύλινδρο σε κάθε κύκλο λειτουργίας.

Δεδομένου του προγράμματος που δημιουργήθηκε για τους σκοπούς της εργασίας, στο επόμενο διάγραμμα του σχήματος 28 έχουμε την πίεση συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα.



Σχήμα 27: Οι κύκλοι πίεσης λειτουργίας για 1000 rpm με χαμηλό φορτίο συναρτήσεως της γωνίας του στροφαλοφόρου, για την μέγιστη, μέση και ελάχιστη τιμή της PfP

Με βάση το διάγραμμα του σχήματος 27 βλέπουμε την πίεση που επικρατεί μέσα στον κύλινδρο σε συνάρτηση με τη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα από τις 0 μέχρι και τις 720 μοίρες. Στο σχήμα 27 παρουσιάζονται τα ίχνη της πίεσης στην μέγιστη, μέση και ελάχιστη παρατηρηθείσα τιμή. Από το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να εξάγουμε σαν δεδομένα τη γωνία στην οποία έχουμε τη μέγιστη πίεση του εκάστοτε κύκλου ή/και συγκεντρωτικά να δούμε μία μέση τιμή της γωνίας για τη μέγιστη πίεση. Στις συνθήκες αυτές, υπάρχει η μέση γωνία 378,2 μοίρες με τη διακύμανσή της να είναι από 374,67 μέχρι και 387,65 μοίρες. Μέσα από το ίχνος της πίεσης και σύμφωνα με αναφορές προηγούμενων κεφαλαίων, ένα άλλο μέγεθος που εξετάζουμε είναι η μέγιστη πίεση συμπίεσης PcP, η οποία για τις υπό εξέταση συνθήκες λειτουργίας είναι 1,8 bar και εμφανίζεται περίπου στις 328 μοίρες (32 μοίρες πριν το άνω νεκρό σημείο).

Με βάση υπολογισμούς του συστήματος διαχείρισης του δυναμομέτρου, σημειώσαμε κάποια μεγέθη, σημαντικά για το επόμενο σκέλος της εργασίας που αφορά τον υπολογισμό της IMEP. Τα μεγέθη αυτά είναι η BMEP (μέση πραγματική πίεση πέδησης) καθώς και η FMEP (μέση πραγματική πίεση τριβών), τα οποία με τη βοήθεια της εξίσωσης (12) μάς προσδιορίζουν την IMEP. Γνωρίζοντας λοιπόν αυτά, με βάση τους υπολογισμούς του προγράμματος, καθώς και ανάλογα με την διορθωμένη πίεση (όπως αυτή παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα), βρίσκουμε την μέση τιμή της IMEP για τις συνθήκες αυτές. Στην πρώτη στήλη (IMEP_{LABVIEW}) του πίνακα 5, έχουμε την τιμή της IMEP από το πρόγραμμα την ώρα

της καταγραφής και είναι για τον τελευταίο θερμοδυναμικό κύκλο. Στην ακόλουθη στήλη ($IMEP_{DYN}$) τοποθετείται η υπολογισμένη τιμή της $IMEP$ (12) από τα δεδομένα $BMEP_{DYN}$ και $FMEP_{DYN}$, τα οποία αντλούμε από το σύστημα διαχείρισης του δυναμομέτρου. Τα δύο αυτά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5 σε ξεχωριστές στήλες. Στην επόμενη, έχουμε τη μέση τιμή της $IMEP$ όλων των θερμοδυναμικών κύκλων που εξετάζουμε.

Πίνακας 5: Τα αποτελέσματα για 1000 rpm με χαμηλό φορτίο

$IMEP_{LABVIEW}$	$IMEP_{DYN}$	$BMEP_{DYN}$	$FMEP_{DYN}$	$IMEP_{(μ\epsilon\sigma\eta)}$
3,4bar	3bar	0.3bar	-2.7 bar	3,38bar

Όπως είναι έκδηλο από τον πίνακα 5, οι τιμές της $IMEP$ διαφέρουν. Αυτό πηγάζει στον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται η $IMEP$. Η τιμή που μας φανερώνει το πρόγραμμα είναι αρκετά κοντά στην τιμή της υπολογισμένης μέσης τιμής και ο υπολογισμός τους βασίζεται στο ίχνος πίεσης και στον όγκο. Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με την τιμή, όπως αυτή υπολογίζεται από το πρόγραμμα διαχείρισης του δυναμομέτρου, παρατηρούμε μία διαφορά. Αυτό οφείλεται στο ότι το δυναμόμετρο χρειάζεται εκ' νέου βαθμονόμηση.

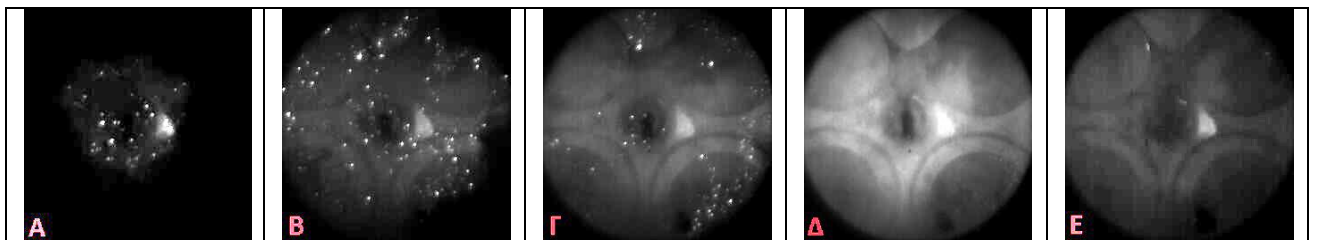
Το μέγεθος που προσδιορίζει τη σταθερότητα της λειτουργίας του κινητήρα είναι το COV_{IMEP} , το οποίο υπολογίσαμε σύμφωνα με το μαθηματικό τύπο (13). Με βάση λοιπόν όσα έχουν λεχθεί ήδη έχουμε $COV_{IMEP}=1,66\%$. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ικανοποιητικό και σημαίνει ότι έχουμε σταθερή καύση και κατά συνέπεια, σταθερότητα στη λειτουργία του κινητήρα, διότι για τιμές πάνω από το 10% εμφανίζεται πρόβλημα λειτουργίας [18].

Σε αυτό το σημείο λειτουργίας, θα παρουσιαστούν και κάποιες ενδεικτικές φωτογραφίες από έναν τυχαίο κύκλο κατά τη διάρκεια της καύσης στο σχήμα 29, οι οποίες αφορούν την έναυση και την εξέλιξη της καύσης, με σκοπό να υπολογίσουμε τη διάρκειά της σε μοίρες. Επιλέγουμε έναν τυχαίο κύκλο, γιατί οι συνθήκες είναι σταθερές, οπότε η διάρκεια της καύσης θα είναι σχετικά σταθερή. Οι φωτογραφίες αποτυπώθηκαν με κάμερα υψηλής ταχύτητας απεικόνισης που διαθέτει το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών. Η ταχύτητα λήψης είναι στις 15.000 frame/sec, επομένως γνωρίζοντας ότι ο κινητήρας δουλεύει με 1.000 rpm, υπολογίζεται ότι κάθε φωτογραφία αποτυπώνεται ανά 0.4 μοίρες, όπως μπορούμε να δούμε παρακάτω:

$$1000rpm = 1000 \left[\frac{revolution}{min} \right] \frac{360}{60} \left[\frac{degree}{revolution} \right] \left[\frac{min}{sec} \right] = 6000 \left[\frac{degree}{sec} \right]$$

$$6000 \left[\frac{degree}{sec} \right] \frac{1}{15000} \left[\frac{sec}{photo} \right] = 0.4 \left[\frac{degree}{photo} \right]$$

Από τις φωτογραφίες που ελήφθησαν πράγματι παρατηρούμε ότι η διάρκεια της καύσης για αυτές τις συνθήκες είναι περίπου στις 117 φωτογραφίες. Αυτό μας οδηγεί σε μία διάρκεια καύσης περίπου στις 46,8 μοίρες. Η απεικόνιση των αμέσως παρακάτω φωτογραφιών γίνεται με διαφορά μεταξύ τους, 10 περίπου μοίρες.



Σχήμα 28: Φωτογραφίες της καύσης για 1.000 rpm με χαμηλό φορτίο

A: στις -10° σε σχέση με το ANΣ

B: στη 1° σε σχέση με το ANΣ

C: στις 11° σε σχέση με το ANΣ

D: στις 23° σε σχέση με το ANΣ

E: στις 31° σε σχέση με το ANΣ

Η διάρκεια της καύσης αποτελεί ένα από τα στοιχεία για την διερεύνηση του επόμενου κομματιού της εργασίας που αφορά το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται. Όπως γνωστοποιήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η καμπύλη αυτή προσδιορίζεται μέσα από τα πειραματικά δεδομένα και τις μαθηματικές σχέσεις για τον υπολογισμό των συντελεστών. Επειδή, έχουμε σταθερές συνθήκες (γεγονός για το οποίο ήδη έχει γίνει λόγος), αρκεί να υπολογίσουμε τους συντελεστές με βάση έναν τυχαίο κύκλο σε συγκεκριμένες συνθήκες. Για τον υπολογισμό των συντελεστών λύνουμε ένα σύστημα εξισώσεων, στηριζόμενοι στην εξίσωση Wiebe και την εξίσωση έκλυσης θερμότητας.

Οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν, είτε με το πρόγραμμα Microsoft Excel είτε με τη χρήση ενός βοηθητικού προγράμματος στο LabView και το Excel. Έτσι λοιπόν, αναλογικά με τα δεδομένα της πίεσης του όγκου και της γωνίας που εξάγαμε από το

πρόγραμμα, υπολογίζουμε την έκλυση θερμότητας σε σχέση με τη γωνία (18) και ακολουθώντας τη μεθοδολογία των υπολογισμών [(23), (24), (25)] που υπόκεινται στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας, μπορούμε να εξάγουμε σαν αποτέλεσμα το κλάσμα της μάζας καυσίμου που καίγεται (17).

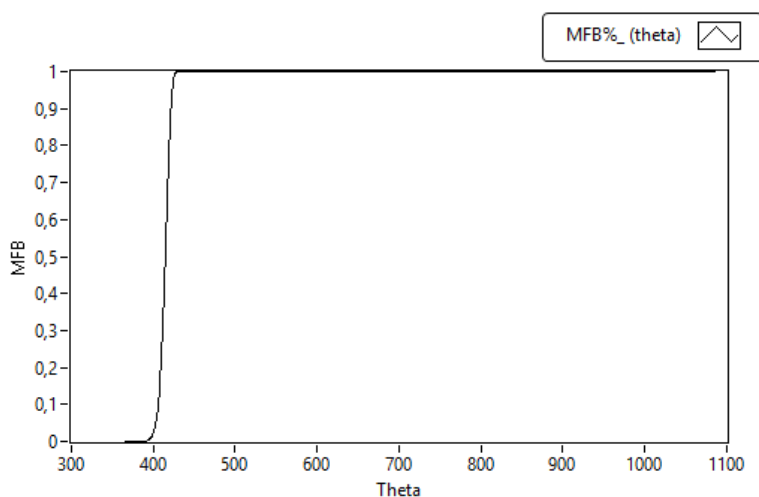
Από τους υπολογισμούς που έγιναν, η συνολική διάρκεια καύσης σε γωνία του στροφαλοφόρου άξονα είναι 60° . Συγκριτικά με το αποτέλεσμα από την καταμέτρηση των φωτογραφιών και τον υπολογισμό της διάρκειας, ανακύπτει μια διαφορά στις τιμές. Αυτό προέκυψε από την αδυναμία καταγραφής της όλης διάρκειας, λόγω μικρής έντασης φωτεινότητας της φλόγας, όταν αυτή εξασθενεί.

Συγκεντρωτικά, τα παραπάνω δεδομένα μας οδηγούν στον προσδιορισμό των συντελεστών a και m της εξίσωσης Wiebe. Η επίλυση έγινε για τα σημεία κοντά στο 50%. Τα αποτελέσματα απαντώνται στον πίνακα 6.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα συντελεστών και CA50%

$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
60°	46.051	8,2	$395,61^\circ$	$396,22^\circ$

Οι συντελεστές αυτοί είναι σταθεροί για τις συνθήκες του πίνακα 4 και δεδομένων αυτών μπορούμε να βρούμε το διάγραμμα της Wiebe που παρουσιάζεται παρακάτω. Το διάγραμμα του σχήματος 29 μας δείχνει το κλάσμα μάζας που καίγεται συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα.



Σχήμα 29: Απεικόνιση του διαγράμματος MFB της συνάρτησης Wiebe

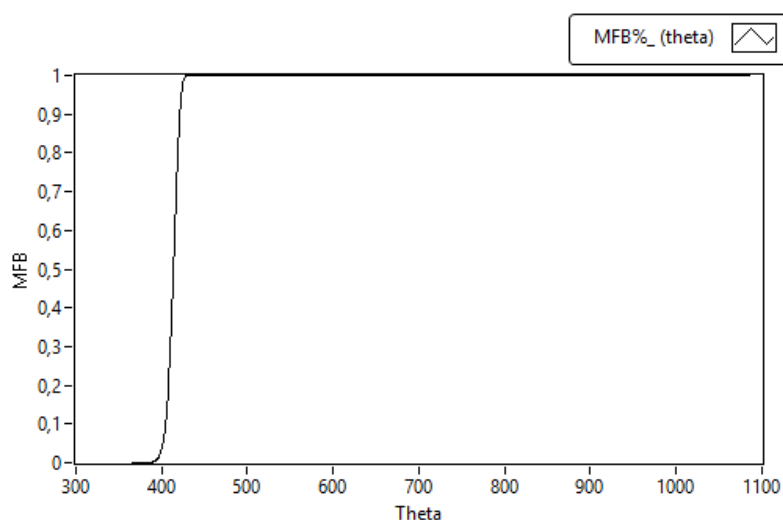
Εξετάζοντας τα στοιχεία του πίνακα βλέπουμε πως η εξίσωση Wiebe μπορεί να προσδιορίσει με αρκετά καλή ακρίβεια το κλάσμα μάζας του καυσίμου που

καίγεται. Το αποτέλεσμα αυτό είναι από τον τελευταίο θερμοδυναμικό κύκλο που καταγράφεται και στη συνέχεια θα συγκριθεί με τα αποτελέσματα του μέσου κύκλου. Με την έννοια "μέσος κύκλος" αναφερόμαστε σε ένα κύκλο που έχει το μέσο όρο πίεσης από όλους τους καταγεγραμμένους κύκλους για όλα τα σημεία. Στον πίνακα 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την μέση τιμή.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα συντελεστών και CA50% για το μέσο κύκλο

$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
60°	46.051	8,2	394,81°	394,92°

Προσέχουμε ότι οι τιμές αυτές είναι αρκετά κοντά και μεταξύ τους, κάτι που επαληθεύει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εξίσωση Wiebe, οπότε το πρόγραμμα μας δίνει μία ορθή εικόνα της διεργασίας της καύσης. Χαρακτηριστικά, παρουσιάζουμε και το αντίστοιχο διάγραμμα της καμπύλης Wiebe στο σχήμα 30 για το μέσο κύκλο.



Σχήμα 30: Απεικόνιση του διαγράμματος MFB της συνάρτησης Wiebe για το μέσο κύκλο

Διαπιστώνουμε και οπτικά ότι τα δύο διαγράμματα (σχήμα 29, 30) ταυτίζονται μεταξύ τους και ως προς τη μορφή, δίνοντάς μας την ίδια, σχεδόν, καμπύλη.

3.2 Αποτελέσματα για 1.000 rpm με πίεση εισαγωγής -90mbar

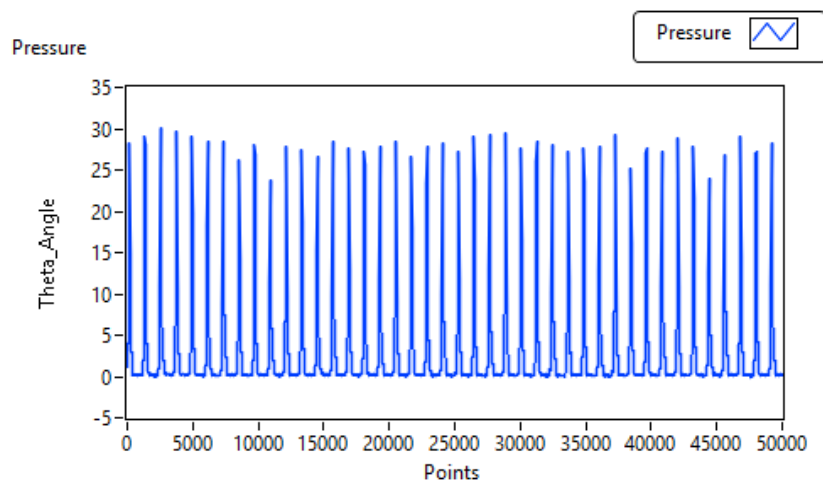
Για το δεύτερο πείραμα κρατήθηκαν σταθερές οι στροφές του κινητήρα, αλλά το άνοιγμα στην εισαγωγή μεγάλωσε. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ποσότητα αέρα μέσα στον κύλινδρο, οπότε είναι αναγκαίο να ρυθμιστεί η μονάδα

διαχείρισης χρονισμού για τις νέες συνθήκες λειτουργίας. Χαρακτηριστικά και προς επίρρωση των παραπάνω, στον πίνακα 8 δίνονται οι ρυθμίσεις του εγκεφάλου.

Πίνακας 8: Οι ρυθμίσεις της ETU για 1.000 rpm και μεγάλο φορτίο

RPM	P intake [mbar]	SA [°]	SOI_1 [°]	DOI_1 [ms]
1000	-90	-10	-280	2,85

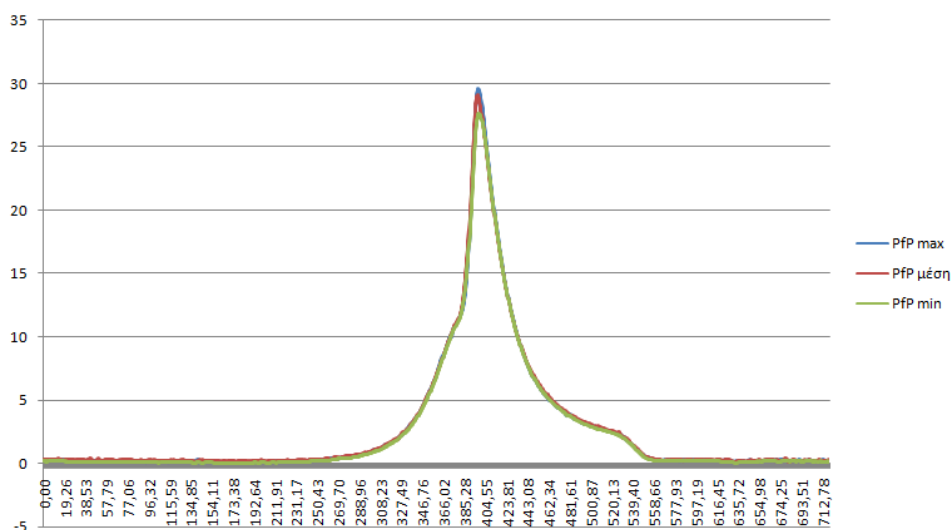
Οι ρυθμίσεις αυτές έγιναν, ώστε να έχουμε την τιμή του λ κοντά στο ένα, δηλαδή κοντά στην στοιχειομετρία. Βάσει του ανωτέρω πίνακα 8, έχουμε προπορεία έναυσης του σπινθηριστή στις -10 μοίρες, σχετικά με το άνω νεκρό σημείο, καθώς και αρχή της έγχυσης στις -280 μοίρες με διάρκεια 2,85 ms. Σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση, υπάρχει περισσότερος χρόνος ψεκασμού, άρα και περισσότερο καύσιμο, που σημαίνει ότι η πίεση που θα αναπτυχθεί εντός του κυλίνδρου θα είναι και μεγαλύτερη, όπως βλέπουμε και στο παρακάτω διάγραμμα της πίεσης του συνόλου των κύκλων στο σχήμα 31. Χαρακτηριστικό αποτελεί και εδώ το φαινόμενο των κυκλικών μεταβολών, αφού δεν έχουμε σταθερότητα στη μέγιστη πίεση. Μέσα από το σχήμα 31 μπορούμε να υπολογίσουμε και τον αριθμό των θερμοδυναμικών κύκλων που σημειώσαμε κατά την διάρκεια του πειράματος. Μετρώντας τις κορυφές βλέπουμε ότι για τα λίγα δευτερόλεπτα καταγραφής έχουμε 39 κύκλους.



Σχήμα 31: Απεικόνιση όλων των κύκλων για 1.000 rpm με μεγάλο φορτίο

Από το διάγραμμα μπορούμε να δούμε ότι η πίεση έχει αυξηθεί αρκετά, με τη μέση τιμή μέγιστης πίεσης να ανέρχεται στα 25,1 bar, ενώ η μέγιστη πίεση που καταγράφηκε καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος είναι 27,7 bar. Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, έχουμε τον υπολογισμό της γωνίας και την αντιστοίχισή

της με τις τιμές της πίεσης, δίνοντάς μας το διάγραμμα της πίεσης συναρτήσει με τη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 32.



Σχήμα 32: Οι κύκλοι για 1000 rpm με μεγάλο φορτίο συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου για την μέγιστη, μέση και ελάχιστη τιμή της PfP

Με βάση την αντιστοίχιση της πίεσης με τη γωνία γίνεται φανερό ότι εδώ η γωνία μέγιστης πίεσης είναι κατά μέσο όρο περίπου στις 379,2 μοίρες ή 19,2 μοίρες μετά το ΑΝΣ. Η μετατόπιση αυτή οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Αναλογικά λοιπόν, περιμένουμε αλλαγές σε όλα τα μεγέθη, οπότε μέσα από το ίχνος της πίεσης εξετάζουμε τη μέγιστη πίεση συμπίεσης, η οποία για τις υπό εξέταση συνθήκες λειτουργίας είναι 2,4 bar και με γωνία εμφάνισης στις 327,12 μοίρες, κατά μέσο όρο.

Η συνέχεια των υπολογισμών επικεντρώνεται στο επόμενο μέγεθος, την ΙΜΕΡ. Τόσο μέσα από το πρόγραμμα διαχείρισης του δυναμομέτρου, όσο και μέσα από το πρόγραμμα και τους υπολογισμούς, εξάγουμε τα αποτελέσματα του πίνακα 9.

Πίνακας 9: Τα αποτελέσματα για 1.000 rpm με μεγάλο φορτίο

IMEP _{LABVIEW}	IMEP _{DYN}	BMEP _{DYN}	FMEP _{DYN}	IMEP _(μέση)
7,32bar	6,1bar	3,4bar	-2.7 bar	7,42bar

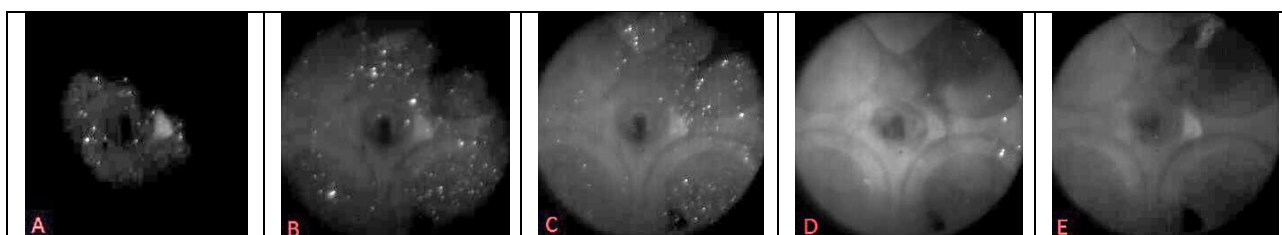
Παρατηρούμε ότι το πρόγραμμα παρουσιάζει μια αντιπροσωπευτική τιμή πολύ κοντά στην υπολογισμένη του μέσου κύκλου. Η ΙΜΕΡ όμως, που υπολογίζεται

μέσα από το πρόγραμμα διαχείρισης του δυναμομέτρου, είναι μικρότερη και ο λόγος είναι η ανάγκη για επαναβαθμονόμηση του δυναμομέτρου.

Η σταθερότητα της λειτουργίας του κινητήρα χαρακτηρίζεται από το στατιστικό μέγεθος COV_{IMEP} . Με βάση λοιπόν τα προαναφερθέντα, έχουμε $COV_{IMEP}=1,21\%$.

Σε αυτή την περίπτωση βλέπουμε ότι έχουμε μικρότερο αποτέλεσμα, που σημαίνει ότι ο κινητήρας λειτουργεί με λιγότερες κυκλικές μεταβολές σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος στις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, εκτός από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, έχουμε και την οπτικοποίηση της φλόγας μέσα από την καταγραφή φωτογραφιών της καύσης. Μια τέτοια καταγραφή παρουσιάζεται στο σχήμα 33. Ο λόγος που την κάναμε, όπως και πριν, είναι αποσκοπώντας στον προσδιορισμό της συνολικής γωνίας που διαγράφει ο στροφαλοφόρος άξονας όσο διαρκεί η καύση. Επειδή οι στροφές παραμένουν σταθερές, έτσι και ο ρυθμός αποτύπωσης των φωτογραφιών παραμένει σταθερός και ίσος με 0.4 μοίρες ανά φωτογραφία.



Σχήμα 33: Φωτογραφίες της καύσης για 1000 rpm σε μεγάλο φορτίο

A: στις -8° σε σχέση με το ANΣ

B: στις 1.8° σε σχέση με το ANΣ

C: στις 10° σε σχέση με το ANΣ

D: στις 18° σε σχέση με το ANΣ

E: στις 26° σε σχέση με το ANΣ

Μετά την οπτική καταμέτρηση των 112 φωτογραφιών μπορούμε να προσδιορίσουμε τη συνολική γωνία του στροφαλοφόρου άξονα, που διαρκεί η καύση, που ισούται με 44,8 μοίρες. Το αποτέλεσμα είναι εντός φυσιολογικών ορίων, διότι έχουμε σταθερές στροφές, οπότε και η γωνία είναι σχεδόν ίδια. Οι φωτογραφίες του σχήματος 34 έχουν διαφορά μεταξύ τους περίπου 8 μοίρες.

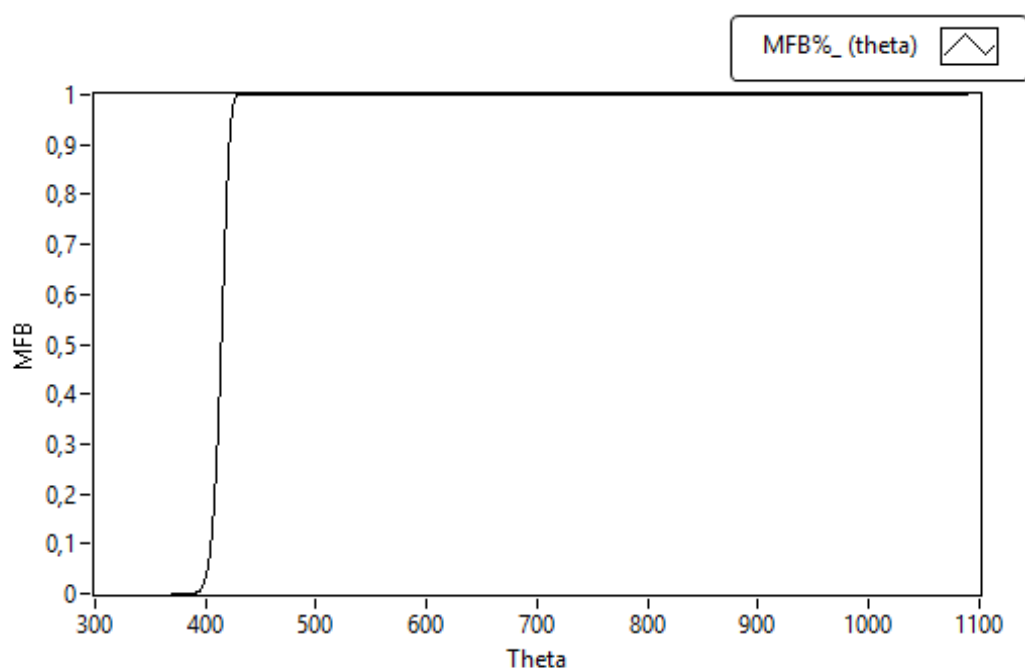
Από τη μεθοδολογία που αναφέραμε στην ενότητα 2.1, προκύπτει ο πίνακας 10. Στην πρώτη στήλη έχουμε τη διάρκεια της κάυσης, στη δεύτερη στήλη το συντελεστή a της εξίσωσης Wiebe και στην τρίτη στήλη το συντελεστή m . Στις δύο τελευταίες στήλες βρίσκουμε τις γωνίες για το 50% του κλάσματος της μάζας του καυσίμου που καίγεται, με τον αντίστοιχο τρόπο υπολογισμού.

Πίνακας 10:Αποτελέσματα συντελεστών και CA50%

$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
55°	4,6051	7,4	$396,81^\circ$	$396,72^\circ$

Από τους υπολογισμούς που φέραμε εις πέρας, η συνολική διάρκεια καύσης σε γωνία του στροφαλοφόρου άξονα είναι 55 μοίρες. Σε σχέση με το αποτέλεσμα της καταμέτρησης των φωτογραφιών και τον υπολογισμό της διάρκειας, βλέπουμε μία διαφορά στις τιμές. Αυτό οφείλεται στην αδυναμία καταγραφής όλης της διάρκειας, λόγω μικρής έντασης φωτεινότητας της φλόγας, όταν αυτή εξασθενεί.

Οι συντελεστές παραμένουν σταθεροί για τις συνθήκες του πίνακα 8 και βάσει των συντελεστών αυτών, μπορούμε να βρούμε το διάγραμμα του κλάσματος μάζας καυσίμου που παρουσιάζεται στο σχήμα 34. Το διάγραμμα αυτό μας δείχνει το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα.



Σχήμα 34: Απεικόνιση του διαγράμματος MFB της συνάρτησης Wiebe

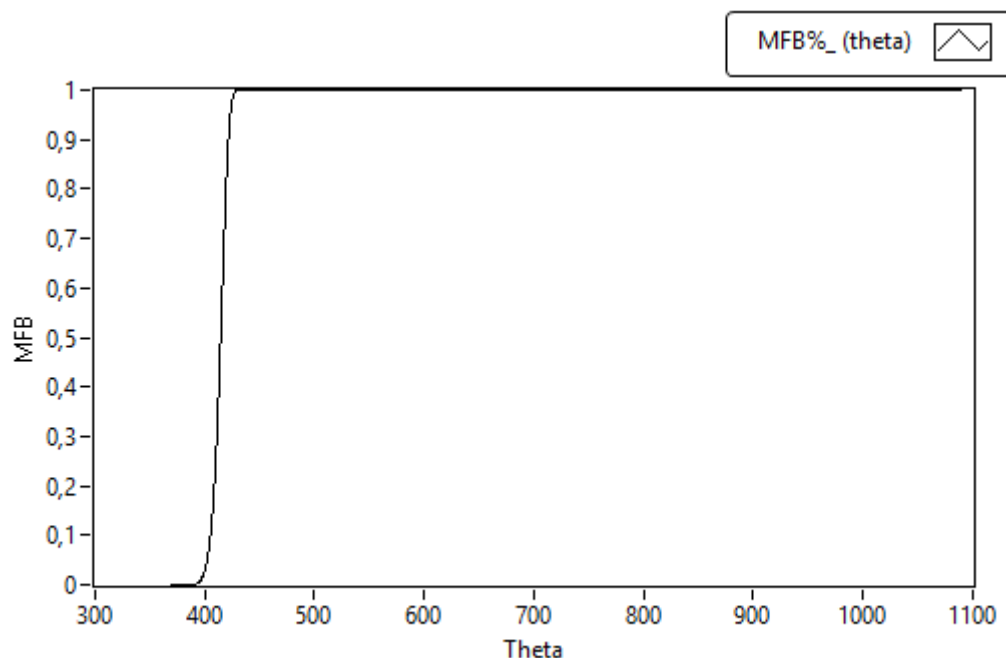
Αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι οι γωνίες είναι σε πολύ κοντινές τιμές μεταξύ της Wiebe και της ανεπτυγμένης εξίσωσης της έκλυσης θερμότητας και το σφάλμα είναι λιγότερο από 1 μοίρα.

Απαραίτητη για την επαλήθευση και την ορθότητα των αποτελεσμάτων είναι η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων για το μέσο κύκλο. Στον πίνακα 11 δίνονται τα αποτελέσματα για το μέσο κύκλο λειτουργίας.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα συντελεστών και CA50% για την μέση τιμή

$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
55°	46.051	7,2	396,81°	397°

Συγκρίνοντας τους πίνακες 10 και 11, παρατηρούμε ότι οι τιμές των αποτελεσμάτων είναι κοντά μεταξύ τους και η απόκλισή τους είναι σε αποδεκτά επίπεδα. Κατ'αυτόν τον τρόπο επαληθεύεται ότι το αποτέλεσμα του προγράμματος είναι αντιπροσωπευτικό. Χαρακτηριστικά, παρουσιάζουμε και το αντίστοιχο διάγραμμα του κλάσματος μάζας καυσίμου που καίγεται, βάσει της καμπύλης Wiebe στο σχήμα 35, για το μέσο κύκλο λειτουργίας.



Σχήμα 35: Απεικόνιση του διαγράμματος MFB της συνάρτησης Wiebe για το μέσο κύκλο

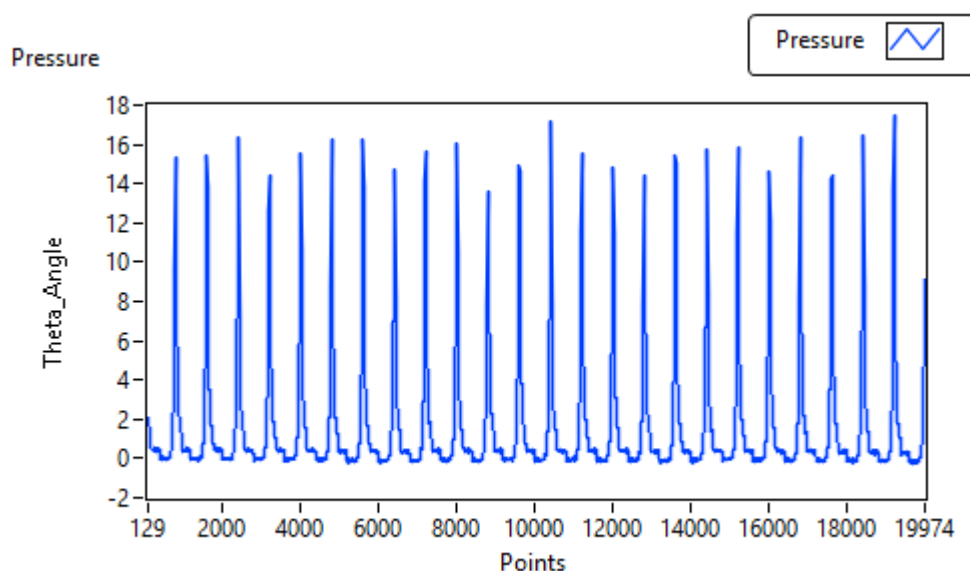
3.3 Αποτελέσματα για 1.500 rpm με πίεση εισαγωγής -400 mbar

Στο επόμενο σημείο λειτουργίας αυξήθηκαν οι στροφές λειτουργίας και η πίεση εισαγωγής ορίστηκε στα -400 mbar. Επιπρόσθετα, έγιναν οι κατάλληλες αλλαγές στη μονάδα χρονισμού του κινητήρα, ώστε να επιτευχθεί η στοιχειομετρία στην καύση. Ο χρόνος ψεκασμού καθώς και η προπορεία έναυσης άλλαξαν, όπως βλέπουμε αναλυτικά στον πίνακα 12.

Πίνακας 12: Οι ρυθμίσεις της ETU για 1.500 rpm με χαμηλό φορτίο

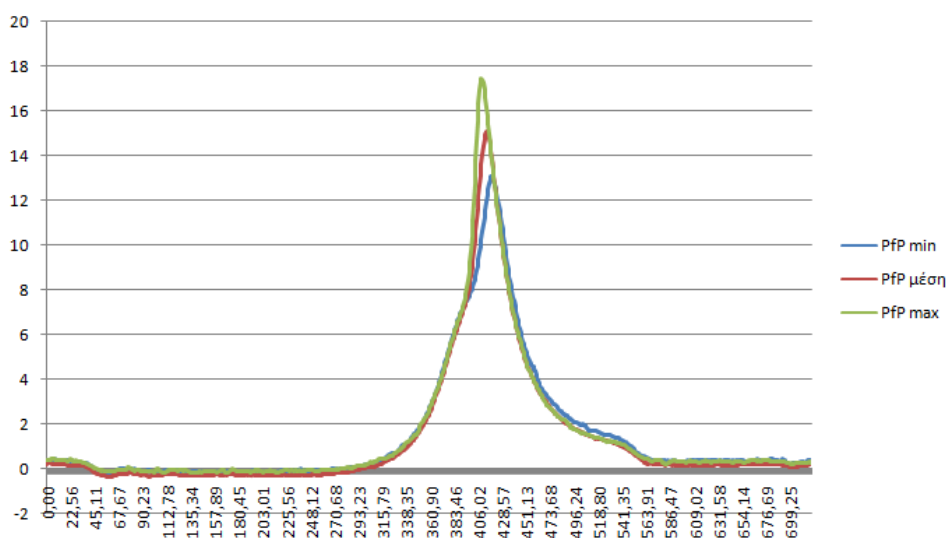
RPM	P intake [mbar]	SA [°]	SOI_1 [°]	DOI_1 [ms]
1500	-400	-14	-280	1,45

Ιδιαίτερως προσέχουμε ότι, σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση η προπορεία έναυσης έγινε στις -14 μοίρες συγκριτικά με το ANΣ και ο χρόνος ψεκασμού μειώθηκε, γιατί έχουμε λιγότερο αέρα εντός του κυλίνδρου. Στο ακόλουθο διάγραμμα του σχήματος 36 βλέπουμε το συνολικό διάγραμμα με τις πιέσεις, όπως αυτές καταγράφησαν από το πρόγραμμα. Με βάση το σχήμα 36, διαπιστώνουμε ότι έχουμε 62 κύκλους λειτουργίας προς εξέταση.



Σχήμα 36: Απεικόνιση όλων των κύκλων για 1.500 rpm με χαμηλό φορτίο

Η πίεση συναρτήσεως της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα δίνεται στο σχήμα 37. Από τις μετρήσεις που έγιναν για την πίεση, βλέπουμε ότι το εύρος της μέγιστης πίεσης κυμαίνεται από τα 12,5 έως τα 17,6 bar. Η μέση τιμή μέγιστης πίεσης στον κύλινδρο είναι στα 15,4 bar περίπου και η μέση γωνία που εμφανίζεται είναι στις 378 μοίρες περίπου ή στις 18 μοίρες μετά το ΑΝΣ.



Σχήμα 37: Οι κύκλοι για 1.500 rpm με χαμηλό φορτίο συναρτήσεως της γωνίας του στροφαλοφόρου για την μέγιστη, μέση και ελάχιστη τιμή της PfP

Είναι χρήσιμο να σχολιαστεί ότι η μέγιστη πίεση στο χαμηλό φορτίο είναι μεγαλύτερη από την περίπτωση των 1.000 rpm με χαμηλό φορτίο. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση των στροφών του κινητήρα έχει ως επακόλουθο τη μεγαλύτερη αναρρόφηση αέρα στον κύλινδρο κατά το χρόνο της εισαγωγής. Με την ίδια διαδικασία προσδιορίζουμε τη μέση συμπίεση που είναι στα 1.6 bar και με γωνία εμφάνισης τις 312,6 μοίρες.

Στη συνέχεια, παραθέτουμε τα αποτελέσματα της IMEP, όπως φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 10. Στην πρώτη στήλη ($IMEP_{LABVIEW}$) του πίνακα 13 έχουμε την τιμή της IMEP από το πρόγραμμα την ώρα της καταγραφής και είναι για τον τελευταίο θερμοδυναμικό κύκλο. Στην επόμενη στήλη ($IMEP_{DYN}$) είναι η υπολογισμένη τιμή της IMEP (9) από τα δεδομένα $BMEP_{DYN}$ και $FMEP_{DYN}$ τα οποία αντλούμε από το σύστημα διαχείρισης του δυναμομέτρου. Τα δύο αυτά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5, σε ξεχωριστές στήλες. Στην τελευταία στήλη του πίνακα 13 έχουμε τη μέση τιμή της IMEP, από όλους τους θερμοδυναμικούς κύκλους που εξετάζουμε.

Πίνακας 13: Τα αποτελέσματα για 1.500 rpm με χαμηλό φορτίο

IMEP _{LABVIEW}	IMEP _{DYN}	BMEP _{DYN}	FMEP _{DYN}	IMEP _(μέση)
4,512bar	3,7 bar	0,8 bar	-2.9 bar	4,961bar

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από τον πίνακα 13 παρατηρούμε ότι έχουμε διαφορές στις τιμές της IMEP. Αυτό οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται η IMEP σε κάθε περίπτωση. Η τιμή που μας παρουσιάζει το πρόγραμμα στην πρώτη στήλη είναι αρκετά κοντά στην τιμή της υπολογισμένης μέσης τιμής της τελευταίας στήλης, και ο υπολογισμός τους βασίζεται στο ίχνος πίεσης και στον όγκο. Εξετάζοντας ταυτόχρονα την IMEP_{LABVIEW} και την IMEP_(μέση) με την τιμή, όπως αυτή υπολογίζεται από το πρόγραμμα διαχείρισης του δυναμομέτρου, παρατηρούμε μία διαφορά, η οποία οφείλεται στην ανάγκη βαθμονόμησης του δυναμομέτρου.

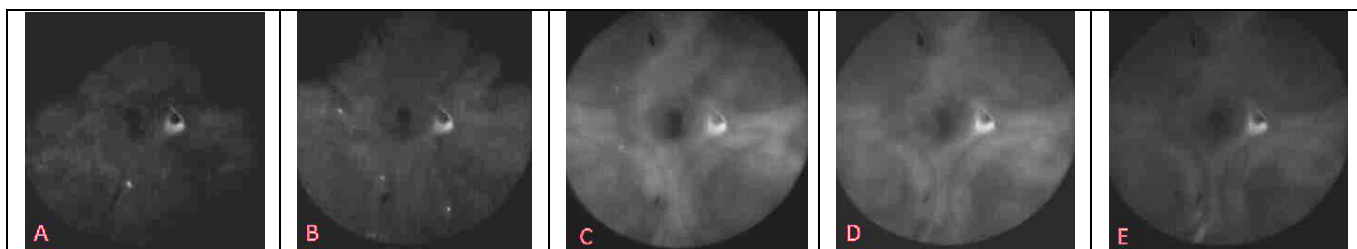
Χαρακτηριστικό μέγεθος για τη σταθερότητα της λειτουργίας του κινητήρα είναι το COV_{IMEP} (13) που εν προκειμένω είναι **COV_{IMEP}=1,03 %**.

Στο σχήμα 38, έπονται ενδεικτικές φωτογραφίες από έναν κύκλο καύσης στις 1.500 rpm με χαμηλό φορτίο. Θα πρέπει να υπολογιστεί εκ νέου ο λόγος της μεταβολής της γωνίας σε μοίρες ανά εικόνα. Όπως είδαμε και παραπάνω, η συχνότητα καταγραφής εξαρτάται από τις στροφές του κινητήρα. Άρα είναι διαφορετική από τις προηγούμενες, διότι η κάμερα καταγράφει μόνιμα 15.000 frames/sec, ενώ ο κινητήρας λειτουργεί με 1.500 rpm αντί για 1.000 rpm. Συνεχίζοντας, αναλύεται πώς υπολογίστηκε ότι κάθε φωτογραφία καταγράφεται ανά 0.6 μοίρες.

$$1500rpm = 1500 \left[\frac{revolution}{min} \right] \frac{360}{60} \left[\frac{degree}{revolution} \right] \left[\frac{min}{sec} \right] = 9000 \left[\frac{degree}{sec} \right]$$

$$9000 \left[\frac{degree}{sec} \right] \frac{1}{15000} \left[\frac{sec}{photo} \right] = 0.6 \left[\frac{degree}{photo} \right]$$

Από την αποτύπωση του αριθμού των εικόνων που απεικονίζουν την καύση και τη συχνότητα της καταγραφής που υπολογίσαμε, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη διάρκεια της καύσης σε μοίρες.



Σχήμα 38: Φωτογραφίες της καύσης για 1500 rpm με χαμηλό φορτίο

A: στις -10° σε σχέση με το ANΣ

B: στις -1° σε σχέση με το ANΣ

C: στις 8° σε σχέση με το ANΣ

D: στις 17° σε σχέση με το ANΣ

E: στις 26° σε σχέση με το ANΣ

Στο σχήμα 38 οι εικόνες που παρουσιάζονται είναι από την αρχή της καύσης, όπου η γωνία είναι -10° σε σχέση με το άνω νεκρό σημείο και η διαφορά μεταξύ τους είναι περίπου 9 μοίρες. Από την καταμέτρηση των φωτογραφιών βλέπουμε ότι κατά μέσο όρο, έχουμε 75 φωτογραφίες για την καύση. Αυτός ο αριθμός φωτογραφιών μας δίνει μια διάρκεια καύσης 45 μοιρών.

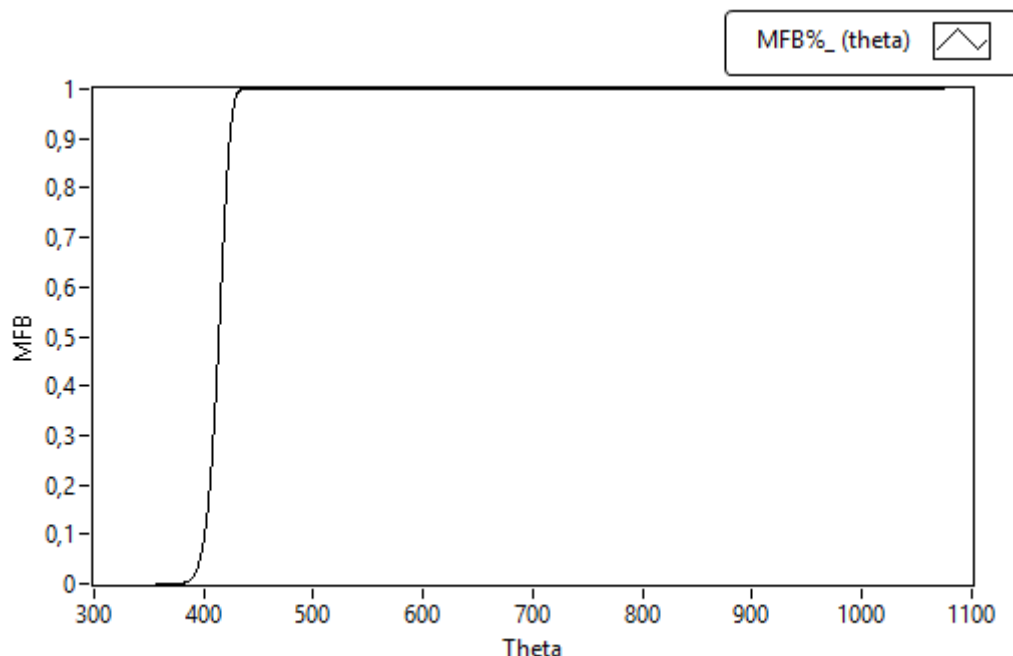
Στη συνέχεια, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, προσδιορίζουμε το ρυθμό έκλυσης θερμότητας (18), την συνολική θερμότητα που παράγεται από την καύση [(23), (24)], καθώς και την αθροιστική έκλυση θερμότητας (25), με σκοπό τον υπολογισμό του κλάσματος μάζας καυσίμου που καίγεται (17). Από τα αποτελέσματα του υπολογισμένου κλάσματος μάζας καυσίμου που καίγεται, προκύπτουν οι συντελεστές a και m της εξίσωσης Wiebe (16). Η επίλυση έγινε για τα σημεία κοντά στο 50% και έτσι αισίως αποτυπώνεται το αποτέλεσμα στον πίνακα 14.

Πίνακας 14: Αποτελέσματα συντελεστών και CA50%

$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
74°	4,6051	6,6	$408,1^\circ$	$408,36^\circ$

Ζωτικής σημασίας παρατήρηση είναι η εξής: με βάση τον υπολογισμό που πραγματοποιήσαμε, η συνολική διάρκεια καύσης σε γωνία του στροφαλοφόρου

άξονα είναι 74 μοίρες. Σε σχέση με το αποτέλεσμα της καταμέτρησης των φωτογραφιών και του υπολογισμού της διάρκειας, αντιλαμβάνεται κανείς διαφορά στις τιμές. Αυτό έγκειται στην αδυναμία καταγραφής όλης της διάρκειας, εξαιτίας της μικρής έντασης φωτεινότητας της φλόγας, όταν αυτή εξασθενεί.



Σχήμα 39: Απεικόνιση του διαγράμματος MFB της συνάρτησης Wiebe

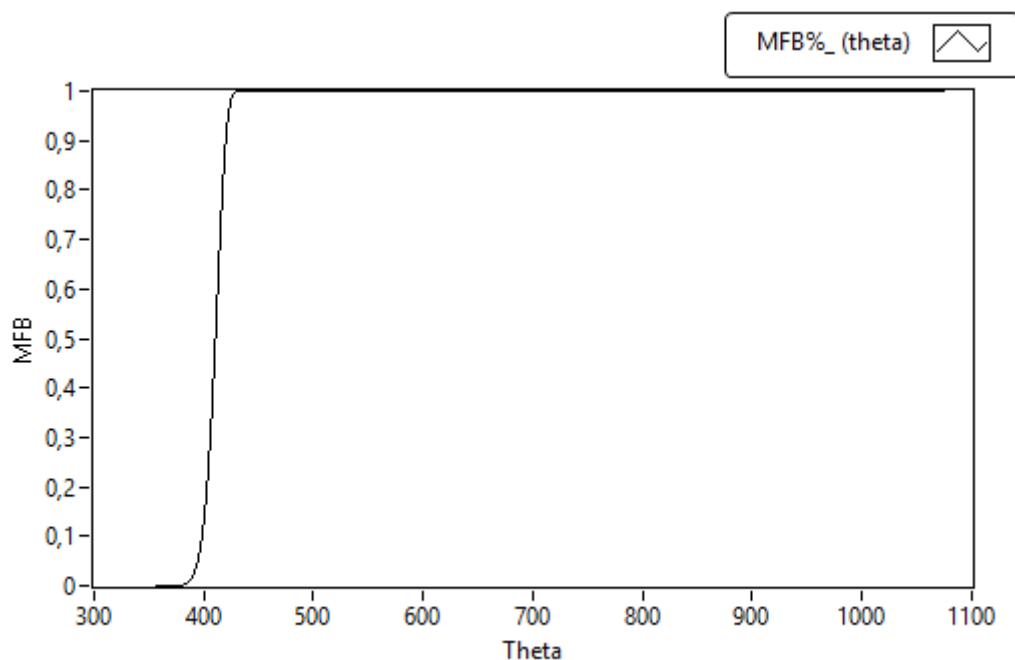
Ο συντελεστής μορφής m , καθώς και ο συντελεστής a παραμένουν σταθεροί για τις συνθήκες λειτουργίας των 1.500 rpm, προσεγγίζοντας με αρκετά καλό βαθμό ακρίβειας το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται. Η διαφορά τους στην γωνία CA50% (Wiebe) και CA50% (HR) είναι περίπου στις 0,2 μοίρες. Αναλογικά προς τα παραπάνω, παρουσιάζουμε την καμπύλη αναπαράστασης του κλάσματος μάζας που καίγεται συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα στο σχήμα 39.

Στη συνέχεια συγκρίνουμε τον θερμοδυναμικό κύκλο που εξετάσαμε με τη μέση τιμή των καταγεγραμμένων κύκλων. Αποβλέπουμε να αποδείξουμε ότι τα αποτελέσματα του προγράμματος είναι αντιπροσωπευτικά για όλους τους κύκλους που σημειώσαμε. Στον πίνακα 15 φαίνονται τα αποτελέσματα για το μέσο κύκλο.

Πίνακας 15: Αποτελέσματα συντελεστών και CA50% για την μέση τιμή

$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
73°	46.051	6,6	408,1°	407,6°

Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων διεκπεραιώνεται μέσα από τη σύγκριση των τιμών της γωνίας (CA50%). Η διαφορά της γωνίας αφορά περίπου 0,5 μοίρες. Για τη συμπλήρωση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα του MFB που ακολουθεί στο σχήμα 40.



Σχήμα 40: Απεικόνιση του διαγράμματος MFB της συνάρτησης Wiebe για την μέση τιμή

3.4 Αποτελέσματα για 1500 rpm με πίεση εισαγωγής -100 mbar

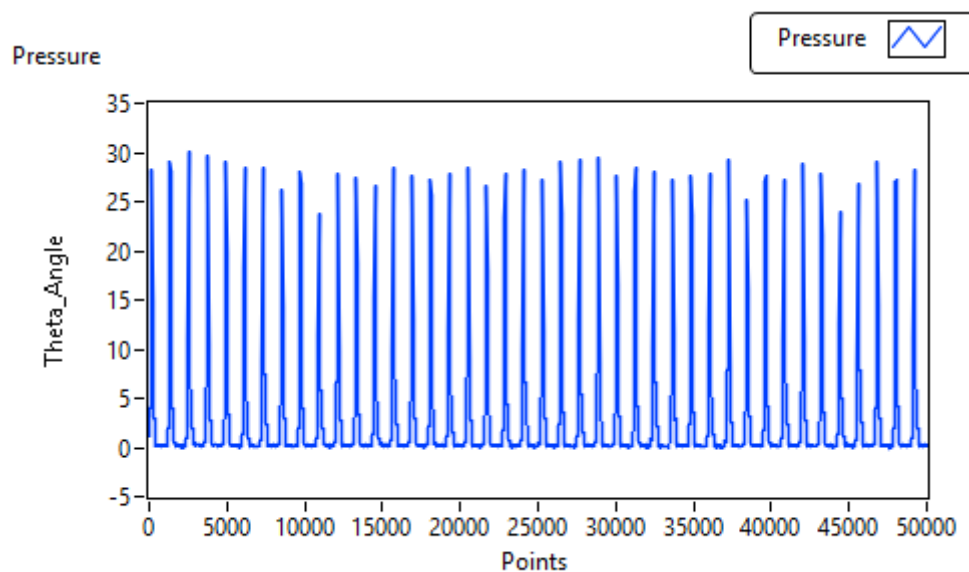
Σε αντιστοιχία με την πρώτη περίπτωση στροφών λειτουργίας, όμοια και εδώ θα εξετάσουμε την περίπτωση με μεγαλύτερο φορτίο, δηλαδή με αύξηση της πίεσης εισαγωγής στις ίδιες με προηγούμενως, στροφές λειτουργίας. Είναι αναγκαίο να γίνουν οι απαραίτητες αλλαγές, ώστε να πετύχουμε την στοιχειομετρία στην καύση. Στηριζόμενοι λοιπόν στον πίνακα 16 βλέπουμε τις ρυθμίσεις που έγιναν στη μονάδα διαχείρισης της μηχανής.

Πίνακας 16: Οι ρυθμίσεις της ETU για 1.500 rpm με μεγάλο φορτίο

RPM	P intake [mbar]	SA [°]	SOI_1 [°]	DOI_1 [ms]
1.500	-100	-14	-280	2,6

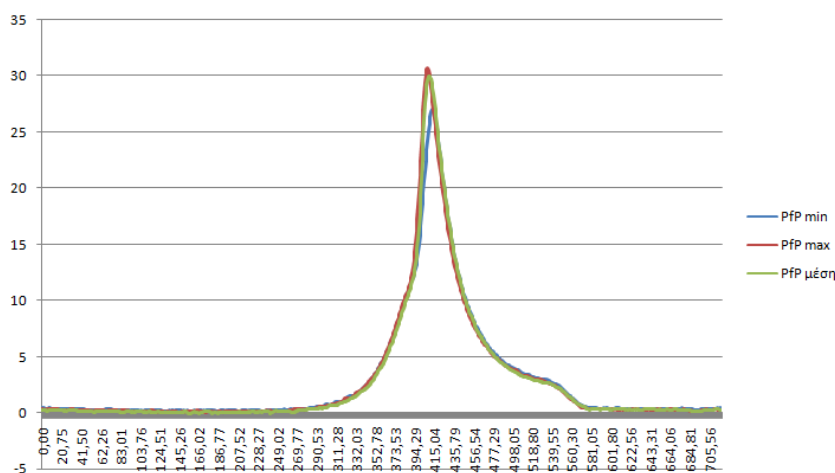
Όπως και στην πιο πάνω περίπτωση της αύξησης του φορτίου, βρίσκουμε την αύξηση του χρόνου ψεκασμού στα 2,60 ms. Αυτό είναι φυσιολογικό, γιατί έχουμε αύξηση της παροχής του αέρα, που σημαίνει ότι πρέπει να μεγαλώσουμε την παροχή του καυσίμου. Η γωνία για την οποία έχουμε την έγχυση του καυσίμου, παρόλα αυτά, παραμένει σταθερή όπως επίσης και η γωνία έναυσης του σπινθηριστή.

Σύμφωνα λοιπόν με τα αρχικά δεδομένα, δημιουργείται το διάγραμμα του σχήματος 41, της πίεσης συναρτήσει των σημείων δειγματοληψίας, όπως το λαμβάνουμε από την πειραματική διάταξη μέσω του αισθητήρα πίεσης.



Σχήμα 41: Απεικόνιση όλων των κύκλων για 1.500 rpm με μεγάλο φορτίο

Από το διάγραμμα μπορούμε να οδηγηθούμε σε μία πρώτη εκτίμηση της πίεσης, καθώς και του αριθμού των κύκλων. Επιπλέον, με βάση τις κορυφές της μέγιστης πίεσης έχουμε 37 κύκλους λειτουργίας.



Σχήμα 42: Οι κύκλοι για 1500 rpm με μεγάλο φορτίο συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου για την μέγιστη, μέση και ελάχιστη τιμή της PFP

Αντιστοιχίζοντας την πίεση με την γωνία του στροφαλοφόρου άξονα έχουμε σαν αποτέλεσμα το διάγραμμα του σχήματος 42. Μέσα από αυτό παρατηρούμε ότι η μέση μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται στις συνθήκες αυτές είναι 29,77 bar, με γωνία εμφάνισης τις 368,4°. Η μέγιστη πίεση που σημειώθηκε είναι 30,4 bar.

Μέσω της επεξεργασίας της πίεσης απομονώσαμε την πίεση συμπίεσης, καθώς και τη γωνία που εντοπίζουμε τη μέγιστη συμπίεση. Τα αποτελέσματα κατά μέσο όρο είναι για μέγιστη πίεση συμπίεσης στα 2.51 bar με γωνία εμφάνισης στις 301 περίπου μοίρες.

Η συνέχεια των υπολογισμών επικεντρώνεται στο επόμενο μέγεθος που είναι η IMEP. Τόσο από το πρόγραμμα, όσο και με τη χρήση δυναμομέτρου εξάγουμε τα αποτελέσματα του πίνακα 17.

Πίνακας 17: Τα αποτελέσματα για 1500 rpm με μεγάλο φορτίο

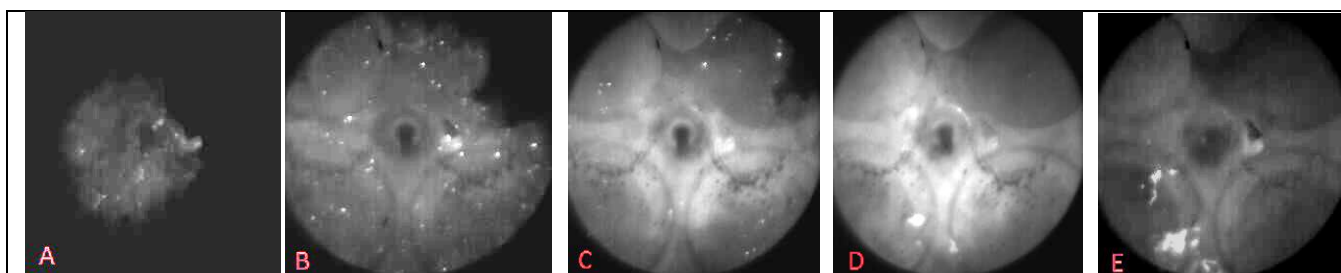
IMEP _{LABVIEW}	IMEP _{DYN}	BMEP _{DYN}	FMEP _{DYN}	IMEP _(μέση)
8.82 bar	6,3 bar	3,4 bar	-2.9 bar	9,4 bar

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από τον πίνακα 17, παρατηρούμε ότι υπάρχουν διαφορές στις τιμές της IMEP, ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού της. Η τιμή που μας δίνεται από το πρόγραμμα στην πρώτη στήλη είναι αρκετά κοντά στην τιμή της υπολογισμένης μέσης τιμής της τελευταίας στήλης, και ο υπολογισμός τους βασίζεται στο ίχνος πίεσης και στον όγκο. Συγκρίνοντας την IMEP_{LABVIEW} και την IMEP_(μέση) με την τιμή, όπως αυτή καταμετράται από το πρόγραμμα διαχείρισης του

δυναμομέτρου, προσέχουμε μία διαφορά η οποία οφείλεται στην ανάγκη βαθμονόμησης του δυναμομέτρου.

Η σταθερότητα της λειτουργίας ελέγχθηκε με τη βοήθεια του μεγέθους COV_{IMEP} (13) και εν προκειμένω έχουμε $COV_{IMEP}=0,86\%$. Η τιμή αυτή είναι αρκετά χαμηλή και μας δηλώνει πως έχουμε λιγότερες κυκλικές μεταβολές, κατά την λειτουργία σε συσχέτισμό με κάθε άλλη περίπτωση.

Η οπτικοποίηση της φλόγας φαίνεται στο σχήμα 43. Η χρησιμότητά του, όπως προαναφέρθηκε, συναντάται στον προσδιορισμό της διάρκειας της καύσης, μέσα από τον υπολογισμό της γωνίας αποτύπωσης της φωτογραφίας και του συνόλου των φωτογραφιών. Η γωνία αποτύπωσης είναι ανάλογη των στροφών λειτουργίας (γεγονός που έχει αποδειχθεί ήδη), οπότε με βάση το προηγούμενο σημείο μέτρησης, που ήταν στις ίδιες στροφές λειτουργίας, έχουμε και εδώ το αποτέλεσμα των $0,6^\circ$ ανά φωτογραφία.



Σχήμα 43: Φωτογραφίες της καύσης για 1500 rpm με μεγάλο φορτίο

A: στις -12° σε σχέση με το ANΣ

B: στις -4° σε σχέση με το ANΣ

C: στις 6° σε σχέση με το ANΣ

D: στις 16° σε σχέση με το ANΣ

E: στις 26° σε σχέση με το ANΣ

Στο σχήμα 43, η πρώτη φωτογραφία δείχνει την έναυση της φλόγας που είναι στις -12 μοίρες σε σχέση με το άνω νεκρό σημείο. Οι υπόλοιπες φωτογραφίες προβάλλουν την εξέλιξη της φλόγας ανά 10 περίπου μοίρες. Ο αριθμός των φωτογραφιών που απεικονίζουν την καύση ανέρχεται στις 80 περίπου φωτογραφίες και μας δίνει μια διάρκεια φλόγας περίπου στις 48 μοίρες. Λαμβάνοντας υπόψη την οπτική μελέτη της φλόγας, είναι σημαντικό να αναφερθούμε στις περιοχές που διακρίνονται χάρη στο έντονο φως των φωτογραφιών. Στα σημεία εκείνα συμβαίνει

καύση υπολειμμάτων, είτε λόγω της λίπανσης, είτε από άκαυστα προηγούμενων κύκλων.

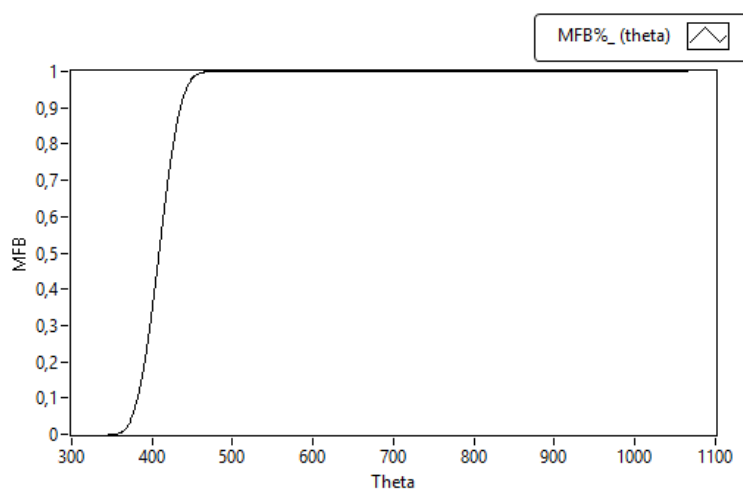
Εν συνεχεία, με βάση τη μεθοδολογία που ακολουθούμε, υπολογίζουμε μέσα από τις εξισώσεις (18), (23), (24), (25) και (17) τον δείκτη m (συντελεστής μορφής της καμπύλης) και συντελεστή a για την εξίσωση Wiebe (16). Στον πίνακα 18 παρουσιάζονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα των συντελεστών, αλλά και της γωνίας, όπου έχουμε το 50% του κλάσματος της μάζας καυσίμου που καίγεται.

Πίνακας 18: Αποτελέσματα συντελεστών και CA50%

$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
68	4,6051	6,6	404,029 ^o	404,65 ^o

Παρατηρείται ότι με δεδομένους τους υπολογισμούς που πραγματοποιήσαμε, η συνολική διάρκεια καύσης σε γωνία του στροφαλοφόρου άξονα είναι 68 μοίρες. Σχετικά με το αποτέλεσμα της καταμέτρησης των φωτογραφιών και τον υπολογισμό της διάρκειας, ανακύπτει μία διαφορά στις τιμές. Αυτό αιτιολογείται από την αδυναμία επισήμανσης όλης της διάρκειας, λόγω μικρής έντασης φωτεινότητας της φλόγας, όταν αυτή εξασθενεί.

Οι συντελεστές του πίνακα 18 είναι σταθεροί για τις συνθήκες αυτές (πίνακας 15) και με βάση αυτούς μπορούμε να βρούμε το διάγραμμα της Wiebe που έπεται. Το διάγραμμα του σχήματος 44 μας δείχνει το κλάσμα μάζας που καίγεται συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου.



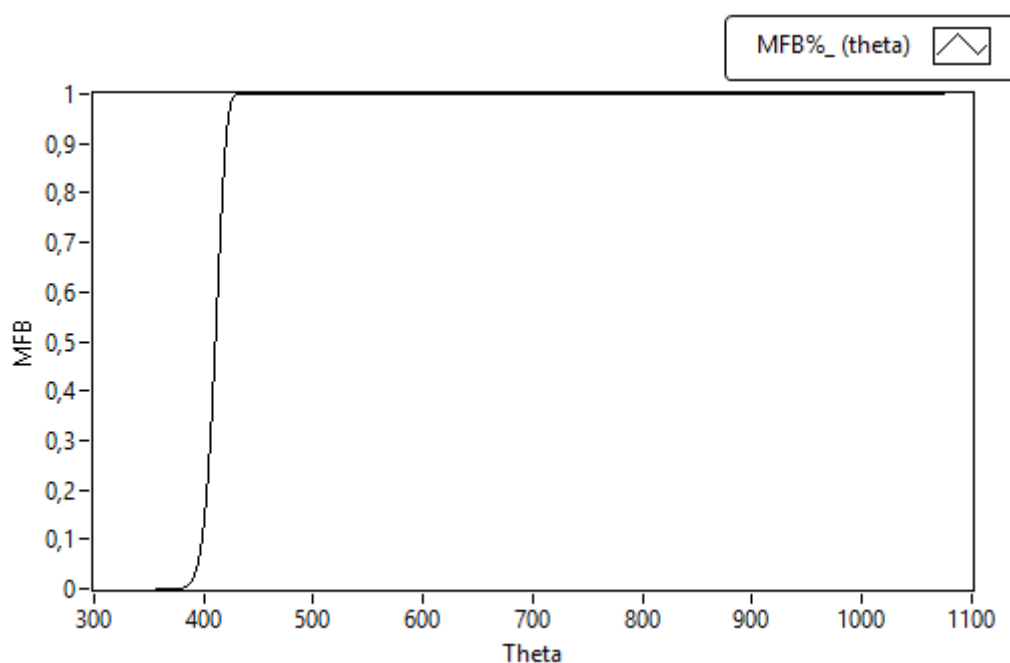
Σχήμα 44: Απεικόνιση του διαγράμματος MFB της συνάρτησης Wiebe

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με το μέσο κύκλο είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την απαιτούμενη επαλήθευση. Η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων δίνεται στον πίνακα 19.

Πίνακας 19: Αποτελέσματα συντελεστών και CA50% για τη μέση τιμή

$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
70°	46.051	6,6	405,6°	405,2°

Χαρακτηριστικά παρουσιάζουμε και το αντίστοιχο διάγραμμα της καμπύλης Wiebe στο σχήμα 45 για το μέσο κύκλο.



Σχήμα 45: Απεικόνιση του διαγράμματος MFB της συνάρτησης Wiebe για τη μέση τιμή

3.5 Αποτελέσματα για 2.000 rpm με πίεση εισαγωγής -390 mbar

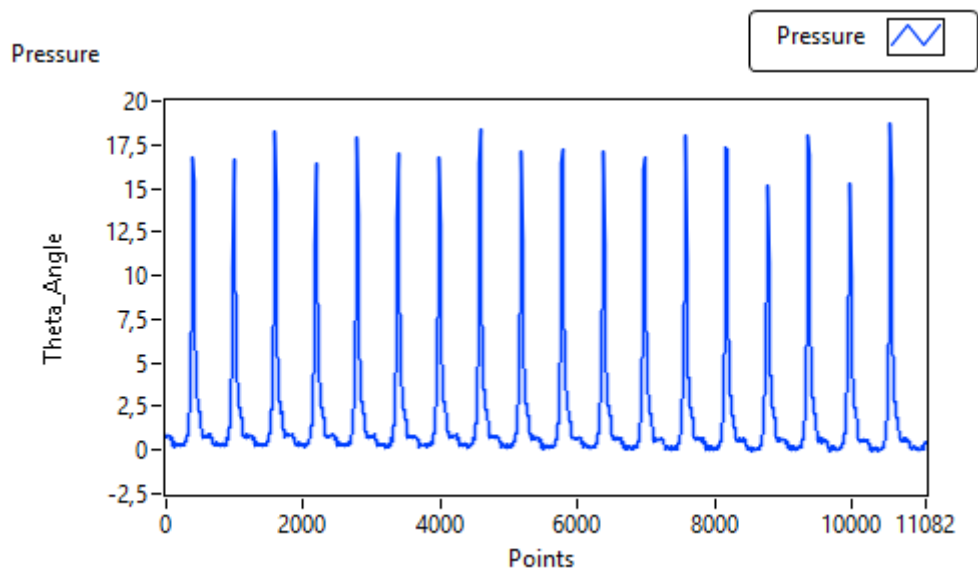
Ως τελευταίο σημείο δοκιμών επιλέχθηκαν οι 2.000 στροφές ανά λεπτό με πίεση εισαγωγής τα -390 mbar. Σε αυτές τις στροφές έχουμε χαμηλό φορτίο που ισοδυναμεί με μικρό άνοιγμα της εισαγωγής του αέρα. Οι απαραίτητες ρυθμίσεις για την στοιχειομετρία της καύσης αναγράφονται στον πίνακα 20.

Πίνακας 20: Οι ρυθμίσεις της ETU για 2.000 rpm με χαμηλό φορτίο

RPM	P intake [mbar]	SA [°]	SOI_1 [°]	DOI_1 [ms]
2000	-390	-15	-290	1,57

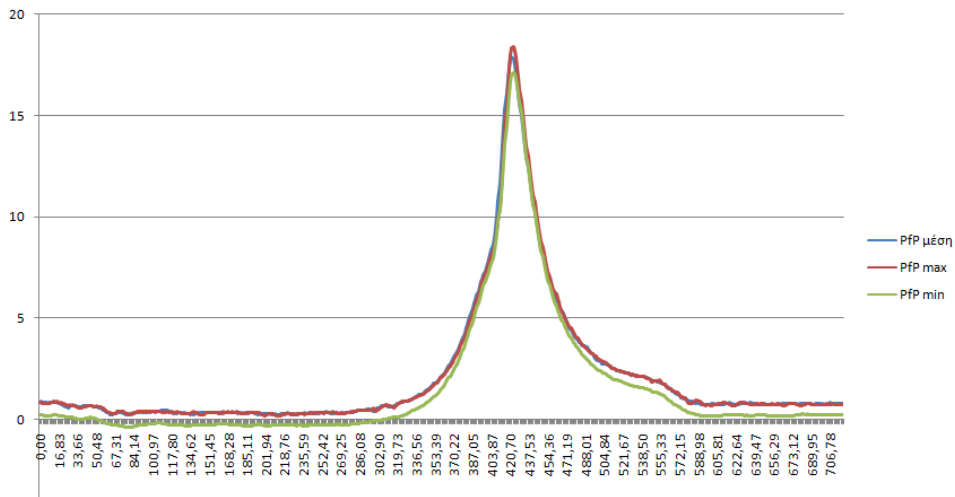
Στις στροφές αυτές βλέπουμε κάποιες αλλαγές στις ρυθμίσεις. Μία εκ των σημαντικότερων είναι ο χρόνος έγχυσης, που είναι ο μεγαλύτερος απ' όλες τις περιπτώσεις χαμηλού φορτίου, καθώς η αρχή της έγχυσης του είναι στις -290 μοίρες. Ο λόγος είναι ότι μέσω της μεγαλύτερης ταχύτητας εμβόλου έχουμε και μεγαλύτερη αναρρόφηση αέρα, οπότε για τη στοιχειομετρία θέλουμε και περισσότερο καύσιμο.

Και σε αυτήν την περίπτωση έχουμε σαν πρώτη εικόνα το διάγραμμα της πίεσης σε συνάρτηση των σημείων καταγραφής του σχήματος 46, που μας παρέχει και τον αριθμό των θερμοδυναμικών κύκλων, οι οποίοι καταγράφησαν.



Σχήμα 46: Απεικόνιση όλων των κύκλων για 2.000 rpm με χαμηλό φορτίο

Το διάγραμμα του σχήματος 46 αποτελεί μέρος του συνολικού διαγράμματος, διότι λόγω του μεγάλου αριθμού στροφών, σημειώθηκαν πολλοί κύκλοι λειτουργίας και η απεικόνισή τους δεν είναι ξεκάθαρη. Ωστόσο, βάσει της καταμέτρησής τους έχουμε 83 κύκλους λειτουργίας. Το συγκεντρωτικό διάγραμμα της πίεσης, συναρτήσει της γωνίας, δίνεται στο σχήμα 47.



Σχήμα 47: Οι κύκλοι για 2.000 rpm με χαμηλό φορτίο συναρτήσεως της γωνίας του στροφαλοφόρου για την μέγιστη, μέση και ελάχιστη τιμή της PfP

Μέσα από την αντιστοίχιση της πίεσης με τη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα, μπορούμε να παρουσιάσουμε τη μέση μέγιστη πίεση που επικρατεί στις συνθήκες αυτές (πίνακας 20). Με τη βοήθεια λοιπόν της διερεύνησης του ίχνους πίεσης, έχουμε μέση μέγιστη πίεση στα 16,4 bar με γωνία εμφάνισης 363 περίπου μοίρες. Η μέγιστη πίεση που καταγράφηκε σε όλους τους κύκλους λειτουργίας είναι τα 17 bar. Η μέγιστη πίεση συμπίεσης είναι στα 1.2 bar και η γωνία εμφάνισής της είναι κατά μέσο όρο στις 280 μοίρες περίπου.

Η συνέχεια επικεντρώνεται στον υπολογισμό και τη σύγκριση την μέσης ενδουκνύμενης πραγματικής πίεσης.

Πίνακας 21: Τα αποτελέσματα για 2.000 rpm με χαμηλό φορτίο

$IMEP_{LABVIEW}$	$IMEP_{DYN}$	$BMEP_{DYN}$	$FMEP_{DYN}$	$IMEP_{(μέση)}$
6.45 bar	4.5 bar	1.2bar	-3.3bar	6.34bar

Μελετώντας τον πίνακα 21, βλέπουμε διαφορές στις τιμές της IMEP ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού της. Η τιμή που μας παρουσιάζει το πρόγραμμα στην πρώτη στήλη είναι αρκετά κοντά στην τιμή της υπολογισμένης μέσης τιμής της τελευταίας στήλης και η μέτρησή τους βασίζεται στο ίχνος πίεσης και στον όγκο.

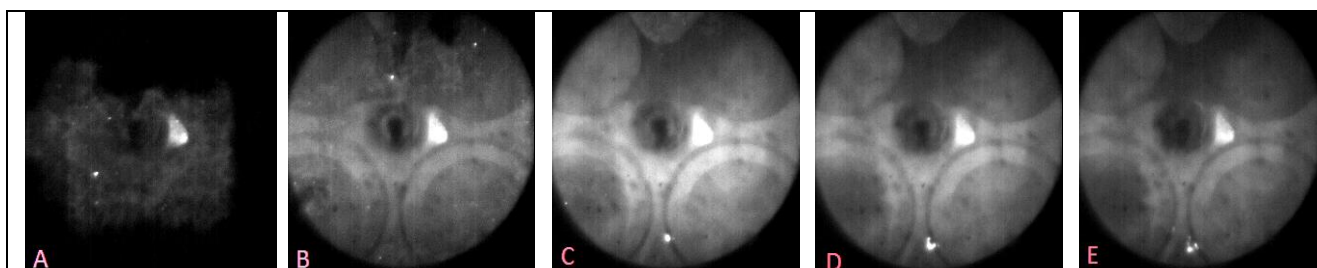
Συγκρίνοντας την $IMEP_{LABVIEW}$ και την $IMEP_{(μέση)}$ με την τιμή, όπως αυτή υπολογίζεται από το πρόγραμμα διαχείρισης του δυναμομέτρου, παρατηρούμε μία διαφορά η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει ανάγκη για βαθμονόμηση του.

Επίσης, έγινε και ο υπολογισμός της σταθερότητας της λειτουργίας με την χρήση του COV_{IMEP} και για την περίπτωση αυτή, με αποτέλεσμα $COV_{IMEP} = 1,2\%$.

Παρακάτω βρίσκει κανείς φωτογραφίες της καύσης σε αυτές τις συνθήκες (πίνακας 20). Αξιοσημείωτα αναφέρουμε ότι οι φωτογραφίες ελήφθησαν με την ίδια ταχύτητα λήψης, όπως και στις άλλες περιπτώσεις, με ταχύτητα λήψης τα 15.000 fps, οπότε, λόγω της αλλαγής των στροφών λειτουργίας της, η ανάγκη προσδιορισμού της συχνότητας λήψης σε σχέση με τη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα προβάλλει επιτακτική.

$$2000rpm = 2000 \left[\frac{revolution}{min} \right] \frac{360}{60} \left[\frac{degree}{revolution} \right] \left[\frac{min}{sec} \right] = 12000 \left[\frac{degree}{sec} \right]$$
$$12000 \left[\frac{degree}{sec} \right] \frac{1}{15000} \left[\frac{sec}{photo} \right] = 0.8 \left[\frac{degree}{photo} \right]$$

Με βάση λοιπόν αυτό, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη διάρκεια της καύσης σε μοίρες μέσα από την καταγραφή του αριθμού των εικόνων που την απεικονίζουν. Προχωρώντας στο σχήμα 48 παρουσιάζονται ενδεικτικές φωτογραφίες της καύσης από την αρχή της έναυσης στις -15 μοίρες σε σχέση με το άνω νεκρό σημείο και με διαφορά ανάμεσά τους περίπου 8 μοίρες.



Σχήμα 48: Φωτογραφίες της καύσης για 2.000 rpm με χαμηλό φορτίο

A: στις -10° σε σχέση με το ANΣ

B: στις -2° σε σχέση με το ANΣ

C: στη 6° σε σχέση με το ANΣ

D: στις 14° σε σχέση με το ANΣ

E: στις 22° σε σχέση με το ANΣ

Με βάση την καταμέτρηση των φωτογραφιών που απεικονίζουν την καύση έχουμε περίπου 50 φωτογραφίες και ως εκ τούτου, η καύση καταλήγει να προσδιορίζεται στις 40° .

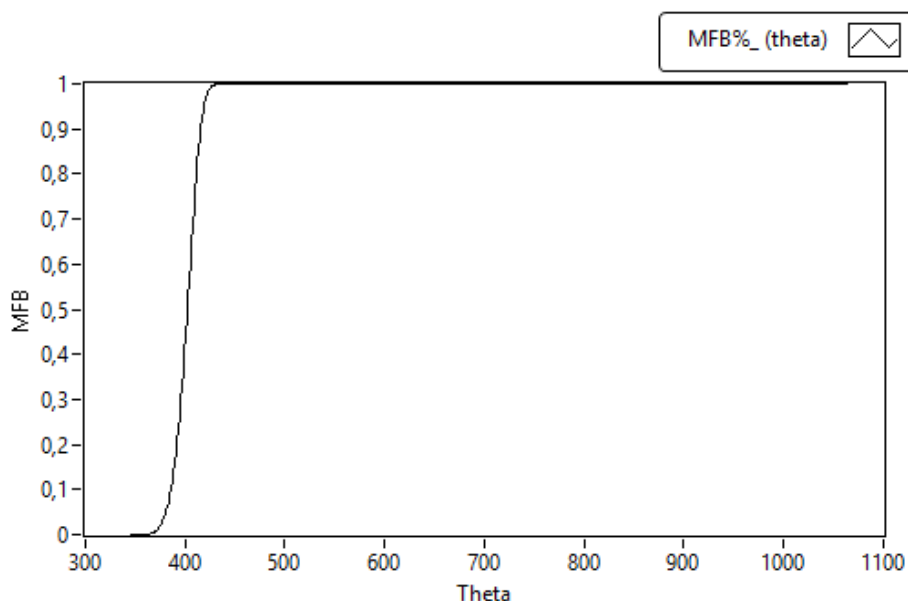
Στα πλαίσια της μεθοδολογίας που αναφέραμε στις προηγούμενες περιπτώσεις, αναπτύσσουμε το μοντέλο της καύσης και αποκτάμε μια καλύτερη εικόνα για την κάυση. Έτσι προκύπτει ο πίνακας 22. Στην πρώτη στήλη έχουμε τη διάρκεια την καύσης, στη δεύτερη τον συντελεστή a της εξίσωσης Wiebe και στην τρίτη το συντελεστή m . Στις δύο τελευταίες στήλες, υπάρχουν οι γωνίες για το 50% του κλάσματος της μάζας του καυσίμου που καίγεται για κάθε τρόπο υπολογισμού.

Πίνακας 22: Αποτελέσματα συντελεστών και CA50%

$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
80°	4,6051	4,6	$414,35^\circ$	$414,4^\circ$

Παρατηρείται ότι κατά τους υπολογισμούς που πραγματοποιήσαμε η συνολική διάρκεια καύσης σε γωνία του στροφαλοφόρου άξονα είναι 80 μοίρες. Σε σχέση με το αποτέλεσμα από την καταμέτρηση των φωτογραφιών και τον υπολογισμό της διάρκειας, βρίσκουμε μία διαφορά στις τιμές. Αυτό πηγάζει στην αδυναμία καταγραφής της όλης διάρκειας, επειδή η φλόγα είναι μικρής έντασης φωτεινότητας, κάθε φορά που εξασθενεί.

Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων γίνεται μέσα από τη σύγκριση των τιμών της γωνίας (CA50%) που αποτελούν κοντινές τιμές με σφάλμα γωνίας περίπου στις 0,05 μοίρες. Για την ολοκλήρωση της έρευνας παρουσιάζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα του MFB στο σχήμα 49.



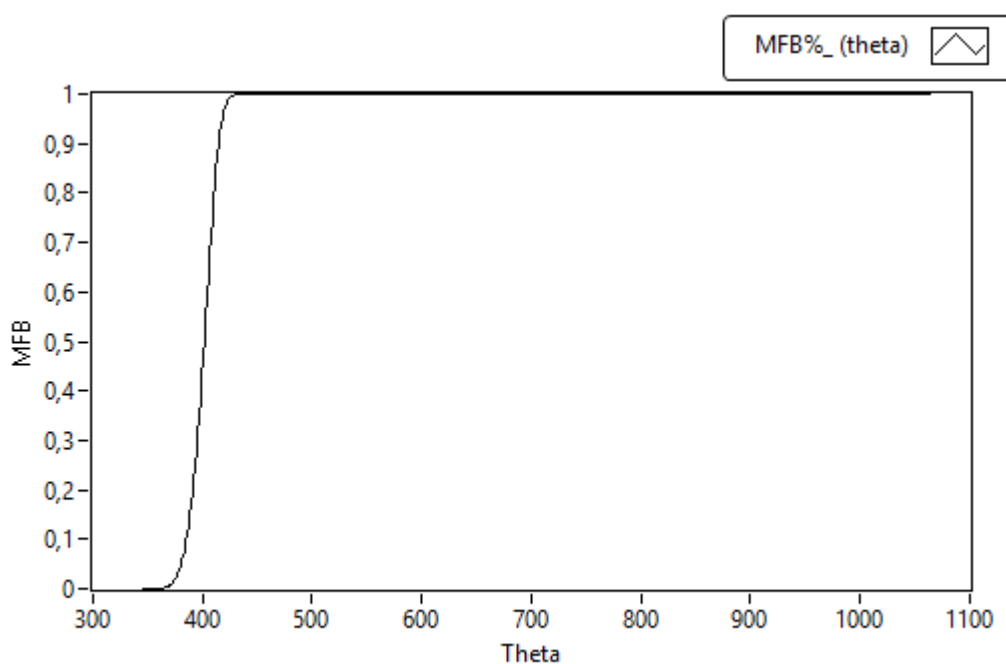
Σχήμα 49: Απεικόνιση του διαγράμματος MFB της συνάρτησης Wiebe

Για να προσδιορίσουμε αν τα αποτελέσματα του προγράμματος επαληθεύονται, χρησιμοποιούμε έναν κύκλο με τη μέση τιμή των πιέσεων όλων των κύκλων που καταγράφησαν από το πείραμα. Κατόπιν υπολογισμών που έγιναν για τη μέση τιμή, δημιουργήσαμε τον πίνακα 23.

Πίνακας 23: Αποτελέσματα συντελεστών και CA50% για τη μέση τιμή

$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
79 ^ο	46.051	4,6	412,9 ^ο	413,2 ^ο

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με εκείνα του πίνακα 23. Το διάγραμμα για το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται για αυτή την περίπτωση δίνεται στο σχήμα 51.



Σχήμα 50: Απεικόνιση του διαγράμματος MFB της συνάρτησης Wiebe για τη μέση τιμή

3.6 Αποτελέσματα για 2000 rpm με πίεση εισαγωγής -210 mbar

Για τις ίδιες στροφές λειτουργίας εξετάζουμε τα αποτελέσματα και για την αύξηση του φορτίου, αυξάνοντας την πίεση εισαγωγής. Με βάση τη διαδικασία που

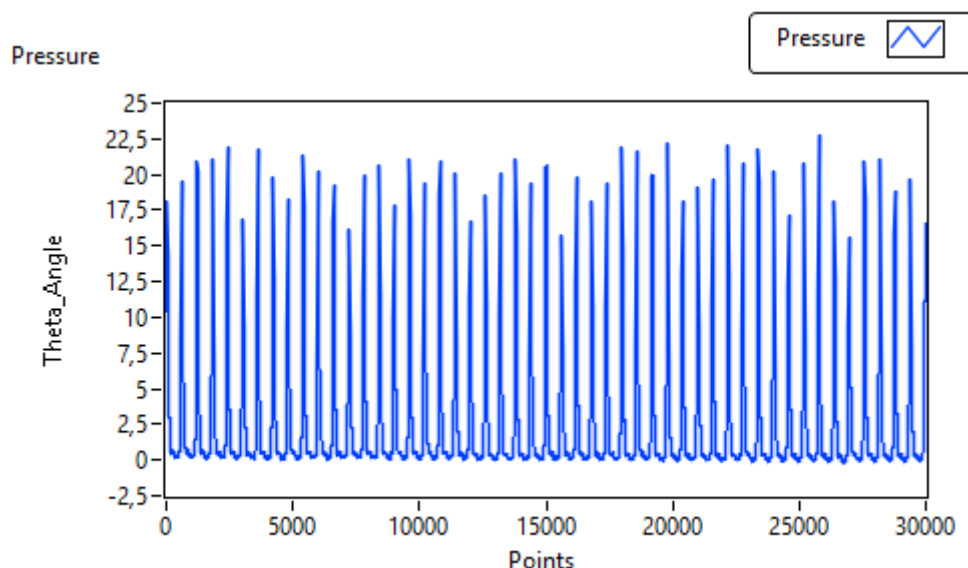
ακολουθούμε τοποθετούμε στον πίνακα 24 τις αλλαγές που έγιναν στη μονάδα διαχείρισης της μηχανής, ώστε να έχουμε στοιχειομετρία στην καύση.

Πίνακας 24: Οι ρυθμίσεις της ETU για 2.000 rpm με μεγάλο φορτίο

RPM	P intake [mbar]	SA [°]	SOI_1 [°]	DOI_1 [ms]
2000	-210	-8	-300	2,25

Προσέχουμε ορισμένες αλλαγές σε σχέση με κάθε άλλη περίπτωση. Η πιο βασική είναι πως η γωνία έναυσης πλησιάζει στο άνω νεκρό σημείο. Ο λόγος είναι ότι πρέπει να περιοριστεί η μέγιστη πίεση εντός του κυλίνδρου, ώστε να μη θέσουμε σε κίνδυνο τα γυάλινα κομμάτια του οπτικού κινητήρα. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι η διάρκεια της έγχυσης αυξήθηκε, διότι εισέρχεται μεγαλύτερη ποσότητα αέρα, ενώ η γωνία έγχυσης αυξήθηκε σε σχέση με το άνω νεκρό σημείο.

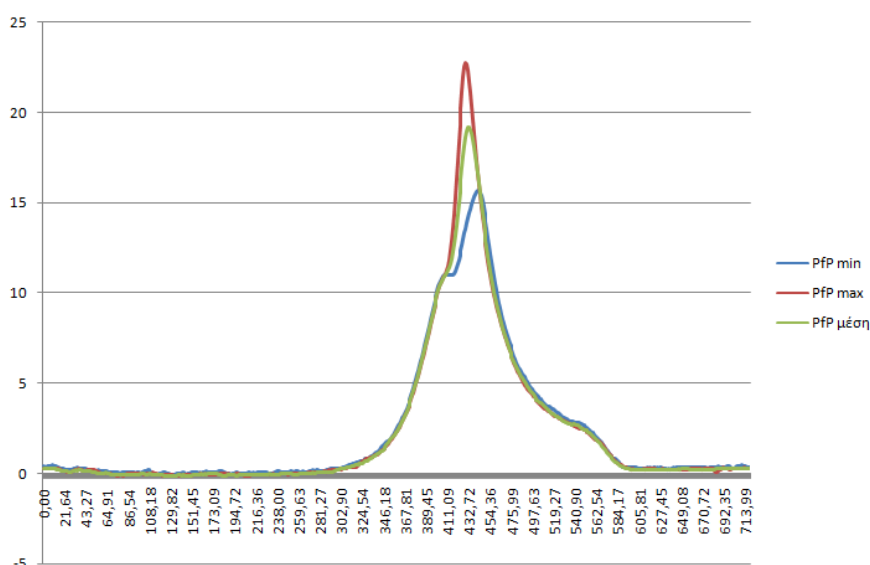
Μέσα από το διάγραμμα της πίεσης συναρτήσει των σημείων της δειγματοληψίας του σχήματος 51, έχουμε τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε τον αριθμό των θερμοδυναμικών κύκλων που καταγράψαμε. Ο συνολικός αριθμός των κύκλων λειτουργίας είναι 49. Αυτό θα επιβεβαιωθεί από την καταμέτρηση των κορυφών του σχήματος 51.



Σχήμα 51: Απεικόνιση όλων των κύκλων για 2.000 rpm με μεγάλο φορτίο

Εξέχουσας σημασίας παρατήρηση είναι ότι οι μέγιστες πιέσεις της περίπτωσης αυτής είναι μικρότερες από την προηγούμενη περίπτωση επαυξημένου φορτίου για τις 1.500 στροφές.

Το ακόλουθο διάγραμμα του σχήματος 52 απεικονίζει την πίεση συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα. Το διάγραμμα αυτό δημιουργήθηκε μετά από την αντιστοίχιση της πίεσης με τη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα.



Σχήμα 52: Οι κύκλοι για 2.000 rpm με μεγάλο φορτίο συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου για την μέγιστη, μέση και ελάχιστη τιμή της PfP

Από την επεξεργασία του ίχνους πίεσης, βλέπουμε ότι η μέση μέγιστη πίεση είναι στα 17,3 bar με γωνία εμφάνισης κατά μέσο όρο, να είναι στις 380,6 μοίρες ενώ η μέγιστη πίεση που αναπτύχθηκε βρίσκεται στα 19,34 bar. Με τη βοήθεια του σχήματος, ξέρουμε ότι υπάρχουν κάποιες ανωμαλίες σχετικά με την πίεση, οι οποίες οφείλονται στις κυκλικές μεταβολές. Από την περαιτέρω επεξεργασία του ίχνους πίεσης, αντιλαμβανόμαστε ότι η μέγιστη πίεση συμπίεσης είναι στα 1.97 bar και η γωνία εμφάνισής της είναι στις 299 μοίρες περίπου.

Η συνέχεια των υπολογισμών επικεντρώνεται στη μέτρηση και τη σύγκριση της μέσης ενδυκνύμενης πραγματικής πίεσης.

Πίνακας 25: Τα αποτελέσματα για 2.000 rpm με μεγάλο φορτίο

IMEP _{LABVIEW}	IMEP _{DYN}	BMEP _{DYN}	FMEP _{DYN}	IMEP _(μέση)
8,24 bar	6,1 bar	2,8 bar	-3.3bar	8,76 bar

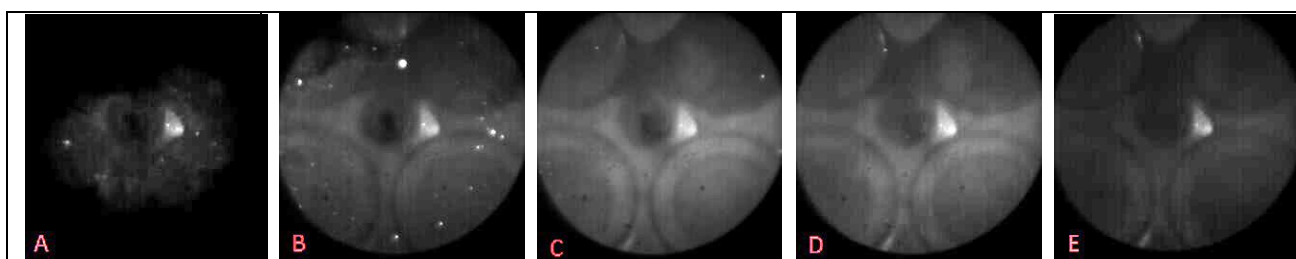
Όπως βλέπουμε από τον πίνακα 25 έχουμε διαφορά στις τιμές της IMEP. Αυτή προκύπτει από τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται. Η τιμή που μας παρουσιάζει το πρόγραμμα είναι αρκετά κοντά στην τιμή της υπολογισμένης μέσης τιμής, γιατί ο υπολογισμός τους στηρίζεται στο ίχνος πίεσης και στον όγκο.

Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με την τιμή, όπως αυτή υπολογίζεται από το πρόγραμμα διαχείρισης του δυναμομέτρου, παρατηρούμε μία διαφορά η οποία αιτιολογείται από τη βαθμονόμησή του.

Το μέγεθος που προσδιορίζει τη σταθερότητα της λειτουργίας του κινητήρα είναι το COV_{IMEP} , το οποίο υπολογίσαμε με βάση τη μεθοδολογία προηγούμενου κεφαλαίου με το μαθηματικό τύπο (13). Από τα προαναφερθέντα έχουμε **$COV_{IMEP}=2,33\%$** .

Όπως αναφέραμε, είχαμε κάποιες ανωμαλίες σχετικά με την πίεση, λόγω των έντονων κυκλικών μεταβολών που επηρέασαν τα αποτελέσματα της IMEP και κατ' επέκταση τη σταθερότητά της. Χαρακτηριστικά, αναφέρουμε ότι το αποτέλεσμα της COV_{IMEP} είναι το μεγαλύτερο, σε σχέση με όλες τις περιπτώσεις που εξετάσαμε.

Στη συνέχεια, έχουμε την απεικόνιση της καύσης μέσα από φωτογραφίες του σχήματος 53. Εξαιτίας των σταθερών στροφών λειτουργίας, η συχνότητα λήψης ανά γωνία παραμένει σταθερή και ίση με 0,8 μοίρες ανά φωτογραφία.



Σχήμα 53: Φωτογραφίες της καύσης για 2000 rpm με μεγάλο φορτίο

A: στις -6° σε σχέση με το ANΣ

B: στη 3° σε σχέση με το ANΣ

C: στις 12° σε σχέση με το ANΣ

D: στις 21° σε σχέση με το ANΣ

E: στις 30° σε σχέση με το ANΣ

Οι φωτογραφίες του σχήματος 53 δείχνουν την αρχή της έναυσης στις -6 μοίρες, σχετικά με το άνω νεκρό σημείο και ανά 9 περίπου μοίρες, βρίσκεται η απεικόνιση της εξέλιξης της φλόγας στις υπόλοιπες φωτογραφίες. Από την καταμέτρηση των φωτογραφιών, στις οποίες εξελίσσεται η καύση, βρίσκουμε ότι το σύνολο κατά μέσο όρο είναι 55 περίπου φωτογραφίες, γεγονός που συνεπάγεται 44 μοίρες.

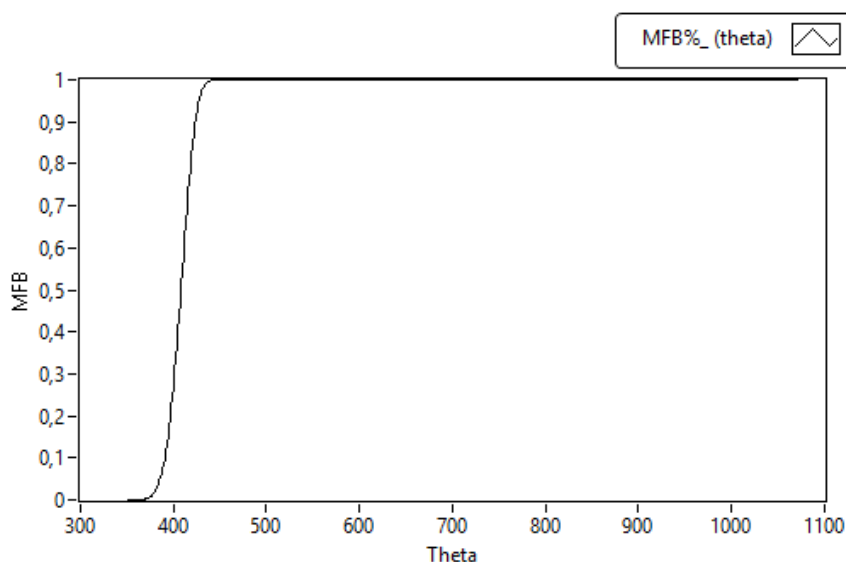
Έπειτα, με βάση τη μεθοδολογία που εκτελούμε, προσδιορίζουμε μέσα από τις εξισώσεις [(17),(18),(23),(24),(25)], το δείκτη m (συντελεστής μορφής της καμπύλης) και συντελεστή a για την εξίσωση Wiebe. Στον πίνακα 26 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των συντελεστών καθώς και της γωνίας, όπου έχουμε το 50% της καύσης του κλάσματος της μάζας καυσίμου που καίγεται.

Πίνακας 26: Αποτελέσματα συντελεστών και CA50%

$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
85°	4,6051	4,2	422,79°	423,7°

Μία βασική παρατήρηση είναι ότι από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήσαμε, η συνολική διάρκεια καύσης σε γωνία του στροφαλοφόρου άξονα είναι 55 μοίρες. Σε σχέση με το αποτέλεσμα από την καταμέτρηση των φωτογραφιών και τον υπολογισμό της διάρκειας αναφέρεται μία διαφορά στις τιμές. Αυτό είναι απόρροια της αδυναμίας καταγραφής της όλης διάρκειας, διότι η φλόγα παρουσιάζει φωτεινότητα μικρής έντασης, τη στιγμή που εξασθενεί.

Από τους προσδιορισμένους συντελεστές της εξίσωσης Wiebe του πίνακα 26 προκύπτει το διάγραμμα του κλάσματος της μάζας καυσίμου που καίγεται, συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα.



Σχήμα 54: Απεικόνιση του διαγράμματος MFB της συνάρτησης Wiebe

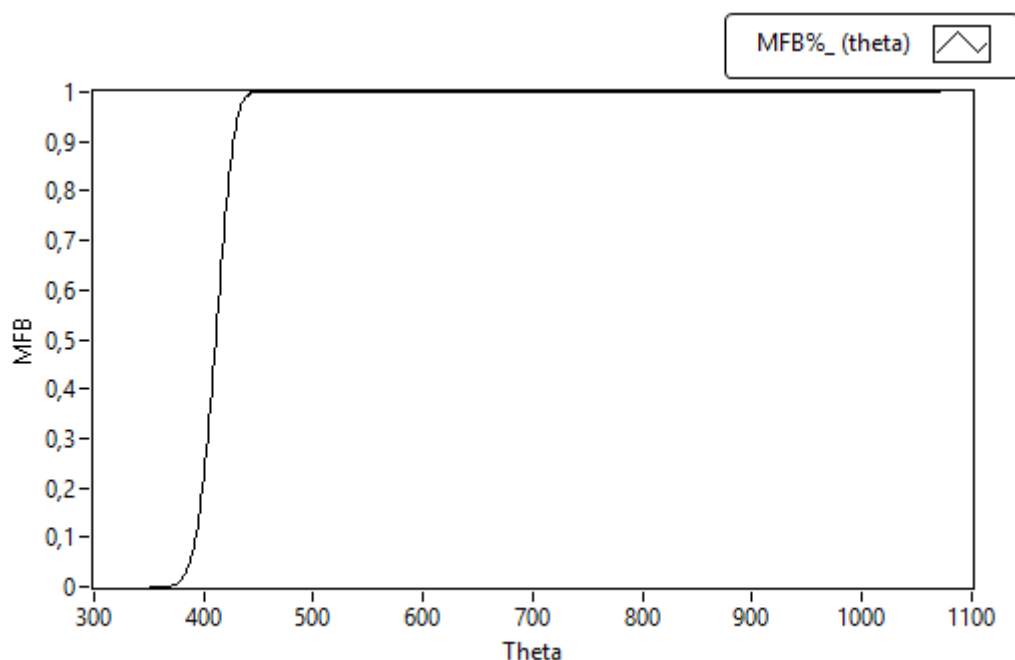
Τα αποτελέσματα θα εξεταστούν σε σχέση με το μέσο κύκλο. Ο συσχετισμός αυτός θα σταθεί σημαντικός αρωγός στην επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Πιο

κάτω, υπάρχει ο πίνακας 27, στον οποίο με σχολαστικό τρόπο σημειώσαμε τα εν λόγω αποτελέσματα.

Πίνακας 27: Αποτελέσματα συντελεστών και CA50% για τη μέση τιμή

$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
86°	46.051	4,2	422,79°	423,2°

Περί του κύκλου της μέσης τιμής της πίεσης παραθέτουμε το διάγραμμα του κλάσματος της μάζας καυσίμου που καίγεται, συναρτήσει της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα, στο σχήμα 55.



Σχήμα 55: Απεικόνιση του διαγράμματος MFB της συνάρτησης Wiebe για την μέση τιμή

3.7 Συνοπτικά όλες οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα

Μέσα από τους παρακάτω πίνακες προβάλλονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων και οι παρατηρήσεις τους. Στον πίνακα 28 έχουμε τις ρυθμίσεις της μονάδας διαχείρισης της λειτουργίας του κινητήρα, όπως αναλυτικά παρουσιάστηκαν.

Πίνακας 28: Συγκεντρωτικά οι ρυθμίσεις της ETU

RPM	P_{INTAKE}	SA	SOI_1	DOI_1
rpm	[mbar]	[°CA]	[°CA]	[ms]
1000	-410	-13	-280	1.45
1000	-90	-10	-280	2.85
1500	-400	-14	-280	1.45
1500	-90	-14	-280	2.60
2000	-390	-15	-290	1.57
2000	-210	-8	-300	2.25

Στο τέλος των πειραματικών μετρήσεων ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων, η ανάλυσή τους καθώς και ο επανέλεγχός τους. Όσα προείπαμε ήρθαν εις πέρας μέσα από υπολογιστικά προγράμματα, τόσο στο LabView όσο και στο Microsoft Excel. Σαν πρώτα αποτελέσματα έχουμε τις πιέσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 29.

Πίνακας 29: Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των πιέσεων

RPM	P_{INTAKE}	P_{max} (μεση)	P_{max}	PcP
rpm	[mbar]	bar	bar	bar
1000	-410	14.1	15.6	1.8
1000	-90	25.1	27.7	2.4
1500	-400	15.4	17.6	1.6
1500	-90	29.7	30.4	2.51
2000	-390	16.4	17	1.2
2000	-210	19.3	24.34	1.97

Παρατηρούμε ότι η πίεση αυξάνεται ανάλογα με το φορτίο και τις στροφές λειτουργίας, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Επίσης, το φορτίο εξαρτάται από την πίεση εισαγωγής, δηλαδή από την ποσότητα αέρα που θα μπει μέσα στον κύλινδρο.

Αργότερα οι υπολογισμοί επικεντρώθηκαν στην IMEP και το COV_{IMEP} (13). Τα ανάλογα συμπεράσματα αναλύθηκαν σε βάθος και σχολιάστηκαν ανά περίπτωση. Μέσα από τον πίνακα 30 είναι εφικτό να εξάγουμε και επιπλέον συμπεράσματα, αναφορικά προς τα μεγέθη που υπολογίσαμε.

Πίνακας 30: Τα αποτελέσματα της IMEP και του COV_{IMEP}

RPM	IMEP_{LABVIEW}	FMEP_{DYN}	COV_{IMEP}	IMEP_{μέση}
rpm	bar	bar	%	bar
1000 (-400mbar)	3.4	-2.7	1.66	3.38
1000 (-100mbar)	7.32	-2.7	1.21	7.42
1500 (-400mbar)	4.512	-2.9	1.032	6.34
1500 (-90mbar)	8.82	-2.9	0.86	9.4
2000 (-390mbar)	6.45	-3.3	1.2	6.34
2000 (-290mbar)	3.24	-3.3	2.33	8.76

Μείζων παράγοντας είναι ο τρόπος υπολογισμού που το δυναμόμετρο βασίζεται στη ροπή, ενώ στην εργασία στεκόμαστε στο ίχνος πίεσης που παίρνουμε από τον αισθητήρα. Χαρακτηριστικό είναι ότι η IMEP αυξάνεται όπως η πίεση που προαναφέραμε. Πρέπει να υπογραμμίσουμε επίσης, ότι η FMEP εξαρτάται αποκλειστικά από τις στροφές λειτουργίας. Εν κατακλείδι, ως προς τη σταθερότητα της IMEP το πόρισμα είναι πως έχουμε αποδεκτές τιμές και ότι η τιμή COV_{IMEP} κινείται σε χαμηλά γενικά επίπεδα.

Στη συνέχεια τίθεται ο πίνακας 31, περιλαμβάνοντας τα αποτελέσματα της γωνίας για το 50% του κλάσματος καυσίμου που καίγεται ανάλογα με τον τρόπο προσδιορισμού, τη διάρκειά της, και τους συντελεστές της εξίσωσης Wiebe (16).

Πίνακας 31: Αποτελέσματα συντελεστών και CA50% για όλες τις συνθήκες

RPM	$\Delta\theta$	a	m	CA50%(Wiebe)	CA50%(HR)
1000 (-400mbar)	60	4,6051	8,2	395,61	396,22
1000 (-100mbar)	55,75	4,6051	7,2	396,8	396,72
1500 (-400mbar)	74	4,6051	6,6	408,1	408,36
1500 (-90mbar)	68	4,6051	6,6	404,029	404,65
2000 (-390mbar)	80	4,6051	4,6	414,35	414,4
2000(-290mbar)	85	4,6051	4,2	422,79	423,7

Γενική παρατήρηση είναι ότι η διάρκεια της καύσης διαφέρει ανάλογα με τις στροφές λειτουργίας, καθώς και το φορτίο κατά μικρό βαθμό. Οι συντελεστές μορφής για συγκεκριμένες στροφές λειτουργίας, είναι σχεδόν ίσοι και ο συντελεστής απόδοσης παραμένει σταθερός, για όλες τις συνθήκες λειτουργίας των πειραματικών μετρήσεων (πίνακας 29).

4. Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, έγινε η δημιουργία ενός κώδικα μέσα από το λογισμικό LabView, το οποίο αποτελεί πρόγραμμα δημιουργίας εικονικών οργάνων μέτρησης. Από τα πειραματικά δεδομένα που καταγράψαμε, ελέγξαμε την ορθότητα του προγράμματος ως προς τα αποτελέσματά του, συγκρίνοντάς τα με τα αντίστοιχα της μέσης τιμής από την πειραματική καταγραφή. Όλα αυτά πραγματοποιήθηκαν για την καλύτερη διασταύρωση και τεκμηρίωσή του. Αφού έγινε η επαλήθευση των αποτελεσμάτων, ήταν πλέον εμφανές, πως ο στόχος της εργασίας είχε επιτευχθεί. Το πρόγραμμα δύναται να υπολογίζει τα μεγέθη που επιλέχθηκαν σε άμεσο χρόνο, δίνοντας στο χρήστη της πειραματικής μηχανής αξιόπιστα και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα.

Συμπερασματικά μπορούμε να σχολιάσουμε κάποιες βασικές παρατηρήσεις σχετικά με τα αποτελέσματα που έχουμε εξάγει. Χαρακτηριστικό είναι και το φαινόμενο των κυκλικών μεταβολών, που επηρεάζει την πίεση. Έπειτα αυτή με την σειρά της επιδρά στην ενδεικνύμενη μέση πραγματική πίεση (IMEP). Ένα ιδιαίτερο σχόλιο που πρέπει να επισημανθεί, είναι οι διαφορές ανάμεσα στις τιμές του προγράμματος διαχείρισης του δυναμομέτρου καθώς και στις υπολογισμένες τιμές για το οποίο αναφερθήκαμε πιο πάνω. Η διαφορά αυτή δημιουργήθηκε ως επακόλουθο της λανθασμένης βαθμονόμησης του δυναμομέτρου. Παρατηρήθηκε ότι οι κυκλικές μεταβολές επηρεάζουν το παραπάνω μέγεθος.

Διερευνήσαμε επίσης για τις ανάγκες της εργασίας, το κλάσμα μάζας καυσίμου που καίγεται με χρήση της εξίσωσης Wiebe, και μέσα από τη μεθοδολογία για την έκλυση θερμότητας [(17),(18),(23),(24),(25)], διασταυρώσαμε τα αποτελέσματα. Ο έλεγχος για την ορθότητα και για το κατά πόσο το πρόγραμμα μπορεί να μας δώσει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για τη γενική εικόνα συνεχίστηκε και μέσω της σύγκρισής του με τα αποτελέσματα για το μέσο κύκλο. Όπως αποδείξαμε το πρόγραμμα με τη χρήση της εξίσωσης Wiebe ανταποκρίνεται στις προσδοκίες μας και μπορεί να εμφανίσει την εικόνα του κλάσματος της μάζας καυσίμου που καίγεται με άμεσο υπολογισμό. Δημιουργήθηκαν επίσης και πίνακες αποτελεσμάτων και συντελεστών για τη διερεύνηση του κλάσματος μάζας που καίγεται. Οι ίδιοι εξετάστηκαν προσεκτικά για την ορθότητα και την ακρίβεια τους, με τη βοήθεια των συντελεστών στους υπολογισμούς για τη μέση τιμή του κύκλου.

Τα περιθώρια έρευνας και μελέτης που έχουμε με τη συγκεκριμένη διάταξη είναι μεγάλα. Αρχικό στάδιο θα ήταν η δημιουργία μίας διάταξης, που θα αποβλέπει στον υπολογισμό της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα, έτσι ώστε να εξελιχθεί το πρόγραμμα της εργασίας και να κάνει υπολογισμούς σε πραγματικό χρόνο.

Κάποια πρόταση για μελλοντική δουλειά θα μπορούσε να περιλαμβάνει την έρευνα αλληλεπίδρασης της ροής και φλόγας (με τη χρήση της διάταξης PIV που υπάρχει στο εργαστήριο MEK του τμήματος) και πώς η τύρβη επηρεάζει το κλάσμα μάζας καυσίμου και τους συντελεστές a και m της εξίσωσης Wiebe.

Επιπρόσθετα, ίσως ήταν αρκετά χρήσιμη η υπολογιστική μελέτη καύσης σε ένα πρόγραμμα CFD με τη χρήση της γεωμετρίας της οπτικής μηχανής, ώστε χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις των γνωστών σημείων λειτουργίας, να καταστεί δυνατή η σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσμάτων.

Ένας άλλος τομέας που χρήζει έρευνας είναι η χρήση βίο-καυσίμων κυρίως σε μίγματα με συμβατικά καύσιμα, διότι πρόκειται για την τάση που θα επικρατήσει τα επόμενα χρόνια. Εκτός από τα βίο-καύσιμα είναι σημαντικό να δημιουργηθεί εγκατάσταση για τη χρήση υδρογόνου στην καύση (ήδη έχει γίνει προεγκατάσταση των σωληνώσεων). Αυτή η εγκατάσταση δίνει τη δυνατότητα για επιπλέον έρευνα σε χρήση καθαρού υδρογόνου ή και μίγματος αυτού με συμβατική βενζίνη, ώστε να μελετηθούν με τη χρήση διαφορετικών καυσίμων οι διαφοροποιήσεις στο κλάσμα μάζας καυσίμου, καθώς και να υπολογιστούν οι συντελεστές της εξίσωσης Wiebe, δημιουργώντας μια βιβλιοθήκη με αναλυτικά αποτελέσματα των εν λόγω ερευνών.

Τέλος, μια ακόμα πρόταση αφορά την τοποθέτηση συστήματος επανακυκλοφορίας των καυσαερίων, διότι έτσι μπορεί να βρεθεί ο τρόπος που θα επηρεαστεί ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και κατ' επέκταση το κλάσμα μάζας καυσίμου και οι συντελεστές Wiebe.

5.Βιβλιογραφία

- [1] **Goering E. Carrol** Engine Performance Measures
([http://210.27.80.89/2006/qiche/engine%20book/ENGINE%20PERFORMANCE%20MEASURES%20\(2\).pdf](http://210.27.80.89/2006/qiche/engine%20book/ENGINE%20PERFORMANCE%20MEASURES%20(2).pdf))
- [2] **Harris Yong and Randy Chang** mean effective pressures and fuel consumption characteristics for a direct fuel injection spark ignition two stroke engine
(<http://www.steerbythrottle.com/hccyong/files/DFI.pdf>)
- [3] **Lei Tian David B. Kittelson William K. Durfee** Experimental Tests and Simulations of A 1.5 cc Miniature Glow-Ignition Two-Stroke Engine Mechanical Engineering, Univ. of Minnesota
(<http://www.me.umn.edu/~wkdurfee/publications/10SETC-0095.pdf>)
- [4]**SAE (1999-01-0905): Labreuche G** Total Friction Effective Pressure and Torque Estimator University of Orleans – France
- [5] **William J. Rice** Development of an Instrument for Real-Time Computation of Indicated Mean Effective Pressure
(<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19840008393.pdf>)
- [6] **Benjamin Robert Brown** Combustion Data Acquisition and Analysis 00TTD010: Final Year Project M.Eng. Automotive Engineering
- [7] **Per Tunestål, Mark Wilcutts, Albert T. Lee, J. Karl Hedrick** In-Cylinder Measurement for Engine Cold-Start Control University of California, Berkeley
(<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.39.909&rep=rep1&type=pdf>)
- [8] **Wei-Chin Chang** An Improved Method of Investigation of Combustion Parameters in a natural gas fuelled SI engine with EGR and H₂ as additives by University of Birmingham August, 2002 (<https://core.ac.uk/download/files/121/5222628.pdf>)
- [9] <http://www.dieseltune.com/combpar.htm>
- [10] <https://books.google.gr/books?id=iJ6P4Q6UCPIC&pg=PA49&lpg=PA49&dq=peak+compression+pressure&source=bl&ots=IDMaTs3Z12&sig=B-5LmMQgTtoyFdJkX5nbtUdbApQ&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwIijpJOoitrNAhXBDSw>

KHf0GBH04ChDoAQgtMAM#v=onepage&q=peak%20compression%20pressure&f=alse

[11] Manual AVL , technical description AVL SCRE 5405

[12] **SAE (2008-01-0980): Corti E.** Measurement errors in real-time IMEP and ROHR evaluation. April 2008.

[13] **SAE: Jason Meyer** Engine Modeling of an Internal Combustion Engine with Twin Independent Cam Phasing THESIS Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for Graduation with Distinction at the Ohio State University 2007

[14] **Κολοκοτρώνης Δημήτριος** ΜΕΚ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ (2015)

[15] **SAE (2012-36-0498): Leonardo De Oliviera Carvalho Rubelmar Maia De Azevedo Cruz Neto Tadeu Cavalcante Cordeiro De Melo** Investigation on the fuel and engine parameters that affect th half mass fraction burned (CA50) optimum crank angle

[16] **Paulina S. Kuo** Cylinder Pressure in a Spark_Ignition Engine Journal of Undergraduate Sciences (Fall 1996)

[17] **Mohammad J. Nekooei** A Study on Combustion Modelling of Marine Engines Concerning the Cylindrical Pressure Journal of Applied Science and Agriculture March, 2014

[18] **SAE (2001-01-3485): Stefan Byttner, Thorsteinn Rognvaldsson, and Nicholas Wickstrom** Estimation of combustion variability using in-cylinder ionization measurements
(<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.23.9326&rep=rep1&type=pdf>)

[19] **Jamil Ghojel** Review of the development and applications of the Wiebe function: A tribute to the contribution of Ivan Wiebe to engine research International Journal of Engine Research May, 2010

[20] **M. Mittal & H. Schock** Fast mass-fraction-burned calculation using the net pressure method for real-time applications Michigan State University, East Lansing November, 2008

[21] https://www.techimaging.com/products/product/download/file_id-236

- [22] Labview tutorial by National Instruments
(<https://www.youtube.com/watch?v=PqxStfwjQoQ&list=PL085A358B79B37463>)
- [23] https://www.youtube.com/watch?v=IOkoyuikj5Q&list=PLdNp0fxltzmPvvK_yjX-XyYgfVW8WK4tu
- [24] LabVIEW™ Getting Started with LabVIEW
(<http://www.ni.com/pdf/manuals/373427j.pdf>)
- [25] NI 9215 ±10 V, Simultaneous Analog Input, 100 kS/s, 4 Ch Module
(<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/208793>)
- [26] **Cinzia Tornatore, Luca Marchitto, Gerardo Valentino, Felice Esposito Corcione, Simona Silvia Merola**, Optical diagnostics of the combustion process in a PFI SI boosted engine fueled with butanol-gasoline blend, Energy 45 (2012) pp.277-287
- [27] http://www.photron.com/datasheet/FASTCAM_SA3.pdf
- [28] **Μοσχοβίτης Πέτρος** Διπλωματική Εργασία ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΠΤΙΚΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΙΣΟ-ΟΚΤΑΝΙΟ (Π.Δ.Μ. Κοζάνη, Μάρτιος, 2015)
- [29] AVL Pressure Sensors for Combustion Analysis (January 2013) pp.27
- [30] Manual KISTLER amplifier, 5011B_000-296e-12.05, (2005) pp.1-3
- [31] **Yunus A. Cengel & Michel A. Boles** Θερμοδυναμική Για Μηχανικούς [μετάφρ] Παναγιώτης Ε. Τσιακάρης 7^η Έκδοση Έκδοση σ.Ι. Εκδόσεις Τζιόλα 2012 ISBN 978-960-418-345-6