



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΟΡΗΤΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΥΣΗΣ
ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Π. ΜΠΕΝΤΕΒΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Θ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ , ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΟΡΗΤΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΥΣΗΣ
ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ

COMPARATIVE APPRAISAL OF PORTABLE COMBUSTION
PRESSURE RECORDING SYSTEMS FOR LARGE DIESEL
ENGINES

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Π. ΜΠΕΝΤΕΒΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Θ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ , ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση και αξιολόγηση φορητής συσκευής για τη καταγραφή της πίεσης καύσης κινητήρων Diesel. Είναι μια συσκευή καταγραφής της μέγιστης πίεσης καύσης εντός του κυλίνδρου κινητήρα και αποτελεί εξοπλισμό του εργαστηρίου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, τη λειτουργία του οποίου είχα τη χαρά και την τιμή να μελετήσω. Κατά τη διάρκεια της εργασίας έλαβαν χώρα πραγματικές μετρήσεις τόσο σε κινητήρα του εργαστηρίου όσο και σε ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος της Δ.Ε.Η. στο νησί της Χίου. Τα αποτελέσματα του φορητού οργάνου συγκρίνονται με τα αντίστοιχα ενός διαγνωστικού λογισμικού που αναπτύχθηκε από τον καθηγητή κ. Χουντάλα και τους συνεργάτες του και ορίζεται ως πρότυπο στη συγκεκριμένη εργασία.

Καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος υπήρξε η επιθυμία μου για ενασχόληση με το επιστημονικό αντικείμενο της επιτήρησης της λειτουργικής κατάστασης και της διάγνωσης βλαβών εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Έναυσμα αποτέλεσε η διδασκαλία των σχετικών με τους κινητήρες μαθημάτων, που κέντρισε το ενδιαφέρον μου και σε συνδυασμό με την προϋπάρχουσα κλίση μου με οδήγησαν στον συγκεκριμένο τομέα. Η διάθεση του μετρητικού οργάνου, εκ μέρους του κύριου Δημήτριου Θ. Χουντάλα, καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, καθώς και η προθυμία του να συμβάλλει, μέσω της συνεργασίας μας, στον εμπλουτισμό της εκπαιδευτικής μου κατάρτισης σχετικά με το εν λόγω αντικείμενο, υπήρξε αναμφισβήτητο σημείο κλειδί.

Έτσι, μου ανατέθηκε η εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας από τον κ. Δημήτριο Θ. Χουντάλα, τον οποίο οφείλω να ευχαριστήσω θερμά για την καθοδήγηση που μου πρόσφερε, την άψογη συνεργασία και τη μέγιστη συνεισφορά του στην εμπάθυνση των γνώσεών μου σχετικά με τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε ήταν και είναι το μεγαλύτερο κίνητρο που θα μπορούσε να δοθεί σε κάθε νέο μηχανικό.

Επιπλέον είμαι ειλικρινά ευγνώμων στους υποψήφιους διδάκτορες Γεώργιο Ζοβάνο, Νικόλαο Σάββα και Σπυρίδων Ραπτοτάσιο, καθώς και στον δρ. Αντώνιο Αντωνόπουλο, για την συνεργασία και τη βοήθεια που μου πρόσφεραν, ώστε να ολοκληρώσω επιτυχώς την διπλωματική αυτή εργασία.

Τέλος αξίζει μια σύντομη έστω αναφορά στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση, την αδιάκοπη παροχή όλων των απαραίτητων εφοδίων και την υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΣΥΝΟΨΗ

Η διαδικασία επιτήρησης της λειτουργίας των κινητήρων και της διάγνωσης των βλαβών τους αποτελεί ένα τεχνολογικό πεδίο που γνωρίζει ιδιαίτερη άνθιση στις μέρες μας. Συγκεντρώνει το ενδιαφέρον, καθώς μπορεί να εξασφαλίσει ομαλή λειτουργία της μηχανής προσεγγίζοντας τη βέλτιστη απόδοσή της, να διευκολύνει την επισκευή της, να εξασφαλίσει εξοικονόμηση χρημάτων και να προσφέρει πολλά ακόμη πλεονεκτήματα στον μηχανικό.

Οι ιδιότητες αυτές της διαγνωστικής διαδικασίας σε συνδυασμό με την εντεινόμενη έρευνα που διεξάγεται διεθνώς πάνω στο εν λόγω αντικείμενο υπήρξαν το εφαλτήριο για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η φορητή συσκευή καταγραφής της πίεσης καύσης, η οποία και αξιολογείται εδώ, συμβάλλει μέσω της μέτρησης της πίεσης εντός του κυλίνδρου στην εκτίμηση της λειτουργικής κατάστασης του κινητήρα. Γίνεται έτσι μια προσπάθεια ανάλυσης της εφαρμογής, της λειτουργίας και της αξιοπιστίας του συγκεκριμένου οργάνου, όσον αφορά τη δυνατότητα καταγραφής της πίεσης και του δυναμοδεικτικού διαγράμματος.

ABSTRACT

The procedure of monitoring the operation of engines and fault diagnosis forms a flourishing technological field nowadays. It attracts interest, as it is able to ensure smooth engine operation approaching its optimal efficiency, to facilitate its repair, to lead to moneysaving and to offer many more benefits to the engineer.

These properties of the diagnostic process combined with the growing research which has been conducted internationally on this field have been the springboard for completing the particular thesis. The portable combustion pressure recording device which is evaluated in this thesis, contributes to the assessment of the functional status of the engine by measuring the pressure within the cylinder. Thus, an effort takes place in order to analyze the implementation, the operation and reliability of the specific instrument, regarding the recording possibility of pressure and pressure diagram.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	1
1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας	1
2. Κινητήρες Diesel	3
2.1 Γενικές Αρχές – Λειτουργία.....	3
2.1.1 Εισαγωγή	3
2.1.2 Τετράχρονος (4-Χ) κινητήρας	8
2.1.3 Δίχρονος (2-Χ) κινητήρας	10
2.2 Πλεονεκτήματα του κινητήρα Diesel.....	13
2.3 Σύγκριση δίχρονων και τετράχρονων κινητήρων Diesel	14
2.4 Δίχρονος ναυτικός κινητήρας Diesel.....	16
2.4.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	16
2.4.2 Γενική περιγραφή.....	19
2.4.3 Κύκλος λειτουργίας	21
2.4.4 Βραδύστροφοι κινητήρες Diesel	23
2.4.5 Μεσόστροφοι κινητήρες Diesel μεγάλου μεγέθους.....	26
2.5 Μηχανισμός της καύσης σε κινητήρες Diesel	30
2.5.1 Καύση.....	30
2.5.2 Στάδια της καύσης.....	33
2.6 Το δυναμοδεικτικό διάγραμμα κινητήρων Diesel	35
3. Μέθοδοι επίβλεψης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel	38
3.1 Αναγκαιότητα επίβλεψης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel	38
3.2 Βασικές αρχές μεθόδων επίβλεψης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel	39
3.3 Διαγνωστικές τεχνικές ως εργαλείο βελτιστοποίησης του κινητήρα.....	41
3.4 Εξέλιξη των διαγνωστικών συστημάτων	42
3.5 Η πίεση κυλίνδρου ως βασικό μέγεθος της διαγνωστικής διαδικασίας	45
4. Καταγραφή της πίεσης κυλίνδρου	46
4.1 Μέτρηση πίεσης θαλάμου καύσης.....	46
4.1.1 Εισαγωγή	46
4.1.2 Σύγχρονες Προκλήσεις	46
4.2 Ο μηχανικός δυναμοδείκτης.....	47
4.3 Ο ηλεκτρονικός δυναμοδείκτης.....	50
4.4 Ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας – μεταλλάκτης.....	51

4.5 Μετατροπή τιμών τάσης σε τιμές πίεσης.....	55
4.6 Κωδικοποιητές γωνίας στροφάλου	55
4.6.1 Γενικά	55
4.6.2 Οπτικοί κωδικοποιητές	57
4.6.3 Μαγνητικοί λήπτες (pickups)	58
4.6.4 Αισθητήρες φαινομένου Hall.....	60
4.7 Αναφορά του άνω νεκρού σημείου.....	61
4.8 Αντιστοίχιση μετρούμενης πίεσης στη γωνία στροφάλου.....	63
4.9 Εισαγωγή σφάλματος στις μετρήσεις.....	64
5. Περιγραφή της φορητής συσκευής καταγραφής	
πίεσης καύσης που αξιολογείται	65
5.1 Περιγραφή	66
5.1.1 Εισαγωγή	66
5.1.2 Μετρητικές λειτουργίες	66
5.1.3 Αρχή λειτουργίας.....	68
5.1.4 Διαδικασία μέτρησης	68
5.2 Λειτουργία	70
5.2.1 Συνδέσεις και στοιχεία ελέγχου	70
5.2.2. Εκκίνηση	72
5.2.3 Μέτρηση με στατιστική εκτίμηση για 1 έως 100 κύκλους πίεσης.....	73
5.2.4 Διαχωρισμός της Μνήμης	74
5.2.5 Μέτρηση της στιγμιαίας μέγιστης τιμής της πίεσης.....	74
5.2.6 Ανάκληση αποθηκευμένων μετρήσεων.....	75
5.2.7 Διαγραφή της μνήμης	76
5.2.8 Μεταφορά δεδομένων μέσω της διεπαφής RS-232C.....	76
5.2.9 Αποθήκευση μετρήσεων και προώθηση στην διεπαφή RS-232C.....	77
5.2.10 Κωδικός (Password).....	77
6. Μετρήσεις στον κινητήρα Ruggerini CRD100 του εργαστηρίου	79
6.1 Εισαγωγή.....	79
6.2 Προετοιμασία πριν τη διεξαγωγή μετρήσεων.....	80
6.3 Μετρήσεις που ελήφθησαν	80
6.4 Μεταφορά και επεξεργασία τιμών πίεσης σε Η/Υ	81
7. Μετρήσεις στον κινητήρα MAN B&W 9K60MC-S του ΑΣΠ Χίου	84
7.1 Εισαγωγή.....	84
7.1.1 Ο κινητήρας MAN B&W 9K60MC-S.....	85
7.1.2 Μέθοδος αξιολόγησης της καταγεγραμμένης πίεσης από την φορητή μετρητική συσκευή	86

7.1.3 Το πρότυπο διαγνωστικό σύστημα και λογισμικό.....	86
7.2 Διαδικασία λήψης μετρήσεων.....	87
7.3 Επεξεργασία των μετρήσεων.....	90
7.3.1 Σύγκριση δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων $p - \phi$	90
7.3.2 Σύγκριση δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων $p - V$ και τιμών ισχύος	121
8. Τελική αξιολόγηση της μέτρησης του διαγράμματος πίεσης καύσης με χρήση απλής φορητής συσκευής - Συμπεράσματα.....	153
Παράρτημα	156
Βιβλιογραφία	158



1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Οι κινητήρες Diesel μεγάλου μεγέθους έχουν επικρατήσει σήμερα στη ναυπηγία και στην αυτόνομη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία και οι σύγχρονες απαιτήσεις επιβάλλουν την εφαρμογή νέων βελτιωμένων μεθόδων επιτήρησης αυτών των μηχανών και διάγνωσης των βλαβών τους. Παρά την ύπαρξη ποικίλων διαγνωστικών συσκευών, αναζητούνται διαρκώς νέες τεχνικές και συστήματα που να καθιστούν τη διαγνωστική διαδικασία πιο αξιόπιστη, εύκολη και σύντομη. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια προσπάθεια συμβολής στη σύγχρονη αυτή έρευνα μέσω καταγραφής σχετικών βιβλιογραφικών πηγών, διεξαγωγής μετρητικών πειραμάτων και υπολογιστικής επεξεργασίας. Απώτερος σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση της δυνατότητας καταγραφής του δυναμοδεικτικού διαγράμματος πίεσης με χρήση απλής φορητής συσκευής.

1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα έκθεση χωρίζεται σε δύο μέρη. Στα Κεφάλαια 2 – 4 γίνεται μία εισαγωγική αναφορά στις έννοιες που θα μας απασχολήσουν και παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της μέχρι τώρα ερευνητικής δραστηριότητας γύρω από την διαγνωστική διαδικασία κινητήρων Diesel μεγάλου μεγέθους. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η φορητή μετρητική συσκευή στη μελέτη της οποίας στηρίχθηκε η εν λόγω εργασία, τα Κεφάλαια 6 και 7 αφορούν τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, ενώ τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται στο Κεφάλαιο 8.

Αναλυτικότερα, στο Κεφάλαιο 2 παρατίθενται γενικά στοιχεία για τους κινητήρες Diesel και τη λειτουργία τους. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες μιας και οι συγκεκριμένες μηχανές συνιστούν τον πρωτεύοντα τομέα εφαρμογής διαγνωστικών μεθόδων. Παρατίθενται επίσης στοιχεία που αφορούν την καύση, αλλά και το δυναμοδεικτικό διάγραμμα, το οποίο αποτελεί το βασικό ενδεικτικό στοιχείο της λειτουργικής κατάστασης ενός κινητήρα.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται η επιτήρηση της λειτουργίας και η διάγνωση βλαβών του κινητήρα Diesel, ενώ απαριθμούνται οι σχετικές τεχνικές που έχουν



αναπτυχθεί, οι βασικές τους αρχές και αναγκαιότητα χρήσης τους. Αναδεικνύεται ακόμα η σημασία που έχει για τη διαγνωστική διαδικασία η πίεση καύσης.

Στο Κεφάλαιο 4 λαμβάνει χώρα εκτενής αναφορά στη μέτρηση της πίεσης εντός του κυλίνδρου, στα μέσα με τα οποία μπορεί να διεξαχθεί καθώς και στα στοιχεία εκείνα που συμβάλλουν στην επιτυχή εξαγωγή του δυναμοδεικτικού διαγράμματος.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται αναλυτικά το φορητό μετρητικό όργανο που αξιολογείται στην παρούσα εργασία, καθώς και οι λειτουργίες του.

Το Κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει τις πρώτες μετρήσεις που διεξήχθησαν με το συγκεκριμένο φορητό όργανο σε κινητήρα του εργαστηρίου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο Κεφάλαιο 7 εντάσσεται η μετρητική διαδικασία που έλαβε χώρα στον Αυτόνομο Σταθμό Παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος της Χίου. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι μετρήσεις που έγιναν καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υπολογιστική επεξεργασία τους. Επιπροσθέτως, παρατίθενται τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα που παρήχθησαν και επιτελείται σύγκρισή τους με αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν από πιστοποιημένο διαγνωστικό σύστημα που θεωρείται (στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας) πρότυπο.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η παρούσα έρευνα και αποτιμάται τελικώς η δυνατότητα καταγραφής δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων πίεσης με χρήση της απλής φορητής μετρητικής συσκευής.

Η έκθεση συμπληρώνεται με ένα παράρτημα στις τελευταίες σελίδες, όπου παρουσιάζονται τα τεχνικά στοιχεία του φορητού οργάνου μέτρησης της πίεσης καύσης, καθώς και με την παράθεση των βιβλιογραφικών πηγών που χρησιμοποιήθηκαν.

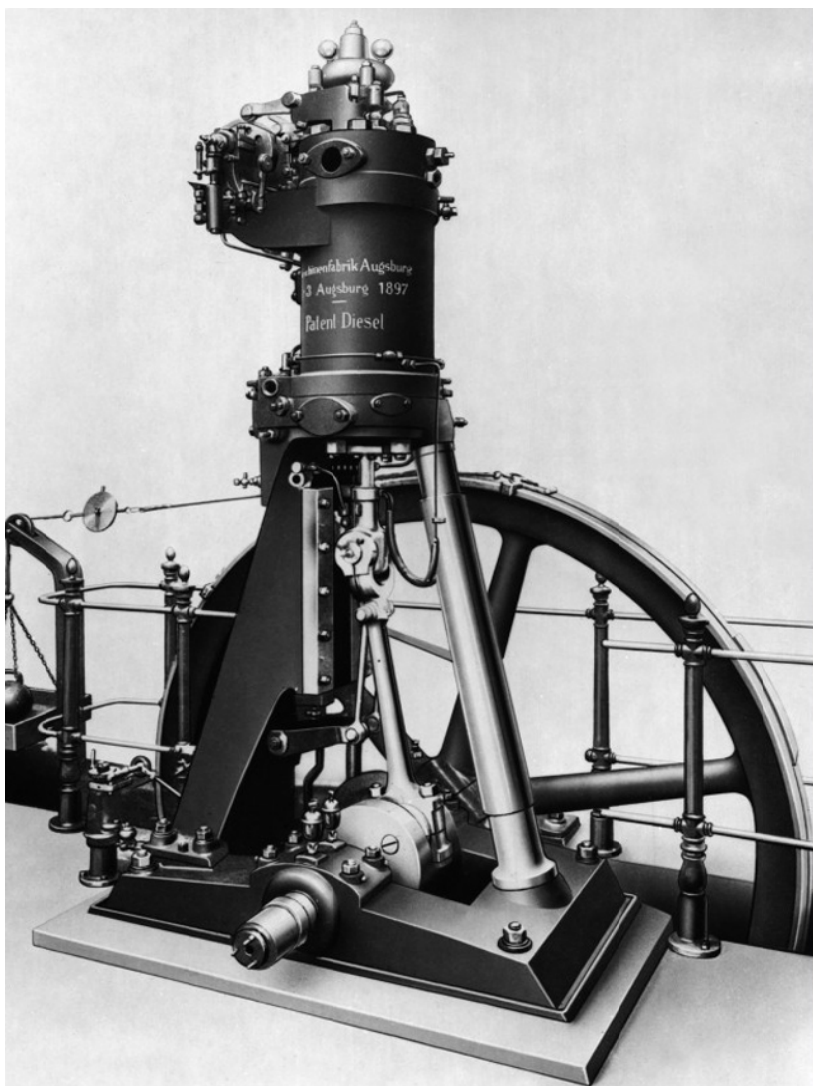


2. Κινητήρες Diesel

2.1 Γενικές Αρχές – Λειτουργία

2.1.1 Εισαγωγή

Ο κινητήρας Diesel αποτελεί μια εμβολοφόρο μηχανή εσωτερικής καύσης, η οποία μετατρέπει τη θερμική ενέργεια του καυσίμου σε κινητική ενέργεια. Εφευρέθηκε το 1892 από τον Rudolf Diesel και στην αρχική, αυθεντική πατέντα του η μηχανή Diesel λειτουργούσε σύμφωνα με τον κύκλο Diesel, όπου η έγχυση του καυσίμου γινόταν υπό σταθερή πίεση. Αυτό κατέστη δυνατό με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα (πίεσης $60 \div 80$ bar), χορηγούμενου μέσω ειδικού συμπιεστή, η οποία διευκόλυνε σημαντικά τη λεπτή διασκόρπιση του καυσίμου και έδινε ομαλότατη καύση (πολύ μικρή αύξηση της πίεσης).

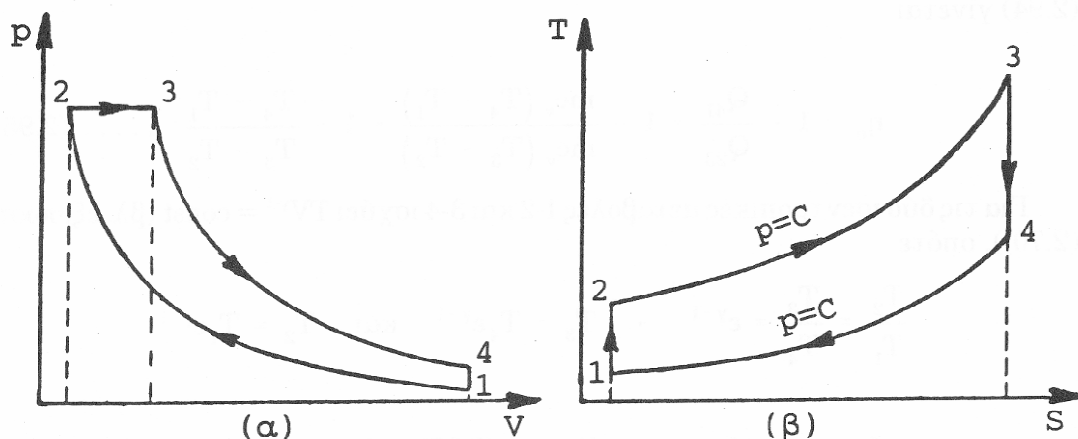


Σχήμα 2.1. Η πρώτη πετρελαιομηχανή του Rudolf Diesel – έτος 1897



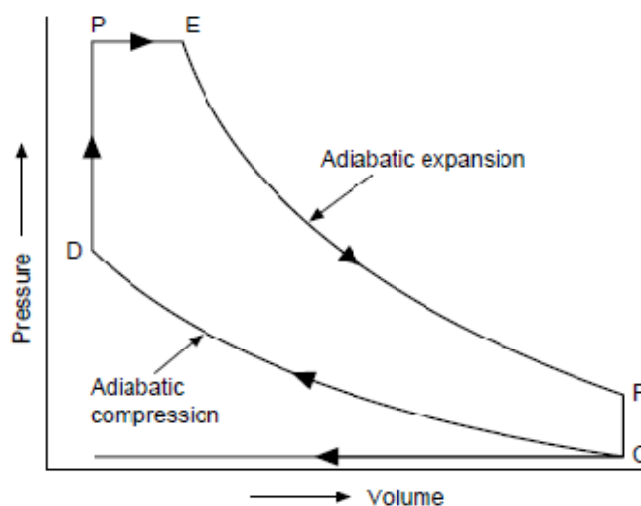
Ο ιδανικός πρότυπος κύκλος αέρα Diesel παρουσιάζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν και αποτελείται από τις εξής διεργασίες:

- 1-2: Ισεντροπική συμπίεση του αέρα, κατά τον βαθμό συμπίεσης $\varepsilon = V_1/V_2$
- 2-3: Πρόσδοση θερμότητας Q_{23} υπό σταθερή πίεση, κατά τον λόγο των όγκων V_3/V_2
- 3-4: Ισεντροπική εκτόνωση του αέρα, μέχρι τον αρχικό όγκο V_1
- 4-1: Αποβολή θερμότητας Q_{23} υπό σταθερό όγκο, για τη συμπλήρωση του κύκλου.



Σχήμα 2.2. Ιδανικός πρότυπος κύκλος αέρα Diesel

Σήμερα ο θεωρητικός κύκλος με βάση τον οποίο λειτουργούν οι μοντέρνοι κινητήρες Diesel εκπροσωπείται καλύτερα από τον μικτό κύκλο που απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



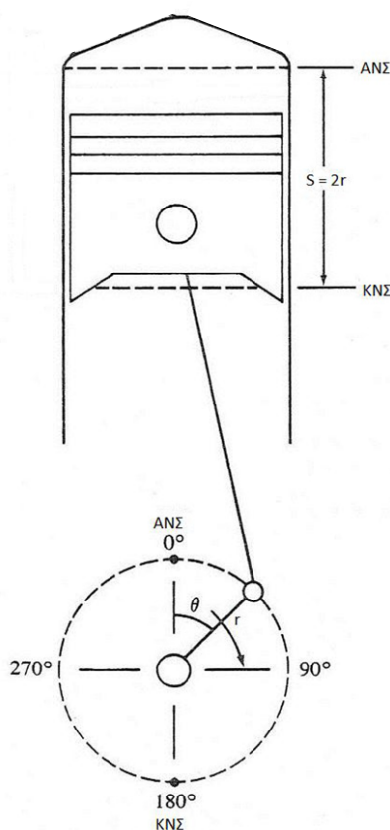
Σχήμα 2.3. Θεωρητικός κύκλος αέρα πραγματικού κινητήρα Diesel

Ξεκινώντας από το σημείο C, ο αέρας συμπιέζεται αδιαβατικά έως το σημείο D. Η έγχυση του καυσίμου ξεκινά στο σημείο D. Η θερμότητα προστίθεται στον κύκλο μερικώς υπό σταθερό όγκο, όπως φαίνεται από την κάθετο DP και μερικώς



υπό σταθερή πίεση, όπως φαίνεται από την οριζόντια ΡΕ. Στο σημείο Ε αρχίζει η αποτόνωση, η οποία συνεχίζεται αδιαβατικά μέχρι το σημείο F. Εκεί η θερμότητα αποβάλλεται υπό σταθερό όγκο στην εξαγωγή καυσαερίων όπως φαίνεται και στην κάθετη FC. Ο ιδανικός βαθμός απόδοσης αυτού του κύκλου λειτουργίας είναι $55\% \div 60\%$.

Η ορθότερη τεχνικά ονομασία του κινητήρα Diesel είναι «κινητήρας καύσης (ή έναυσης) με συμπίεση». Αυτό είναι και το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του που τον διαφοροποιεί από τον κινητήρα Otto, στον οποίο η ανάφλεξη του καυσίμου γίνεται με τη βοήθεια εξωτερικής πηγής θερμότητας (σπινθήρας). Η λειτουργία του Diesel στηρίζεται στην παλινδρομική κίνηση εμβόλου μέσα σε κύλινδρο, όπου βρίσκεται η καύσιμη ύλη, προς παραγωγή μηχανικού έργου. Η παραγόμενη ισχύς μεταφέρεται στο στροφαλοφόρο άξονα μέσω του μηχανισμού του διωστήρα (ή και βάκτρου – διωστήρα).



Σχήμα 2.4. Κινηματικός μηχανισμός εμβόλου – διωστήρα

Σε αυτού του είδους τους κινητήρες έχουμε αναρρόφηση ατμοσφαιρικού αέρα και λίγο πριν τη στιγμή που πρέπει να ξεκινήσει η καύση εγχύεται το καύσιμο απευθείας στον κύλινδρο. Πιο αναλυτικά, για το σχηματισμό του καυσίμου μείγματος, το καύσιμο εισάγεται στον κύλινδρο διασκορπισμένο στη μάζα του ήδη συμπιεσμένου αέρα, υπό την επίδραση ισχυρής πίεσεως, που δημιουργείται από το

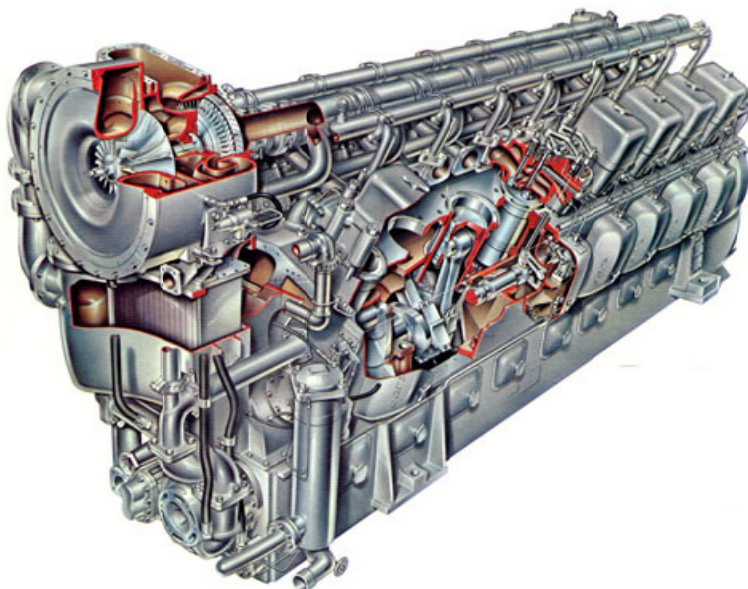


σύστημα αντλίας καυσίμου – εγχυτήρα. Μέσω της εγχύσεως του καυσίμου την κατάλληλη στιγμή στον κύλινδρο, όταν ο αέρας έχει θερμανθεί επαρκώς λόγω της συμπίεσης, δημιουργείται αυτανάφλεξη (αυτόματη ανάφλεξη).

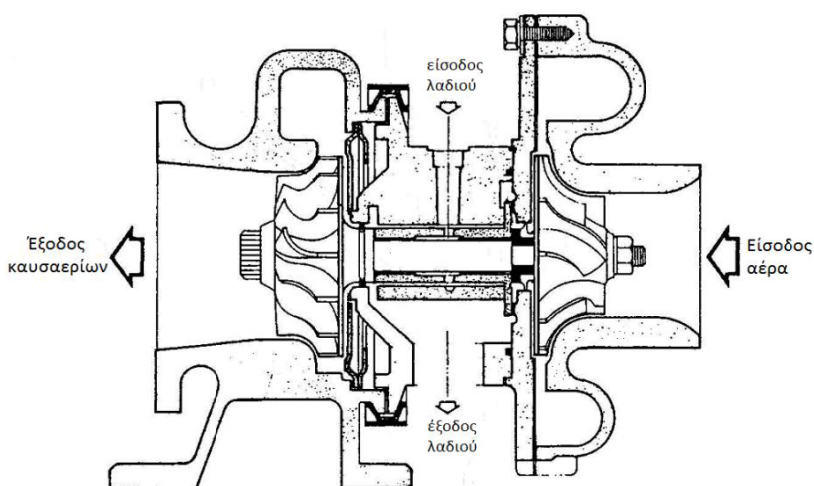
Η ρύθμιση της ισχύος γίνεται ποιοτικά, με έλεγχο της ποσότητας του καυσίμου που εγχέεται σε κάθε κύκλο λειτουργίας, αφού πρακτικά η ποσότητα του αέρα που αναρροφάται σε σταθερές στροφές δεν αλλάζει. Στον κινητήρα Diesel έχουμε την καύση ενός ετερογενούς μείγματος καυσίμου και αέρα (φλόγα διαχύσεως), εφόσον το καύσιμο εγχέεται προς το τέλος της διαδρομής συμπίεσεως. Επισημαίνεται εδώ ότι υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων έγχυσης καυσίμου: το σύστημα μηχανικής έγχυσης και το σύστημα κοινού διανομέα καυσίμου (Common Rail System – CRS). Στον εν λόγω κινητήρα υπάρχει μεγάλη περίσσεια αέρα με αποτέλεσμα η ελάχιστη τιμή του λόγου μαζών αέρα-καυσίμου να είναι υψηλή (18:1 μέχρι και 25:1). Είναι θεμελιώδους σημασίας να υπάρχει περίσσεια αέρα, ώστε στο μικρό χρονικό διάστημα όπου πρέπει να σχηματισθεί το μείγμα, να επιτευχθεί κατά το δυνατόν τέλεια καύση. Αυτό όμως οδηγεί σε μειωμένη συγκέντρωση ισχύος. Στους σύγχρονους κινητήρες Diesel το πρόβλημα αυτό ξεπερνιέται με τη χρήση της υπερπλήρωσης, η οποία αναλύεται παρακάτω.

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στις συγκεκριμένες μηχανές είναι υγρά βαρύτερα της βενζίνης, ανήκουν στην κατηγορία των πετρελαίων και είναι λιγότερο πτητικά και φθηνότερα, όπως για παράδειγμα το αεριέλαιο (καύσιμο Diesel), το ελαφρύ (1500" RED) ή βαρύ (3500" RED) καύσιμο λεβήτων (Μαζούτ). Ακόμη είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και βαρύτερα αυτών κλάσματα του πετρελαίου (residual fuel oil) τα οποία βρίσκονται κυρίως σε ναυτικές εφαρμογές ή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Σήμερα γίνονται μελέτες και καταβάλλονται προσπάθειες αντικατάστασης του πετρελαίου και των μη καθαρών παραγώγων του από καύσιμα «φιλικά» προς το περιβάλλον όπως η βιομάζα, το υδρογόνο, το βιο-Diesel, το LNG – Liquefied Natural Gas (υγροποιημένο φυσικό αέριο) και το LPG – Liquefied Petroleum Gas (υγροποιημένο αέριο πετρελαίου).

Οι κινητήρες Diesel καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως σε επιβατικά οχήματα, φορτηγά, τρένα, πλοία και μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Απαντώνται ως κινητήρες φυσικής αναπνοής (naturally aspirated) αλλά και υπερπληρωμένοι, όπου η υπερπλήρωση μπορεί να επιτευχθεί με χρήση μηχανικού υπερσυμπιεστή (supercharging), ή με μονοβάθμια ή διβάθμια διάταξη συμπιεστή – στροβίλου (στροβιλοϋπερπλήρωση – turbocharging). Ως υπερπλήρωση ορίζεται η αύξηση της πυκνότητας του αέρα εισαγωγής, μέσω της αύξησης της πίεσής του πριν εισέλθει στον κύλινδρο. Εφαρμόζεται συνήθως σε μεγαλύτερους κινητήρες και συμβάλλει στην μείωση του μεγέθους και του βάρους ενός κινητήρα για δεδομένη εξαγόμενη ισχύ (downsizing). Σκοπός επίσης της υπερπλήρωσης είναι η αύξηση της ισχύος ενός δεδομένου κινητήρα χωρίς αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του (downrevving).



Σχήμα 2.5. 4-Χ , V-16 στροβιλο-υπερπληρωμένος κινητήρας Diesel σε τομή 3/4 (διακρίνεται το ζεύγος υπερπλήρωσης)



Σχήμα 2.6. Στρόβιλο-υπερπληρωτής ακτινικού συμπιεστή και στροβίλου

Το βασικό μειονέκτημα των κινητήρων Diesel είναι ο ολόένα και μειούμενος χρόνος που έχει το καύσιμο για να καεί όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Το γεγονός αυτό θέτει ως άνω όριο (μέχρι σήμερα) στους συγκεκριμένους κινητήρες τις 5000 ÷ 5500 rpm . Απαράβατο κανόνα αποτελεί η ολοκλήρωση της καύσης εντός 60° ÷ 70° γωνίας στροφάλου. Επίσης η μέγιστη διάρκεια έγχυσης του καυσίμου δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 35° ÷ 36° γωνίας στροφάλου. Σε αντίθετη περίπτωση το καύσιμο δεν προλαβαίνει να καεί επιφέροντας ιδιαίτερα αρνητικές συνέπειες για τον κινητήρα.

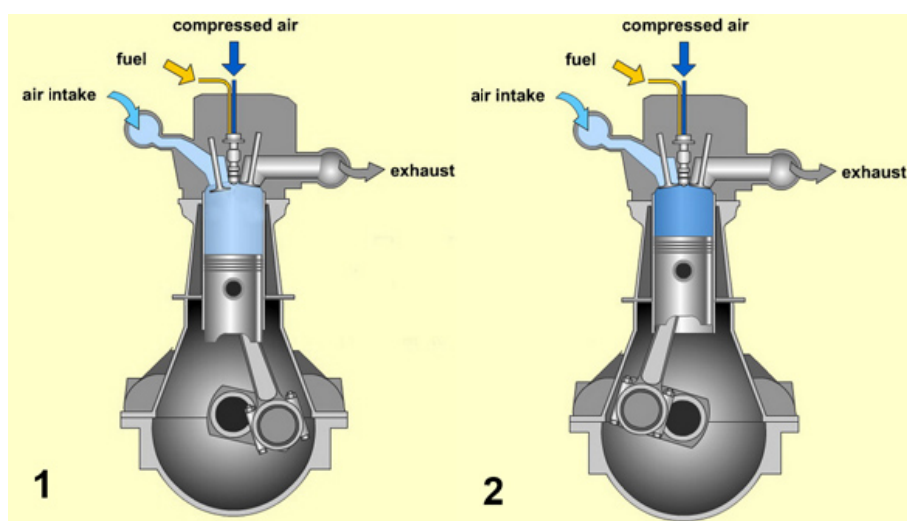
Οι κινητήρες Diesel διακρίνονται σε τετράχρονης (4-Χ) και δίχρονης (2-Χ) λειτουργίας. Οι δύο αυτές κατηγορίες κινητήρων παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω.



2.1.2 Τετράχρονος (4-Χ) κινητήρας

Στους τετράχρονους κινητήρες απαιτούνται τέσσερις διαδρομές εμβόλου, δηλαδή ένας κύκλος λειτουργίας αντιστοιχεί σε 2 πλήρεις περιστροφές της στροφαλοφόρου ατράκτου ή 720° σε γωνία στροφάλου. Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί έναν κύκλο λειτουργίας. Προφανώς, επαναλαμβανόμενοι τέτοιοι κύκλοι παράγουν το επιθυμητό μηχανικό έργο. Κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας έχουμε 4 πλήρεις διαδρομές του εμβόλου ή χρόνους. Οι τέσσερις βασικοί χρόνοι, όπως απεικονίζονται και στα σχήματα 2.7, 2.8 και συγκεντρωτικά στο 2.9 είναι:

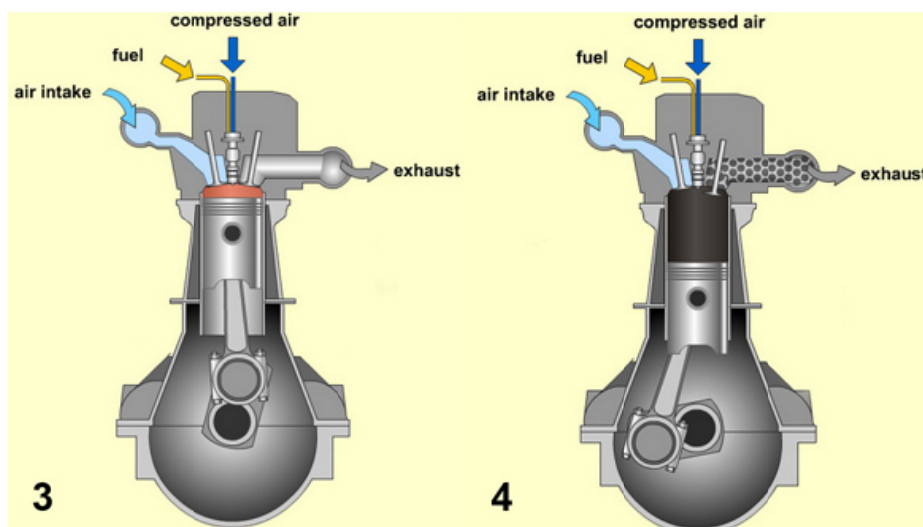
- 1) *χρόνος αναρρόφησης* : ξεκινάει με το έμβολο στο ΑΝΣ (Άνω Νεκρό Σημείο) και ολοκληρώνεται με το έμβολο στο ΚΝΣ (Κάτω Νεκρό Σημείο). Κατά τη διάρκειά του εισάγεται αέρας στον κύλινδρο από τον σχετό εισαγωγής, μέσω των βαλβίδων εισαγωγής. Για να αυξηθεί η αναρροφώμενη μάζα, η βαλβίδα εισαγωγής ανοίγει λίγο πριν το έμβολο ξεκινήσει την κάθοδό του και κλείνει λίγο μετά το ΚΝΣ.
- 2) *χρόνος συμπίεσης* : συμβαίνει όταν οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής είναι κλειστές, καθώς το έμβολο κινείται από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ. Ο αέρας που εισήχθη στον κύλινδρο τώρα συμπιέζεται από το έμβολο με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης (25-55 bar) . Η αυξημένη συμπίεση προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα ($500-700^\circ\text{C}$), η οποία είναι σχεδόν διπλάσια από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου. Ταυτόχρονα εισάγεται την κατάλληλη στιγμή (συνήθως λίγο πριν το άνω νεκρό σημείο – προπορεία $10^\circ \div 30^\circ$) μέσω του εγχυτήρα στο χώρο του κυλίνδρου το καύσιμο. Η χρονική στιγμή της έγχυσης διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την ορθή λειτουργία του κινητήρα και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και η ποιότητα του καυσίμου. Προς το τέλος της διαδικασίας της συμπίεσης, πριν το ΑΝΣ, έχουμε την έναυση της καύσης κάτι που οδηγεί σε έντονη αύξηση της πίεσης μέσα στον κύλινδρο.



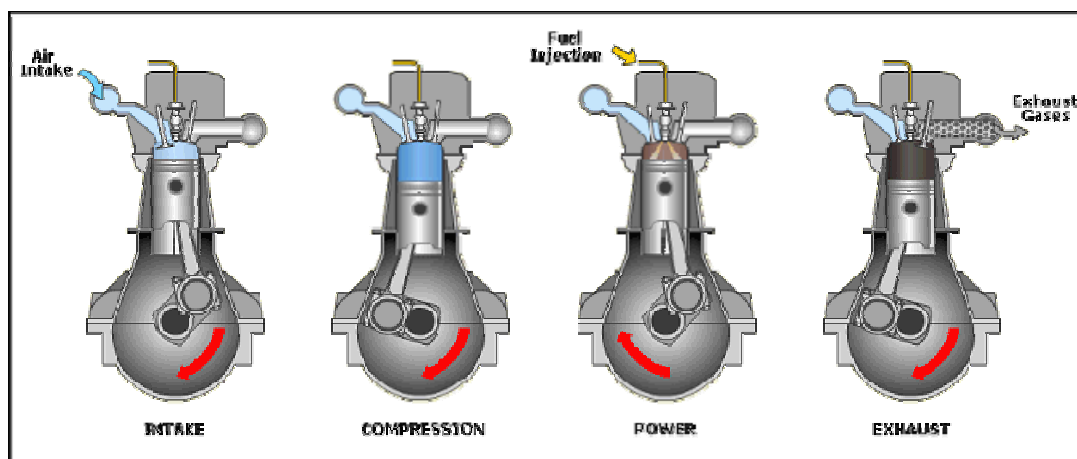
Σχήμα 2.7. Κύκλος λειτουργίας 4-Χ κινητήρα Diesel – χρόνοι (1) & (2)



- 3) *χρόνος καύσης-αποτόνωσης* : ξεκινά με το έμβολο στο ΑΝΣ. Το καύσιμο έχει εγχυθεί υπό πολύ υψηλή πίεση και με τη μορφή σταγονιδίων (ατμοποιημένο). Λαμβάνει χώρα η καύση του μείγματος αέρα-καυσίμου υπό την επίδραση των υψηλών πιέσεων που επικρατούν στο εσωτερικό του κυλίνδρου. Κατά την καύση η πίεση παρουσιάζει απότομη άνοδο (λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της λίγες μοίρες αφού διέλθει του άνω νεκρού σημείου) με συνέπεια να ασκηθεί μια πολύ ισχυρή δύναμη στην ελεύθερη επιφάνεια του εμβόλου ωθώντας το βιαίως προς τα κάτω και αναγκάζοντας κατά συνέπεια τη στροφαλοφόρο άτρακτο να περιστραφεί. Η εξαναγκασμένη αυτή κίνηση παράγει το μηχανικό έργο κατά τη διάρκεια του κύκλου.
- 4) *χρόνος εξαγωγής* : κατά τη διάρκεια του χρόνου εξαγωγής αποβάλλονται τα προϊόντα της καύσης στο περιβάλλον. Προκειμένου να καταστεί αυτό δυνατό ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής και η διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού του κυλίνδρου και του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την κίνηση του εμβόλου (το οποίο ανέρχεται) ωθούν τα καυσαέρια προς τον οχετό εξαγωγής. Προς το τέλος του εν λόγω χρόνου ανοίγει και η βαλβίδα εισαγωγής σε χρονική στιγμή που η πίεση στο εσωτερικό του κυλίνδρου έχει πέσει στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής, ώστε να μην έχουμε ροή των καυσαερίων προς την εισαγωγή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υποβοηθείται η εξαγωγή των καυσαερίων με την ροή του εισερχόμενου αέρα. Τέλος, μετά το ΑΝΣ κλείνει η βαλβίδα εξαγωγής αρχίζοντας έτσι έναν νέο κύκλο λειτουργίας.



Σχήμα 2.8. Κύκλος λειτουργίας 4-Χ κινητήρα Diesel – χρόνοι (3) & (4)



Σχήμα 2.9. Κύκλος λειτουργίας 4-Χ κινητήρα Diesel (όλοι οι χρόνοι)

2.1.3 Δίχρονος (2-Χ) κινητήρας

Οι δίχρονι κινητήρες είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενοι κινητήρες diesel κυρίως στη ναυτική βιομηχανία και στην ηλεκτροπαραγωγή. Εν αντιθέσει με τους 4-Χ κινητήρες στους δίχρονους ένας κύκλος λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια μόνο περιστροφή της στροφαλοφόρου ατράκτου ή σε 360° σε γωνία στροφάλου. Έτσι κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας έχουμε δυο πλήρεις διαδρομές του εμβόλου ή 2 χρόνους. Η εναλλαγή των αερίων στους δίχρονους κινητήρες εμπεριέχει μεγαλύτερη δυσκολία καθώς δεν πραγματοποιείται μέσω βαλβίδων αλλά μέσω θυρίδων εισαγωγής και εξαγωγής (εκτός του δίχρονου κινητήρα με διαμήκη απόπλυση, όπου στο μηχανισμό περιλαμβάνονται και βαλβίδες) οι οποίες «αποκαλύπτονται» όταν το έμβολο κινείται κοντά στο κάτω νεκρό σημείο. Ειδικότερα για την ομαλή εξαγωγή των καυσαερίων (απόπλυση) απαιτείται η χρήση αντλίας αποπλύσεως ή σαρώσεως, η οποία κινείται από τη στροφαλοφόρο δεσμεύοντας έτσι σημαντική ποσότητα ωφέλιμου έργου.

Τα παραπάνω περιγράφονται αναλυτικότερα ακολούθως με τα στάδια – «χρόνους» που περιλαμβάνει κάθε κύκλος λειτουργίας δίχρονου κινητήρα, κατά τη διάρκεια των οποίων λαμβάνουν χώρα και οι τέσσερις διεργασίες του κύκλου: συμπίεση, καύση, εκτόνωση, εξαγωγή καυσαερίων και νέα πλήρωση αέρα. Συγκεκριμένα, ο κύκλος λειτουργίας συνίσταται από:

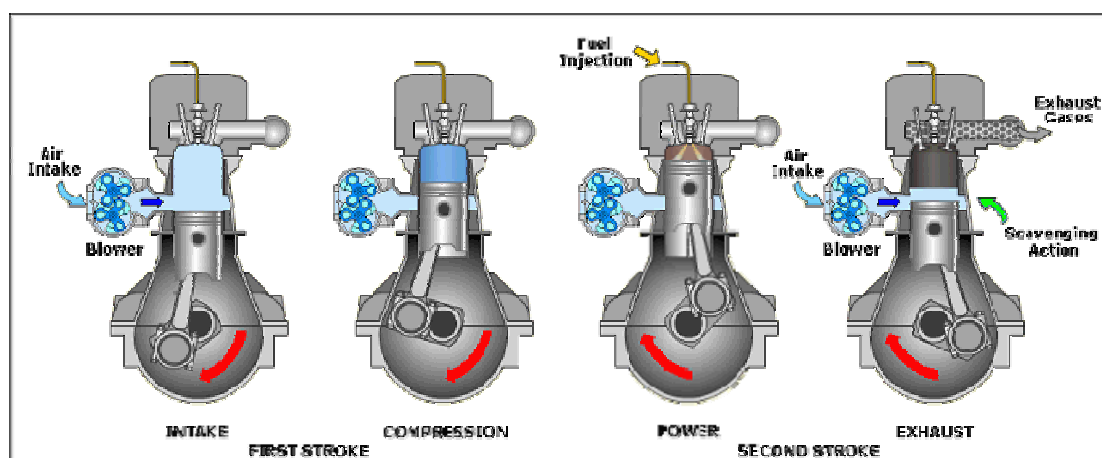
- 1) τη *συμπίεση*, η οποία ξεκινάει όταν το έμβολο ανέλθει αρκετά ώστε να φράξει τις θυρίδες εισαγωγής και εξαγωγής, όπως κατευθύνεται από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ. Καθώς το έμβολο κινείται ανοδικά συμπιέζει τον αέρα που έχει εισέλθει από τις θυρίδες εισαγωγής αυξάνοντας έτσι την πίεση και τη θερμοκρασία του. Λίγες μοίρες πριν το φτάσει στο ΑΝΣ εγχέεται το καύσιμο εντός του κυλίνδρου υπό μορφή μικροσκοπικών σταγονιδίων μέσω



κατάλληλα διαμορφωμένου εγχυτήρα. Το εγχυόμενο καύσιμο αναμειγνύεται με τον αέρα αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία του ενώ ο διασκορπισμός του μέσα στον κύλινδρο συμβάλλει στη γρηγορότερη ατμοποίηση του και καλύτερη ανάμιξη με τον αέρα, ώστε όταν δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες να αρχίσει η έναυση του μείγματος και να ξεκινήσει το φαινόμενο της *κάυσης* (λίγες μοίρες πριν το ΑΝΣ).

- 2) Την *αποτόνωση*, που συμβαίνει κατά την κίνηση του εμβόλου από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ. Τα προϊόντα της καύσης ωθούν το έμβολο προς τα κάτω παράγοντας μηχανικό έργο. Κατά τη διάρκεια της καθοδικής κίνησης του εμβόλου, αρχικά αποκαλύπτονται από την άνω ακμή του οι θυρίδες εξαγωγής έτσι τα *καυσαέρια* ξεκινούν να εγκαταλείπουν το εσωτερικό του κυλίνδρου (*εξαγωγή καυσαερίων*). Στη συνέχεια, αποκαλύπτονται οι θυρίδες εισαγωγής βοηθώντας στην *πλήρωση του κυλίνδρου με νέα ποσότητα γόμωσης* (αέρα). Το έμβολο και οι θυρίδες είναι διαμορφωμένες με κατάλληλο τρόπο ώστε να αποφεύγεται το πέρασμα του εργαζόμενου μέσου απευθείας από την εισαγωγή στην εξαγωγή, ενώ ταυτόχρονα ο νεοεισερχόμενος αέρας ωθεί τα καυσαέρια στον οχετό εξαγωγής. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται απόπλυση (*scavenging*) και πραγματοποιείται, ειδικότερα σε μεγάλους κινητήρες με τη βοήθεια ειδικής αντλίας αποπλύσεως, η οποία παίρνει κίνηση από τη στροφαλοφόρο άτρακτο (κατανάλωση ωφέλιμου έργου) και ωθεί το εργαζόμενο μέσο στο εσωτερικό του κυλίνδρου στον πολύ λίγο χρόνο που είναι διαθέσιμος στους 2-Χ κινητήρες κατά τη διαδικασία της εναλλαγής των αερίων.

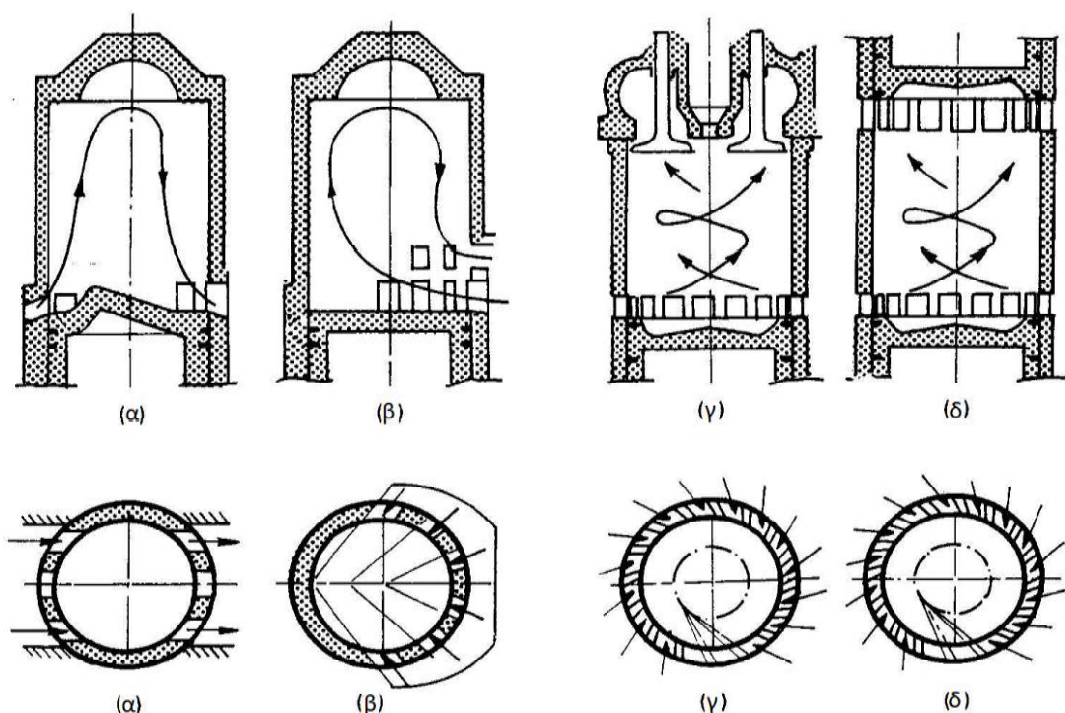
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι «χρόνοι» και οι διεργασίες ενός τυπικού δίχρονου (υπερπληρωμένου) κινητήρα Diesel.



Σχήμα 2.10. Κύκλος λειτουργίας 2-Χ κινητήρα Diesel

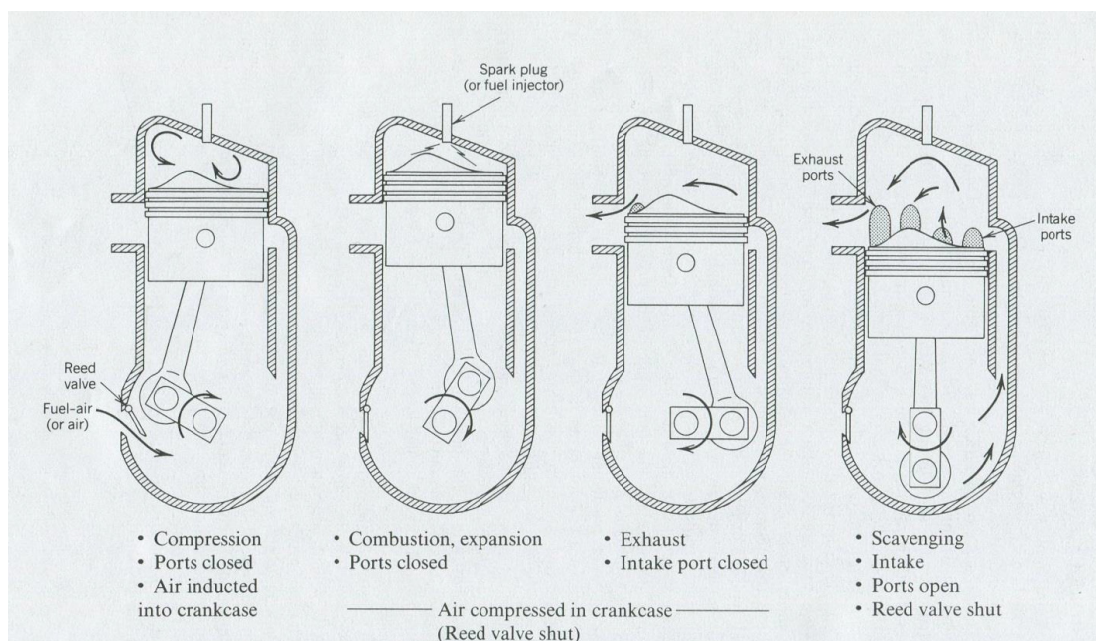


Όπως γίνεται κατανοητό από την περιγραφή που προηγήθηκε η φάση της εναλλαγής των αερίων (εξαγωγή καυσαερίων, εισαγωγή νέου αέρα) γίνεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και αρκετά βίαια, σε αντίθεση με τους τετράχρονους κινητήρες όπου υπάρχει περισσότερος χρόνος για την πιο ομαλή διεξαγωγή των φάσεων. Επίσης η χρησιμοποίηση μέρους του νέου αέρα εισαγωγής για απόπλυση του κυλίνδρου, αλλά και λόγω της επικάλυψης των χρόνων των θυρίδων εισαγωγής και των θυρίδων εξαγωγής των καυσαερίων οδηγεί σε μείωση του βαθμού πληρώσεως του δίχρονου κινητήρα, με αποτέλεσμα να έχει πάντα χειρότερο βαθμό πληρώσεως από τον τετράχρονο. Οι τυπικές μέθοδοι απόπλυσης οι οποίες εφαρμόζονται στους δίχρονους κινητήρες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.11. Διαφορετικές διατάξεις απόπλυσης σε 2-Χ κινητήρες: (α) εγκάρσια, (β) βρογχοειδής, (γ) διαμήκης με βαλβίδες εξαγωγής επί κεφαλής, (δ) διαμήκης αντίθετων εμβόλων

Πολλές φορές συναντάμε και την διαμόρφωση που εικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα, όπου χρέη αντλίας σάρωσης αναλαμβάνει ο στροφαλοθάλαμος μέσω μιας θυρίδας που παρέχει επιπλέον αέρα (αέρας αναρροφάται κατά τη συμπίεση καθώς με την ανοδική πορεία του εμβόλου δημιουργείται υποπίεση στο στροφαλοθάλαμο). Επίσης παρατηρούμε την ιδιαίτερη διαμόρφωση της κορυφής του εμβόλου η οποία συμβάλλει στην απόπλυση.



Σχήμα 2.12. Ειδική διαμόρφωση του στροφαλοθαλάμου με την οποία επιτυγχάνεται καλύτερη εναλλαγή των αερίων

2.2 Πλεονεκτήματα του κινητήρα Diesel

Ο κινητήρας Diesel παρουσιάζει αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι του Otto και γι' αυτό το λόγο άλλωστε η χρήση του έχει επικρατήσει σχεδόν ολοκληρωτικά σε εφαρμογές όπου απαιτούνται βαρείς τύποι κινητήρων (στους οποίους αναφέρεται κατά κύριο λόγο η παρούσα εργασία). Παρακάτω αναφέρονται μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα:

- ✓ Ο κινητήρας Diesel παρουσιάζει μεγάλο βαθμό συμπίεσης σε αντίθεση με τον Otto, όπου υπάρχει περιορισμός λόγω του κινδύνου εμφάνισης κρουστικής καύσης. Κατά τα γνωστά, όσο μεγαλύτερος λόγος συμπίεσης επιτυγχάνεται τόσο βελτιώνεται ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα και μειώνεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου.
- ✓ Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα Diesel εξαρτάται σε μικρό βαθμό από το φορτίο στο οποίο λειτουργεί, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει καλούς βαθμούς απόδοσης σε όλα σχεδόν τα φορτία. Αντίθετα στον κινητήρα Otto ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από το φορτίο με αποτέλεσμα να είναι αρκετά χαμηλός όταν λειτουργεί σε χαμηλά φορτία.
- ✓ Παρόλο που θεωρητικά η βενζίνη (χρήση στους Otto) έχει μεγαλύτερη θερμική απόδοση σε σύγκριση με το καύσιμο Diesel, στην πράξη συμβαίνει το αντίθετο, καθώς για να επιτευχθεί η ίδια τιμή έργου στους Diesel απαιτείται μικρότερη ποσότητα καυσίμου, γεγονός που συνεπάγεται μικρότερη κατανάλωση. Υστερούν δηλαδή στον τομέα της ειδικής ισχύος (KW/lt) αλλά υπερτερούν στην



ειδική κατανάλωση καυσίμου (απόδοση/κατανάλωση). Στο θέμα της μικρότερης κατανάλωσης των Diesel μεγάλο ρόλο λαμβάνει η εμφάνιση της μέγιστης τιμής της ισχύος σε μικρότερο εύρος στροφών σε σχέση με τους βενζινοκινητήρες.

- ✓ Και από πλευράς θερμοδυναμικής απόδοσης, οι Diesel υπερέχουν των βενζινοκινητήρων. Λόγω της υψηλότερης σχέσης συμπίεσης, η οποία μπορεί να ξεπερνά το 20:1 σε αντίθεση με την 8-12:1 των βενζινοκινητήρων, η δομή του μπλοκ στους Diesel είναι πιο στιβαρή προσφέροντας καλύτερο βαθμό θερμοαγωγιμότητας.
- ✓ Η ενισχυμένη αρχιτεκτονική των κινητήρων Diesel που αναφέρεται παραπάνω μεταφράζεται σε αυξημένο βάρος, αλλά το συγκεκριμένο πρόβλημα καλύπτεται έμμεσα λόγω της βραδύτερης απαγωγής της θερμότητας που προσφέρει καλύτερο θερμοδυναμικό συντελεστή (30-36%) έναντι των βενζινοκινητήρων (20-25%).
- ✓ Όσον αφορά τη περιβαλλοντική ρύπανση ο κινητήρας Diesel υστερεί ως προς τον Otto στις εκπομπές αιθάλης ενώ οι εκπομπές NOx είναι παρόμοιες για τους δύο κινητήρες. Ωστόσο οι εκπομπές CO στον κινητήρα Diesel είναι αισθητά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες στον Otto και αυτό οφείλεται στην μεγάλη περίσσεια αέρα με την οποία λειτουργεί.
- ✓ Τέλος, ο κινητήρας Diesel χρησιμοποιεί καύσιμο λιγότερο πτητικό της βενζίνης, το οποίο είναι φθηνότερο. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιεί και σχετικά βαριά καύσιμα που έχουν χαμηλό κόστος. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τον καλύτερο βαθμό απόδοσης του κινητήρα Diesel τον καθιστά την οικονομικότερη των χρησιμοποιούμενων σήμερα θερμικών μηχανών.

2.3 Σύγκριση δίχρονων και τετράχρονων κινητήρων Diesel

Χρήσιμη κρίνεται εδώ μια περιεκτική σύγκριση των δίχρονων κινητήρων Diesel έναντι των αντίστοιχων τετράχρονων. Επιχειρείται με αυτόν τον τρόπο να αναδειχθούν τα προτερήματα της μιας ή της άλλης μηχανής στα πλαίσια της αναφοράς του συγκεκριμένου κεφαλαίου στους κινητήρες Diesel.

Πλεονεκτήματα δίχρονων (2-Χ) κινητήρων

- ✓ Σε μια δίχρονη μηχανή Diesel το αποδιδόμενο ανά κύκλο ωφέλιμο έργο, συγκριτικά με μια τετράχρονη μηχανή, είναι μεγαλύτερο (θεωρητικά το διπλάσιο από το ωφέλιμο έργο που αποδίδεται από μια τετράχρονη μηχανή με τις ίδιες διαστάσεις). Αυτό κυρίως οφείλεται στο ότι κάθε κύλινδρος μιας τετράχρονης μηχανής παράγει έργο ανά τέσσερις διαδρομές του εμβόλου, ενώ κάθε κύλινδρος μιας δίχρονης παράγει έργο ανά δύο διαδρομές του εμβόλου.



- ✓ Οι δίχρονοι μηχανές χαρακτηρίζονται επίσης για την απλότητα τους, καθώς ο αριθμός των βαλβίδων είναι μικρότερος ή και δεν υπάρχουν καθόλου βαλβίδες, σε αντίθεση με τις τετράχρονες που έχουν απαραίτητα βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής, κάτι που τις κάνει πιο πολύπλοκες.
- ✓ Τέλος, σε μια δίχρονη μηχανή δεδομένων διαστάσεων η ροπή στρέψεως είναι πιο ομοιόμορφη από τη ροπή στρέψεως μιας τετράχρονης. Αυτό συμβαίνει γιατί στην τετράχρονη αποδίδεται έργο ανά δύο περιστροφές του στροφάλου ενώ στην δίχρονη ανά μία περιστροφή.

Μειονεκτήματα δίχρονων (2-Χ) κινητήρων

- * Στις δίχρονες μηχανές υπάρχουν δυσκολίες στην απόπλυση του κυλίνδρου από τα καυσαέρια και γι' αυτό διατηρούνται επί ορισμένο χρόνο συγχρόνως ανοιχτές οι θυρίδες εξαγωγής και σαρώσεως. Αντίθετα στις τετράχρονες μηχανές τα καυσαέρια οδηγούνται στην εξαγωγή πιο εύκολα και απλά μέσω εξώθησης.
- * Η διάρκεια της εκτόνωσης των καυσαερίων σε κάθε κύλινδρο ενός δίχρονου κινητήρα είναι συνήθως μικρότερη από την αντίστοιχη εκτόνωση σε κάθε κύλινδρο ενός τετράχρονης, γεγονός που επηρεάζει ελαφρά το βαθμό απόδοσης της μηχανής.
- * Στους δίχρονους κινητήρες υπάρχει περιορισμένος χρόνος για την εκτέλεση των διαφόρων φάσεων λειτουργίας, κάτι που δεν συμβαίνει στους τετράχρονους, όπου όλες οι φάσεις (π.χ. σάρωση, εξαγωγή) διαρκούν περισσότερο.
- * Τέλος, οι δίχρονες μηχανές υφίστανται μεγαλύτερες (σε σύγκριση με τις τετράχρονες) καταπονήσεις των δομικών τμημάτων, οι οποίες συνεπάγονται δυσκολίες στην απαγωγή της θερμότητας.

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι δίχρονοι κινητήρες Diesel προτιμούνται συνήθως σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές ως βραδύστροφες μηχανές μεγάλης ισχύος (λ.χ. στη ναυσιπλοΐα και την ηλεκτροπαραγωγή), σε αντίθεση με τις τετράχρονες που μπορούν να λειτουργούν σε αρκετά υψηλές στροφές αλλά παράγουν συνήθως μικρότερη ισχύ ανά κύλινδρο από τις δίχρονες (ευρύτατη χρήση στην αυτοκίνηση).

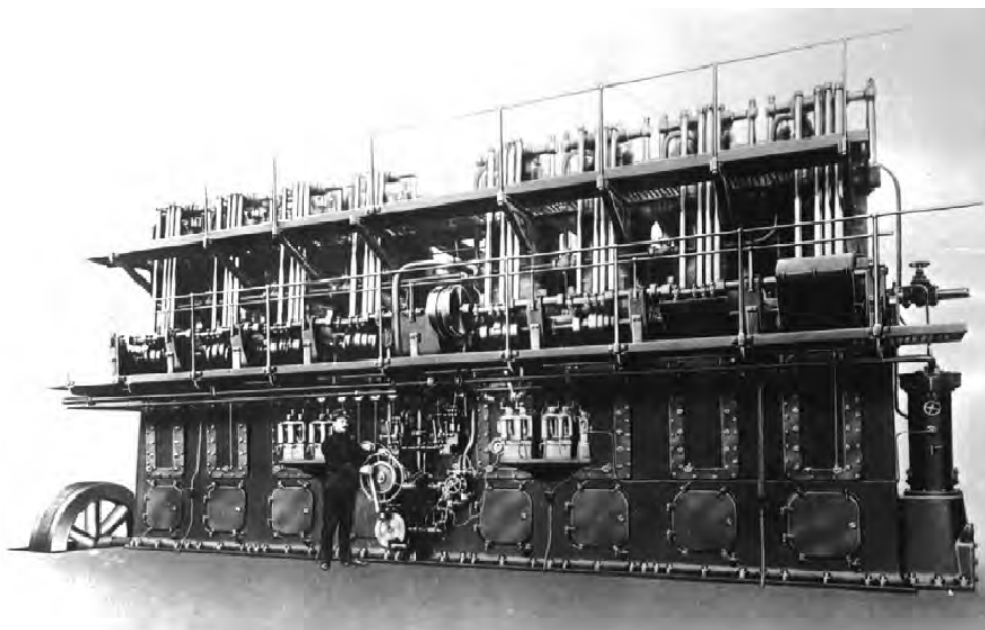


2.4 Δίχρονος ναυτικός κινητήρας Diesel

2.4.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Η συσκευή που μελετάται στην παρούσα εργασία έχει δυνατότητα εφαρμογής κατά κύριο λόγο σε βραδύστροφους και μεσόστροφους κινητήρες Diesel λόγω του μεγέθους τους και της δυνατότητας λήψης διαγραμμάτων πίεσης από τον εξαεριστικό κρουνό που υπάρχει πάντα σε κάθε κύλινδρο. Κρίνεται έτσι σκόπιμη η εκτενέστερη αναφορά στους δίχρονους κινητήρες Diesel, οι οποίοι έχουν επικρατήσει στις μέρες μας ως το κύριο σύστημα πρόωσης πλοίων, με ευρύτατη επίσης χρήση στην ηλεκτροπαραγωγή.

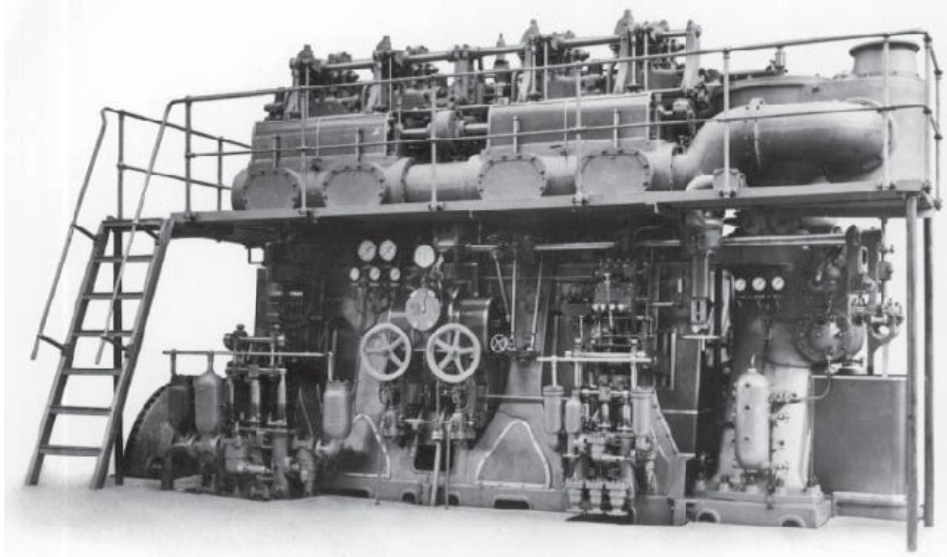
Η ανακάλυψη του κινητήρα Diesel υπήρξε καθοριστική για την ανάπτυξη της ναυτιλίας. Εκτόπισε την παλινδρομική ατμομηχανή, η οποία σήμερα δεν κατασκευάζεται για καμία απολύτως εφαρμογή. Το 1903 τοποθετήθηκε πετρελαιοκινητήρας για πρώτη φορά σε πλοίο (το ρωσικό τάνκερ νάφθας Vandal). Το πρώτο μεγάλο πλοίο με εγκατεστημένο κινητήρα Diesel ήταν το Romagna 678 τόνων που ναυπηγήθηκε το 1910 στα ναυπηγεία Cantieri Navali Riuniti, διαθέτοντας δύο τετρακύλινδρους κινητήρες Sulzer των 280 KW έκαστος, με διάμετρο εμβόλου 310 mm, διαδρομή 460 mm και ταχύτητα περιστροφής 250 στροφές/λεπτό. Δύο χρόνια αργότερα, το 1912, λαμβάνει χώρα η εγκατάσταση πετρελαιοκινητήρα για πρώτη φορά σε ωκεανοπόρο εμπορικό πλοίο από την εταιρία Burmeister & Wain Shipyard, στη Δανία. Ήταν το πλοίο MS Selandia, το οποίο πραγματοποίησε στη συνέχεια ταξίδι 20.000 ναυτικών μιλίων από την Κοπεγχάγη στην Άπω Ανατολή (Μπανγκόκ, Ταϊλάνδη) με τους δύο εγκατεστημένους τετράχρονους, οκτακύλινδρους κινητήρες του (με 530 mm διάμετρο εμβόλου και 730 mm διαδρομή), που επέδιδαν 920 KW έκαστος στις 140 rpm.



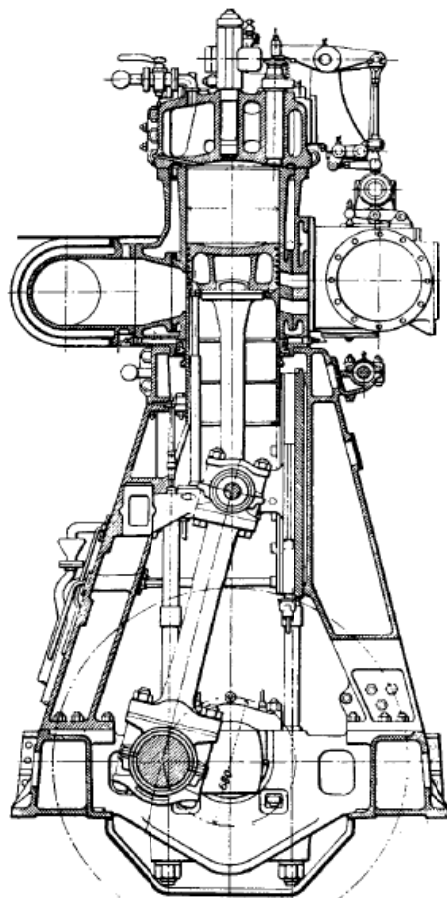
Σχήμα 2.13. Ο ένας από τους δύο κινητήρες Burmeister & Wain DM8150X που ήταν επιφορτισμένοι (1912) με την πρόωση του πρώτου Selandia (MAN B&W Diesel)



Λίγους μήνες μετά το Selandia, τέθηκε σε υπηρεσία το φορτηγό/επιβατικό πλοίο Monte Penedo από την Hamburg – South America Line. Ήταν το πρώτο μεγάλο ποντοπόρο πλοίο που κινούνταν με δίχρονους κινητήρες Diesel. Καθένας από τους δύο τετρακύλινδρους κινητήρες Sulzer 4S47 που χρησιμοποιούνταν για την πρόωση είχε 470 mm διάμετρο εμβόλου, 680 mm διαδρομή εμβόλου και απέδιδε 625 KW στις 160 rpm.



Σχήμα 2.14. Κινητήρας Sulzer 4S47 του ποντοπόρου πλοίου Monte Penedo (1912)



Σχήμα 2.15. Ο Κινητήρας Sulzer 4S47 σε τομή



Η ραγδαία ανάπτυξη των ναυτικών μηχανών τα τελευταία χρόνια έστρεψε το ενδιαφέρον στην κατασκευή αργόστροφων δίχρονων κινητήρων μεγάλης διαμέτρου εμβόλου, μεγαλύτερου βαθμού συμπίεσης, εφοδιασμένων με στροβιλοϋπερπληρωτές υψηλής πίεσης και υψηλού βαθμού απόδοσης. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης των μηχανών αυτών υπερβαίνει πλέον το 54% , ενώ ταυτόχρονα αυξήθηκε ο βαθμός απόδοσης των ελίκων με τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής τους, φτάνοντας μέχρι και τις 55 στροφές/λεπτό. Ο ισχυρότερος σήμερα ναυτικός κινητήρας στον κόσμο είναι ο 14-κύλινδρος Wärtsilä RT-flex96C. Αποτελεί έναν δίχρονο βραδύστροφο στροβιλοϋπερπληρωμένο κινητήρα Diesel, σχεδιασμένο από την φινλανδική κατασκευαστική εταιρία Wärtsilä Corporation. Διαθέτει έμβολα διαμέτρου 960 mm έκαστο, διαδρομή εμβόλου 2500 mm και η ισχύς που αποδίδει φτάνει τα 80.080 KW (108.920 bhp) στις 102 rpm.



Σχήμα 2.16. Ο 14-κύλινδρος Wärtsilä RT-flex96C (Hyundai Heavy Industries)

Η μελλοντική έρευνα στους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες στρέφεται προς τη βελτίωση της καύσης των βαρέων καυσίμων, στη μείωση των εκπομπών ρύπων και στη χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Παραμένει επίσης αυξημένο το ερευνητικό ενδιαφέρον και στη βελτίωση του βαθμού απόδοσης, την αύξηση της αξιοπιστίας με αντίστοιχη μείωση των αναγκών συντήρησης και του κόστους λειτουργίας. Τέλος, ανάμεσα στους κυριότερους στόχους είναι και η επέκταση του ηλεκτρονικού ελέγχου λειτουργίας του κινητήρα με σκοπό να επιτευχθεί η βέλτιστη και απροβλημάτιστη λειτουργία του. Με την σημερινή τεχνολογία ο ηλεκτρονικός έλεγχος λειτουργίας του κινητήρα παρέχει $1\pm 2\%$ μικρότερη κατανάλωση καυσίμου καθώς και πιο καθαρή διαδικασία καύσης με λιγότερο επιβλαβείς εκπομπές ρύπων,



σε μικρά και μεσαία φορτία. Επιπλέον, ο ηλεκτρονικός έλεγχος μπορεί να οδηγήσει στο μέλλον σε περεταίρω μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και είναι το μέσο με το οποίο θα ικανοποιηθούν μελλοντικές απαιτήσεις και περιορισμοί σε επιδόσεις και εκπομπές ρύπων αντίστοιχα. Τέλος, η εν λόγω εποπτεία του κινητήρα προσφέρει και ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης σε περίπτωση δυσλειτουργίας, πράγμα που έχει μεγάλη σημασία για την ασφάλεια του πληρώματος του πλοίου, την ομαλή πλεύση του, αλλά και το κόστος λειτουργίας (ή επισκευής) από πλευράς ιδιοκτήτη.

2.4.2 Γενική περιγραφή

Όπως προαναφέρθηκε, οι δίχρονοι κινητήρες Diesel χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην πρόωση πλοίων. Ο σημαντικότερος λόγος της επικράτησης του κινητήρα Diesel στη ναυτιλία είναι το γεγονός ότι σε υψηλές ισχύς ο βαθμός απόδοσής του μπορεί να ξεπεράσει το 50%. Επίσης οι κινητήρες αυτοί, οι οποίοι είναι μεγάλων διαστάσεων, μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να λειτουργούν ικανοποιητικά με καύσιμα χαμηλής ποιότητας, τα οποία είναι βαριά κλάσματα του πετρελαίου και προέρχονται από τα τελευταία στάδια απόσταξης του, γεγονός που μειώνει κατά πολύ το κόστος λειτουργίας του κινητήρα. Επιπλέον, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η απορριπτόμενη θερμότητα που βρίσκεται στα καυσαέρια και το νερό ψύξης, αυξάνοντας έτσι περαιτέρω το βαθμό απόδοσης. Όλα αυτά έχουν οδηγήσει στη μεγάλη διάδοση του κινητήρα Diesel ως σύστημα πρόωσης εμπορικών ή επιβατικών πλοίων.

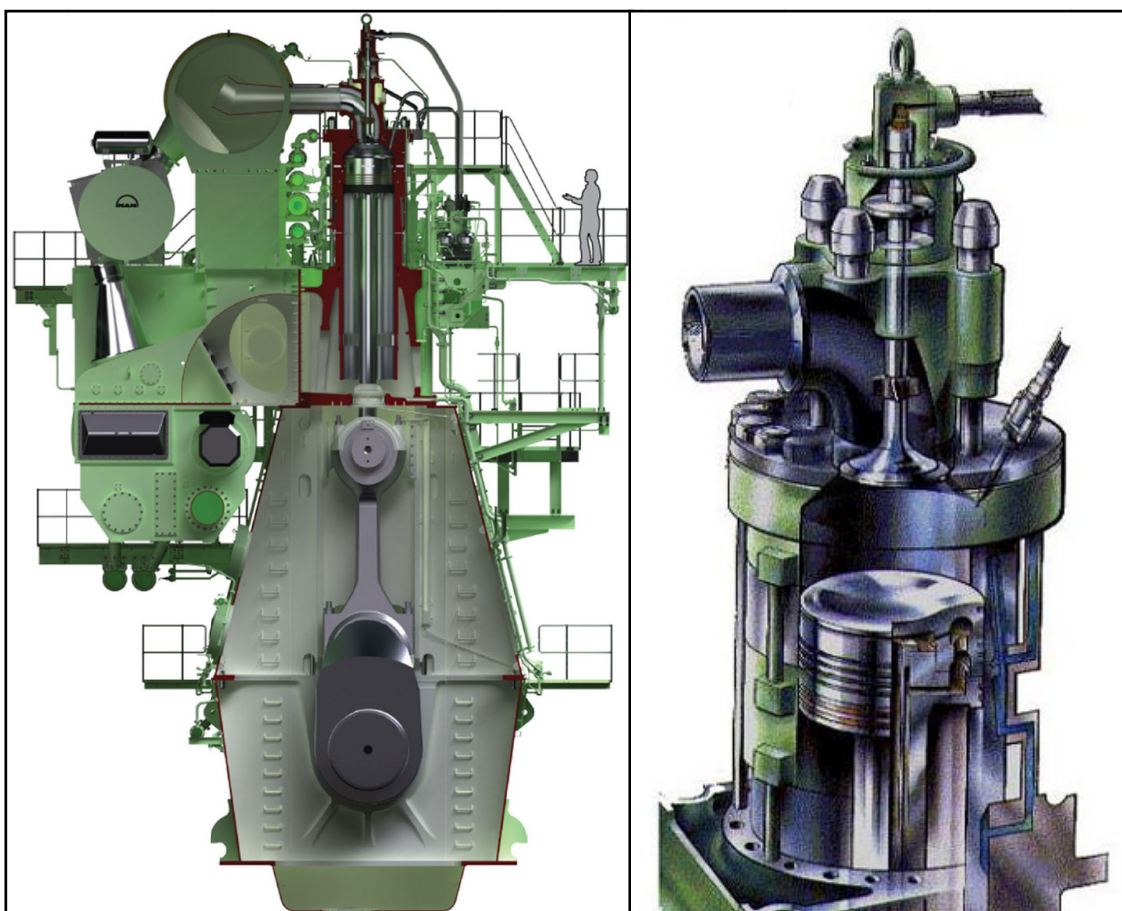
Οι εν λόγω κινητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περεταίρω ως εξής:

- Ανάλογα με τη διάταξη του κινηματικού τους μηχανισμού χωρίζονται σε κινητήρες με διωστήρα-στρόφαλο ή με βάκτρο-διωστήρα-στρόφαλο.
- Ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους διακρίνονται σε:
 - ❖ Βραδύστροφους, στους οποίους η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής δεν ξεπερνά τις 300rpm.
 - ❖ Μεσόστροφους, οι οποίοι στρέφονται μεταξύ 300 και 900 rpm.
 - ❖ Ταχύστροφους, στους οποίους περιλαμβάνεται κάθε κινητήρας με μέγιστη ταχύτητα περιστροφής που ξεπερνά τις 900rpm.
- Φυσικής αναπνοής ή υπερπληρωμένοι.

Ανάλογα με τις ανάγκες πρόωσης και την απαιτούμενη ισχύ για την εκάστοτε εφαρμογή, επιλέγεται ο κατάλληλος κινητήρας Diesel. Όλοι οι κινητήρες Diesel με παραγόμενη ισχύ της τάξεως των εκατοντάδων kW και πάνω είναι υπερπληρωμένοι. Αυτό σημαίνει, πρακτικά, πως η συντριπτική πλειοψηφία των δίχρονων ναυτικών Diesel είναι υπερπληρωμένοι. Σημαντικό ρόλο στην επιλογή του



κατάλληλου κινητήρα παίζει και η ταχύτητα περιστροφής. Ταχύστροφοι κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως είναι αναμενόμενο, αφού τα αδρανειακά φαινόμενα σε κινητήρες πολύ μεγάλου μεγέθους επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την κατασκευή και τη λειτουργία τους. Έτσι, στις περιπτώσεις της πρόωσης μεγάλων πλοίων με μεγάλες απαιτήσεις σε ισχύ χρησιμοποιούνται βραδύστροφοι ή μεσόστροφοι κινητήρες. Επιπροσθέτως, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής προσαρμόζεται και το μέγεθος του κινητήρα επηρεάζοντας έτσι το μέγεθος και τη μορφή του μηχανοστασίου, όπως στενό και ψηλό ή πιο χαμηλό και μακρύ, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό στη σχεδίαση του πλοίου, ανάλογα τη χρήση του.



Σχήμα 2.17. Σχηματική απεικόνιση σε τομή τυπικού δίχρονου βραδύστροφου κινητήρα και σύγκριση με το μέγεθος ενός ανθρώπου

Σχήμα 2.18. Σχηματική απεικόνιση σε τομή συστήματος κυλίνδρου από τυπικό δίχρονο βραδύστροφο κινητήρα (MAN B&W MC Series)

Αξίζει εδώ να αναφερθούν και άλλα δύο χαρακτηριστικά του ναυτικού Diesel, που είναι ο τρόπος σύνδεσής του με την έλικα και ο τρόπος ψύξης του. Ένας τέτοιος κινητήρας μπορεί να συνδεθεί με την έλικα είτε απευθείας, είτε με τη χρήση μειωτήρα και συμπλέκτη. Το γεγονός ότι η έλικα θα πρέπει να μπορεί να κινείται και προς τις δύο κατευθύνσεις σημαίνει πως στην περίπτωση της απευθείας



σύνδεσης θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα αναστροφής της φοράς περιστροφής του κινητήρα, αλλιώς αυτό γίνεται με τη χρήση του μειωτήρα και του συμπλέκτη. Όσον αφορά την ψύξη ενός ναυτικού Diesel, αυτή γίνεται αποκλειστικά με νερό το οποίο μάλιστα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάκτηση της θερμότητας που βρίσκεται σε αυτό.

2.4.3 Κύκλος λειτουργίας

Στον δίχρονο κινητήρα, ο πλήρης κύκλος λειτουργίας κάθε κυλίνδρου ολοκληρώνεται σε δύο παλινδρομικές διαδρομές του εμβόλου, δηλαδή σε μία πλήρη περιστροφή του στροφάλου (360° γωνίας στροφάλου). Η αναλυτική περιγραφή των δύο χρόνων λειτουργίας θα βασιστεί σε ναυτική βραδύστροφη υπερπληρωμένη μηχανή. Η υπερπλήρωση, εκτός από την αύξηση της συγκέντρωσης ισχύος, μειώνει σημαντικά την ειδική κατανάλωση καυσίμου. Επιτυγχάνεται μέσω ενός ανεξάρτητου στροβιλοϋπερπληρωτή, που λειτουργεί βάσει ενός ανοιχτού κύκλου αεριοστρόβιλου, στον οποίο ο κύλινδρος μπορεί να θεωρηθεί ως ο θάλαμος καύσης. Ο αέρας και εν συνεχεία τα καυσαέρια ακολουθούν μια διαδρομή μέσα στον κύλινδρο μέσω περιφερειακών θυρίδων, προσαρμοσμένων στο χιτώνιο και μίας βαλβίδας εξαγωγής που είναι τοποθετημένη στο πώμα του κυλίνδρου (ευθύγραμμη σάρωση). Επίσης, οι εγχυτήρες είναι συμμετρικά τοποθετημένοι στο πώμα. Στο εσωτερικό του κυλίνδρου παλινδρομεί το έμβολο, το οποίο συνδέεται, μέσω του βάκτρου και του ζυγώματος, με τον διωστήρα, και αυτός με τη σειρά του με τον στροφαλοφόρο άξονα.

Διακρίνονται δύο χρόνοι τους οποίους εξ' ορισμού χρειάζονται οι δίχρονοι κινητήρες για να ολοκληρώσουν τον πλήρη κύκλο λειτουργίας τους. Ξεκινώντας, το έμβολο βρίσκεται λίγο πριν το ΑΝΣ (TDC – Top Dead Centre), αφού έχει συμπιέσει τον εισερχόμενο αέρα, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία και η πίεση του αέρα εντός του επιζήμιου όγκου να είναι αρκετά υψηλές, ώστε να μπορεί το εγχυόμενο καύσιμο να αυταναφλεγεί. Όταν το έμβολο φτάνει 25° - 10° (ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής) πριν το ΑΝΣ (ΠΑΝΣ) ψεκάζεται το καύσιμο Diesel μέσα στον κύλινδρο, και ακολουθεί η καύση που διαρκεί 30° - 50°. Η καύση του μείγματος αέρα-πετρελαίου ελευθερώνει σημαντικά ποσά θερμότητας, αυξάνοντας περεταίρω τη θερμοκρασία και την πίεση μέσα στον κύλινδρο. Η ιδιαίτερα αυξημένη πίεση των καυσαερίων ωθεί το έμβολο προς το ΚΝΣ. Από το πέρας της καύσης μέχρι και 95° - 110° μετά το ΑΝΣ (ΜΑΝΣ), διαρκεί η εκτόνωση των παραγόμενων από την καύση αερίων. Κατά τη φάση της εκτόνωσης, λαμβάνει χώρα και η απόδοση του ωφέλιμου έργου. Καθώς το έμβολο κατεβαίνει μεταδίδει την κίνηση στο διωστήρα ο οποίος με τη σειρά του κινεί το στρόφαλο, μετατρέποντας την ευθύγραμμη κίνηση του εμβόλου σε περιστροφική. Το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής, (95° - 110° μετά το ΑΝΣ ανάλογα με τον κινητήρα), οριοθετεί το πέρας



της εκτόνωσης, με αποτέλεσμα τα καυσαέρια να οδηγούνται στον οχετό εξαγωγής, πριν οδηγηθούν στον στροβιλοϋπερπληρωτή. Καθώς το έμβολο κατέρχεται προς το ΚΝΣ, $55^\circ - 45^\circ$ πριν φθάσει σε αυτό (ΠΚΝΣ), αποκαλύπτει τις θυρίδες της σάρωσης, με αποτέλεσμα ο εισερχόμενος αέρας της σάρωσης, με πίεση μεγαλύτερη από αυτή που επικρατεί στον κύλινδρο (περίπου 1,2 bar), να ωθεί τα καυσαέρια προς τον οχετό εξαγωγής. Σημειώνεται ότι οι λόγοι, για τους οποίους η πίεση του αέρα σάρωσης είναι μεγαλύτερη από αυτή που επικρατεί στον κύλινδρο, είναι η προπορεία ανοίγματος της βαλβίδας εξαγωγής ως προς την αποκάλυψη των θυρίδων σαρώσεως και η παρουσία του στροβιλοϋπερπληρωτή.

Η κίνηση του εμβόλου από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ αποτελεί τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:

- Έγχυση και καύση (ολοκλήρωση φάσης)
- Εκτόνωση καυσαερίων
- Έναρξη εξαγωγής καυσαερίων
- Έναρξη εισαγωγής αέρα

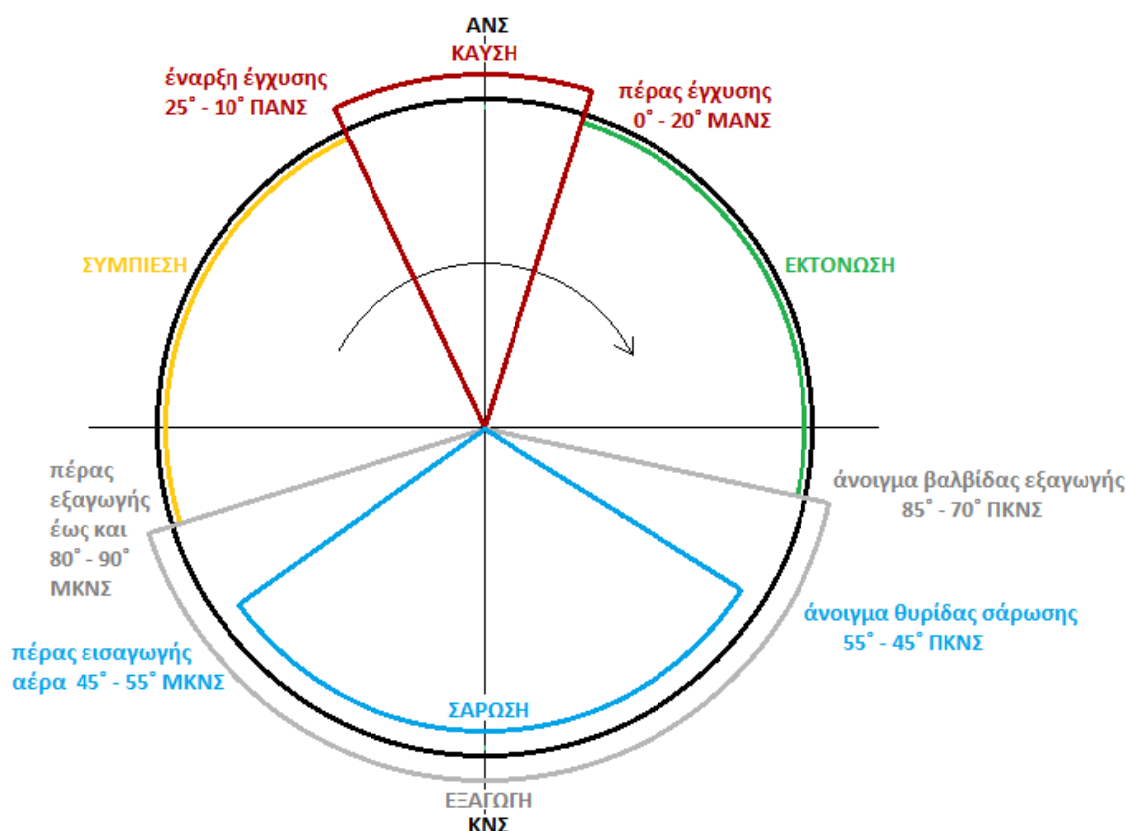
Ο δεύτερος χρόνος ξεκινά με το έμβολο να κινείται από το ΚΝΣ προς το ΑΝΣ, ωθούμενο από τον στροφαλοφόρο άξονα (πρόσληψη έργου από το έμβολο). Όπως και στην κάθοδο, $45^\circ - 55^\circ$ μετά το ΚΝΣ (ΜΚΝΣ), το έμβολο καλύπτει πλήρως τις θυρίδες εισαγωγής, οπότε και παύει η εισαγωγή αέρα στον κύλινδρο. Στη συνέχεια και για όσο διάστημα παραμένει ακόμα ανοιχτή η βαλβίδα εξαγωγής, μαζί με τα καυσαέρια εξέρχεται και μέρος του αέρα σαρώσεως. Σε κάποιες περιπτώσεις η βαλβίδα εξαγωγής κλείνει σχεδόν ταυτόχρονα με τη θυρίδα σάρωσης, ενώ σε άλλες μπορεί να μένει ανοιχτή μέχρι και $80^\circ - 90^\circ$ μετά το ΚΝΣ, ώστε να γίνει αποτελεσματικότερη απόπλυση. Τη στιγμή που κλείνει και η βαλβίδα εξαγωγής και αρχίζει η συμπίεση, πρέπει εντός του κυλίνδρου να υπάρχει, αν είναι δυνατόν, μόνον καθαρός αέρας. Ο συμπιεζόμενος αέρας, λόγω του ειδικού σχήματος της κεφαλής του εμβόλου, του εσωτερικού του πώματος και της κλίσης της θυρίδας εισαγωγής – σαρώσεως, στροβιλίζεται συνεχώς. Ο στροβιλισμός του αέρα και ο ψεκασμός του καυσίμου με τη μορφή νέφους μικροσκοπικών σταγονιδίων έχει ως αποτέλεσμα την κατά το δυνατόν καλύτερη ανάμειξη αέρα – καυσίμου. Η φάση της συμπίεσης διαρκεί μέχρι τη στιγμή της έναρξης έγχυσης του καυσίμου με ταυτόχρονη καύση, όπως περιγράφεται παραπάνω.

Η κίνηση του εμβόλου από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ αποτελεί τον δεύτερο και τελευταίο χρόνο λειτουργίας του δίχρονου ναυτικού κινητήρα Diesel περιλαμβάνοντας τις ακόλουθες φάσεις:

- Ολοκλήρωση εισαγωγής αέρα
- Ολοκλήρωση εξαγωγής και σαρώσεως καυσαερίων
- Συμπίεση
- Έναρξη έγχυσης και καύσης



Η αλληλουχία των γεγονότων κατά τη διάρκεια ενός κύκλου δίχρονου βραδύστροφου υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel φαίνεται στο σχήμα 2.19.



Σχήμα 2.19. Κύκλος και φάσεις λειτουργίας δίχρονου βραδύστροφου υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel

2.4.4 Βραδύστροφοι κινητήρες Diesel

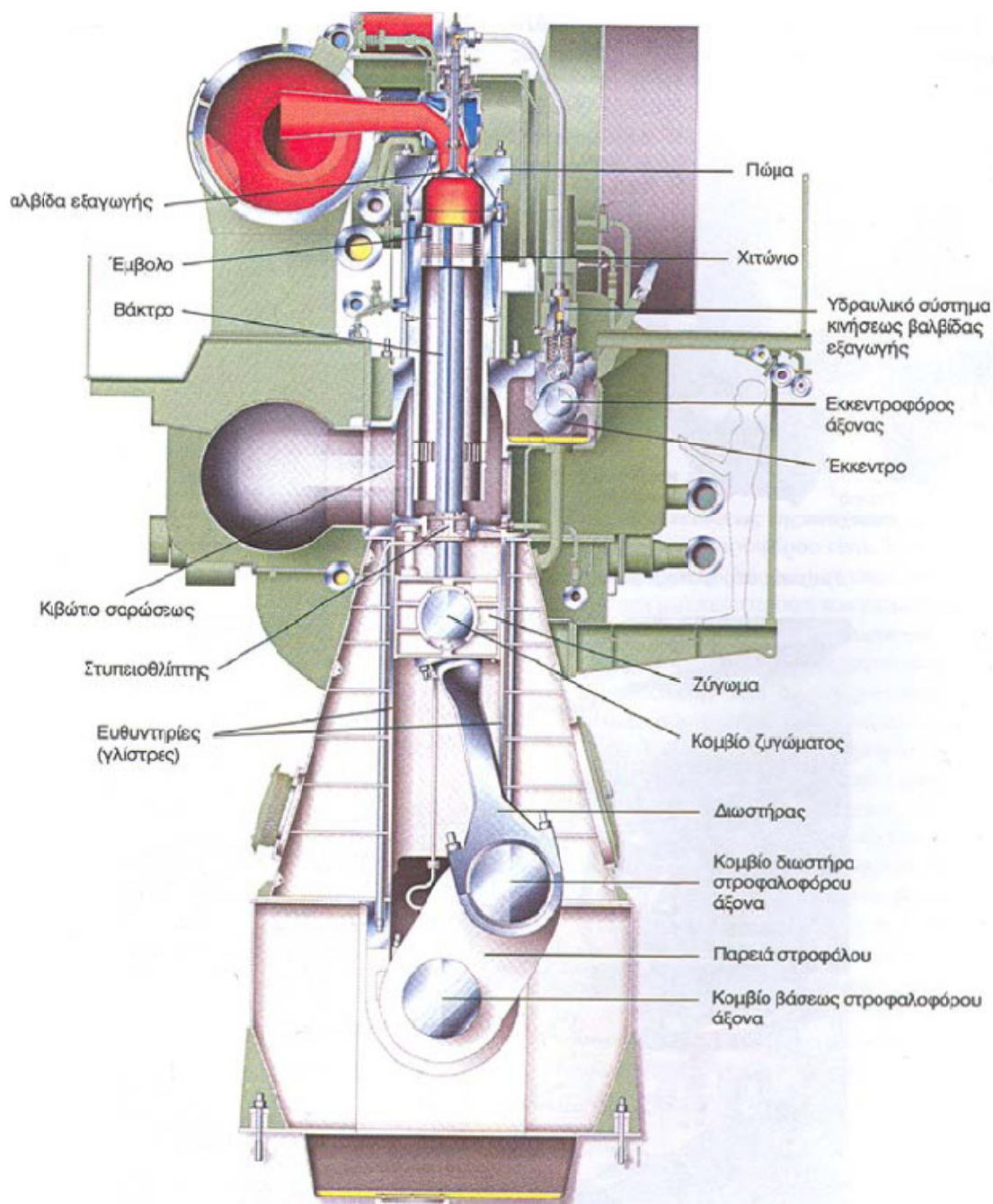
Οι βραδύστροφοι κινητήρες κυριαρχούν στο χώρο της πρόωσης των μεγάλων ποντοπόρων εμπορικών πλοίων (δεξαμενόπλοια, πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, μεταφοράς χύδην φορτίου). Είναι τυπικά δίχρονοι με μεγάλο λόγο διαδρομής – διαμέτρου εμβόλου και διάταξη βάρου με ζύγωμα – διωστήρα – στρόφαλο. Επιπλέον, έχουν θυρίδες εισαγωγής και αντί για θυρίδες εξαγωγής διαθέτουν βαλβίδα στην κεφαλή του κυλίνδρου με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται διαμήκης απόπλυση, η οποία είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική. Οι κινητήρες αυτοί συνδέονται άμεσα με την έλικα, χωρίς μειωτήρα χάρη στην χαμηλή ταχύτητα περιστροφής τους. Για το λόγο αυτό κατασκευάζονται συνήθως με δυνατότητα αναστροφής. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι ότι μπορούν να λειτουργήσουν αρκετά καλά με ένα μεγάλο εύρος ποιότητας καυσίμου, ακόμα και πολύ χαμηλής, καθώς και η απλότητα της κατασκευής τους (μικρότερος αριθμός



εξαρτημάτων, απουσία μειωτήρα). Τα παραπάνω οδηγούν σε χαμηλότερο κόστος χρήσης και μεγαλύτερη αξιοπιστία. Ειδικότερα, η χρήση ζυγώματος και βάκτρου επιτρέπει την απομόνωση του στροφαλοθαλάμου από το κιβώτιο σάρωσης, οπότε είναι δυνατή η χρήση διαφορετικού λιπαντικού για τον κύλινδρο (κυλινδρέλαιο) και διαφορετικού για την υπόλοιπη μηχανή. Με τη χρήση ειδικών αλκαλικών κυλινδρελαίων αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά τα όξινα κατάλοιπα από την καύση βαρέων πετρελαίων. Παράλληλα, η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής παρέχει τον απαραίτητο χρόνο για την πλήρη και απροβλημάτιστη καύση των χαμηλής ποιότητας καυσίμων. Οι εν λόγω κινητήρες έχουν λιγότερους κυλίνδρους από τους υπόλοιπους διατεταγμένους σε σειρά (σήμερα έχουν έως και δεκατέσσερις κυλίνδρους). Αυτό σημαίνει ότι έχουν λιγότερα κινούμενα μηχανικά μέρη, γεγονός που σε συνδυασμό με την απουσία μειωτήρα αυξάνει την αξιοπιστία τους.

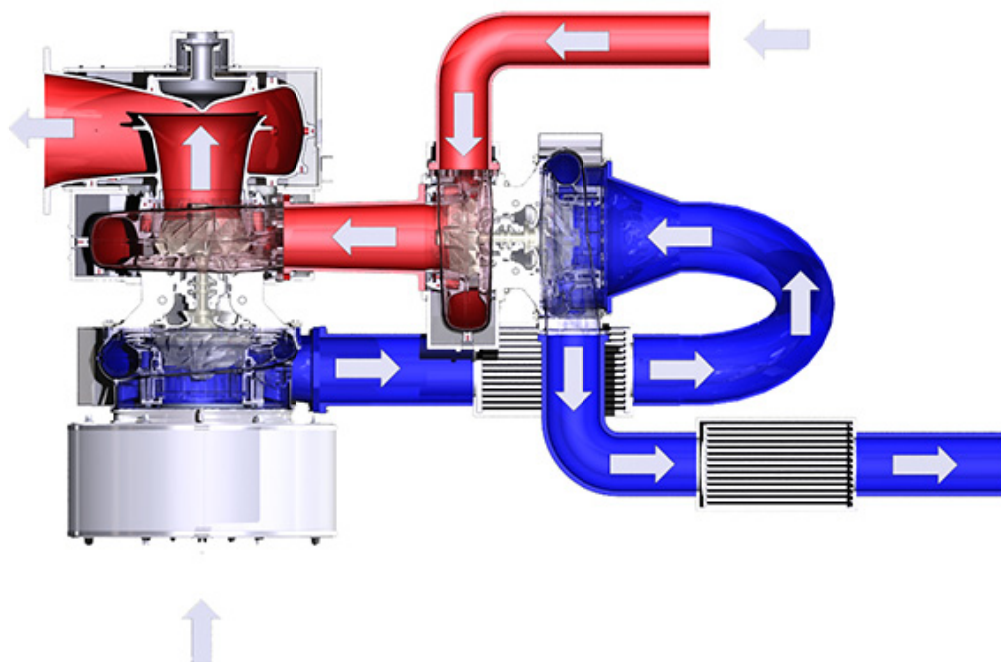
Ένα μειονέκτημα των βραδύστροφων δίχρονων κινητήρων Diesel είναι το σημαντικά μεγαλύτερο ύψος που έχουν (λόγω της μεγάλης διαδρομής του εμβόλου) σε σχέση με τους μεσόστρους, κάτι που οδηγεί και σε μεγάλο ύψος μηχανοστασίου. Γενικά, καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο και έχουν μεγαλύτερο βάρος ανά παραγόμενη μονάδα ισχύος από αντίστοιχους μεσόστρους και είναι πιο ακριβές. Όμως, σε συνδυασμό με το μικρότερο κόστος χρήσης και τη μεγαλύτερη αξιοπιστία οδηγούν γενικά σε μικρότερο συνολικό κόστος. Το μειονέκτημα των μεγάλων εξαρτημάτων δεν έχει επίπτωση στην άρμωση, επιθεώρηση ή εξάρμωση της μηχανής, μιας και ο χειρισμός τους γίνεται ούτως ή άλλως με χρήση γερανών και άλλων ειδικών συσκευών τόσο στους αργόστρους όσο και στους μεσόστρους πετρελαιοκινητήρες.

Στις μέρες μας μόνο τρεις κατασκευαστές βραδύστροφοφρων κινητήρων Diesel έχουν επιβιώσει (MAN B&W, Mitsubishi, Wärtsilä NSD). Άλλες κατασκευάστριες εταιρίες τέτοιων μηχανών είτε έπαυσαν προ πολλού τη λειτουργία τους είτε δραστηριοποιούνται σήμερα σε άλλους τομείς. Σε αυτή την ομάδα εταιριών εντάσσονται οι: AEG-Hesselman, Deutsche Werft, Fullagar, Krupp, McIntosh and Seymour, Neptune, Nobel, North British, Polar, Richardsons Westgarth, Still, Tosi, Vickers, Werkspoor και Worthington. Οι κινητήρες των σημερινών κατασκευαστών έχουν κοινά χαρακτηριστικά, όπως δίχρονη λειτουργία, ύπαρξη σταυρού (μηχανές με ζύγωμα), σάρωση με βαλβίδα εξαγωγής και σύστημα εξαγωγής καυσαερίων σταθερής πίεσης. Οι διάμετροι εμβόλου κυμαίνονται από 260 έως 1080 mm, η διαδρομή εμβόλου από 980 έως 3188 mm, ο λόγος διαδρομής προς διάμετρό φτάνει μέχρι 4,2:1, ο αριθμός κυλίνδρων ποικίλει από 4 έως 14 και η ταχύτητα περιστροφής από 55 έως 250 στροφές/λεπτό. Επίσης, η παραγόμενη ισχύς των συγκεκριμένων κινητήρων κυμαίνεται από 1100 έως 80080 KW και η χαμηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου που έχει επιτευχθεί αγγίζει τα 154 g/KWh. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένας τυπικός δίχρονος βραδύστροφος Diesel.



Σχήμα 2.20. Τομή τυπικού δίχρονου βραδύστροφου κινητήρα Diesel

Όλοι οι δίχρονοι βραδύστροφοι κινητήρες είναι υπερπληρωμένοι. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση στροβιλοϋπερπληρωτή, ο οποίος λειτουργεί με την ενέργεια των καυσαερίων, όπως έχει προαναφερθεί. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ενώ στις μικρές ισχύς υπερπληρωμένων Diesel χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ακτινικοί στρόβιλοι και συμπιεστές, εδώ έχουμε τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε στροβιλοϋπερπληρωτές με αξονικό στρόβιλο, οι οποίοι σε αυτές τις συνθήκες λειτουργούν πιο αποτελεσματικά.



Σχήμα 2.21. Απεικόνιση διβάθμιας στροβιλοϋπερπλήρωσης (MAN Diesel & Turbo)

Ένα σημείο που χρειάζεται προσοχή είναι η λειτουργία του υπερπληρωμένου βραδύστροφου δίχρονου στα χαμηλά φορτία. Εδώ είναι δυνατό τα καυσαέρια να μην έχουν την απαραίτητη ενέργεια ώστε ο στροβιλοϋπερπληρωτής τελικά να παράγει την απαιτούμενη πίεση για τη σωστή απόπλυση των κυλίνδρων έτσι κρίνεται απαραίτητη η επιπλέον χρήση αντλίας αποπλύσεως. Ωστόσο, σε υψηλότερα φορτία διακόπτεται η χρήση της για βελτίωση της κατανάλωσης.

2.4.5 Μεσόστροφοι κινητήρες Diesel μεγάλου μεγέθους

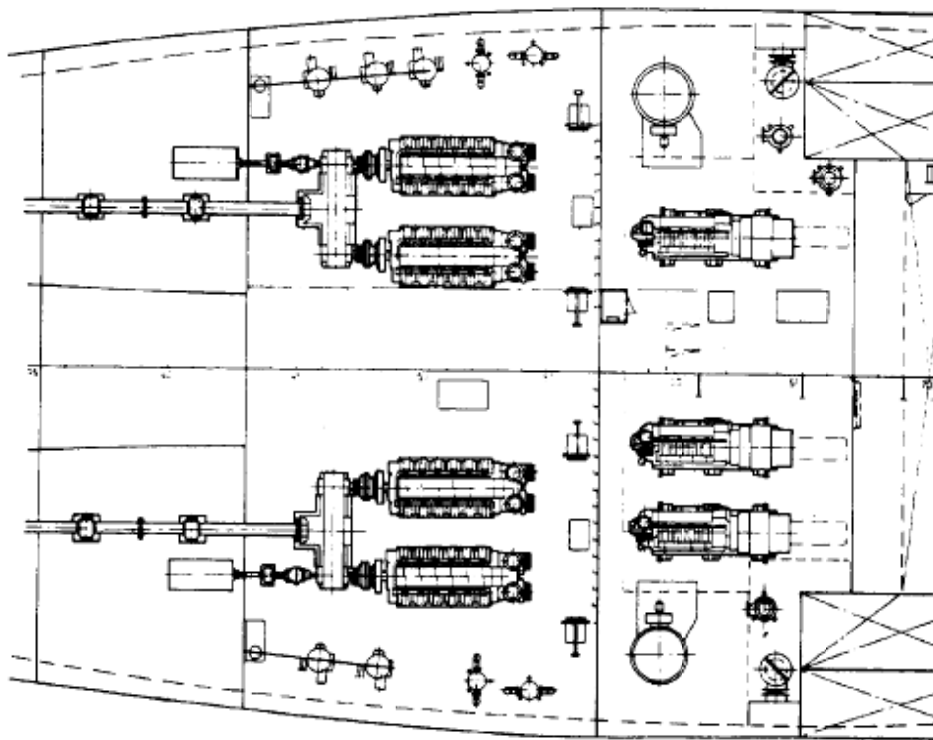
Οι μεσόστροφοι κινητήρες Diesel είναι τετράχρονοι και χρησιμοποιούνται κυρίως για την πρόωση μικρότερων πλοίων ή ειδικών τύπων μεγάλων πλοίων όπως τα κρουαζιερόπλοια και τα οχηματαγωγά. Παρόλα αυτά, οι μεγαλύτερες μηχανές της κατηγορίας στοχεύουν πλέον και στην περιοχή που επικρατούν οι βραδύστροφες δίχρονες. Κατασκευάζονται με διατάξεις κυλίνδρων εν σειρά ή σε διάταξη V και είναι όλες υπερπληρωμένες, κάνοντας μάλιστα χρήση ψυγείου αέρα υπερπλήρωσης ή ψυγείο θάλασσας. Η προσαγωγή των καυσαερίων στο στρόβιλο γίνεται κυρίως με σύστημα παλμών, αλλά χρησιμοποιούνται και συστήματα σταθερής πίεσης όπως και υβριδικά συστήματα. Οι εν σειρά κινητήρες μπορεί να έχουν μέχρι 10 κυλίνδρους και οι V μπορούν να φτάσουν και τους 20 κυλίνδρους. Οι μεσόστροφοι κινητήρες εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε καύσιμα χαμηλής ποιότητας απ' ό,τι οι βραδύστροφοι, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι δεν μπορούν



να χρησιμοποιήσουν και αυτοί χαμηλής ποιότητας καύσιμο αποτελεσματικά. Η καταλληλότερη λίπανσή τους για αυτό το σκοπό αποτελεί αντικείμενο συνεχούς έρευνας.

Οι κινητήρες αυτοί συνδέονται με την έλικα με τη χρήση μειωτήρα στροφών. Αυτό οδηγεί σε ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα που είναι η ελευθερία επιλογής της βέλτιστης ταχύτητας της έλικας. Επιπλέον δεν είναι απαραίτητο να μπορεί να αναστραφεί η φορά περιστροφής του κινητήρα. Γενικά, η χρήση μεσόστροφου κινητήρα οδηγεί σε χαμηλότερου ύψους μηχανοστάσια, αφού είναι μικρότεροι από αντίστοιχης ισχύος βραδύστροφους. Επίσης, έχουν χαμηλότερο βάρος ακόμα και αν συνυπολογίσουμε τα βάρη του μειωτήρα και του συμπλέκτη, καθώς και μικρότερο χρόνο κατασκευής και συναρμολόγησης (σε σύγκριση πάντα με τις δίχρονες μηχανές). Η συνολική εγκατάσταση όμως, είναι σαφώς πιο πολύπλοκη, τα κινούμενα μέρη περισσότερα (μεγάλος αριθμός κυλίνδρων) και η πιθανότητα βλάβης μεγαλύτερη.

Συχνά όμως χρησιμοποιούνται για την ίδια εφαρμογή (λ.χ. για την πρόωση ενός πλοίου) περισσότεροι του ενός μεσόστροφοι κινητήρες. Αυτό εκμηδενίζει τον κίνδυνο ολικής απώλειας ισχύος σε περίπτωση βλάβης, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας, θέτοντας σταδιακά τις μηχανές σε λειτουργία, ανάλογα με τις απαιτήσεις. Αν για παράδειγμα το πλοίο έχει ελαφρύ φορτίο, είναι μερικώς φορτωμένο ή πλέει με χαμηλή ταχύτητα (slow steaming), τότε ένας κινητήρας μπορεί να λειτουργεί στην βέλτιστη περιοχή του, ενώ ο άλλος (ή οι άλλοι) μπορεί να παραμένει ανενεργός. Έτσι, οι μηχανές αυτές λειτουργούν γενικά στη βέλτιστη παροχή τους.



Σχήμα 2.22. Τυπική εφαρμογή πολλαπλών μεσόστροφων κινητήρων



Οι περισσότεροι του ενός κινητήρες σε ένα πλοίο επιτρέπουν ακόμα την πρόωση με περισσότερες έλικες, βελτιώνοντας σημαντικά την ικανότητα ελιγμών. Μεγάλη σημασία έχει τέλος και η δυνατότητα που παρέχουν οι πολλαπλές μηχανές για εύκολο προγραμματισμό συντήρησης, αφού αυτός μπορεί να γίνεται διαδοχικά σε κάθε κινητήρα, ενώ οι υπόλοιποι λειτουργούν απρόσκοπτα.

Οι μεσόστροφοι κινητήρες ποικίλουν όσον αφορά την ταχύτητα περιστροφής, από 400 έως 1000 στροφές/λεπτό, ενώ η μέγιστη ισχύ που έχει επιτευχθεί σε τέτοια μηχανή είναι 23.850 KW (Colt – Pielstick PC4.2B, MAN Diesel, Fairbanks Morse Engine).



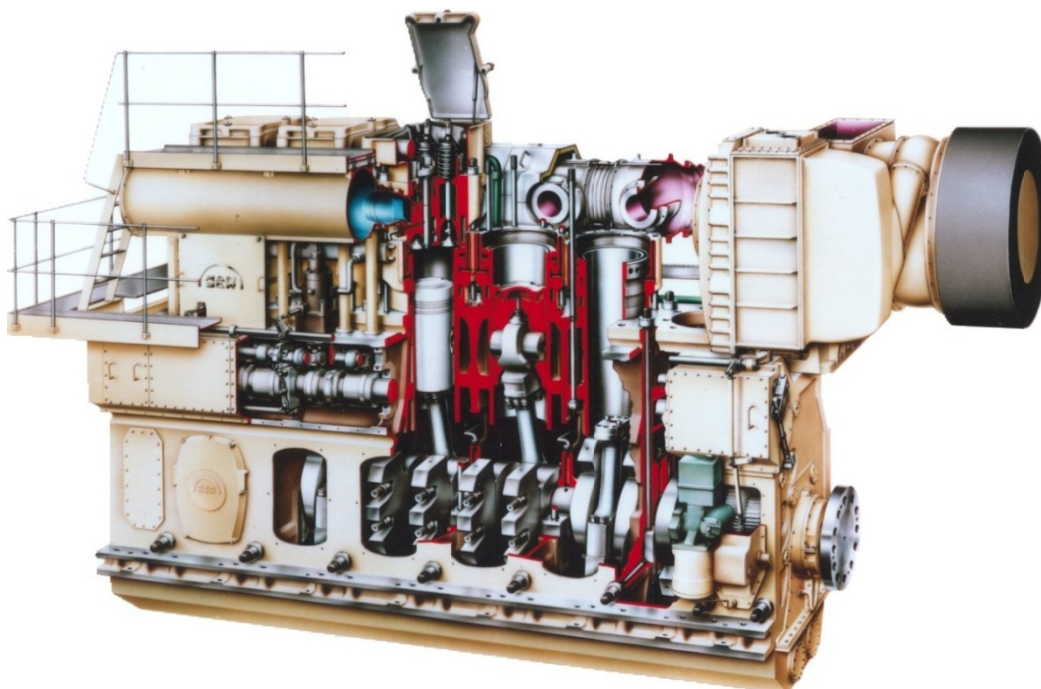
Σχήμα 2.23. Colt – Pielstick PC4.2B

Ο βαθμός απόδοσης των μεσόστροφων μηχανών φτάνει σήμερα έως 50% και η χαμηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου αγγίζει τα 185 g/KWh. Η διάμετρος των εμβόλων κυμαίνεται από 160 mm στις μικρότερες μέχρι και 640 mm στις μεγαλύτερες.

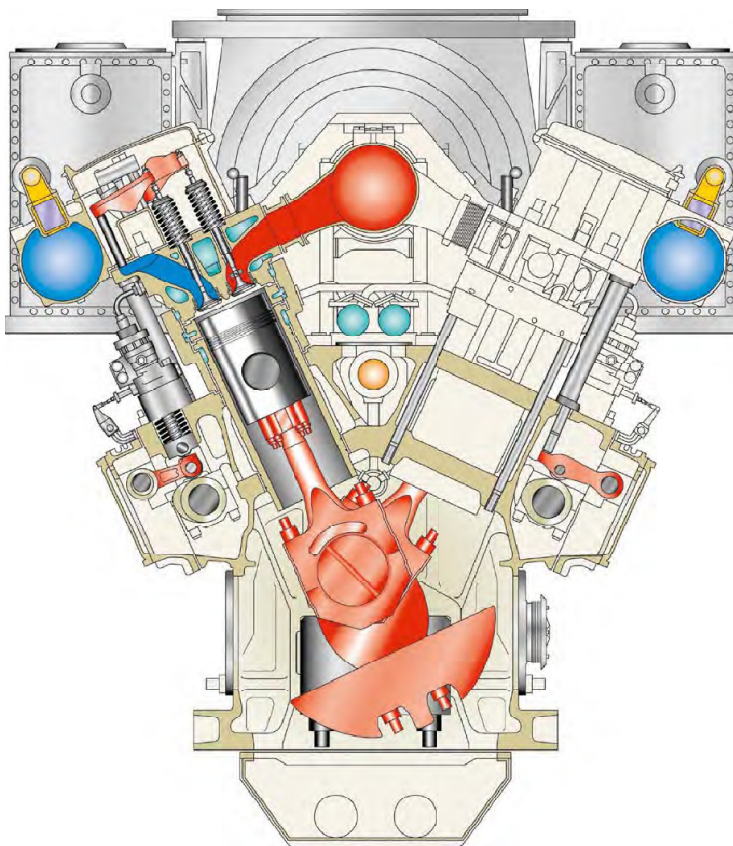
Η έρευνα στο χώρο των μεσόστροφων κινητήρων Diesel κατευθύνεται κυρίως προς τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και λιπαντικού, την αύξηση της αξιοπιστίας, τη μείωση του βάρους και της πολυπλοκότητας τους, την απλοποίηση



της κατασκευής με αντίστοιχο περιορισμό του κόστους κτήσεως, την ικανότητα καύσης εναλλακτικών καυσίμων και τη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων.



Σχήμα 2.24. Τυπικός τετράχρονος μεσόστροφος κινητήρας Diesel σε μερική τομή



Σχήμα 2.25. Τομή τυπικού μεσόστροφου κινητήρα Diesel με διάταξη V



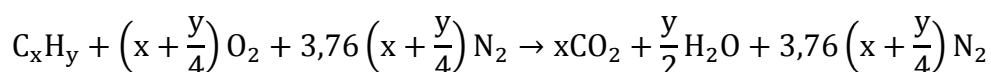
2.5 Μηχανισμός της καύσης σε κινητήρες Diesel

2.5.1 Καύση

Ο όρος Καύση αποδίδεται σε μια διεργασία μετατροπής μάζας και ενέργειας, όπου η χημική ενέργεια των δεσμών του καυσίμου μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Είναι μια ταχύτατη εξώθερμη χημική αντίδραση μεταξύ του καυσίμου και του οξυγόνου του αέρα (οξειδωση), η οποία λαμβάνει χώρα με αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης θερμότητας με άμεσο επακόλουθο την εμφάνιση των φαινομένων καύσης (έντονη αύξηση θερμοκρασίας και πίεσης).

Η επίτευξη τέλει καύσης είναι ο βασικός σκοπός των Μ.Ε.Κ. για την μεγιστοποίηση της απελευθέρωσης της διαθέσιμης ενέργειας και απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες, υψηλά επίπεδα τύρβης και επαρκή χρόνο. Πέραν αυτού η ατελής καύση είναι ανεπιθύμητη και λόγω των επιβλαβών προϊόντων της.

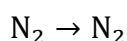
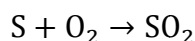
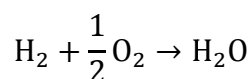
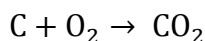
Η στοιχειομετρική καύση ενός καυσίμου υδρογονάνθρακα (C_xH_y) με οξυγόνο παρουσιάζεται μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:



όπου χρησιμοποιείται το απαιτούμενο στοιχειομετρικό ποσό O_2 (ελάχιστο).

Στις εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης το οξυγόνο που χρησιμοποιείται για την καύση του καυσίμου προέρχεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Ο ατμοσφαιρικός αέρας, όμως, εκτός από οξυγόνο περιέχει άζωτο και άλλες ουσίες, οι οποίες, ενώ δεν συμμετέχουν άμεσα στη διαδικασία της παραγωγής θερμότητας, παίζουν σημαντικό ρόλο στην ποιότητα της καύσης και των παραγόμενων καυσαερίων.

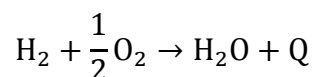
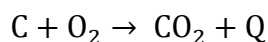
Ως τέλεια καύση του καυσίμου ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία οι χημικές ενώσεις του καυσίμου μετατρέπονται πλήρως σε ενώσεις που δεν επιδέχονται περαιτέρω αντίδραση με το οξυγόνο. Η τέλεια καύση του καυσίμου συνιστά βασικότερη επιδίωξη κατά τη λειτουργία του κινητήρα. Η τέλεια καύση αποτυπώνεται σχηματικά στις ακόλουθες αντιδράσεις:



Από τις παραπάνω αντιδράσεις συμπεραίνεται ότι τα προϊόντα της τέλει καύσης είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το νερό (H_2O), το διοξείδιο του θείου (SO_2) και το άζωτο του αέρα (N_2).

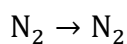
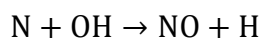
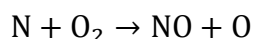
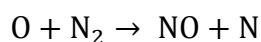


Ωστόσο, η καύση εντός του κυλίνδρου δεν είναι τέλεια, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται και άλλες, ρυπογόνες χημικές ενώσεις. Επειδή στους κινητήρες Diesel το καύσιμο εγχέεται ξεχωριστά από τον αέρα, ο διαθέσιμος χρόνος για τον σχηματισμό του καυσίμου μίγματος (δηλαδή την ανάμιξη του εγχεόμενου καυσίμου με τον πεπιεσμένο αέρα που βρίσκεται εντός του κυλίνδρου), είναι πολύ μικρός. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη μία περίσσεια αέρα, ώστε η καύση να έχει καλή απόδοση. Δηλαδή, η ποσότητα αέρα που βρίσκεται εντός του κυλίνδρου είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα που απαιτείται για τη στοιχειομετρική καύση της συγκεκριμένης μάζας του εγχεόμενου καυσίμου. Η περίσσεια αέρα έχει ως συνέπεια και σχετικά μειωμένες θερμοκρασίες εντός του κυλίνδρου. Δεδομένης της περισσειας οξυγόνου (φυσική συνέπεια της περισσειας αέρα), ο άνθρακας και το υδρογόνο των υδρογονανθράκων αντιδρούν με το οξυγόνο του αέρα παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα και νερό σύμφωνα με τις ακόλουθες αντιδράσεις:



όπου Q η εκλυόμενη θερμότητα της καύσης.

Ωστόσο, η πραγματική διαδικασία της καύσης είναι πιο πολύπλοκη. Το άζωτο που περιέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα, σε χαμηλές θερμοκρασίες αντιδρά ελάχιστα με το οξυγόνο και δεν επηρεάζει σημαντικά τις παραπάνω αντιδράσεις. Στις υψηλές όμως θερμοκρασίες και πιέσεις που επικρατούν στους κυλίνδρους κατά τη φάση της καύσης, αντιδρά με το οξυγόνο σχηματίζοντας οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οποία είναι ιδιαίτερα τοξικά. Τα παραγόμενα οξείδια είναι το μονοξείδιο και το διοξείδιο του αζώτου, με το πρώτο να αποτελεί το κύριο προϊόν. Το άζωτο προέρχεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα, μπορεί όμως να περιέχεται και σε ενώσεις του καυσίμου (κυρίως στο πετρέλαιο). Οι κύριες χημικές αντιδράσεις παραγωγής μονοξειδίου του αζώτου είναι οι ακόλουθες:



Άλλα επιβλαβή για το περιβάλλον προϊόντα της ατελούς καύσης, που λαμβάνει χώρα στους κινητήρες Diesel, είναι το διοξείδιο του θείου (SO_2), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC) και σωματίδια αιθάλης (Soot). Οι κύριοι ρυπαντές είναι τα οξείδια του αζώτου και τα σωματίδια της αιθάλης.

Ένα σημαντικό φαινόμενο το οποίο παρατηρείται κατά την καύση του μείγματος αέρα – καυσίμου είναι αυτό της διάστασης των καυσαερίων. Διάσταση



των καυσαερίων είναι το φαινόμενο κατά το οποίο τα προϊόντα της καύσεως διασπώνται υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών, απορροφώντας ποσά θερμότητας. Ενώ η καύση είναι εξώθερμη αντίδραση, η διάσπαση, που συνιστά την αντίθετη αντίδραση, είναι ενδόθερμη, πραγματοποιείται δηλαδή με απορρόφηση θερμότητας. Η διάσπαση των καυσαερίων, επειδή προκαλεί απορρόφηση θερμότητας, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου, οπότε μειώνονται η ισχύς και ο βαθμός απόδοσης του κύκλου.

Η μεταβολή της πίεσης κατά τη διάρκειά της καύσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τη μορφή του θαλάμου καύσεως, την ένταση των κινήσεων του αέρα, τη χρονική στιγμή εγχύσεως σε συνδυασμό με το νόμο εγχύσεως στον Diesel (ή τη θέση του σπινθηριστή και την χρονική στιγμή που δίνει τον σπινθήρα στον κινητήρα Otto), καθώς και τις ιδιότητες του καυσίμου. Ιδανικά, θα ήταν επιθυμητό να γινόταν ισόχωρη καύση, αλλά αυτό επιφέρει πολύ απότομη αύξηση μεταβολής της πίεσεως, δηλαδή όπως λέγεται τραχεία λειτουργία, η οποία καταπονεί κρουστικά τα διάφορα τμήματα του κινηματικού μηχανισμού.

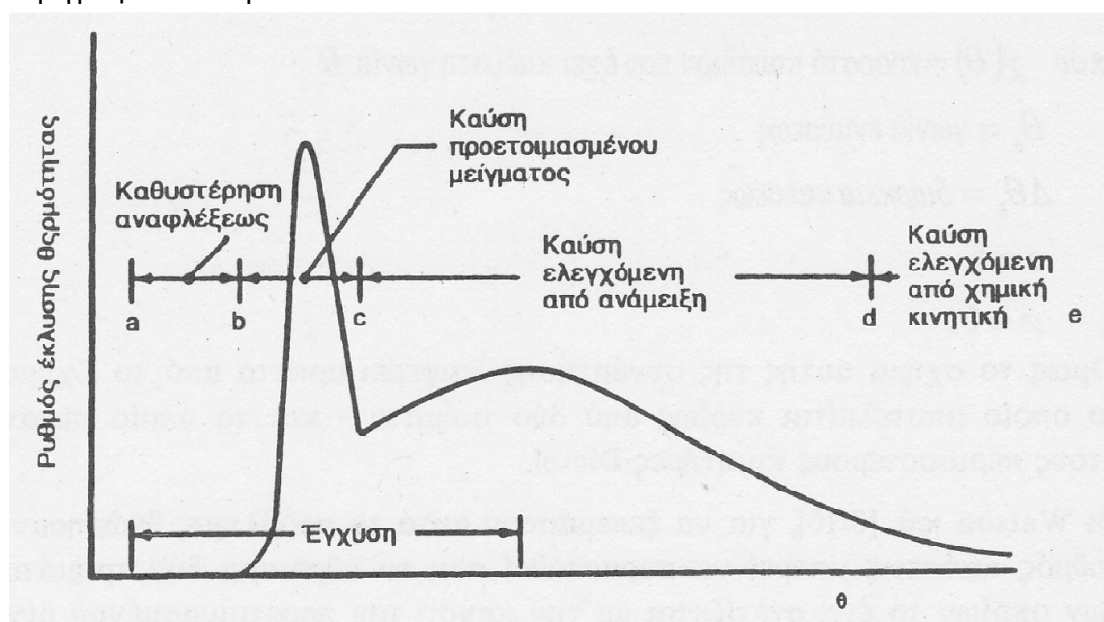
Κατά την καύση υπάρχει πολύ έντονη συναλλαγή θερμότητας με τα τοιχώματα του κυλίνδρου, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των αερίων και της αυξημένης τιμής του συντελεστή μεταβιβάσεως της θερμότητας, οφειλόμενης στην ύπαρξη της φλόγας και την έντονη κινητική κατάσταση. Εν γένει ένα ποσοστό 15÷20% της χορηγούμενης θερμότητας κατά την καύση, απάγεται από το ψυκτικό μέσο αμέσως, δια μέσου των τοιχωμάτων, με αποτέλεσμα τη μείωση των θερμοκρασιών στον κύλινδρο που οδηγεί σε ελαττωμένο έργο και βαθμό απόδοσης. Το μόνο θετικό, εν μέρει, αποτέλεσμα της πτώσεως αυτής της θερμοκρασίας, είναι η μείωση της αρνητικής επιδράσεως της διάσπασης των προϊόντων της καύσης.

Στους κινητήρες Diesel το σημείο ή τα σημεία της έναυσης δεν είναι προκαθορισμένα (όπως στους κινητήρες Otto) και μπορεί να μεταβάλλονται σε κάθε κύκλο, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν εντός του κυλίνδρου. Παράλληλα, η ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα είναι εντελώς ανομοιόμορφη, ενώ στην περιοχή γύρω από το ακροφύσιο υπάρχουν μια ή περισσότερες κεντρικές δέσμες καυσίμου σε υγρή μορφή (ανάλογα με τον τύπο της μηχανής). Γίνεται έτσι κατανοητό πως η καύση στους κινητήρες Diesel είναι ένα φαινόμενο καθαρά τοπικό και εξαρτάται από τις διαφορετικές συνθήκες που επικρατούν στα διάφορα σημεία του όγκου του θαλάμου καύσης. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται η ομοιόμορφη μετωπική ανάπτυξη της φλόγας που παρατηρείται στους βενζινοκινητήρες.



2.5.2 Στάδια της καύσης

Η διαδικασία της καύσης εντός του κυλίνδρου ενός κινητήρα Diesel μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα στάδια, αναλόγως με τη μορφή της καμπύλης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (rate of heat release), συναρτήσει της γωνίας στροφάλου. Τα στάδια αυτά αποτελούνται από σύνθετες εναλλαγές χημικών και φυσικών διεργασιών, των οποίων ο διαχωρισμός εξαρτάται από τη σχεδίαση και τη λειτουργία του κινητήρα. Παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στην ορθή λειτουργία της μηχανής, χωρίς δημιουργία θορύβου, εκπομπών ρύπων και επικαθήσεων στο θάλαμο καύσης. Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την πορεία της καύσης είναι η κατάλληλη θερμοκρασία και η ανάλογη πίεση που επικρατούν στον κύλινδρο. Τα τέσσερα στάδια της καύσης φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί και περιγράφονται παρακάτω.



Σχήμα 2.26. Διάγραμμα ρυθμού έκλυσης θερμότητας – στάδια καύσης σε κινητήρα Diesel

- **1^ο στάδιο – καθυστέρηση ανάφλεξης (a→b)**

Στους κινητήρες Diesel προκαλείται αυτανάφλεξη του καυσίμου λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του αέρα (αποτέλεσμα της συμπίεσής του). Οι χημικές αντιδράσεις της καύσης ξεκινούν από τη στιγμή που το πρώτο σταγονίδιο του καυσίμου θα εγχυθεί από το ακροφύσιο εντός του θαλάμου καύσης. Ωστόσο, ο ρυθμός καύσης αρχικά είναι αρκετά χαμηλός και απαιτείται ένα χρονικό διάστημα, μέχρι να επιτευχθεί τοπικά υψηλότερη θερμοκρασία και ορατή ανάπτυξη μετώπου καύσης. Το χρονικό αυτό διάστημα ονομάζεται περίοδος καθυστέρησης ανάφλεξης (ή υστέρησης έναυσης – delay period) και είναι ουσιαστικός παράγοντας στη λειτουργία των κινητήρων Diesel, αποτελεί δε το πρώτο στάδιο της καύσης. Για το λόγο αυτό, απαιτείται έναρξη της έγχυσης αρκετά πριν το ΑΝΣ. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται ο απαραίτητος χρόνος για να αναπτυχθεί η καύση, έως ότου το έμβολο φτάσει στο ΑΝΣ. Άξια αναφοράς είναι



εδώ η ανεξαρτησία της καθυστέρησης ανάφλεξης από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Ο ψεκασμός του καυσίμου διαρκεί και για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα μετά το ΑΝΣ, ώστε να επιτευχθεί η κατά το δυνατόν ομοιόμορφη διανομή του στον όγκο του θαλάμου καύσεως. Ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης είναι αντιστρόφως ανάλογος του της θερμοκρασίας αυτανάφλεξης, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία ύπαρξης υψηλού βαθμού συμπίεσης.

- **2^ο στάδιο – προαναμεμιγμένη ή ανεξέλεγκτη καύση (b→c)**

Η υψηλή θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα επιτρέπει στα πιο ενεργά στοιχεία του καυσίμου να αναφλέγονται χωρίς τη βοήθεια εξωτερικής πηγής και να προκαλούν αλυσιδωτά την ανάφλεξη και των λιγότερο ενεργών στοιχείων του. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία και η πίεση που προκαλεί η καύση, εξαναγκάζονται σε ανάφλεξη και γειτονικές περιοχές που δεν είχαν φτάσει μέχρι τη στιγμή εκείνη στις κατάλληλες συνθήκες.

Έτσι, ακολουθεί το δεύτερο στάδιο, της ανεξέλεγκτης καύσης, που συνοδεύεται από απότομη αύξηση της πίεσης και υψηλό ρυθμό έκλυσης θερμότητας. Στο στάδιο αυτό καίγεται το προετοιμασμένο (από το προηγούμενο στάδιο) μείγμα (διάδοση φλόγας προανάμειξης). Στην περίπτωση που το πρώτο στάδιο διαρκέσει πολύ, επιτυγχάνεται πολύ καλή ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα και υψηλός βαθμός εξατμίσεως του καυσίμου. Τότε υπάρχει μεγάλη ποσότητα προετοιμασμένου μείγματος, οπότε στο δεύτερο αυτό στάδιο μπορεί η πίεση να φτάσει σε απαγορευτικά επίπεδα (κρουστική καύση Diesel). Είναι συνεπώς ουσιώδης η μείωση του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται είτε με αύξηση του στροβιλισμού, είτε με χρήση καυσίμου υψηλότερου αριθμού κετανίου, είτε με εφαρμογή πιλοτικής εγχύσεως (pilot injection).

- **3^ο στάδιο – ελεγχόμενη καύση (μέσω διάχυσης) (c→d)**

Το τρίτο στάδιο είναι το στάδιο της ελεγχόμενης καύσης, όπου η καύση πραγματοποιείται χωρίς καθυστέρηση και ο ρυθμός της ελέγχεται από το εγχυόμενο καύσιμο. Η φλόγα είναι τυρβώδους διαχύσεως. Η ταχύτητα της καύσης στην περίπτωση του κινητήρα Diesel είναι αρκετά χαμηλότερη από την αντίστοιχη στον βενζινοκινητήρα. Το γεγονός αυτό προκαλείται από την ανομοιόμορφη ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα και τη μειωμένη ατμοποίησή του. Η μειωμένη ατμοποίηση οφείλεται στη μικρότερη πτητικότητα του πετρελαίου Diesel και στο πολύ μικρό διαθέσιμο χρονικό διάστημα. Ο τύπος του πετρελαίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα της καύσης, με τα βαρύτερα καύσιμα να επιτυγχάνουν χαμηλότερους ρυθμούς καύσης.



- **4^ο στάδιο – επίκαιση (d→e)**

Το τελευταίο στάδιο της καύσης περιλαμβάνει την περίοδο καθυστερημένης καύσης, προς το τέλος της φάσης της εκτόνωσης. Η επίκαιση είναι ανεπιθύμητο φαινόμενο, καθώς επιφέρει υπερβολική θερμική καταπόνηση της κεφαλής του εμβόλου και της βαλβίδας εξαγωγής των καυσαερίων (μεγάλοι δίχρονοι κινητήρες). Αυτό συμβαίνει, γιατί όταν η καύση συνεχίζεται για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, τα καυσαέρια αποκτούν υψηλότερη θερμοκρασία με την οποία και διέρχονται από τη βαλβίδα κατά την εξαγωγή τους από τον κύλινδρο. Γι' αυτό τον λόγο, η ποσότητα του καύσιμου, καθώς επίσης και οι συνθήκες κατά τις οποίες πραγματοποιείται η καύση, πρέπει να ρυθμίζονται έτσι, ώστε η καύση να ολοκληρώνεται μέχρι κάποια συγκεκριμένη γωνία στροφάλου.

2.6 Το δυναμοδεικτικό διάγραμμα κινητήρων Diesel

Οι εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης λειτουργούν σε πραγματικό κύκλο και όχι σε θεωρητικό – θερμοδυναμικό κύκλο. Ενώ γενικά επιδιώκεται η προσομοίωση του κύκλου τους με θερμοδυναμικούς κύκλους για να μελετηθούν με μεγαλύτερη ευκολία, είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί και ο πραγματικός κύκλος λειτουργίας τους. Αυτός μπορεί να περιγραφεί πλήρως μόνο αν γνωρίζουμε ακριβώς την κατάσταση του εργαζόμενου μέσου κάθε χρονική στιγμή.

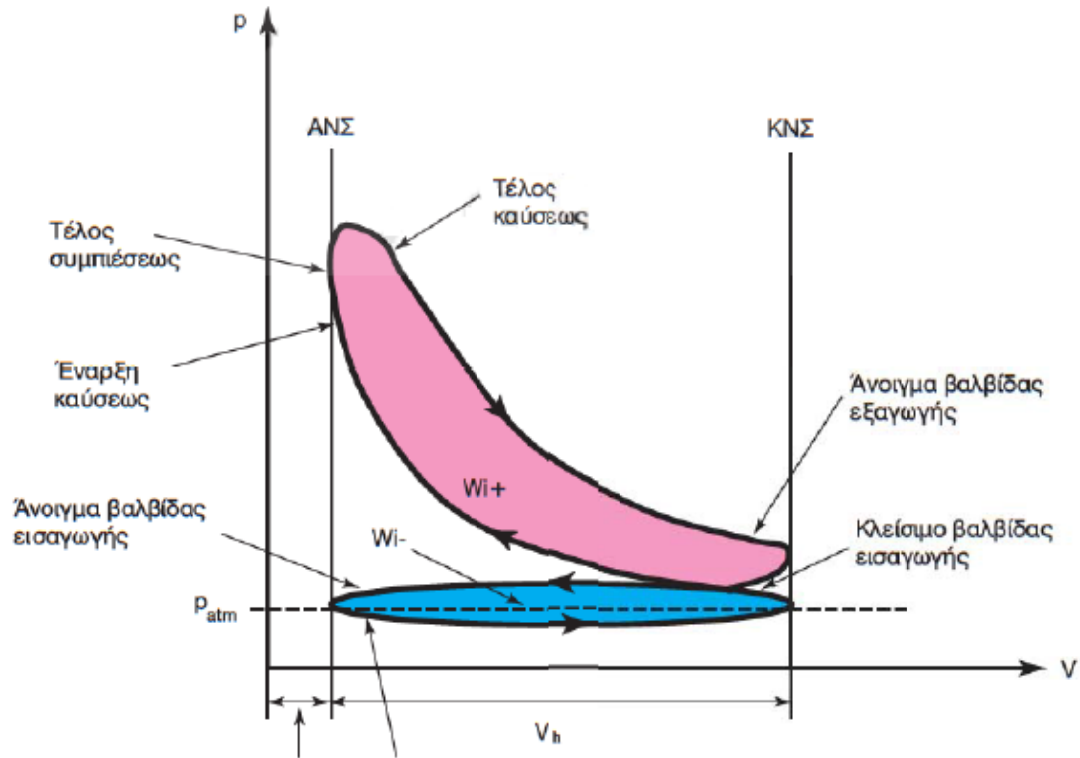
Αν θεωρήσουμε ότι υφίσταται θερμοδυναμική ισορροπία εντός του κυλίνδρου, κάθε χρονική στιγμή (και αμεληθούν προς στιγμήν οι ταχύτητες του εργαζόμενου μέσου), η περιγραφή της κατάστασης μπορεί να γίνει με ένα ζεύγος θερμοδυναμικών μεγεθών, όπως για παράδειγμα η πίεση p και η θερμοκρασία T , ή η πίεση p και ο ειδικός όγκος v (το αντίστροφο της πυκνότητας ρ). Η μέτρηση της θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα δύσκολη, ενώ παράλληλα η θερμοκρασία εμφανίζει σημαντική μεταβολή από σημείο σε σημείο εντός του κυλίνδρου. Επίσης, κατά τις φάσεις εναλλαγής των αερίων (εισαγωγή, εξαγωγή) είναι εξαιρετικά δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια η μάζα m εντός του κυλίνδρου, μέσω της οποίας υπολογίζεται ο ειδικός όγκος $v=V/m$.

Η μέτρηση που μπορεί να γίνει στο εσωτερικό του κυλίνδρου κατά τη λειτουργία της μηχανής, είναι η λήψη του δυναμοδεικτικού διαγράμματος λειτουργίας του κινητήρα (βλ. σχήματα 2.27 και 2.28). Το δυναμοδεικτικό διάγραμμα μας δίνει την τιμή της πίεσης p σε κάθε θέση του εμβόλου x (διάγραμμα $p - x$). Επειδή η θέση του εμβόλου συνδέεται με τον όγκο του κυλίνδρου με τη σχέση:

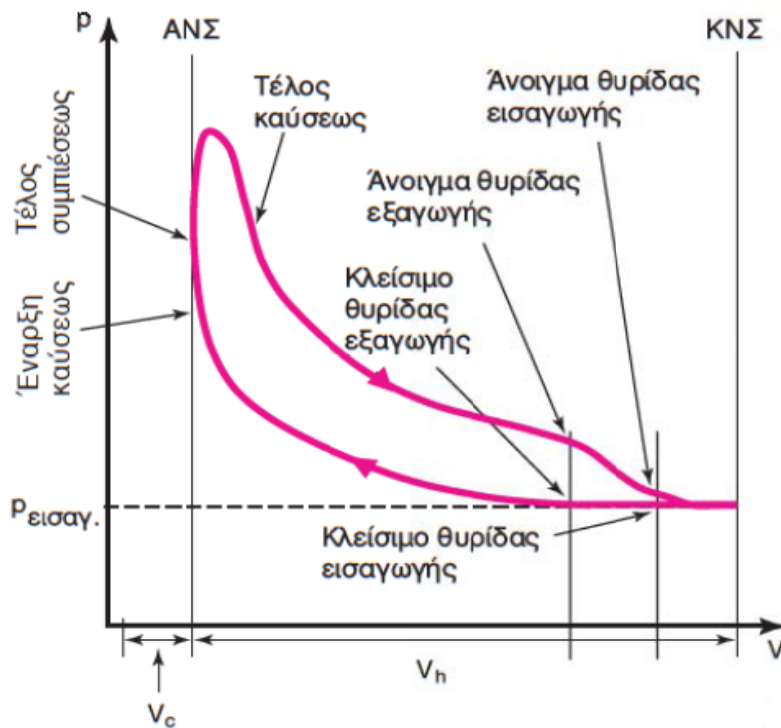
$$V = V_c + Ax = V_c + \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) x$$



όπου D η διάμετρος του κυλίνδρου, από το διάγραμμα $p - x$ μπορεί εύκολα να προκύψει το διάγραμμα $p - V$.



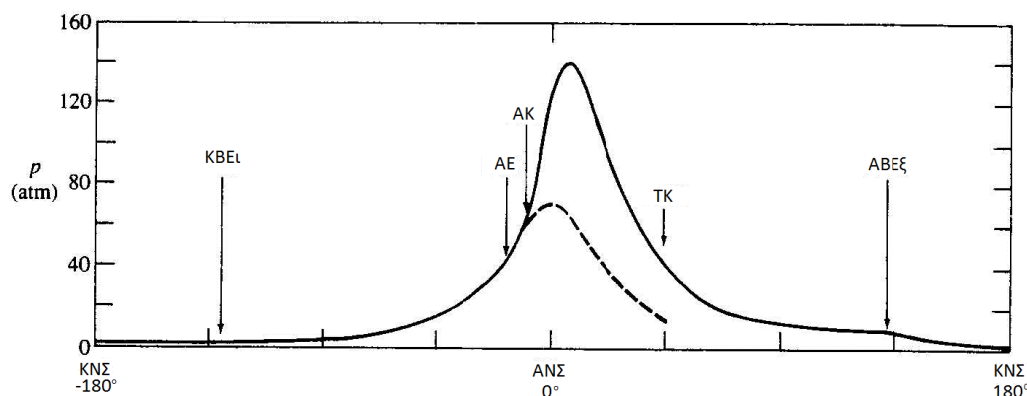
Σχήμα 2.27. Δυναμοδεικτικό διάγραμμα πραγματικής λειτουργίας τετράχρονου κινητήρα



Σχήμα 2.28. Δυναμοδεικτικό διάγραμμα πραγματικής λειτουργίας δίχρονου κινητήρα



Ένας άλλος τρόπος λήψης του διαγράμματος της πίεσης είναι ως συνάρτηση της γωνίας στροφάλου ϕ .



Σχήμα 2.29. Τυπικό δυναμοδεικτικό διάγραμμα $p - \phi$ κινητήρα Diesel. Σημειώνονται τα εξής: KBEI (Κλείσιμο Βαλβίδας Εισαγωγής), AE (Αρχή Εγχύσεως καυσίμου), AK (Αρχή Καύσης), TK (Τέλος Καύσης), ABEI (Άνοιγμα Βαλβίδας Εξαγωγής)

Το δυναμοδεικτικό διάγραμμα λειτουργίας είναι πολύτιμο γιατί δίνει τη δυνατότητα άμεσου υπολογισμού του ενδεικνύμενου έργου W_i . Το ενδεικνύμενο έργο είναι το μηχανικό έργο ογκομεταβολής σε μια πλήρη περίοδο λειτουργίας και εκφράζεται ως:

$$W_i = \oint p dV = A \oint p dx$$

όπου A είναι το εμβαδόν της διατομής του κυλίνδρου και ισούται με

$$A = \pi D^2 / 4, \text{ με } D \text{ τη διάμετρο του εμβόλου.}$$

Το ενδεικνύμενο έργο προκύπτει άμεσα από το διάγραμμα $p - x$ με εμβαδομέτρηση, ενώ αυτό δεν συμβαίνει μέσω του διαγράμματος $p - \phi$, το οποίο πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε διάγραμμα $p - x$ για να είναι δυνατός ο υπολογισμός του W_i . Το τελευταίο προϋποθέτει τη γνώση της θέσης του ANS.

Η λήψη του δυναμοδεικτικού διαγράμματος είναι ιδιαίτερα ουσιαστική υπόθεση. Εκτός της δυνατότητας υπολογισμού του ενδεικνύμενου έργου που παρέχει, αποτελεί ουσιαστικό εργαλείο για τη διάγνωση βλαβών του κύλινδρου. Η σύγκρισή του με ένα πρότυπο διάγραμμα του κάθε κυλίνδρου δίνει τη δυνατότητα να διαγνωστούν έγκαιρα και αξιοπιστία συγκεκριμένες βλάβες της μηχανής (περεταίρω ανάλυση στο επόμενο κεφάλαιο).

Σε αρκετές περιπτώσεις οι σύγχρονες εγκαταστάσεις εμβολοφόρων μηχανών μεγάλης ισχύος (πλοία και ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη) είναι εφοδιασμένες με εξελιγμένα συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών για την εύκολη λήψη των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων $p - \phi$ και την αυτόματη μετατροπή τους σε διαγράμματα $p - V$. Η εμβαδομέτρηση για τον υπολογισμό του ενδεικνύμενου έργου γίνεται αυτόματα. Στη συνέχεια υπολογίζονται και άλλες παράμετροι λειτουργίας του κινητήρα.



3. Μέθοδοι επίβλεψης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel

3.1 Αναγκαιότητα επίβλεψης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel

Στις μέρες μας, οι μηχανές Diesel και ιδιαίτερα οι εν λόγω κινητήρες μεγάλου μεγέθους αξιοποιούνται σε πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα, κυριαρχούν στον τομέα της ναυτιλίας ως μέσο πρόωσης πλοίων και χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως ηλεκτρογεννήτριες σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε απομονωμένες περιοχές (λ.χ. νησιά) όπου υπάρχει ανάγκη ελαστικότητας στην παραγωγή ισχύος. Μια απρόβλεπτη αστοχία αυτών των μηχανών, μπορεί να επιφέρει ιδιαίτερα ανεπιθύμητα αποτελέσματα, θέτοντας σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές ή ακόμα και το περιβάλλον, όπως έχει διαπιστωθεί αρκετές φορές. Σε ηπιότερες μορφές αστοχίας, ο κινητήρας ενδέχεται να λειτουργεί με χαμηλό βαθμό απόδοσης ή ακόμα και να παύσει να λειτουργεί, προκαλώντας επιπρόσθετες αρνητικές συνέπειες κατά περίπτωση (όπως δαπανηρές καθυστερήσεις, διακοπή τροφοδότησης ηλεκτρικής ενέργειας σε κατοικημένη περιοχή κ.α.).

Σε συνδυασμό με την οικονομική λειτουργία, τη φιλικότητα προς το περιβάλλον και την ασφάλεια του προσωπικού, προκύπτουν και ορισμένες – αυτονόητες για την σημερινή τεχνολογία – απαιτήσεις από κάθε κινητήρα. Αναλυτικότερα, κρίνεται αναγκαία η αξιόπιστη και αδιάλειπτη λειτουργία του κινητήρα, με ελάχιστη δυνατή κατανάλωση καυσίμου (σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις της εφαρμογής) και μέγιστη δυνατή παραγωγή ισχύος σε όλο το εύρος λειτουργίας. Επιπλέον, αποτελεί πρωταρχικό στόχο η ελαχιστοποίηση των διαστημάτων που τίθεται ο κινητήρα εκτός λειτουργίας για λόγους συντήρησης ταυτόχρονα με την ελαχιστοποίηση του άμεσου κόστους συντήρησης (κόστος ανταλλακτικών, κόστος υπηρεσιών συντήρησης). Παράλληλα, ιδανική θεωρείται η αύξηση της ωφέλιμης ζωής του κινητήρα, καθώς και ο περιορισμός των εκπομπών ρύπων.

Γίνεται από τα παραπάνω εμφανής η καθοριστική σημασία που έχει η συνεχής παρακολούθηση της μηχανής κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της.



Παρακολουθώντας την μηχανή και γνωρίζοντας τα επίπεδα σωστής λειτουργίας της είναι δυνατό να διαγνωστεί μια αστοχία της ή να προβλεφθεί μια πιθανή δυσλειτουργία που ίσως εμφανιστεί στο κοντινό μέλλον. Έτσι, η πρόβλεψη και κατ' επέκταση πρόληψη βλαβών στους κινητήρες που εξετάζουμε καθίσταται η σύγχρονη πρόκληση για τους μηχανικούς, ισάξια με αυτήν της εξέλιξης των ίδιων των κινητήρων.

3.2 Βασικές αρχές μεθόδων επίβλεψης λειτουργίας και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel

Όπως τονίστηκε παραπάνω, η έρευνα έχει στραφεί με έντονο ενδιαφέρον στην ανάπτυξη, εξέλιξη και εφαρμογή μεθόδων και τεχνικών με σκοπό:

1. την παρακολούθηση της λειτουργίας (health monitoring) ή την παρακολούθηση κατάστασης (condition monitoring), και
2. τον προσδιορισμό της λειτουργικής κατάστασης (engine condition estimation), τον εντοπισμό και τη διάγνωση μιας ενδεχόμενης βλάβης (fault diagnosis).

Τα δυο παραπάνω σημεία συνθέτουν την διαγνωστική διαδικασία στους κινητήρες Diesel.

Η παρακολούθηση λειτουργίας είναι το πρώτο στάδιο της διαγνωστικής διαδικασίας, όπου γίνεται καταγραφή μεγεθών που προσφέρουν ένδειξη άμεση ή έμμεση, της λειτουργικής συμπεριφοράς του κινητήρα. Στα μεγέθη αυτά περιλαμβάνονται:

- η παραγόμενη ισχύς
- η κατανάλωση καυσίμου
- η πίεση και θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής
- η θερμοκρασία των καυσαερίων
- η πίεση και θερμοκρασία του καυσαερίου πριν το στρόβιλο
- η θερμοκρασία του αέρα πριν και μετά το ψυγείο αέρα
- η διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής

Πέρα από την καταγραφή ενός ή περισσότερων από αυτά τα μεγέθη, υπάρχει η δυνατότητα, μετά από επεξεργασία και υπολογισμούς, να παραχθούν πρόσθετες πληροφορίες για μεγέθη που αφορούν τη λειτουργική κατάσταση του κινητήρα. Τέτοια είναι η παραγόμενη ισχύς ανά κύλινδρο, η μέση πραγματική πίεση και η πίεση συμπίεσης. Σε αυτό το πρώτο στάδιο είναι δυνατόν να ανιχνευθεί κάποια δυσλειτουργία ή βλάβη, όμως κατά πάσα πιθανότητα δεν είναι εφικτό να εντοπιστεί η αιτία που την προκαλεί. Για το σκοπό αυτό απαιτείται ο προσδιορισμός



της λειτουργικής κατάστασης και της διάγνωσης βλαβών, που συνιστά το δεύτερο στάδιο της διαγνωστικής διαδικασίας. Οι πληροφορίες που εξάγονται από τη διάγνωση του κινητήρα προκύπτουν μετά από επεξεργασία και αξιολόγηση μεγεθών που μπορεί να παρέχονται από το πρώτο στάδιο ή να συλλέγονται αυτόνομα.

Γίνεται εδώ κατανοητό πως η τεχνική διάγνωση βλαβών και η συντήρηση των κινητήρων Diesel βαρέως τύπου αποτελούν ένα πολυσύνθετο διεπιστημονικό έργο εφαρμοσμένης μηχανικής. Η τεχνική διάγνωση (technical diagnosis) ορίζεται ως μια διαδικασία ακριβούς προσδιορισμού των αιτιών μιας βλάβης και βασίζεται σε δύο διαφορετικούς τρόπους εκτίμησης. Ο πρώτος τρόπος αφορά την ποσοτική εκτίμηση μιας στιγμιαίας κατάστασης (λειτουργικής κατάστασης του κινητήρα) και ο δεύτερος τρόπος αφορά τον εντοπισμό των μηχανικών μερών με βλάβη. Η συντήρηση (maintenance) ορίζεται ως η διαδικασία αποκατάστασης μίας βλάβης, συνήθως με την αντικατάσταση ενός φθαρμένου ανταλλακτικού με ένα νέο και περιλαμβάνει τρία βασικά βήματα: την υπηρετήση, την επιθεώρηση και την επισκευή. Η υπηρετήση (service) περιλαμβάνει όλα τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται για να διατηρήσουν έναν κινητήρα στην ονομαστική του κατάσταση και για να αποτρέψουν την οποιαδήποτε βλάβη. Η επιθεώρηση (inspection) περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα βήματα για να διαπιστωθεί και να αξιολογηθεί η τρέχουσα κατάσταση ενός κινητήρα, προκειμένου να ανιχνευθεί μία βλάβη σε αρχικό στάδιο και να ληφθούν τα αναγκαία προληπτικά μέτρα. Η επισκευή (repair) περιλαμβάνει όλα τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται για να αποκαταστήσουν έναν κινητήρα στην ονομαστική του κατάσταση. Η προληπτική συντήρηση γίνεται όλο και πιο σημαντική, καθώς οι κινητήρες Diesel γίνονται περισσότερο σύνθετοι και το κόστος τους αυξάνεται. Ο έλεγχος της τεχνικής κατάστασης των κινητήρων Diesel περιορίζει τους νεκρούς χρόνους των μηχανών και αυξάνει την παραγωγικότητά τους.

Επιτυγχάνεται έτσι, με τις ανωτέρω ενέργειες, ο στόχος της διαγνωστικής διαδικασίας που είναι ο προσδιορισμός της δυσλειτουργίας και η πρόταση των απαραίτητων ρυθμίσεων ή τροποποιήσεων για την αποκατάσταση της βλάβης και την επαναφορά του κινητήρα στη φυσιολογική του λειτουργία. Οι συγκεκριμένες προτάσεις για τις κατάλληλες επεμβάσεις στον κινητήρα μπορεί να παρέχονται από την διαγνωστική συσκευή ή να είναι προϊόν της γνώσης και της εμπειρίας του μηχανικού, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του όλες τις πληροφορίες που προσφέρει η διαγνωστική διαδικασία.



3.3 Διαγνωστικές τεχνικές ως εργαλείο βελτιστοποίησης του κινητήρα

Η διαγνωστική διαδικασία προσφέρει, όπως αναλύθηκε, τη δυνατότητα στο μηχανικό να επαναφέρει τον δυσλειτουργικό κινητήρα στη φυσιολογική του συμπεριφορά. Ωστόσο, διαθέτει και μια άλλη, εξίσου σημαντική ιδιότητα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι διαγνωστικές τεχνικές και ως εργαλεία για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του κινητήρα. Η πολυπλοκότητα των σημερινών κινητήρων, καθώς και η ανάγκη για ελάττωση του κόστους λειτουργίας τους, χωρίς αρνητικά επακόλουθα (λ.χ. αύξηση ρύπων), επιβάλλουν την εκμετάλλευση αυτών των δυνατοτήτων που παρέχουν τα διαγνωστικά συστήματα. Η βελτιστοποίηση στην οποία αναφέρονται τα ανωτέρω καθίσταται δυνατή χάρη στη δυνατότητα πρότασης των απαιτούμενων ρυθμίσεων και στη δυνατότητα πρόβλεψης της επίδρασης κάποιας ρύθμισης που θα αποφασισθεί.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της λειτουργίας των διαγνωστικών μεθόδων ως εργαλεία βελτιστοποίησης της λειτουργίας του κινητήρα αποτελεί η ρύθμιση της προπορείας (έγχυση του καυσίμου προτού το έμβολο ανέλθει στο ΑΝΣ), με σκοπό την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, με ταυτόχρονη διατήρηση των NO_x και της μέγιστης πίεσης καύσης εντός των προβλεπόμενων ορίων. Γνωστή είναι επίσης η στροφή των ναυτιλιακών εταιρειών στην πλεύση με χαμηλή ταχύτητα, τη γνωστή λειτουργία *slow steaming*, για οικονομικούς λόγους. Όμως, οι μεγάλοι ναυτικοί κινητήρες δεν ενδείκνυνται για λειτουργία σε χαμηλά φορτία. Η χρήση των διαγνωστικών συστημάτων μπορεί να συμβάλει στον προσδιορισμό των ρυθμίσεων ή των τεχνικών εκείνων που θα επιτρέψουν την λειτουργία του κινητήρα σε αυτές τις συνθήκες (π.χ. χρήση ενός εκ των δύο υπερπληρωτών, μετατροπή της έλικας με σκοπό την αλλαγή της φόρτισης, κ.α.). Αν χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα του δίχρονου κινητήρα της MAN B&W 9K90MC-C6 (41130 KW / 104 rpm), μια πιθανή αύξηση της απόδοσής του κατά 1% στο 75% του φορτίου θα μείωνε την ειδική κατανάλωση καυσίμου κατά 0,05 t/h. Σε ετήσια κλίμακα μια τέτοια βελτίωση μπορεί να εξοικονομήσει 250 τόνους καυσίμου, με δεδομένη ειδική κατανάλωση καυσίμου 171 g/KWh. Οφέλη σαν το αναφερθέν καθίστανται δυνατά με τις κατάλληλες (βέλτιστες) ρυθμίσεις, που προτείνουν οι διαγνωστικές τεχνικές, στη μηχανή και συγκεκριμένα στα συστήματα κατανάλωσης καυσίμου και πρόωσης (αν πρόκειται για ναυτικό κινητήρα). Παράλληλα η διαγνωστική συμβάλλει στην ανίχνευση κάποιου προβλήματος ή δυσλειτουργίας πριν αυτό εμφανίσει αρνητικές συνέπειες για τον κινητήρα, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του.



3.4 Εξέλιξη των διαγνωστικών συστημάτων

Με την εμφάνιση των μηχανών Diesel έγινε αισθητή και η ανάγκη διάγνωσης των βλαβών τους. Σημαντικό και πρώτο εργαλείο της διαγνωστικής διαδικασίας, το οποίο λόγω της απλότητάς του διατηρήθηκε μέχρι και σήμερα, είναι η ανακάλυψη και η εφαρμογή του μηχανικού δυναμοδείκτη. Το εργαλείο αυτό αποτελεί την πρώτη προσπάθεια για μέτρηση της πίεσης του κυλίνδρου. Τα πρώτα δυναμοδεικτικά διαγράμματα καταγράφηκαν από τον ίδιο τον Rudolf Diesel το 1893.

Με την ανάπτυξη των κινητήρων Diesel και τη χρησιμοποίησή τους για την κίνηση πλοίων, τρενών, γεννητριών, αντλιών κλπ. λόγω των αυξημένων απαιτήσεών τους σε ισχύ, αυξήθηκε η πολυπλοκότητα και το μέγεθός τους. Για το λόγο αυτό, οι πρώτοι τύποι μηχανών που κυκλοφόρησαν ήταν εφοδιασμένοι και με λίγα ενδεικτικά όργανα πάνω στη μηχανή, όπως θερμομέτρα και μανόμετρα. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τη γενικότερη τάση που επικράτησε στη βιομηχανία και τη ναυπηγική, για τη βελτίωση των συνθηκών εργασίας των μηχανικών και την αποδοτικότερη παρακολούθηση της λειτουργίας της μηχανής, έγινε η πρώτη σχεδίαση και ο εξοπλισμός των μηχανοστασίων με δωμάτια ελέγχου (control rooms). Σε αυτά τοποθετήθηκαν όλα τα τμήματα των οργάνων που προειδοποιούν με φωτεινό ή και ακουστικό σήμα, όταν κάποια παράμετρος υπερβαίνει ή υπολείπεται κάποιας τιμής αναφοράς, της οποίας τα όρια έχουν εκ των προτέρων καθοριστεί.

Με τη ραγδαία αύξηση της τιμής των καυσίμων που συνεχίζεται μέχρι τις μέρες μας, έγινε εξίσου σημαντική και η διάγνωση των λειτουργικών βλαβών των μηχανών. Σε πρώτη φάση αναπτύχθηκαν ιδιαίτερα πολύπλοκα όργανα και συσκευές ακριβείας προσαρμοσμένα ή προσαρμοζόμενα, κατά περίπτωση, στη μηχανή που θέλουμε να κάνουμε διάγνωση. Τέτοια ήταν συστήματα μέτρησης της ισχύος του κινητήρα και λήψη δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων με πιεζοκρυστάλλους. Παρατηρήθηκε όμως έλλειψη της αγοράς σε προσωπικό κατάλληλου επιπέδου, ώστε να μπορούσε να αξιολογήσει αυτές τις ενδείξεις και την αλληλεξάρτηση των παραγόντων που υπεισέρχονται στο πρόβλημα της διάγνωσης. Το γεγονός αυτό ανάγκασε τις εταιρείες παραγωγής συστημάτων διαγνωστικού σκοπού λειτουργικών βλαβών να αναπτύξουν συστήματα που έχουν την δυνατότητα, μεταξύ των άλλων και να επεξεργάζονται οι ίδιες αυτές τις πληροφορίες.

Έτσι, δημιουργήθηκαν από το 1974 συστήματα που στηρίζονται στη χρήση των μικροϋπολογιστών, όπως τα συστήματα SHIPCON – DEMOS και PREDIKT I & II, το Νοέμβριο του 1977 στη Νορβηγία. Η απόλυτη εξειδίκευση των συστημάτων αυτών, που σχεδιάζονται και τοποθετούνται πάνω σε ένα συγκεκριμένο πλοίο παρά τη χρήση μικροϋπολογιστών, δεν μπόρεσε να ξεπεράσει την ανάγκη σε τακτά



χρονικά διαστήματα να γίνεται βαθμονόμηση του συστήματος στις νέες συνθήκες μέτρησης, διαδικασία χρονοβόρα και πολυέξοδη. Η συγκεκριμένη ανάγκη καλύφθηκε με την συγκρότηση ειδικών διαγνωστικών τμημάτων, τα οποία διαθέτουν κατάλληλο εξοπλισμό και προσωπικό. Τα διαγνωστικά αυτά τμήματα εξελίχθηκαν σε δύο τύπους. Ο πρώτος περιλαμβάνει τα τμήματα τοπικού χαρακτήρα, που κάνουν διάγνωση σε πλοία, τα οποία πρόκειται να επισκευάσει η εταιρία στην οποία ανήκουν. Η διάγνωση γίνεται πριν την επισκευή και το διαγνωστικό τμήμα προβαίνει σε ποιοτικό έλεγχο της επισκευής μετά από αυτήν. Ο δεύτερος τύπος αποτελείται από τα τμήματα διεθνούς χαρακτήρα, τα οποία κάνουν πλήρεις μετρήσεις σε μια χρονική στιγμή και με βάση αναφορές στη λειτουργική κατάσταση του κινητήρα, εντοπίζουν τη βλάβη και παρέχουν οδηγίες και συμβουλές σε πλοία που κινούνται σε ευρύτερες γεωγραφικές περιοχές.

Τα τελευταία χρόνια, πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη συστημάτων διάγνωσης βλαβών για κινητήρες Diesel. Ο Jardine και οι συνεργάτες του παρουσίασαν το 1989 μία μέθοδο μοντελοποίησης κινδύνου (hazards modeling) με σκοπό τον προσδιορισμό, με τη βοήθεια ενός έμπειρου συστήματος ανάλυσης λιπαντικού, του κινδύνου εμφάνισης βλάβης σε κινητήρες Diesel. Οι Gelgele και Wang περιέγραψαν το 1998 την εφαρμογή ενός έμπειρου συστήματος για κινητήρες αυτοκινήτων. Το πρωτότυπο λογισμικό που ονομάζεται EXEDS (EXpert Engine Diagnosis System) αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας την KnowledgePro, ένα εργαλείο ανάπτυξης έμπειρων συστημάτων, που εκτελείται σε προσωπικό υπολογιστή. Ο σκοπός του λογισμικού αυτού είναι να βοηθήσει τους μηχανικούς στη διάγνωση βλαβών προβαίνοντας σε συστηματική ανάλυση των συμπτωμάτων της βλάβης με ταυτόχρονη παροχή οδηγιών συντήρησης ή άλλων συμβουλευτικών υπηρεσιών. Ο Grimmelius και οι συνεργάτες του το 1999 περιέγραψαν και συνέκριναν διαφορετικές τεχνικές παρακολούθησης καταστάσεων (condition – monitoring). Οι τεχνικές αυτές, που ανέπτυξαν για κινητήρες πλοίων, αφορούσαν την παρακολούθηση της τεχνικής κατάστασης με βάση τις δονήσεις από την περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα και την πίεση του συστήματος ψύξης. Οι Lebold και Thurston περιέγραψαν το 2001 τις απαιτήσεις ενός ευρύτερου συστήματος CBM (Condition Based Maintenance) και πρόγνωσης βλαβών. Ο Su και οι συνεργάτες του, επίσης το 2001, προσπάθησαν να μελετήσουν τη σχέση ανάμεσα στην ανθρώπινη γνώση και τη χρήση των ευφύων μηχανών στο τομέα της τεχνικής συντήρησης. Για το σκοπό αυτό ανέπτυξαν ένα έμπειρο σύστημα προσδιορισμού των βλαβών για τις ανάγκες του τμήματος συντήρησης κινητήρων Diesel των λεωφορείων της πόλης Ταϊπέι του Ταϊβάν. Ο Tafreshi και οι συνεργάτες του το 2002 ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο ανάλυσης κυματομορφών, ο οποίος βασίζεται σε σήματα δονήσεων (vibration signals) στο πεδίο του χρόνου, τα οποία στη συνέχεια επεξεργάζεται και προβαίνει σε ταξινόμηση βλαβών. Ο Mustapha και οι συνεργάτες του πρότειναν το 2004 ένα σύστημα βασισμένο στη γνώση (knowledge – based



system) που παρέχει βοήθεια σε μηχανικούς για να πραγματοποιούν γρήγορη και ακριβή διάγνωση βλαβών των μηχανών αεροσκαφών. Ο Pernestal και οι συνεργάτες του περιέγραψαν το 2006 μια προσέγγιση κατά Bayes (Bayesian approach) που απομονώνει τις βλάβες και μπορεί να βρει εφαρμογή στη διαγνωστική των κινητήρων Diesel. Λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο μετρήσεων από το σύστημα και ένα σύνολο πιθανών βλαβών, ο στόχος είναι να υπολογιστεί η πιθανότητα εμφάνισης βλάβης. Η τεχνική αξιολόγησης της ποιότητας των λιπαντικών είναι μια χρήσιμη μέθοδος στον έλεγχο της τεχνικής κατάστασης και τη διάγνωση βλαβών για τους κινητήρες Diesel, ειδικά για εκείνους που λειτουργούν με χαμηλό αριθμό στροφών και υπό μεγάλα φορτία. Αλλά είναι δύσκολο να εφαρμοστεί ένα ευφυές σύστημα διάγνωσης, επειδή οι πληροφορίες που λαμβάνονται στερούνται λογικών σχέσεων. Για να λύσουν αυτό το πρόβλημα, ο Zhao και οι συνεργάτες του υιοθέτησαν το 2006 μία μέθοδο συλλογιστικής των περιπτώσεων (case – based reasoning). Στη συλλογιστική αυτή χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες περιπτώσεις προβλημάτων που αντιμετωπίστηκαν στο παρελθόν. Η επιλογή της κατάλληλης περίπτωσης βασίζεται στην ομοιότητά της με την τρέχουσα.

Η λίστα με τις μεθόδους επιτήρησης και διάγνωσης βλαβών κινητήρων Diesel συμπληρώνεται σήμερα με πολλά διαγνωστικά συστήματα ανεπτυγμένα από διάφορες κατασκευαστικές εταιρίες ή άλλους μηχανικούς ερευνητές. Σημαντικό μειονέκτημα της συντριπτικής πλειοψηφίας αυτών είναι το πολύ περιορισμένο φάσμα εφαρμογής τους. Πιο συγκεκριμένα, τα περισσότερα από τα εν λόγω συστήματα εφαρμόζονται μόνο στους κινητήρες της εταιρίας η οποία και τα ανέπτυξε ή ακόμα και σε ένα μόλις μοντέλο κινητήρα. Παράλληλα με την αρνητικά εξειδικευμένη χρήση τους, έχουν τις περισσότερες φορές και μεγάλο έως δυσανάλογο κόστος, με αποτέλεσμα να αδυνατούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο στα χέρια του μηχανικού. Ανάμεσά τους, ωστόσο, διακρίνονται και ορισμένα διεθνώς αναγνωρισμένα διαγνωστικά συστήματα, τα οποία προσφέρουν μια ευρεία γκάμα δυνατοτήτων και συνεχώς αναβαθμίζονται βελτιώνοντας τη λειτουργία τους.

Η έρευνα στον τομέα της διαγνωστικής διαδικασίας συνεχίζεται στις μέρες μας με έντονο και αυξημένο ενδιαφέρον, με στόχο τον σχεδιασμό ολοένα και αποτελεσματικότερων μεθόδων επιτήρησης κινητήρων Diesel και επιτυχούς και έγκαιρης διάγνωσης των βλαβών που προκύπτουν.



3.5 Η πίεση κυλίνδρου ως βασικό μέγεθος της διαγνωστικής διαδικασίας

Η παρακολούθηση της λειτουργίας του κινητήρα μεταφράζεται σε παρακολούθηση κάποιων συγκεκριμένων παραμέτρων, η εξέλιξη των οποίων αποτελεί δείκτη της κατάστασης στην οποία βρίσκεται ο κινητήρας και επιτρέπει την έγκαιρη πρόβλεψη μιας πιθανής μελλοντικής βλάβης.

Οι περισσότερες δυσλειτουργίες των κινητήρων Diesel, στους οποίους στοχεύει κατά κόρον η παρούσα ανάλυση, είναι συνδεδεμένες με τη διαδικασία της καύσης εντός των κυλίνδρων. Στην πολύπλοκη αυτή διαδικασία λαμβάνει μέρος πλήθος υποσυστημάτων, όπως οι βαλβίδες ο εκκεντροφόρος άξονας, οι εγχυτήρες, οι αντλίες και το σύστημα υπερπλήρωσης (συμπιεστής – στρόβιλος). Η πίεση των αερίων στο εσωτερικό του κυλίνδρου συνιστά την πιο σημαντική πληροφορία για την εποπτεία όλων των μηχανισμών και των διαδικασιών που συμβαίνουν εντός του θαλάμου καύσης ενός κινητήρα Diesel. Η μέτρησή της αποτελεί το πρώτο σημαντικό ζητούμενο της πλειοψηφίας των μεθόδων παρακολούθησης της λειτουργίας του κινητήρα και διάγνωσης βλαβών. Η επεξεργασία των τιμών της πίεσης στον κύλινδρο είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μπορεί να δώσει στον μηχανικό χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την ισχύ της μηχανής, το ρυθμό έκλυσης θερμότητας, τη γωνία ανάφλεξης, τη διάρκεια της καύσης και την ποιότητα της συμπίεσης. Συνεπώς, αναδεικνύεται η πίεση εντός του κυλίνδρου ως το κύριο μέγεθος επίβλεψης της λειτουργίας ενός κινητήρα, στη μέτρηση του οποίου βασίζεται το πρώτο στάδιο της διάγνωσης βλαβών.



4. Καταγραφή της πίεσης κυλίνδρου

4.1 Μέτρηση πίεσης θαλάμου καύσης

4.1.1 Εισαγωγή

Η πίεση εντός του κυλίνδρου, όπως περιγράφηκε και σε προηγούμενη ενότητα, είναι μια πολύτιμη πηγή πληροφοριών για τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον θάλαμο καύσης. Η μέτρησή της και η εκτίμηση των παράγωγων μεγεθών που προκύπτουν από την επεξεργασία της (όπως η μέγιστη πίεση καύσης, η ενδεικνύμενη ισχύς, η μέση ενδεικνύμενη πίεση κλπ.), αποτελούν αντικείμενο συστηματικής μελέτης τις τελευταίες δεκαετίες. Βασική επιδίωξη αποτελεί η καταγραφή της πίεσης με ικανοποιητική ακρίβεια, καθώς η συγκεκριμένη διαδικασία, παρόλο που είναι ευρέως διαδεδομένη, παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες και εγκυμονεί πιθανές αιτίες σφαλμάτων.

Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή της πίεσης καύσης σε τεχνικές Παρακολούθησης Λειτουργίας και Διάγνωσης Βλαβών (Condition Monitoring and Fault Diagnosis) μεσαίων και μεγάλων κινητήρων Diesel, που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπαραγωγή και την ναυτιλία. Σε αυτό το πλαίσιο έχουν αναπτυχθεί ποικίλα συστήματα μέτρησης της πίεσης καύσης, ένα από τα οποία είναι και το εξεταζόμενο στην παρούσα μελέτη.

4.1.2 Σύγχρονες Προκλήσεις

Ο σχεδιασμός των συστημάτων καταγραφής της πίεσης καύσης συναντά πολλές προκλήσεις, τις οποίες οι μηχανικοί προσπαθούν να αντιμετωπίσουν. Αυτές περιλαμβάνουν τη μείωση του κόστους κατασκευής τέτοιων συστημάτων, το οποίο πολλές φορές αποτελεί τροχοπέδη για την εφαρμογή τους. Ζήτημα συνιστά και η φορητότητά τους σε συνδυασμό με το μικρότερο βάρος και όγκο τους, με τα τελευταία επιτεύγματα στο χώρο της διαγνωστικής να κινούνται επιτυχώς προς αυτή την κατεύθυνση. Σημαντική είναι, επίσης, η απαλλαγή των εν λόγω συστημάτων από εξωτερική ηλεκτρική τροφοδοσία. Επιπροσθέτως, απαραίτητη είναι η απλότητα στη λειτουργία τους και η ασφάλεια των επιμέρους εξαρτημάτων τους με κατάλληλη ηλεκτρική μόνωση. Σημαντικό πρόβλημα αποτελεί το γεγονός ότι απαιτείται η ανάγνωση της θέσης του ΑΝΣ για να παρέχει το μετρημένο σήμα



της πίεσης κυλίνδρου αναφορά γωνίας στροφάλου. Σε αρκετές περιπτώσεις αυτό είναι δύσκολο και σε μερικές αδύνατο για κατασκευαστικούς λόγους.

Όσον αφορά τις μεγάλες δίχρονες μηχανές δοκιμάζεται έντονα η αποτελεσματικότητα της διαγνωστικής στις περιπτώσεις όπου χρειάζεται να εντοπιστεί η αιτία που προκαλεί μειωμένη ισχύ εξόδου ή αυξημένη θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων, ενώ δεν υπάρχει προφανής βλάβη. Συνήθως οι μηχανικοί χρησιμοποιούν δεδομένα που λαμβάνουν από διάφορα υποσυστήματα του κινητήρα και αφορούν τη γενικότερη κατάσταση λειτουργίας του. Τα δεδομένα αυτά όμως, αν και είναι απαραίτητα, δεν επαρκούν για την ακριβή και έγκαιρη ανίχνευση της αιτίας που οδηγεί στη δυσλειτουργία. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος έχουν προταθεί ποικίλες μέθοδοι διάγνωσης βλαβών, οι οποίες όμως είναι στατιστικές και βασίζονται στη συσχέτιση των μετρήσεων από τη δυσλειτουργικής μηχανής με μετρήσεις που αποθηκεύτηκαν κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μηχανής υπό συνθήκες κάποιας γνωστής βλάβης. Ή αντίθετα, συγκρίνουν οι μέθοδοι αυτές την παρούσα κατάσταση μια μηχανής με τα δεδομένα ιδανικής λειτουργίας. Ωστόσο, είναι πάρα πολύ δύσκολο, ή και αδύνατο, να γίνει η κατάλληλη συσχέτιση της παρούσας κατάστασης ενός κινητήρα με μια δοσμένη κατάσταση δοκιμών παραλαβής (shop test). Αλλά ακόμα κι αν αυτό συμβεί, είναι ιδιαίτερα δύσκολο να εντοπιστεί η ακριβής αιτία για την βλάβη του κινητήρα. Η σημερινή τεχνολογία προσπαθεί να προσφέρει λύσεις με την ανάπτυξη νευρωνικών δικτύων. Αν και είναι σχετικά πρώιμη η κριτική για τις συγκεκριμένες τεχνικές διάγνωσης, γίνεται φανερό η αδυναμία ευρείας εφαρμογής τους, καθώς είναι συνήθως σχεδιασμένες για ένα συγκεκριμένο μοντέλο μηχανής. Επιπλέον, απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων τα οποία συνήθως δεν είναι εύκολα διαθέσιμα για επί τούτου χρήση και παρέχουν λίγες πληροφορίες σχετικά με τη ρύθμιση του κινητήρα.

Καλείται έτσι η επιστήμη της μηχανολογίας να ανταπεξέλθει στις σύγχρονες απαιτήσεις προσφέροντας αποδοτικές και αποτελεσματικές λύσεις σε όλα τα θέματα που προαναφέρθηκαν και να συνεχίσει με αυτό τον τρόπο την προοδευτική βελτίωση της διαγνωστικής διαδικασίας.

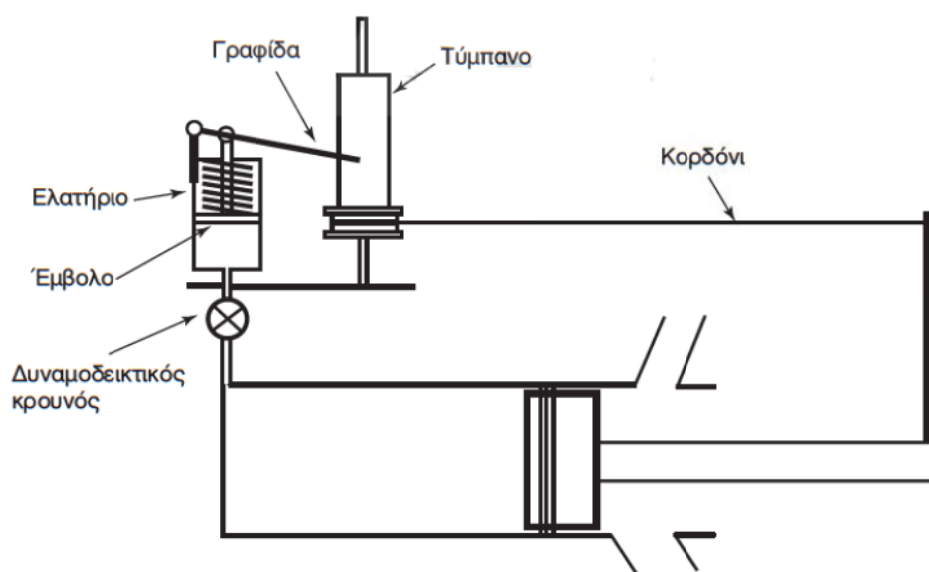
4.2 Ο μηχανικός δυναμοδείκτης

Ο μηχανικός δυναμοδείκτης συνιστά την πρώτη συσκευή με την οποία προσπάθησαν και κατάφεραν οι μηχανικοί να καταγράψουν την πίεση του θαλάμου καύσης. Από κινηματικής άποψης, αποτελεί έναν μηχανισμό Evan's πρώτου είδους, για τη λήψη δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων της μορφής $p-x$ και $p-V$.

Η συσκευή αυτή, η οποία χρησιμοποιείται και σήμερα χάρη στην ευχρηστία και την αμεσότητά της, προσαρμόζεται στο δυναμοδεικτικό κρουνό του πώματος και επικοινωνεί με τον κύλινδρο μέσω οπής και βάνας. Η πίεση του κυλίνδρου



μετακινεί ένα μικρό έμβολο, η κίνηση του οποίου εμποδίζεται από ένα επανατατικό ελατήριο συγκεκριμένης σταθεράς. Η μετακίνηση του μικρού εμβόλου είναι ανάλογη της πίεσης στο εσωτερικό του κυλίνδρου με σταθερά αναλογίας τη σταθερά του ελατηρίου. Η μετακίνηση αυτή μεταβιβάζεται με σύστημα μοχλών σε μια μεταλλική γραφίδα, η οποία καταγράφει την κίνηση του μικρού εμβόλου σε ειδικό χαρτί που τυλίγεται σε ένα τύμπανο (καταγραφικό τύμπανο). Το τύμπανο αυτό περιστρέφεται γύρω από άξονα, ενώ ένα επανατατικό ελατήριο τείνει να το επαναφέρει στην αρχική του θέση. Η περιστροφή του πραγματοποιείται με τη χρήση βοηθητικού μηχανισμού σε συγχρονισμό με την κίνηση του εμβόλου της μηχανής (παίρνοντας κίνηση από το στροφαλοφόρο άξονα ή από το ζύγωμα ή από βοηθητικό μηχανισμό). Ένα λεπτό σχοινί (κορδόνι), που τυλίγεται σε τροχαλία συνδεδεμένη με το τύμπανο, συνδέεται στο βοηθητικό μηχανισμό που ακολουθεί την κίνηση του στροφαλοφόρου άξονα (π.χ. εκκεντροφόρος αντλίας καυσίμου). Έτσι, η περιστροφική κίνηση του τυμπάνου αναλογεί στην απόσταση x που διανύει το έμβολο ή στον όγκο V που σαρώνει. Η γραμμική κίνηση της γραφίδας αντιστοιχεί στη μεταβολή της πίεσης p εντός του κυλίνδρου του κινητήρα. Η κλίμακα της πίεσης στο διάγραμμα που προκύπτει, εξαρτάται από τη σταθερά του ελατηρίου, ενώ η κλίμακα της απόστασης x εξαρτάται από τη γεωμετρία του βοηθητικού μηχανισμού, που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του τυμπάνου.



Σχήμα 4.1. Σκαρίφημα μηχανικού δυναμοδείκτη συνδεδεμένου σε δίχρονο κινητήρα

Το σύστημα του μηχανικού δυναμοδείκτη επειδή συμπεριλαμβάνει κινούμενες μάζες, έχει το μειονέκτημα της αυξημένης αδράνειας, οπότε είναι κατάλληλο για μικρές ταχύτητες περιστροφής ($n < 1000$ rpm, μεγάλες βραδύστροφες μηχανές). Παρά την γενικότερη αξιοπιστία του, ο μηχανικός δυναμοδείκτης εμφανίζει και κάποιες δυσχέρειες στη λειτουργία του. Πιο αναλυτικά, η συνηθισμένη μέθοδος μέτρησης με αυτή τη συσκευή παράγει μία



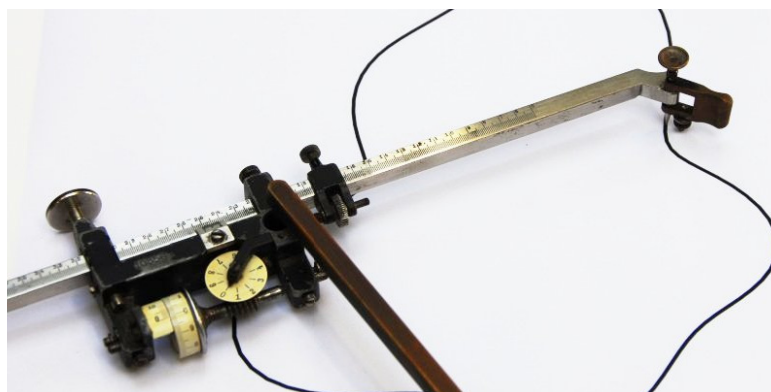
γραμμική παράσταση με τη χρήση μελάνης και μίας βελόνας, πάνω σε ένα κυλινδρικό τύμπανο, η οποία έπειτα πρέπει να μελετηθεί και να ερμηνευθεί κατάλληλα. Στη συνέχεια χρειάζεται η αξιόλογη εμπειρία ενός χειριστή, ώστε οι σημειωθείσες τιμές να καταχωρηθούν χειρόγραφα και να μεταδοθούν αντίστοιχα, εφ' όσον χρειασθεί και σε άλλες πηγές αναφοράς. Η διαδικασία παρουσιάζει πρόσθετες δυσκολίες διότι, κατά τη μέτρηση, η βελόνα πιθανόν να αυτοκραδαίνεται λόγω των παραγόμενων κραδασμών της λειτουργίας της μηχανής, παράγοντας μικρο-αποκλίσεις από το κανονικό αποτέλεσμα. Μετά το τέλος της μέτρησης, η μηχανική συσκευή του δυναμοδείκτη θα πρέπει να καθαρισθεί και να λιπανθεί αντίστοιχα για να χρησιμοποιηθεί εκ νέου, γεγονός που καθυστερεί την διεξαγωγή των επόμενων μετρήσεων.

Από την άλλη μεριά, επειδή ο μηχανικός δυναμοδείκτης δίνει κατευθείαν το διάγραμμα $p-V$, έχει το πλεονέκτημα του εύκολου καθορισμού των ΑΝΣ και ΚΝΣ, τα οποία και αντιστοιχούν στα ακραία σημεία του διαγράμματος.



Σχήμα 4.2. Μηχανικός δυναμοδείκτης προσαρμοσμένος στον κρουνό. Διακρίνεται το ίχνος του διαγράμματος πίεσης – όγκου

Το διάγραμμα $p - V$ που σχηματίζεται από τον μηχανικό δυναμοδείκτη μπορεί να εμβαδομετρηθεί προκειμένου να προκύψει το ενδεικνύμενο έργο W_i . Η μέτρηση αυτή γίνεται με το πλανίμετρο (planimeter), το οποίο είναι ένα όργανο υπολογισμού του εμβαδού διδιάστατου σχήματος.



Σχήμα 4.3. Υπολογισμός εμβαδού με πλανίμετρο

4.3 Ο ηλεκτρονικός δυναμοδείκτης

Ο ηλεκτρονικός δυναμοδείκτης είναι μια φορητή μονάδα επίβλεψης της διαδικασίας της καύσης σε έναν κινητήρα Diesel. Η λειτουργία του στοχεύει στην περιοδική ανίχνευση και μέτρηση της πίεσης στους κυλίνδρους σε μηχανές πλοίων και μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.



Σχήμα 4.4. Ηλεκτρονικός δυναμοδείκτης



Σχήμα 4.5. Ηλεκτρονικός δυναμοδείκτης προσαρμοσμένος στον κρουνό εν ώρα λειτουργίας

Παράγει το διάγραμμα πίεσης – γωνίας στροφάλου ($p - \phi$), επιτρέποντας την επιτήρηση της λειτουργικής κατάστασης του κινητήρα και τον εντοπισμό τυχόν βλαβών ή ανωμαλιών σε πρώιμο στάδιο εμφάνισής τους. Ο ηλεκτρονικός δυναμοδείκτης αποτελείται από ένα μορφοτροπέα πίεσης (pressure transducer), ο οποίος συνδέεται σε κατάλληλη υποδοχή του πώματος του κυλίνδρου (δυναμοδεικτικός κρουός) και μετατρέπει την πίεση εντός του κυλίνδρου σε



ένταση ή τάση ως συνάρτηση της γωνίας στροφάλου ϕ στην οθόνη παλμογράφου (ή ηλεκτρονικού υπολογιστή). Η δυνατότητα σύνδεσης της συσκευής με ηλεκτρονικό υπολογιστή προσφέρεται για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία της πίεσης που καταγράφεται. Στα πλεονεκτήματα της συσκευής εντάσσεται η απουσία μηχανικής αδράνειας, κάτι που επιτρέπει τη χρήση της συσκευής σε πολύστροφες μηχανές. Επιπλέον, το διάγραμμα της πίεσης που εξάγεται από τον ηλεκτρονικό δυναμοδείκτη δεν επηρεάζεται από τους κραδασμούς της μηχανής και η συσκευή είναι απαλλαγμένη από την ανάγκη για καθαρισμό και λίπανση πριν από κάθε χρήση. Το μειονέκτημά της είναι η δυσχέρεια στον καθορισμό των ΑΝΣ και ΚΝΣ, λόγω της χρήσης της γωνίας στροφάλου ως μεταβλητό μέγεθος. Το μειονέκτημα αυτό διορθώνεται με τη χρησιμοποίηση ανιχνευτή για το ΑΝΣ (δημιουργώντας κατάλληλη εγκοπή στο σφόνδυλο της μηχανής).

4.4 Ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας – μεταλλάκτης

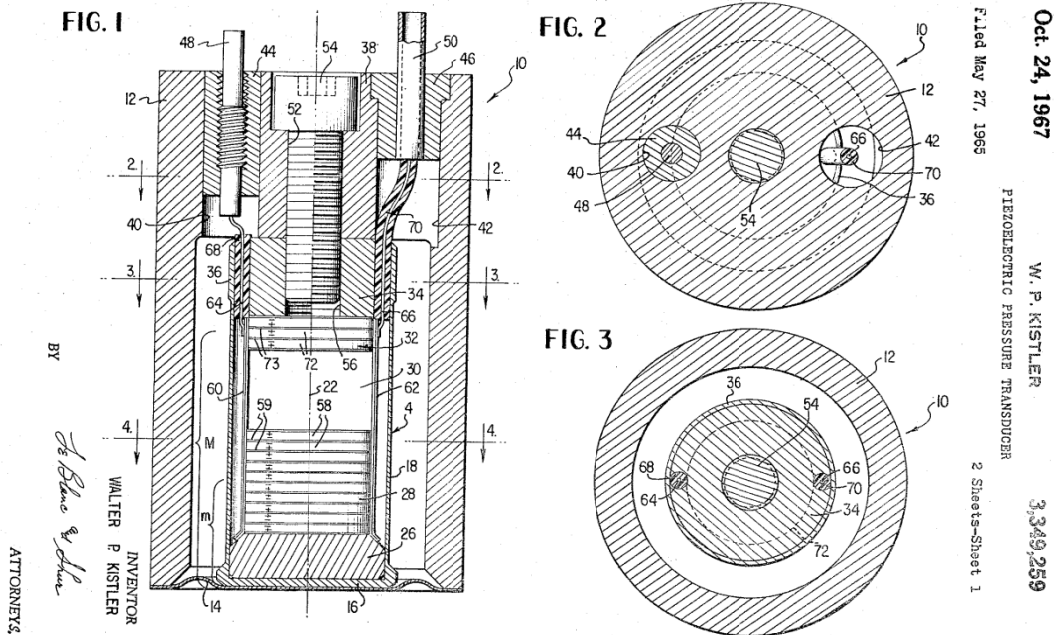
Στα πρώιμα στάδια της επιτήρησης της λειτουργίας των μηχανών και της διάγνωσης των βλαβών τους, οι μετρήσεις της πίεσης κυλίνδρου πραγματοποιούνταν, όπως ήδη περιγράφηκε, με μηχανικό τρόπο, παρέχοντας μια γραφική απεικόνιση του κύκλου σε μορφή πίεσης – όγκου και πίεσης – γωνίας στροφάλου. Η καταγραφή βασίζεται σε πρωτογενείς μηχανισμούς και ως εκ τούτου είναι σχετικά ακριβής. Όμως, οι δυνατότητες αξιοποίησης αυτών των διαγραμμάτων είναι περιορισμένες. Λόγω της αξιοπιστίας της, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται και σήμερα, ιδιαίτερα στις δοκιμές παραλαβής βραδύστροφων κινητήρων. Στα πλαίσια της μέτρησης και καταγραφής της πίεσης καύσης, μια σειρά από μεθόδους έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί, όπως μηχανικοί ενδείκτες μέσης και μέγιστης πίεσης, συστήματα οπτικής μετατροπής της μηχανικής ένδειξης, ηλεκτρομηχανικές διατάξεις, όπως ενδείκτες εξισορροπημένου διαφράγματος κ.α. Σήμερα τα σύγχρονα συστήματα λήψης μετρήσεων βασίζονται στην χρήση πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων και οπτικών αισθητήρων.

Ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο είναι ουσιαστικά η παραγωγή ηλεκτρικών τάσεων όταν εφαρμόζονται μηχανικές τάσεις, πιέσεις ή ταλαντώσεις, σε υλικά όπως ο χαλαζίας (SiO_2), το αλάτι Rochelle ή Seignette (τρυγικό καλιονάτριο, $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), το ADP (δισόξινο φωσφορικό αμμώνιο, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), το ένυδρο θειικό λίθιο ($\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ο τουρμαλίνης, το συνθετικό πολυμερές PVDF (polyvinylidene difluoride) και άλλα συνθετικά, κεραμικά (PZTs), αλλά και βιολογικά υλικά (όπως τα κόκαλα). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε κρυσταλλικές ασυμμετρίες (οι κρύσταλλοι που παρουσιάζουν κεντρική συμμετρία δεν μπορούν να εμφανίσουν πιεζοηλεκτρισμό) και τυγχάνει σήμερα ευρείας εκμετάλλευσης σε διάφορες εφαρμογές της



ακουστικής (ηλεκτροακουστική, ηλεκτροακουστικοί μορφοτροπείς, βιοϊατρική κλπ.) όπως στους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες.

Παρόλο που το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι γνωστό από το 1880 όταν και το ανακάλυψε ο Πιερ Κιουρί (Pierre Curie), χρειάστηκε να περάσουν εβδομήντα χρόνια για να τεθούν σε βιομηχανικές μετρητικές εφαρμογές οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες (μόλις το 1950). Το 1967, ο Walter Kistler κατέθεσε πατέντα στην οποία περιγράφεται ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης με την μορφή που χρησιμοποιείται και σήμερα.



Σχήμα 4.6. Η πατέντα του Walter P. Kistler με τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα (1967)

Από τότε αυτή η τεχνολογία μέτρησης αναπτύχθηκε σταθερά και σήμερα πλέον θεωρείται μια ώριμη και αξιόπιστη τεχνολογία. Έχει δε χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε κρίσιμης ασφάλειας μετρητικές εφαρμογές στην αεροδιαστημική, την ιατρική και την πυρηνική τεχνολογία.

Η ανάπτυξη της πιεζοηλεκτρικής τεχνολογίας συνδέεται άμεσα με ένα σύνολο από εγγενή πλεονεκτήματα που παρουσιάζει. Συγκεκριμένα, οι αισθητήρες αυτού του τύπου παρουσιάζουν πολύ καλή ακρίβεια, μεγάλο μετρητικό εύρος, καλά θερμικά χαρακτηριστικά, ανθεκτικότητα και μικρό μέγεθος. Παρουσιάζουν επίσης υψηλή ευαισθησία, λόγω του μεγάλου εύρους σήματος εξόδου (ηλεκτρική τάση ή φορτίο ανάλογα με την διάταξη) ως προς την κλίμακα μέτρησης. Το υψηλό μέτρο ελαστικότητας πολλών πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι συγκρίσιμο με αυτό των μετάλλων και φθάνει στα 105 N/mm^2 . Αν και οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι ηλεκτρομηχανικά συστήματα που αντιδρούν στην συμπίεση, οι αισθητήρες παρουσιάζουν μηδενική παραμόρφωση. Αυτός είναι και ο λόγος που οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι τόσο στιβαροί και παρουσιάζουν πολύ υψηλή



φυσική συχνότητα και γραμμική συμπεριφορά για μεγάλο εύρος πλάτους. Επιπλέον, δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία και ακτινοβολία επιτρέποντας την χρήση τους σε αντίξοες συνθήκες. Μερικά, μάλιστα, υλικά (ειδικά το Ορθοφωσφορικό Άλας του Γαλλίου και ο τουρμαλίνης) παρουσιάζουν σταθερότητα στη θερμοκρασία με αποτέλεσμα να μπορούν να λειτουργούν μέχρι και στους 1000°C. Σημαντικά προτερήματα εμφανίζουν οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες έναντι και των αισθητήρων αντίστασης - των οποίων η αντίσταση μεταβάλλεται συναρτήσει της πίεσης (piezoresistive sensors), χάρη στο θερμοκρασιακό εύρος μέτρησης που διαθέτουν. Πιο αναλυτικά το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας φτάνει για τους πρώτους μέχρι και τους 367°C, ενώ για τους δεύτερους αγγίζει τους 157°C. Τέλος, οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες υπερτερούν και των οπτικών αισθητήρων νέας γενιάς χάρη στην ακρίβειά τους, η οποία είναι ξεκάθαρα μεγαλύτερη.

Στα μειονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων περιλαμβάνεται η αδυναμία τους για μέτρηση της απόλυτης τιμής της πίεσης, που δημιουργεί την ανάγκη αναφοράς της πίεσης σε μια γνωστή τιμή. Ένα ακόμη πρόβλημα που εμφανίζεται στη διάρκεια της μέτρησης είναι η έκθεση του μεταλλάκτη σε μια μεταβαλλόμενη θερμική ροή, κατά τη διάρκεια μέτρησης της πίεσης του κυλίνδρου, ή οποία προκαλεί συνεχείς αλλαγές στη θερμοκρασία του. Αυτές οι θερμοκρασιακές αλλαγές τροποποιούν την ευαισθησία του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και επιβάλλουν θερμικές καταπονήσεις στο διάφραγμα και στο περίβλημα του αισθητήρα. Οι καταπονήσεις αυτές παράγουν ανεπιθύμητες δυνάμεις που δρουν πάνω στο στοιχείο χαλαζία προκαλώντας επιπρόσθετη αλλοίωση του σήματος που παρέχεται από τον μεταλλάκτη. Το σφάλμα που οφείλεται σε αυτούς τους παράγοντες ονομάστηκε θερμική μετακίνηση (pressure thermal drift, Marzouk & Watson, 1976). Στα αρνητικά σημεία του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα καταγράφεται και η ακαταλληλότητά του για πραγματοποίηση πραγματικά στατικών μετρήσεων. Μια στατική δύναμη θα είχε ως αποτέλεσμα μια σταθερή ποσότητα φορτίου στο πιεζοηλεκτρικό υλικό. Χρησιμοποιώντας κοινά ηλεκτρονικά, όχι τέλεια μονωτικά υλικά και δεδομένης της μείωσης της εσωτερικής αντίστασης του αισθητήρα, θα υπήρχε συνεχής απώλεια ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα το σήμα να ήταν ανακριβές.

Χάρη στα πλεονεκτήματα που προαναφέρθηκαν οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες υπερέχουν έναντι των υπόλοιπων αισθητήρων και χρησιμοποιούνται καθολικά στις μετρήσεις πίεσης καύσης. Κατά τη μέτρηση αυτή, ο αισθητήρας μετατρέπει την πίεση σε ένα μετρήσιμο μέγεθος, συνήθως διαφορά δυναμικού. Η τάση αυτή ψηφιοποιείται και προωθείται στον υπολογιστή του διαγνωστικού συστήματος. Η επεξεργασία της μετρημένης αλληλουχίας τιμών τάσης έτσι, ώστε να προκύψει μια αλληλουχία τιμών πίεσης με σωστή αναφορά γωνίας στροφάλου αποτελεί πολύ σημαντικό ζητούμενο της διαγνωστικής. Η σύνδεση αυτή με τη γωνία στροφάλου αναλύεται σε επόμενη ενότητα.



Σχήμα 4.7. Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας Kistler type 6613CP

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια μέτρηση της πίεσης κυλίνδρου χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί ειδικός προσαρμογέας, μέσω του οποίου συνδέεται ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας στο δυναμοδεικτικό κρουνό που αντιστοιχεί στον κύλινδρο.



Σχήμα 4.8. Αισθητήρας Kistler type 6613CP με προσαρμογέα τύπου Thompson

Το σήμα των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων συνήθως ενισχύεται από έναν ενισχυτή φορτίου με γραμμική απόκριση. Παρόλο που οι σύγχρονοι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι σχεδιασμένοι να ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις από την βραχυχρόνια θερμική μετακίνηση, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η ένταση αυτού του



φαινομένου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το θερμικό φορτίο στο σημείο που προσαρμόζεται ο αισθητήρας. Το θερμικό φορτίο επηρεάζεται από τις έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές που παρατηρούνται κατά τη φάση εναλλαγής των αερίων και από την προσέγγιση της δέσμης καυσίμου, εφόσον αναφερόμαστε σε κινητήρες Diesel. Έτσι, ο έλεγχος της έκτασης του θερμικού σοκ στη θέση του πιεζοηλεκτρικού μεταλλάκτη είναι απαραίτητος, ώστε να προκύψει κατά το δυνατόν ακριβής μέτρηση.

4.5 Μετατροπή τιμών τάσης σε τιμές πίεσης

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας, κατά τη διαγνωστική διαδικασία κινητήρων Diesel, παράγει τιμές τάσεις, μετατρέποντας την πίεση εντός του κυλίνδρου σε διαφορά δυναμικού. Ο μηχανικός, όμως, χρειάζεται τιμές πίεσης για να επεξεργαστεί τις μετρήσεις και να εξάγει συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργική κατάσταση του κινητήρα. Απαιτείται συνεπώς να γίνει μετατροπή των τιμών τάσης σε τιμές πίεσης. Αυτή καθίσταται δυνατή με χρήση του συντελεστή μετατροπής που αναγράφεται στο πιστοποιητικό βαθμονόμησης κάθε αισθητήρα.

Όμως μετά τη μετατροπή η απόλυτη τιμή των πιέσεων πρέπει να αναφερθεί σε μια γνωστή τιμή αναφοράς. Η αναφορά αυτή συνιστά στην ουσία την κατακόρυφη μετακίνηση του δυναμοδεικτικού διαγράμματος και αναφέρεται στην διεθνή βιβλιογραφία ως “pegging”. Μια απλοϊκή αλλά ακριβής προσέγγιση είναι η μετακίνηση του δυναμοδεικτικού, ώστε η μετρημένη τιμή της πίεσης σάρωσης, ή η ατμοσφαιρική πίεση στην περίπτωση κινητήρα φυσικής αναπνοής, να ταυτίζεται με την τιμή της πίεσης του δυναμοδεικτικού στις φάσεις που είναι ταυτόχρονα ανοιχτές οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής (απόπλυση). Διάφορες μέθοδοι αναφοράς έχουν προταθεί και αξιολογηθεί. Κάποιες απαιτούν απόλυτη αναφορά πίεσης, ενώ άλλες χρησιμοποιούν την καμπύλη πολυτροπικής συμπίεσης.

4.6 Κωδικοποιητές γωνίας στροφάλου

4.6.1 Γενικά

Οι θερμοδυναμικοί υπολογισμοί που αφορούν τον κινητήρα, γίνονται με αναφορά στη γωνία στροφάλου. Συνεπώς και οι μετρήσεις της πίεσης που λαμβάνονται από τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες πρέπει να έχουν γνωστή αντιστοίχιση με τη γωνία στροφάλου, από όπου υπολογίζεται ο όγκος του κυλίνδρου. Για να επιτευχθεί



αυτό, πρέπει να υπάρχει αναφορά αυτής της γωνίας (συνήθως αναφορά άνω νεκρού σημείου ή στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής) και παράλληλα οι μετρήσεις να έχουν ληφθεί με γνωστό και σταθερό βήμα γωνίας στροφάλου. Επίλυση στο πρόβλημα αυτής της αντιστοίχισης αποτελεί η χρήση αισθητήρα ή κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου (crank angle sensor/encoder), η τοποθέτηση του οποίου σε κινητήρες πραγματικής λειτουργίας είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Οι αισθητήρες θέσης γωνίας στροφάλου είναι συσκευές που παράγουν παλμούς ανά τακτά και ίσα διαστήματα περιστροφής. Έτσι, με τη χρήση του κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου επιτρέπεται η λήψη μετρήσεων της πίεσης σε προκαθορισμένα σημεία, με ρυθμό δειγματοληψίας σε ένα εύρος μεταξύ 0,1 – 1,0 γωνίας στροφάλου. Το γεγονός αυτό εγγυάται αρκετά μεγάλη ακρίβεια στο συσχετισμό της μετρούμενης πίεσης με την αντίστοιχη πραγματική γωνία στροφάλου της μηχανής, όπου εφαρμόζεται αυτή η πίεση.

Όμως σε κινητήρες που λειτουργούν στο πεδίο δεν είναι συνήθως δυνατή η εφαρμογή κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου (λόγω της δυσκολίας στην απαιτούμενη παρέμβαση στον κινητήρα) και συνεπώς είναι διαδεδομένη η μέτρηση με δειγματοληψία σταθερού βήματος χρόνου. Για την αναφορά της μέτρησης σε γωνία στροφάλου, κατά την επεξεργασία της μέτρησης, γίνεται γραμμική αναγωγή του χρόνου σε γωνία στροφάλου. Όμως, στην περίπτωση που η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται στη διάρκεια του κύκλου, τότε η γραμμική αναγωγή προκαλεί την εισαγωγή σφάλματος στην μέτρηση.

Οι αισθητήρες γωνιακής μετατόπισης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την τεχνολογία που χρησιμοποιούν για να μετατρέψουν την γωνιακή θέση σε ηλεκτρικό σήμα, στις εξής κατηγορίες:

- οπτικοί κωδικοποιητές
- μαγνητικοί λήπτες (pickups)
- αισθητήρες φαινομένου Hall
- κωδικοποιητές ακτίνας μονοχρωματικής ακτινοβολίας
- αισθητήρες ποτενσιόμετρου αντίστασης
- πυκνωτικοί αισθητήρες
- αισθητήρες περιστρεφόμενου πηνίου (revolvers)

Οι κωδικοποιητές γωνίας στροφάλου (crank angle encoders) χωρίζονται και σε δύο άλλες γενικότερες κατηγορίες. Υπάρχουν, έτσι, οι κωδικοποιητές αυξητικού τύπου (incremental encoders), οι οποίοι προσδιορίζουν τη γωνιακή μετατόπιση του στροφαλοφόρου άξονα αναφορικά με ένα αυθαίρετα επιλεγμένο σημείο έναρξης της μέτρησης. Συγκεκριμένα, η μέτρηση ξεκινά (και έχει αναφορά), όταν μηδενίζεται ο απαριθμητής της συσκευής που είναι το όργανο που μετρά αριθμό παραγόμενων παλμών. Κατά συνέπεια, οι αυξητικοί κωδικοποιητές χρησιμοποιούνται μόνο όταν χρειάζεται η σχετική θέση, σε αντίθεση με τους απόλυτους που είναι ο δεύτερος γενικός τύπος κωδικοποιητών. Οι απόλυτοι κωδικοποιητές (absolute encoders)

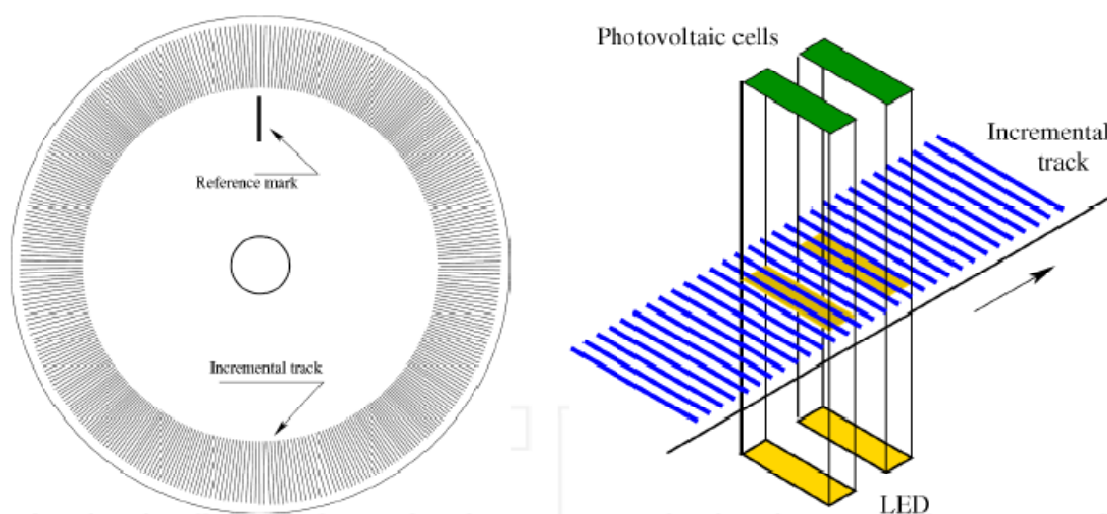


παρέχουν διαφορετική δυαδική έξοδο για κάθε θέση, προσδιορίζοντας απόλυτα τη γωνιακή μετατόπιση του άξονα.

Οι οπτικοί κωδικοποιητές, οι μαγνητικοί λήπτες και οι αισθητήρες φαινομένου Hall είναι οι πιο συνηθισμένοι και συχνότερα χρησιμοποιούμενοι τύποι αισθητήρων γωνίας στροφάλου.

4.6.2 Οπτικοί κωδικοποιητές

Στα μοντέρνα συστήματα επίβλεψης λειτουργίας κινητήρων και διάγνωσης βλαβών, ο καθορισμός της στιγμιαίας θέσης του στροφαλοφόρου άξονα γίνεται με τη βοήθεια του οπτικού κωδικοποιητή. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην φωτοηλεκτρική σάρωση μιας ακολουθίας λεπτών αδιαφανών γραμμών. Αυτές οι γραμμές είναι χαραγμένες σε έναν διαφανή δίσκο που περιστρέφεται μαζί με το στροφαλοφόρο άξονα και είναι διατεταγμένες κατά την ακτινική διεύθυνση, σε ίσα διαστήματα γωνίας, διαμορφώνοντας τη λεγόμενη αυξητική τροχιά (incremental track). Κατά τη λειτουργία του οπτικού κωδικοποιητή, μια δέσμη φωτός που εκπέμπεται από δίοδο LED, πέφτει κάθετο στο επίπεδο του δίσκου πάνω στην αυξητική τροχιά. Καθώς ο δίσκος περιστρέφεται, αυτή η δέσμη αντανακλάται όταν συναντά μια από τις χαραγμένες γραμμές, ενώ διαπερνά το δίσκο όταν προσπίπτει στο κενό μεταξύ δύο γραμμών. Τότε, μια σειρά από παλμούς φωτός, συγχρονισμένους με τη γωνιακή θέση του στροφαλοφόρου, διέρχεται από το δίσκο και μέσω μιας οπτικής ίνας οδηγείται σε έναν μετατροπέα παλμών φωτός, όπου φωτοβολταϊκές κυψέλες μετατρέπουν αυτό το σήμα φωτός σε ηλεκτρικό. Ως εκ τούτου, ο οπτικός κωδικοποιητής εξάγει μια σειρά παλμών που αντιστοιχούν στη γωνιακή μετατόπιση του άξονα. Η θέση της γωνίας του στροφαλοφόρου άξονα προσδιορίζεται με τη χρήση ξεχωριστού μετρητή.



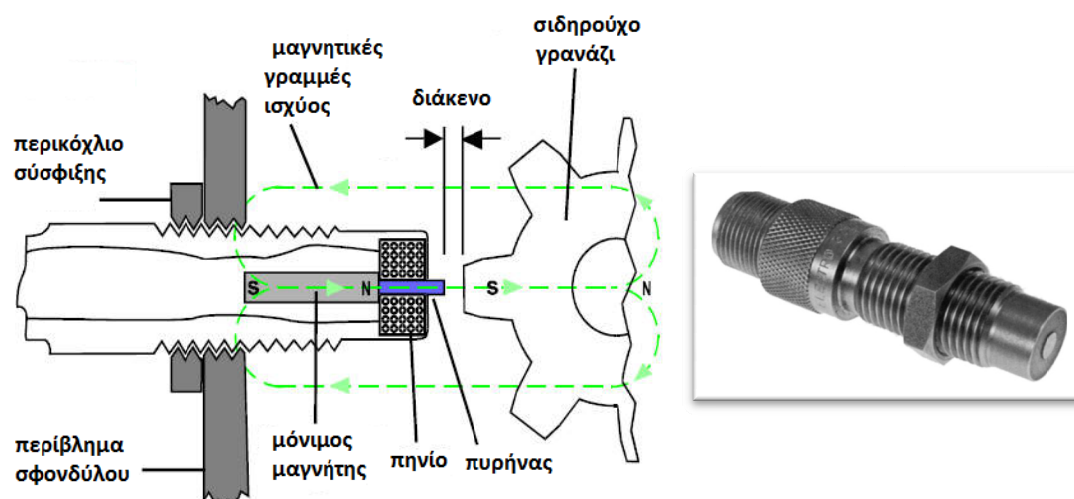
Σχήμα 4.9. Ο οπτικός κωδικοποιητής



Σχήμα 4.10. Οπτικός κωδικοποιητής γωνίας στροφάλου

4.6.3 Μαγνητικοί λήπτες (pickups)

Ο μαγνητικός λήπτης (magnetic pickup) αποτελείται από ένα μόνιμο μαγνήτη και ένα επαγωγικό πηνίο τυλιγμένο γύρω από ένα μόνιμα μαγνητισμένο πυρήνα από μαλακό σίδηρο. Όταν περνούν από το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα σιδηρομαγνητικά αντικείμενα, όπως δόντια γραναζιών, πτερύγια ρότορα στροβίλου ή άξονας με εγκοπές, τότε διαμορφώνεται ανάλογα η πυκνότητα της ροής του πεδίου. Αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει εναλλασσόμενες τάσεις στο πηνίο. Για κάθε αντικείμενο που διέρχεται από το πεδίο δημιουργείται ένας πλήρης κύκλος τάσης.



Σχήμα 4.11. Ο μαγνητικός λήπτης (magnetic pickup)

Εάν τα αντικείμενα είναι ομοιόμορφα κατανομημένα σε έναν άξονα περιστροφής, τότε ο συνολικός αριθμός των κύκλων θα είναι ένα μέτρο της συνολικής περιστροφής και η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος θα είναι ευθέως ανάλογη προς την ταχύτητα περιστροφής του άξονα. Η κυματομορφή



εξόδου είναι συνάρτηση όχι μόνο της ταχύτητας περιστροφής, αλλά και των διαστάσεων του οδοντωτού τροχού, των διαστημάτων μεταξύ των οδόντων του, της διαμέτρου του ηλεκτρομαγνητικού πόλου και του διακένου μεταξύ μαγνητικού λήπτη και της επιφάνειας του δοντιών του τροχού. Η μαγνητική ροή στο πηνίο εξαρτάται ουσιαστικά από το εάν ο αισθητήρας βρίσκεται απέναντι από ένα κενό ή από ένα δόντι. Όταν τα δόντια του γραναζιού περνούν μπροστά από τον αισθητήρα μεταβάλλεται η μαγνητική ροή στον πυρήνα του αισθητήρα. Από τη μεταβολή της μαγνητικής ροής παράγεται στο πηνίο μια εναλλασσόμενη τάση από επαγωγή, με τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.12. Εναλλασσόμενη τάση επαγωγικού αισθητήρα (pickup)

Όταν μπροστά από τον αισθητήρα περάσει το κενό των δοντιών το σήμα μεταβάλλεται όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12. Με την αύξηση του αριθμού στροφών τόσο η συχνότητα όσο και το πλάτος της εναλλασσόμενης τάσης, αυξάνονται. Ο ελάχιστος αριθμός στροφών για ικανοποιητικό σήμα είναι 20 rpm. Ένας A/D μετατροπέας στην ECU, μετατρέπει την ημιτονοειδή τάση μεταβλητού πλάτους, σε μία ψηφιακή τάση με σταθερό πλάτος. Από την συχνότητα (ή την περίοδο) του σήματος, η ECU υπολογίζει τον αριθμό στροφών του στροφαλοφόρου.

Ο αριθμός των παραγόμενων παλμών ανά μονάδα χρόνου αποτελεί μέτρο για τις στροφές του σφονδύλου. Από τα κενά στην οδοντωτή στεφάνη η μονάδα ελέγχου μπορεί να αναγνωρίσει και την τρέχουσα θέση του κινητήρα. Η διάμετρος του πόλου – πυρήνα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από το πλάτος του γραναζιού και την επιφάνεια της κεφαλής του οδόντος. Επιπροσθέτως, ο χώρος μεταξύ διαδοχικών δοντιών πρέπει να είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερος από την διάμετρο που προαναφέρθηκε και το διάκενο πρέπει να είναι ιδανικά όσο το δυνατόν μικρότερο, με μια τυπική τιμή να είναι 0,1 mm. Στους τροχούς παλμών, το σημείο αναφοράς διαμορφώνεται από ένα ή δύο ελλiptή δόντια. Όταν ανιχνεύεται από την ECU μια απόσταση μέσα στο σήμα, μεγαλύτερη από την προηγούμενη και από την επόμενη, αναγνωρίζεται το κενό των δοντιών. Το κενό των δοντιών αντιστοιχεί σε ορισμένη θέση του στροφαλοφόρου άξονα, της οποίας η σχέση με το ΑΝΣ είναι γνωστή.



Ένας μαγνητικός λήπτης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως συσκευή χρονισμού ή συγχρονισμού, όπως για παράδειγμα στο χρονισμό ανάφλεξης των βενζινοκινητήρων ή τη γωνιακή θέση περιστρεφόμενων μερών του κινητήρα.

4.6.4 Αισθητήρες φαινομένου Hall

Έχει αποδειχθεί ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό. Μπορούμε συνεπώς να συμπεράνουμε ότι, όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα τοποθετηθεί σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε θα ασκηθεί πάνω του μια αντιμαγνητική δύναμη κάθετη τόσο στο μαγνητικό πεδίο όσο και το ρεύμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο Hall και μπορεί κατάλληλα να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση μεταβολών της μαγνητικής επαγωγής. Συνιστά ένα φυσικό φαινόμενο που βρίσκει εφαρμογή σε βιομηχανικά όργανα, όπως οι αισθητήρες φαινομένου Hall.

Το φαινόμενο Hall αποτελεί ιδανική τεχνολογία όσον αφορά τα αισθητήρια. Το στοιχείο Hall κατασκευάζεται από ένα λεπτό φύλλο αγωγίμου υλικού με συνδέσεις εξόδου κάθετες στην κατεύθυνση της ροής του ρεύματος. Όταν υποβάλλεται σ' ένα μαγνητικό πεδίο, ανταποκρίνεται δημιουργώντας μια τάση ανάλογη με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η παραγόμενη τάση είναι πολύ μικρή (της τάξης των μV) και προϋποθέτει χρήση επιπλέον ηλεκτρονικών διατάξεων, ώστε να παραχθούν ωφέλιμα επίπεδα τάσης. Όταν το στοιχείο Hall συνδυάζεται με τις απαραίτητες ηλεκτρονικές διατάξεις, σχηματίζουν έναν αισθητήρα Hall. Παρόλο που ο αισθητήρας Hall είναι αισθητήρας μαγνητικού πεδίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βασικό εξάρτημα σε πολλών ειδών αισθητήρες.

Οι αισθητήρες φαινομένου Hall, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, όπως και σε πολλά συστήματα ανάφλεξης χωρίς διανομέα (DIS), για να καθορίσουν τη θέση του στροφαλοφόρου και του εκκεντροφόρου άξονα. Η μαγνητική ροή που απαιτείται για να λειτουργήσει ο αισθητήρας μπορεί να επιτευχθεί από ξεχωριστούς μαγνήτες τοποθετημένους πάνω στον άξονα ή με ένα μαγνήτη δακτύλιο.

Το φαινόμενο Hall προσαρμόστηκε έτσι, ώστε η αλλαγή τάσης να εμφανίζεται σε ένα τσιπ σιλικόνης που τοποθετείται στη σωστή γωνία του μαγνητικού πεδίου. Όταν ένα μεταλλικό έλασμα περνά μέσω του κενού αέρα μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και του τσιπ πυριτίου, διακόπτει το μαγνητικό πεδίο και αναγκάζει την τάση παραγωγής του τσιπ να μειωθεί ξαφνικά στο μηδέν. Με τα πρόσθετα στοιχεία κυκλώματος, ο αισθητήρας μπορεί να κάνει ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή να παράγει ένα σήμα τάσης, όταν περνά το έλασμα από το μαγνητικό πεδίο. Τα πρόσθετα στοιχεία κυκλώματος ρυθμίζουν την τάση τροφοδότησης στο τσιπ και ενισχύουν την τάση εξόδου του. Σε ένα σύστημα ανάφλεξης αυτοκινήτου, τα ελάσματα τοποθετούνται στον άξονα του διανομέα, στο ρότορα, στην τροχαλία του



στροφαλοφόρου άξονα ή στον εκκεντροφόρο και έτσι ο αισθητήρας μπορεί να παράγει ένα σήμα σπινθηροδότησης (κινητήρες Otto) ή θέσης, ή και τα δύο μαζί, καθώς ο στροφαλοφόρος άξονας περιστρέφεται. Σε μερικές εφαρμογές, μια εγκοπή σε μια τροχαλία, ένα δόντι γραναζιού ή ακόμα και ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό κουμπί εξυπηρετούν τον ίδιο σκοπό με το μεταλλικό έλασμα, για να διακόψουν το "μαγνητικό παράθυρο" του αισθητήρα και να κλείσουν το διακόπτη.

Όταν ο αισθητήρας Hall δρα ως αισθητήρας στροφών κινητήρα, καταγράφει 360 δόντια από έναν τροχό αισθητήρα στο στροφαλοφόρο άξονα. Ο αισθητήρας Hall-IC βρίσκεται ανάμεσα στο ρότορα και ένα μόνιμο μαγνήτη ο οποίος σχηματίζει ένα κάθετο μαγνητικό πεδίο προς το στοιχείο Hall. Εάν ένα δόντι περάσει το στοιχείο του αισθητήρα τότε μεταβάλλεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Έτσι δημιουργείται μια τάση από επαγωγή (τάση Hall) και ένα ψηφιακό σήμα στον αισθητήρα Hall-IC. Η περιστροφή του τροχού αισθητήρα του στροφαλοφόρου μεταβάλλει, επομένως, την τάση του αισθητήρα Hall-IC στην κεφαλή του αισθητήρα. Η μεταβαλλόμενη τάση μεταβιβάζεται και αξιολογείται στη μονάδα ελέγχου. Σημειώνεται ότι το μέγεθος του τσιπ Hall-IC είναι μόλις 1,5 x 1,6 mm.

4.7 Αναφορά του άνω νεκρού σημείου

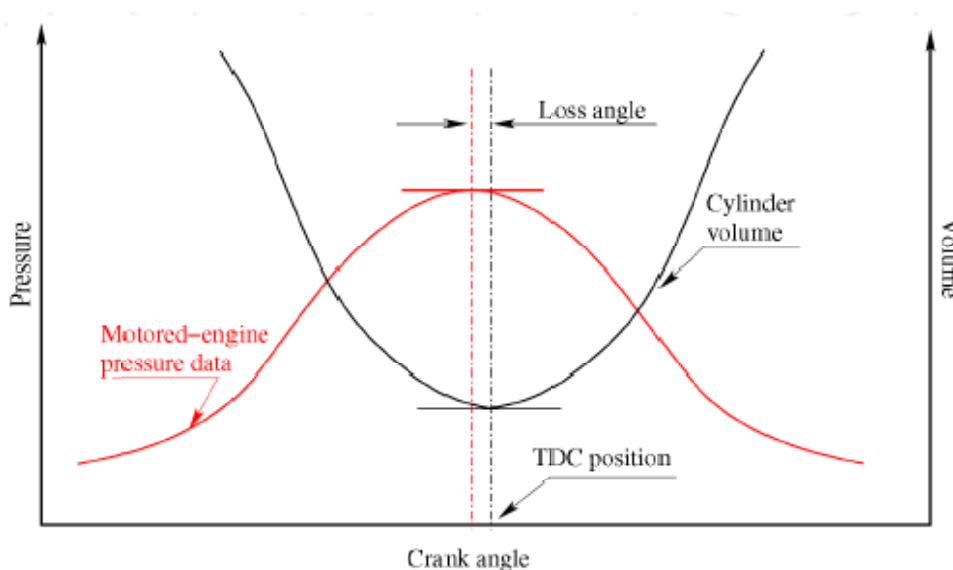
Στις διαγνωστικές μετρήσεις που γίνονται σε κινητήρες, η γωνιακή θέση του στροφαλοφόρου άξονα πρέπει να προσδιορίζεται σε σχέση με μια αναφορά, η οποία γενικά χρησιμοποιείται και για την ανίχνευση της θέσης του άνω νεκρού σημείου. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται εδώ, καθώς έστω και μικρά σφάλματα στη μέτρηση αναφορικά με το ΑΝΣ οδηγούν σε σημαντικές αποκλίσεις στην εκτίμηση του ενδεικνύμενου έργου και του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (Krieger & Borman, 1966 – Pischinger & Glaser, 1985 – Lapuerta et al. , 2000). Έρευνες υποδεικνύουν ότι σφάλμα 1° γωνίας στροφάλου στην τοποθέτηση του ΑΝΣ, μπορεί να οδηγήσει σε απόκλιση μέχρι και 8% στην εκτίμηση της ενδεικνύμενης πίεσης. Συνεπώς απαιτείται προσδιορισμός του ΑΝΣ με σφάλμα μικρότερο της 0,1° γωνίας στροφάλου.

Ο προσδιορισμός του ΑΝΣ γίνεται είτε με μετρητική είτε με υπολογιστική προσέγγιση. Η πρώτη μέθοδος αφορά τη χρησιμοποίηση κατάλληλου αισθητήρα και εξοπλισμού που εντοπίζουν ειδικά σημάδια στο σφόνδυλο, τα οποία αντιστοιχούν σε γνωστή γωνία στροφάλου σε σχέση με το ΑΝΣ. Η τοποθέτηση του αισθητήρα – κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου γίνεται με τρόπο τέτοιο, ώστε να ταυτίζεται το σήμα αναφοράς του οργάνου με την θέση του άνω νεκρού σημείου. Γι αυτόν τον λόγο ο στροφαλοφόρος πρέπει να περιστραφεί έως ότου το έμβολο έλθει στην ανώτατη θέση του. Προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία της μέτρησης,



απαιτείται επιβεβαίωση της υψηλότερης θέσης του εμβόλου με ειδικό όργανο, όπως το ρολόι γράφτου.

Σημειώνεται ότι η ακριβέστερη διαδικασία βαθμονόμησης για την σύμπτωση του άνω νεκρού σημείο με το παλμό του οργάνου, γίνεται με ετεροκίνηση της μηχανής (motored engine) και τοποθέτηση αισθητήρα θέσης (LVTD) από την οπή του εγχυτήρα. Άλλη μέθοδος βαθμονόμησης που χρησιμοποιείται ευρέως και δεν απαιτεί ειδικό εξοπλισμό είναι ο εντοπισμός του άνω νεκρού σημείου από την θέση της μέγιστης πίεσης συμπίεσης κατά την λειτουργία σε ετεροκίνηση. Όμως και αυτή η μέθοδος δεν παρέχει πολύ καλή ακρίβεια, επειδή η μέγιστη πίεση εμφανίζεται πριν την θέση του μικρότερου όγκου του κυλίνδρου (ΑΝΣ), λόγω μεταφοράς θερμότητας και διαφυγών αερίων. Η γωνία μεταξύ της μέγιστης πίεσης και του άνω νεκρού σημείου λέγεται «γωνία απώλειας θερμότητας» (“loss angle”). Για τον προσδιορισμό αυτής της γωνίας έχουν προταθεί ποικίλες και αρκετά ακριβείς μέθοδοι, όπως αυτές του Pinchon (1984) και του Stas (1996). Συνήθως, οι κατασκευαστές διαγνωστικού εξοπλισμού περιλαμβάνουν στα τεχνικά εγχειρίδια συστάσεις για την εκτίμηση των γωνιών απώλειας θερμότητας, οι οποίες εξαρτώνται από το είδος του κινητήρα (Otto ή Diesel) και το βαθμό συμπίεσης.



Σχήμα 4.13. Ο ορισμός της γωνίας απώλειας θερμότητας (loss angle)

Ωστόσο, η τοποθέτηση αισθητήρα για τον προσδιορισμό του άνω νεκρού σημείου απαιτεί παρέμβαση στη λειτουργία του κινητήρα και ειδικές τροποποιήσεις, ενέργειες που πολλές φορές είναι δύσκολο έως αδύνατο να γίνουν (περιπτώσεις μεγάλων δίχρονων μηχανών). Στην προσπάθεια να ξεπεραστούν αυτές οι δυσκολίες, έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικές τεχνικές, οι οποίες αποτελούν και τη δεύτερη μέθοδο προσέγγισης του ΑΝΣ. Οι συγκεκριμένες υπολογιστικές μέθοδοι πραγματοποιούν ταυτόχρονα πολλά βήματα επεξεργασίας της μέτρησης, επιλύοντας ένα σύστημα εξισώσεων.



4.8 Αντιστοίχιση μετρούμενης πίεσης στη γωνία στροφάλου

Η στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα ορίζεται ως η γωνία $\Delta\theta$ κατά την οποία περιστρέφεται ο άξονας σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα Δt , προς το χρονικό αυτό διάστημα και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\omega = \Delta\theta / \Delta t$$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, παρατηρείται πως για την μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση είτε ο χρόνος (μέτρηση γωνίας σε γνωστά διαστήματα χρόνου), είτε η γωνία περιστροφής (μέτρηση χρόνου που αντιστοιχεί σε γνωστή γωνία περιστροφής). Στην περίπτωση που επιλεγεί η μέτρηση της ταχύτητας με γνωστή γωνία περιστροφής, απαιτείται η χρήση κωδικοποιητή γωνίας στροφάλου, οι δυσκολίες της οποίας αναλύθηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Πιο εφικτή και συχνότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος, είναι η μέτρηση με χρονική δειγματοληψία αρχικά και έπειτα αναγωγή του χρόνου σε γωνία στροφάλου. Τις περισσότερες φορές η αναγωγή αυτή γίνεται γραμμικά. Πολλές φορές όμως, η ταχύτητα περιστροφής δεν είναι σταθερή στη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας, αλλά παρουσιάζει διακυμάνσεις.

Κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας και ανάλογα με τη φάση που βρίσκεται η μηχανή μπορούν να εξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα για την τάση που παρουσιάζει η ταχύτητα περιστροφής. Πιο αναλυτικά, εκφράζοντας την στιγμιαία ταχύτητα περιστροφής σαν ποσοστό της μέσης ταχύτητας, τότε θα διαπιστωθεί ότι κατά τη διάρκεια της συμπίεσης η ταχύτητα βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα από τη μέση τιμή της και μειώνεται ακόμα πιο γρήγορα όσο πλησιάζουμε στο τέλος της συμπίεσης όπου και τελικά παίρνει την μικρότερη δυνατή τιμή. Η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής παρατηρείται ακριβώς πριν το ΚΝΣ κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης. Μετά την ανάφλεξη και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, αν και η ταχύτητα αυξάνεται, παραμένει κάτω από την μέση τιμή της. Μετά το ΚΝΣ και κατά τη διάρκεια της φάσης εναλλαγής των αερίων, η περιστροφική ταχύτητα της μηχανής μειώνεται εξ' αιτίας των απωλειών.

Από κατασκευαστικής άποψης, τα έμβολα του κινητήρα και κυρίως οι μηχανισμοί των στροφάλων τους είναι φυσικό να έχουν διακυμάνσεις στην περιστροφική ταχύτητα, ακόμα και εάν η ροπή της μηχανής, η οποία προκαλείται από τις δυνάμεις των αερίων μέσα στον κύλινδρο, ήταν σταθερή. Αυτό συμβαίνει γιατί η ροπή αδράνειας της μηχανής σε σχέση με τη θέση του στροφαλοφόρου άξονα είναι περιοδικά μεταβλητή, πράγμα που αναπόφευκτα συνεπάγεται αντίστοιχα την εμφάνιση περιοδικά μεταβλητών ροπών αδράνειας σε αυτούς του τύπους μηχανισμών.

Τέλος, ένας άλλος σημαντικός παράγοντας, ο οποίος επηρεάζει τις διακυμάνσεις της περιστροφικής ταχύτητας, είναι οι ταλαντώσεις του ίδιου του κινητήρα, δηλαδή ελαστικές, εξαναγκασμένες και γωνιακές παραμορφώσεις με



απόσβεση κατά μήκος του στροφαλοφόρου άξονα που προκαλούνται από τη μεταβλητή ροπή της μηχανής.

Έτσι τελικά η γραμμική αναγωγή του χρόνου σε γωνία στροφάλου, που πραγματοποιείται στα πλαίσια της μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή σφάλματος στην εκτίμηση της πραγματικής γωνίας στροφάλου.

4.9 Εισαγωγή σφάλματος στις μετρήσεις

Η μέτρηση και καταγραφή της πίεσης που μεταβάλλεται εντός του κυλίνδρου αποτελεί ιδιαίτερα πολύπλοκη και απαιτητική διαδικασία. Ακόμα κι όταν γίνεται ιδανική εφαρμογή των μεθόδων υπολογισμού της πίεσης κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μηχανής, υπάρχουν διάφορες πηγές σφαλμάτων που επιδρούν αρνητικά στην ακρίβεια των μετρήσεων. Τα πιο σημαντικά σφάλματα εμπεριέχονται στα θεμελιώδη βήματα αυτών των μεθόδων. Πιο συγκεκριμένα, η αντιστοίχιση της μετρούμενης πίεσης σε πραγματικά σημεία του στροφαλοφόρου και ο καθορισμός του ΑΝΣ είναι τα πεδία όπου υπεισέρχονται συνήθως τα μείζονα σφάλματα που απασχολούν τον μηχανικό.

Τις περισσότερες φορές, οι μετρήσεις και η καταγραφή της πίεσης διενεργούνται με βάση το πεδίο του χρόνου, οπότε ακολουθεί η αναγωγή σε γωνία στροφάλου. Για να γίνει, όμως, η αναγωγή, χρειάζεται η παραδοχή σταθερού βήματος γωνίας. Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι σε κάθε βήμα χρόνου Δt , ο κινητήρας περιστρέφεται με σταθερή γωνία στροφάλου $\Delta\theta$, γεγονός που προϋποθέτει σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Εντούτοις, στην περίπτωση που η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται στη διάρκεια του κύκλου, η αναγωγή προκαλεί την εισαγωγή σφάλματος στην εκτίμηση της πραγματικής γωνίας στροφάλου (σφάλμα αναφοράς γωνίας στροφάλου). Τα σφάλμα αυτό έπειτα μετακυλίεται σε άλλες παραμέτρους που προκύπτουν άμεσα από τον υπολογισμό και την επεξεργασία της πίεσης, όπως για παράδειγμα στην παραγόμενη ισχύ της μηχανής, στη μέση ενδεικνύμενη πίεση, στο ρυθμό έκλυσης θερμότητας ακόμα και στην κατανάλωση καυσίμου.

Σήμερα πραγματοποιείται συνεχής διερεύνηση της φύσης του σφάλματος αναφοράς γωνίας στροφάλου σε μετρήσεις με σταθερό βήμα χρόνου.



5. Περιγραφή της φορητής συσκευής καταγραφής πίεσης καύσης που αξιολογείται



Σχήμα 5.1. Η φορητή συσκευή καταγραφής πίεσης καύσης που αξιολογείται, με αισθητήρα Type 7613C, συνδεδεμένο με προσαρμογέα Thompson Type 7513A



5.1 Περιγραφή

5.1.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση της δυνατότητας καταγραφής της πίεσης καύσης με χρήση απλής φορητής συσκευής. Στη συνέχεια δίνεται λεπτομερής περιγραφή του συγκεκριμένου οργάνου. Είναι ένα εύχρηστο όργανο μέτρησης της πίεσης στον κύλινδρο για μηχανές εσωτερικής καύσης με εύρος ταχύτητας έως και 4000 στροφές/λεπτό. Αυτή η μετρητική συσκευή λειτουργεί με μπαταρία (IEC 6LF22/9, προτεινόμενη: Ultralife Lithium Power Cell, #U9VL-FP) ή και με εξωτερική παροχή ισχύος μέσω καλωδίου με κατάλληλο βύσμα.

Το συγκεκριμένο μετρητικό όργανο μετρά από 1 έως 100 κύκλους πίεσης από τους οποίους υπολογίζει την αριθμητική μέση τιμή της μέγιστης πίεσης καύσης, τη μέση απόκλιση, τη μεγαλύτερη κλίση της καμπύλης πίεσης, καθώς και την μέση καμπύλη πίεσης. Τα αριθμητικά δεδομένα προβάλλονται στην LCD οθόνη της συσκευής και μπορούν να αποθηκευτούν όταν χρειαστεί. Επίσης η μέση καμπύλη πίεσης μπορεί να αναλυθεί με το λογισμικό που δίνεται. Μια επιπρόσθετη μετρητική λειτουργία επιτρέπει την εμφάνιση της μέγιστης πίεσης ("Peak") χωρίς τον περιορισμό του χρόνου. Το αναλογικό σήμα από τον αισθητήρα προβάλλεται συνεχώς στην οθόνη και η ένδειξη ανανεώνεται κάθε 1,5 s.

5.1.2 Μετρητικές λειτουργίες

Παρουσιάζονται εδώ οι μετρητικές λειτουργίες της περιγραφόμενης συσκευής στις οποίες περιλαμβάνονται η στατιστική εκτίμηση από 1 έως 100 κύκλους πίεσης, η καμπύλη πίεσης ($p - t$), η στιγμιαία μέγιστη τιμή της πίεσης και η μέση τιμή των αποθηκευμένων τιμών. Πιο αναλυτικά:

1. Στατιστική εκτίμηση από 1 έως 100 κύκλους πίεσης

p_{max} η μεγαλύτερη των μετρούμενων μέγιστων πιέσεων

p_{min} η μικρότερη των μετρούμενων μέγιστων πιέσεων

p_{av} η μέση μέγιστη πίεση

p_{sdev} η τυπική απόκλιση της μέγιστης πίεσης

$(dp/dca)_{max}$ μέγιστη κλίση της καμπύλης πίεσης

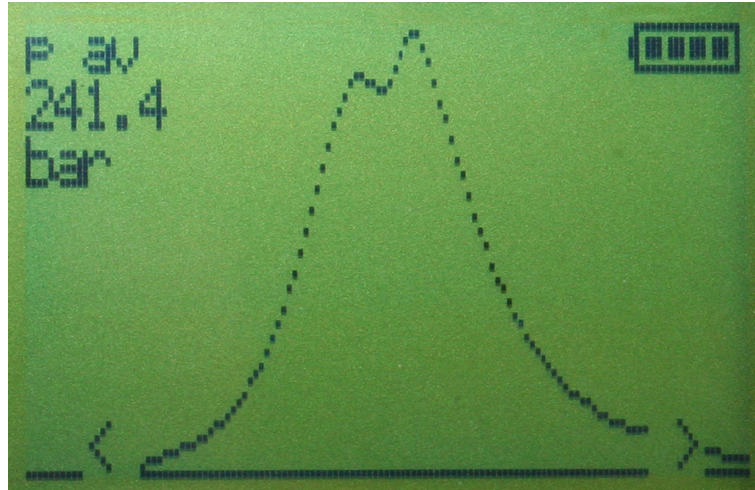
Speed η ταχύτητα

2. Καμπύλη πίεσης ($p - t$)

Η μέση καμπύλη πίεσης έχει ανάλυση (resolution) 720 μετρούμενα σημεία ανά περιστροφή και μπορεί να εκτυπωθεί μέσω της διεπαφής (interface) RS-232C (αρχείο ASCII). Η καμπύλη μπορεί ακόμα να εμφανιστεί με το



λογισμικό που διατίθεται μαζί με τη συσκευή. Σημειώνεται εδώ ότι η καμπύλη πίεσης δεν προκύπτει/καταγράφεται σε σχέση με τη γωνία στροφάλου. Η κλίμακα του άξονα των x σε μοίρες γωνίας στροφάλου έχει επιλεγεί μόνο για λόγους καλύτερης απεικόνισης, όπου 360 μετρητικά σημεία αντιπροσωπεύουν 360 °KW. Για μια πρώτη πραγματογνωμοσύνη η καμπύλη πίεσης μπορεί να προβληθεί και στην οθόνη της συσκευής.



Σχήμα 5.2. Παράδειγμα καμπύλης πίεσης στην οθόνη της συσκευής

3. Στιγμαία μέγιστη τιμή της πίεσης “Peak”

Η μέγιστη πίεση προβάλλεται χωρίς χρονικό περιορισμό. Για αυτή την εφαρμογή προτείνεται η χρήση της εξωτερικής μονάδας παροχής ισχύος μέσω καλωδίου με κατάλληλο βύσμα.

4. Μέση τιμή των αποθηκευμένων τιμών p_{av}


Η μέση τιμή υπολογίζεται από τις μετρήσεις που έχουν αποθηκευτεί στο Memory Block 1 p_{av} και παρουσιάζεται στην οθόνη. Για να υπολογιστεί αυτή η τιμή είναι απαραίτητο να αποθηκευτούν οι μετρήσεις με αύξουσα σειρά (Store to Memory 1 → 20). Εάν δεν γίνει αυτό, θα εμφανιστεί το μήνυμα “Error” για την τιμή p_{av} , ενώ όλες οι άλλες μετρήσεις θα εμφανιστούν σωστά.







Σχήμα 5.3. Χαρακτηριστική ένδειξη της οθόνης LED της φορητής συσκευής, με ιδιαίτερη ένδειξη για το σημείο όπου εμφανίζεται η μέση τιμή των αποθηκευμένων τιμών



5.1.3 Αρχή λειτουργίας

Η πίεση στον κύλινδρο μετράται με έναν αισθητήρα, όπως ο Type 7613C, αφού πρώτα συνδεθεί στο δυναμοδεικτικό κρουνό. Επειδή οι δυναμοδεικτικοί αγωγοί με μεγάλο μήκος συνεπάγονται ταλαντώσεις, οι οποίες μπορεί να επιφέρουν σφάλματα στις μετρήσεις, το σήμα της πίεσης του κυλίνδρου μπορεί να εξομαλυνθεί με χρήση ρυθμιζόμενου βαθυπερατού φίλτρου. Η μπαταρία του οργάνου έχει τυπική διάρκεια ζωής περίπου 10 ώρες. Όταν εμφανίζεται το σύμβολο  στην LCD οθόνη (η διαφορά δυναμικού της μπαταρίας έχει πέσει κάτω από τα 6,7 V), η μπαταρία πρέπει να αντικατασταθεί. Ωστόσο, η μετρητική συσκευή έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί για μία ακόμη ώρα. Όταν η διαφορά δυναμικού ελαττωθεί περαιτέρω των $\approx 6,5$ V, η συσκευή δεν θα μπορεί πλέον να λειτουργεί. Προτού ο μετρητής απενεργοποιηθεί αυτόματα, στην οθόνη θα εμφανιστεί το μήνυμα "Battery empty". Εκτός των προαναφερθέντων, Ο μετρητής θα κλείσει αυτόματα 2 λεπτά μετά το τελευταίο πάτημα πλήκτρου, αν δεν απενεργοποιηθεί η αντίστοιχη λειτουργία. Αυτό μπορεί να γίνει ως εξής:

- Ενεργοποιούμε την συσκευή
- Πατάμε το πλήκτρο "Menu"
- Επιλέγουμε το "Instrument Settings" με τα πλήκτρα  
- Επιβεβαιώνουμε με το πλήκτρο "OK"
- Επιλέγουμε την παράμετρο "Auto off" και με τα πλήκτρα   επιλέγουμε να το απενεργοποιήσουμε
- Επιβεβαιώνουμε πατώντας το πλήκτρο "OK"
- Με το "Esc" επιστρέφουμε ένα βήμα πίσω στην ιεραρχία του καταλόγου επιλογών.

5.1.4 Διαδικασία μέτρησης

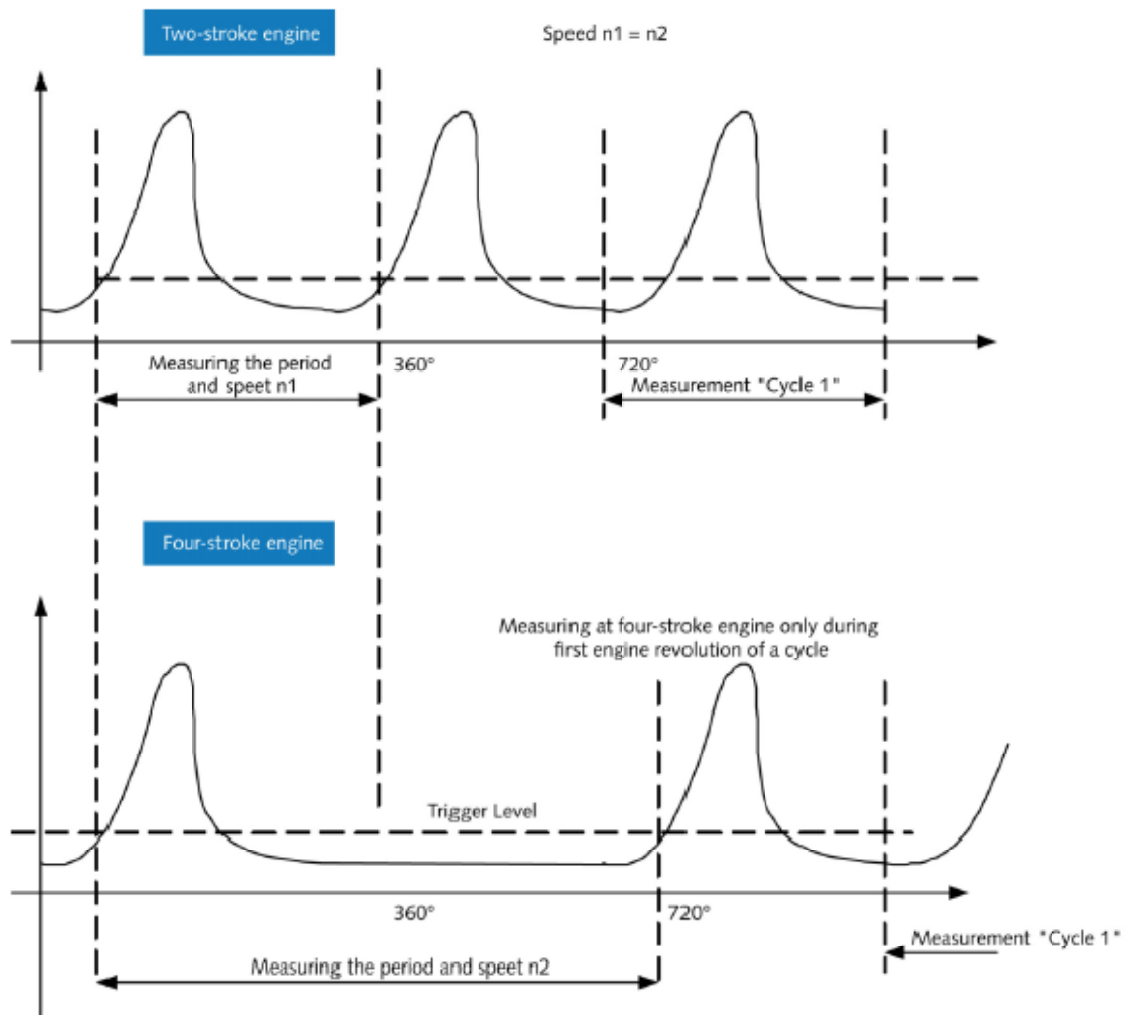
→ Zero Shifter

Ο μετρητής διαθέτει μια ειδική λειτουργία Zero Shifter, η οποία θέτει τις διάφορες τάσεις ηρεμίας των συνδεδεμένων αισθητήρων σε μια συγκεκριμένη τιμή που είναι το σημείο μηδέν (zero point). Η οθόνη θα δείχνει "Wait" έως ότου επιτευχθεί αυτή η τιμή, οπότε θα εμφανιστεί η ένδειξη "Ready" και η συσκευή θα είναι έτοιμη να αρχίσει μετρήσεις. Μόνο μετά την εμφάνιση της ένδειξης "Ready" έχει πρακτικό νόημα να πατηθεί το πλήκτρο "Measure". Εάν πατηθεί όσο στην οθόνη προβάλλεται το μήνυμα "Wait" η μετρητική διαδικασία δεν θα αρχίσει.



Μετά την επιτυχή ενεργοποίηση της μετρητικής διαδικασίας, ο μετρητής περιμένει μέχρι το σήμα πίεσης να φτάσει το όριο ενεργοποίησης που έχει τεθεί, πριν αρχίσει την ανάλυση του επιλεγμένου αριθμού κύκλων λειτουργίας.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η προετοιμασία του οργάνου, λίγα μόλις δευτερόλεπτα πριν αρχίσει η μέτρηση των επιλεγμένων κύκλων λειτουργίας και επεξηγείται γραφικά (για δίχρονο και τετράχρονο κινητήρα) η λειτουργία Zero Shifter.



Σχήμα 5.4. Διαγράμματα πίεσης μέχρι το όριο ενεργοποίησης, όπου ξεκινά η ανάλυση του πρώτου κύκλου. Το πλήκτρο "Measure" έχει πατηθεί πριν το $t=0$, δηλαδή σε χρόνο $t=0$ ο μετρητής έχει ήδη συγχρονιστεί με την ταχύτητα του κινητήρα.

→ Μέτρηση

Αφού πατηθεί το πλήκτρο "Measure", γίνεται έλεγχος εάν υπάρχει σήμα πίεσης και εάν αυτό έχει φτάσει το όριο ενεργοποίησης. Αν τηρούνται και οι δύο αυτοί όροι, τότε ο μετρητής συγχρονίζεται με τον κινητήρα, μετά



προσδιορίζει αν είναι 2-χρονος ή 4-χρονος και με βάση αυτό την ταχύτητα του κινητήρα. Στη συνέχεια, αναλύει ένα δοθέντα αριθμό κύκλων καύσης σύμφωνα με τις επιλογές που έχουν γίνει στον κατάλογο επιλογών. Για την επιθυμητή εκτίμηση λαμβάνεται υπόψη από το όργανο κάθε δεύτερη καμπύλη πίεσης. Η μέτρηση ξεκινά μέσω προ-ενεργοποίησης στην περιοχή χαμηλών πιέσεων (πίεση κατά την εναλλαγή των αερίων).

- Στον 4-χρονο κινητήρα καταγράφονται μόνο οι φάσεις της συμπίεσης και της καύσης (οι πρώτες δηλαδή 360° του κύκλου καύσης).

5.2 Λειτουργία

5.2.1 Συνδέσεις και στοιχεία ελέγχου

Η φορητή συσκευή μέτρησης πίεσης καύσης που αξιολογείται διαθέτει τις εξής υποδοχές για συνδέσεις:

- Υποδοχή Fischer KE103 για αισθητήρα πίεσης Type 7613C
- Υποδοχή BCN για διανομή του αναλογικού σήματος του αισθητήρα
- Υποδοχή D-Sub 9 ακίδων για σειριακή διεπαφή RS-232C
- Υποδοχή Klinker 2 ακίδων (EIAJ standard) για εξωτερική τροφοδοσία 12V





Σχήμα 5.5. Οι υποδοχές του φορητού οργάνου

Τα στοιχεία ελέγχου (πλήκτρα) που διαθέτει η συγκεκριμένη συσκευή είναι τα εξής:

- On/Off → ο μετρητής ανοίγει/κλείνει
(Ο μετρητής κλείνει μετά από δύο λεπτά απραξίας, εάν η αντίστοιχη λειτουργία δεν απενεργοποιηθεί, βλ. παρ. 5.2.2)



- F1 ... F3 → πλήκτρα για διάφορες λειτουργίες
(Η εκάστοτε λειτουργία αυτών των πλήκτρων εμφανίζεται στην οθόνη)
- Menu → για να εμφανιστεί ο κατάλογος επιλογών
 - Measurement Settings
 - Instrument Settings
 - Calibration
 - Memory
 - RS-232C Settings
-   → μετακίνηση πάνω ή κάτω για είσοδο σε έναν κατάλογο επιλογών ή για επιλογή κάποιας παραμέτρου
- Esc → Για έξοδο από κατάλογο επιλογών
- OK → Για επιβεβαίωση εισόδου σε κατάλογο επιλογής ή για επιλογή παραμέτρου
- Measure → για έναρξη της μέτρησης



Σχήμα 5.6. Τα πλήκτρα του οργάνου



5.2.2. Εκκίνηση

Μόλις ο μετρητής ενεργοποιείται (πατώντας το πλήκτρο On/Off) εμφανίζεται η έκδοση λογισμικού.

Οι εργοστασιακές ρυθμίσεις για το εν λόγω μετρητικό όργανο είναι οι εξής:

Ρυθμίσεις στον κατάλογο επιλογών “Measurement Settings” (Ρυθμίσεις Μέτρησης)

Sensitivity (∼ευαισθησία)	20 mV/bar
Engine (∼κινητήρας)	2-stroke (∼δίχρονος)
Pressure Unit (∼μονάδα πίεσης)	bar
Low-pass filter 5 th order Butterworth (∼βαθυπερατό φίλτρο Butterworth 5 ^{ης} τάξης)	300 Hz
Trigger Level (∼επίπεδο ενεργοποίησης)	10 % FS
Measuring cycles (∼κύκλοι μέτρησης)	16

Ρυθμίσεις στον κατάλογο επιλογών “Instrument Settings” (∼Ρυθμίσεις οργάνου)



Time (∼ώρα)	hms(∼ώρες-λεπτα-δευτερόλεπτα)
Date (∼ημερομηνία)	dmy (∼μέρα-μήνας-έτος)
Auto off (λειτουργία που απενεργοποιεί τη συσκευή μετά από 2 λεπτά αργίας)	activated (∼ενεργοποιημένο)
Password (∼κωδικός)	deactivated (∼απενεργοποιημένο)
Default settings	Επαναφέρει τις παραμέτρους του μενού “Measurement Settings” στις εργοστασιακές ρυθμίσεις

“RS-232C Settings”





Baud rate (∼ρυθμός μετάδοσης συμβόλων)	19 200 Bd
--	-----------

Στην μετάδοση αναλογικά διαμορφωμένων ψηφιακών σημάτων χρησιμοποιείται ο όρος *ρυθμός μετάδοσης συμβόλων*. Ρυθμός μετάδοσης συμβόλων (baud rate) ορίζεται το πλήθος των συμβόλων που διέρχονται από ένα σημείο του καναλιού σε ένα χρονικό διάστημα και μετριέται σε bauds.



Οι παράμετροι μπορούν να τροποποιηθούν ως εξής:



1. Ενεργοποιούμε την συσκευή μέτρησης
2. Πιέζουμε το πλήκτρο “Menu”
3. Επιλέγουμε το μενού που θέλουμε με τα πλήκτρα   :
 - Measurement Settings
 - Instrument Settings
 - Memory
 - RS-232C Setting



4. Επιβεβαιώνουμε πιέζοντας το πλήκτρο “OK”
5. Επιλέγουμε την παράμετρο που επιθυμούμε να αλλάξουμε με τα πλήκτρα  
6. Πιέζουμε το “OK” για να επιβεβαιώσουμε την επιλογή της συγκεκριμένης παραμέτρου, επεξεργαζόμαστε την τιμή της με τα   και επιβεβαιώνουμε τη νέα τιμή της παραμέτρου με το πλήκτρο “OK”
7. Πιέζουμε το πλήκτρο “Esc” για να επιστρέψουμε ένα βήμα πίσω στην ιεραρχία του καταλόγου επιλογών.

5.2.3 Μέτρηση με στατιστική εκτίμηση για 1 έως 100 κύκλους πίεσης

1. Συνδέουμε τον αισθητήρα με τη συσκευή μέτρησης
2. Συνδέουμε τον αισθητήρα στο δυναμοδεικτικό κρουνό
3. Ενεργοποιούμε το μετρητή
4. Ξεκινάμε τη διαδικασία μέτρησης πιέζοντας το πλήκτρο “Measure”. Στην οθόνη εμφανίζεται η ένδειξη “Measuring running” ακολουθούμενη από τον αριθμό των κύκλων προς μέτρηση. Με την ολοκλήρωση της μέτρησης, εμφανίζεται στην οθόνη η μέση τιμή της μέγιστης πίεσης, “ p_{av} ”. Οι μετρήσεις των επιμέρους χαρακτηριστικών του κινητήρα μπορούν να κληθούν με τα πλήκτρα  .
5. Για να αποθηκεύσουμε τις μετρήσεις στη μνήμη πιέζουμε το πλήκτρο “F2”=«Αποθήκευση». Τότε στην οθόνη εμφανίζονται οι επιλογές:
 - Store to Memory
 - Memory Block

Εάν η θέση μνήμης που φαίνεται είναι η επιθυμητή, αποθηκεύουμε τις μετρήσεις πιέζοντας το “F2”=«Αποθήκευση» για άλλη μια φορά. Εάν οι μετρήσεις πρόκειται να αποθηκευτούν σε διαφορετική θέση μνήμης, ο αριθμός της θέσης μνήμης μπορεί να επιλεγεί με τα πλήκτρα  . Η επιλογή του Memory Block μπορεί να γίνει με το πλήκτρο “F3”=«Εναλλαγή». Το αποθηκεύουμε στη συνέχεια πιέζοντας το “F2”.



5.2.4 Διαχωρισμός της Μνήμης

Memory Block 1

Memory	1
.	.
.	.
Memory	20



(Αποθήκευση των δεδομένων στις θέσεις από 1 έως 20)

Memory Block 2

Memory	21
.	.
.	.
Memory	40

(Αποθήκευση των δεδομένων στις θέσεις από 21 έως 40)

5.2.5 Μέτρηση της στιγμιαίας μέγιστης τιμής της πίεσης

1. Συνδέουμε τον αισθητήρα στο μετρητή
2. Συνδέουμε τον αισθητήρα στο δυναμοδεικτικό κρουνό
3. Ενεργοποιούμε τη συσκευή
4. Επιλέγουμε την ένδειξη "Peak" με τα πλήκτρα  . Πλέον η στιγμιαία μέγιστη πίεση προβάλλεται συνεχώς και η τιμή της ανανεώνεται/ενημερώνεται κάθε 1,5 s.



Σημαντικό: Η λειτουργία "Auto Off" πρέπει να απενεργοποιηθεί, αλλιώς ο μετρητής θα κλείσει μετά από 2 λεπτά. Σκόπιμη είναι η χρήση της εξωτερικής τροφοδοσίας του οργάνου μέσω καλωδίου με κατάλληλο βύσμα, όταν επίκειται συνεχής παρακολούθηση της πίεσης.

Το σήμα πίεσης είναι διαθέσιμο σαν αφιτράριστο σήμα τάσης από 0 V έως 5 V, όπου η τιμή 0 Volt αντιπροσωπεύει την μικρότερη πίεση (boost pressure=πίεση στην εισαγωγή ενός υπερπληρωμένου κινητήρα, ενώ ο υπερπληρωτής είναι σε λειτουργία).



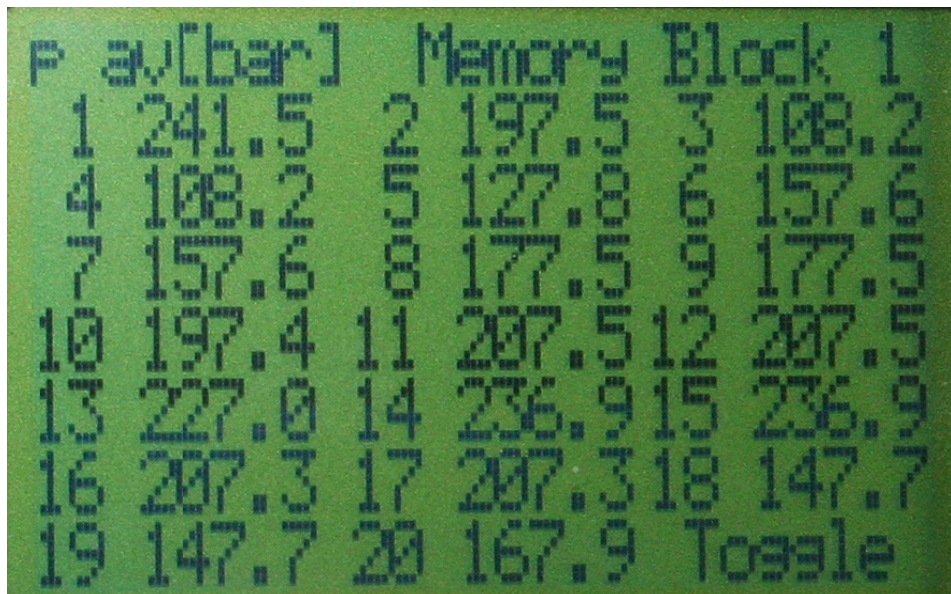
5.2.6 Ανάκληση αποθηκευμένων μετρήσεων

➤ Για μοναδική μέτρηση

1. Ενεργοποιούμε τον μετρητή
2. Επιλέγουμε “Read out one shot”
3. Πιέζουμε το πλήκτρο “F1”=«Ανάγνωση»
4. Επιλέγουμε τη μέτρηση που χρειαζόμαστε με τα πλήκτρα   και “F3”=«Εναλλαγή»
5. Τα μετρητικά δεδομένα από τις αποθηκευμένες μετρήσεις εμφανίζονται στην οθόνη. Ταυτόχρονα, στο πάνω-δεξί μέρος της οθόνης προβάλλεται ο αντίστοιχος αριθμός της θέσης μνήμης και του Memory Block (βλ. σχήμα 5.3)

➤ Επισκόπηση της p_{av}

1. Πιέζουμε το πλήκτρο “F1”=«Ανάγνωση»
2. Επιλέγουμε “Read out all p_{av} ”
Εμφανίζονται όλες οι p_{av} . Μπορούμε να εναλλασσόμαστε από το Block 1 στο Block 2 με το “F3”.





Σχήμα 5.7. Ένδειξη οθόνης με 20 αποθηκευμένες μετρήσεις πίεσης



5.2.7 Διαγραφή της μνήμης

Ολόκληρο το περιεχόμενο της μνήμης μπορεί να διαγραφεί στον κατάλογο επιλογής “Memory” ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία:



1. Ενεργοποιούμε τον μετρητή
2. Πιέζουμε το πλήκτρο “Menu”
3. Επιλέγουμε τον κατάλογο επιλογής “■ Memory” με τα πλήκτρα  
4. Επιβεβαιώνουμε με πιέζοντας το “OK”

Μεμονωμένες μετρήσεις δεν μπορούν να διαγραφούν, είναι όμως δυνατό να γίνει επανεγγραφή στη θέση των ήδη αποθηκευμένων μετρητικών δεδομένων.

5.2.8 Μεταφορά δεδομένων μέσω της διεπαφής RS-232C

Οι αποθηκευμένες μετρήσεις είναι διαθέσιμες ως αρχείο ASCII και μπορούν να μεταφερθούν μέσω της σειριακής διεπαφής σε έναν υπολογιστή. Πριν τη μεταφορά δεδομένων, πρέπει να γίνει έλεγχος ώστε να καθοριστεί εάν ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων (baud rate) είναι ο ίδιος με αυτόν του υπολογιστή και αν είναι απαραίτητο πρέπει να προσαρμόζεται αναλόγως. Η μεταφορά δεδομένων στο αντίστοιχο λογισμικό της συσκευής πρέπει να λαμβάνει χώρα με ρυθμό μετάδοσης συμβόλων της τάξης των 19200 baud.

Διαδικασία μεταφοράς δεδομένων:

1. Ενεργοποιούμε τον μετρητή
2. Πιέζουμε το πλήκτρο “F3”=«Αποστολή» – θα εμφανιστεί η ένδειξη:
 - “■ Send All Shots” :
Αποστέλλονται όλα τα αποθηκευμένα δεδομένα
 - “■ Send Memory x to: y” :
x,y = 1 ... 40 , επιλέγουμε με τα “OK” ,   , <> “F2”
 - “■ Actual Shot” :
Αποστέλλεται η τελευταία μέτρηση που δεν έχει ακόμα αποθηκευτεί
 - “■ Send with curve?”
NO/YES
Πρώτα επιλέγουμε εάν θα σταλεί ή όχι η καμπύλη και μετά ποια αποθηκευμένα δεδομένα πρόκειται να σταλούν.
3. Πατάμε το κουμπί “F3”=«Αποστολή» για να μεταφέρουμε τα δεδομένα. Ο σειριακός αριθμός της φορητής συσκευής μέτρησης πίεσης καύσης μεταδίδεται μαζί με τα μετρητικά δεδομένα.

Παράδειγμα

Επιλογή: Memory Block 2 αποθηκευμένα δεδομένα 2 έως 4
 Είσοδος μετρητή: Αποστολή μνήμης 22 έως 24

5.2.9 Αποθήκευση μετρήσεων και προώθηση στην διεπαφή RS-232C

Memory			
EnginePeak	SN: 12312312	Firmware: 1.0xx	
1/min	pmax	pmin	p av
1681	197,9	197,9	98,3
P sdev	(dp/dca)max		
0,0	10,2		
Time(h m s)	02 50 00	Date(d m y)	01 10 07
Stroke	FilterFreq.		
2	300 Hz		
Trigger level	Cycles		
10	1		

1.2

1.3

1.2

1.2

1.4

1.4

1.5

1.3

.

.

.

720 σημεία καμπύλης πίεσης

Η μεταφορά δεδομένων γίνεται σε απλό κείμενο (ASCII)

Κάθε σειρά τελειώνει με CR + LF (OD + OA).





Όλες οι τιμές είναι σε "bar".

5.2.10 Κωδικός (Password)

Όταν ενεργοποιείται αυτή η λειτουργία, μπλοκάρεται η πρόσβαση στον κύριο κατάλογο επιλογών. Αυτό προστατεύει τον μετρητή ενάντια σε αλλαγές στις μετρητικές παραμέτρους, που μπορεί να γίνουν από μη εξουσιοδοτημένα άτομα. Η



συγκεκριμένη λειτουργία απενεργοποιείται στο εργοστάσιο κατασκευής. Για να την ενεργοποιήσουμε ακολουθούμε τα εξής βήματα:

1. Ενεργοποιούμε τον μετρητή
2. Πατάμε το πλήκτρο “Menu”
3. Επιλέγουμε τον κατάλογο επιλογών: “■ Instrument Settings” με τα πλήκτρα   και επιβεβαιώνουμε με το “OK”
4. Με τα   επιλέγουμε τον κατάλογο επιλογών “■ Password” και επιβεβαιώνουμε με το “OK”

Αφού ενεργοποιηθεί η λειτουργία password, τα πλήκτρα “F1” , “F2” , “F3” πρέπει να πατηθούν με τη αναγραφόμενη σειρά, ώστε να εμφανιστεί ο κεντρικός κατάλογος επιλογών.

Στο παράρτημα δίνονται πίνακες με τα τεχνικά στοιχεία της συσκευής.



6. Μετρήσεις στον κινητήρα Rugggerini CRD100 του εργαστηρίου

6.1 Εισαγωγή

Μετά τη μελέτη του τεχνικού εγχειριδίου και την προσπάθεια κατανόησης του συνόλου των λειτουργιών της φορητής συσκευής καταγραφής πίεσης καύσης (Portable Pressure Meter), παρουσιάστηκε η ανάγκη για καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων της, μέσω πρακτικής εφαρμογής. Στα πλαίσια αυτά της εξοικείωσης με το όργανο, πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων στον κινητήρα του εργαστηρίου του τομέα θερμότητας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, τον Rugggerini CRD100. Πρόκειται για τετράχρονη μονοκύλινδρη μηχανή Diesel, κυβισμού 746 cm^3 , με διάμετρο εμβόλου 100 mm και διαδρομή 95 mm.



Σχήμα 6.1. Ο κινητήρας Rugggerini CRD100 στο εργαστήριο Θερμότητας του Ε.Μ.Π.



6.2 Προετοιμασία πριν τη διεξαγωγή μετρήσεων

Η διαδικασία των μετρήσεων έλαβε χώρα στο εργαστήριο του Τομέα Θερμότητας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αρχικά τέθηκε σε λειτουργία ο κινητήρας Rugggerini CRD100. Η μηχανή αυτή διαθέτει πέδη και κατάλληλη διάταξη ασφαλούς εξαγωγής των καυσαερίων από τον εργαστηριακό χώρο στην ατμόσφαιρα. Στη συνέχεια, συνδέθηκε στην υποδοχή Fischer KE103 ο αισθητήρας πίεσης 6613CP. Προς χάριν πληρότητας αναφέρεται εδώ, πως τόσο ο αισθητήρας όσο και η μετρητική συσκευή δεν χρειάζονταν βαθμονόμηση, καθώς διατέθηκαν στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο με πιστοποιητικά βαθμονόμησης και μέχρι τη στιγμή της εν λόγω μέτρησης δεν είχαν χρησιμοποιηθεί σε άλλες μετρητικές διαδικασίες. Επόμενο βήμα ήταν η προσαρμογή του αισθητήρα στο δυναμοδεικτικό κρουνό της μηχανής με τη βοήθεια προσαρμογέα τύπου Thompson. Στη συνέχεια, τέθηκε σε λειτουργία η συσκευή και επιλέχθηκαν οι κατάλληλες ρυθμίσεις στον κατάλογο επιλογών, λαμβάνοντας υπόψη τους 4 χρόνους του κινητήρα και την επιθυμία για μέτρηση 20 κύκλων πίεσης. Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις στο μετρητικό όργανο παρέμειναν ως είχαν (εργοστασιακές ρυθμίσεις). Η συσκευή ήταν πλέον έτοιμη για διεξαγωγή μετρήσεων.

6.3 Μετρήσεις που ελήφθησαν

Στόχος της συγκεκριμένης εφαρμογής, ήταν η λήψη μετρήσεων σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα. Πράγματι, καταγράφηκαν τρεις ομάδες τιμών πίεσης, μία στις 1043 rpm, μια στις 1541 rpm και μια στις 2031 rpm. Μετά από κάθε μέτρηση, αποθηκεύονταν στη μνήμη της συσκευής η μέση μέγιστη πίεση των 20 κύκλων “ p_{av} ”, η υψηλότερη των μέγιστων πιέσεων “ p_{max} ”, η μικρότερη των μέγιστων πιέσεων “ p_{min} ”, η τυπική απόκλιση της μέγιστης πίεσης “ p_{sdev} ” και η κλίση της καμπύλης της πίεσης “ $(dp/dca)_{max}$ ”. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.1. Αποθηκευμένα αποτελέσματα μέτρησης στον κινητήρα Rugggerini CRD100

Speed	p_{av}	p_{max}	p_{min}	p_{sdev}	$(dp/dca)_{max}$
1043 rpm	53 bar	54,7 bar	50,8 bar	0	2,6 bar/°ca
1541 rpm	57,8 bar	58,7 bar	56,3 bar	0	4,7 bar/°ca
2031 rpm	61,3 bar	62,8 bar	59,4 bar	0	4,9 bar/°ca



6.4 Μεταφορά και επεξεργασία τιμών πίεσης σε Η/Υ

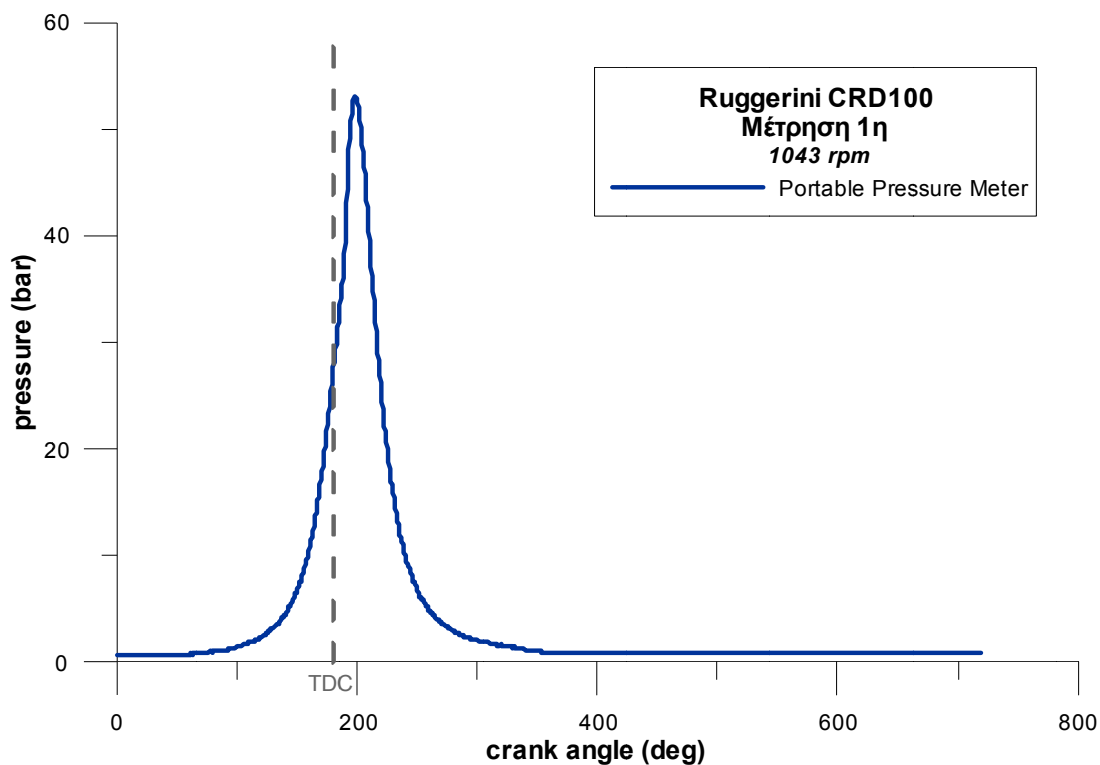
Με τη λήψη και αποθήκευση των τιμών πίεσης ολοκληρώθηκε η μετρητική διαδικασία στον χώρο του εργαστηρίου. Ακολούθησε η μεταφορά των δεδομένων μέσω της διεπαφής RS-232C. Αναλυτικότερα, αφού συνδέθηκε το ειδικό καλώδιο σειριακής διεπαφής RS-232C στην υποδοχή D-Sub 9 ακίδων του μετρητικού οργάνου, συνδέθηκε και από την άλλη μεριά στην ανάλογη υποδοχή ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ακολουθώντας τα βήματα που περιγράφονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε η μεταφορά των 720 τιμών πίεσης που αντιστοιχούν σε κάθε μια από τις τρεις μετρήσεις που έγιναν. Σημειώνεται εδώ, ότι οι τιμές αυτές αποτελούν ουσιαστικά τους μέσους όρους των τιμών πίεσης των 20 επιλεγμένων κύκλων λειτουργίας.

Εν συνεχεία, στοχεύοντας στην εξοικείωση με την επεξεργασία δεδομένων πίεσης, κρίθηκε χρήσιμη η παραγωγή των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων πίεσης – γωνίας στροφάλου ($p - \phi$). Προκειμένου να αντιστοιχηθούν οι τιμές πίεσης σε γωνίες στροφάλου έγινε η παραδοχή ότι το σταθερό χρονικό βήμα συνεπάγεται και σταθερό βήμα γωνίας στροφάλου. Παρόλο που αδιαμφισβήτητα υπεισέρχεται σφάλμα με τη συγκεκριμένη παραδοχή, αυτό μπορεί να παραβλεφθεί ως μικρό, διότι κατά τη διάρκεια κάθε μέτρησης η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα παρουσίαζε ελάχιστη διακύμανση. Τέλος, λόγω του τετράχρονου κινητήρα, η μετρητική συσκευή κατέγραψε πιέσεις μόνο κατά τις φάσεις της συμπίεσης και της καύσης.

Τα διαγράμματα που παρήχθησαν, μετά την επεξεργασία που περιγράφηκε, παρατίθενται παρακάτω. Το ANΣ εμφανίζεται στα διαγράμματα μόνο για λόγους εποπτείας και προφανώς δεν αντιστοιχεί στην πραγματικότητα. Αυτό οφείλεται στο ότι η μετρητική διάταξη (Portable Pressure Meter) που αξιολογείται δεν έχει αναφορά στο ANΣ, αδυναμία που καθιστά αδύνατη την αντιστοίχιση των τιμών της πίεσης με τις πραγματικές γωνίες στροφάλου όπου αυτές επιδρούν.

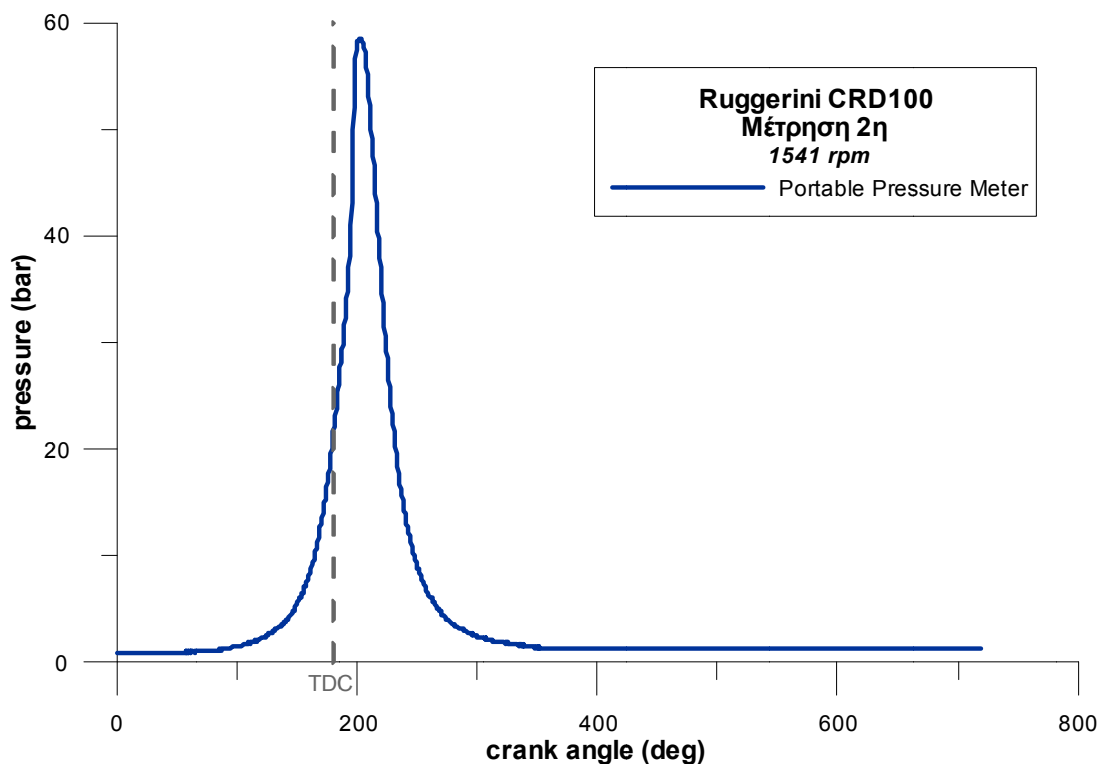


➤ **Πρώτη Μέτρηση, στις 1043 rpm**



Σχήμα 6.2. Διάγραμμα $p - \phi$, στις 1043 rpm

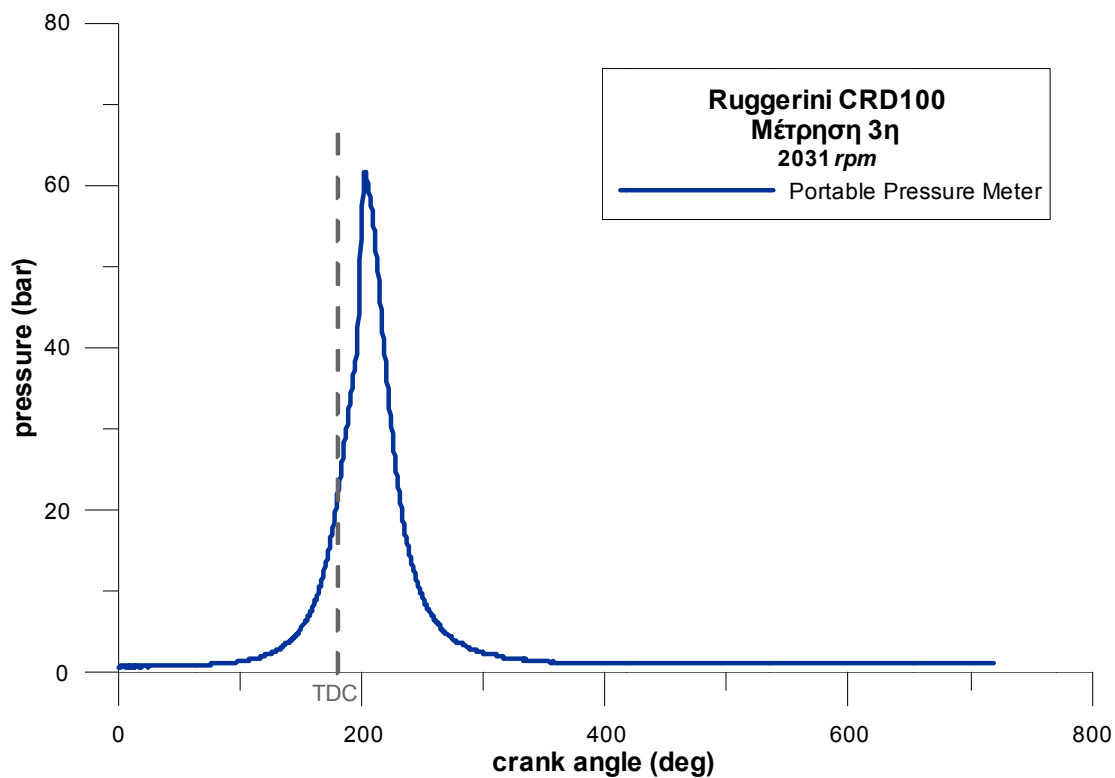
➤ **Δεύτερη Μέτρηση, στις 1541 rpm**



Σχήμα 6.3. Διάγραμμα $p - \phi$, 1541 rpm



➤ Τρίτη Μέτρηση, στις 2031 rpm



Σχήμα 6.4. Διάγραμμα $p - \phi$, 2031 rpm

Το συμπέρασμα που προκύπτει μετά την επεξεργασία των μετρημένων πιέσεων είναι ότι η φορητή συσκευή καταγραφής της πίεσης καύσης συνιστά ένα εύχρηστο όργανο, το οποίο χρειάζεται ρύθμιση ελάχιστων αρχικών παραμέτρων για την πραγματοποίηση μιας επιτυχούς μέτρησης και προσφέρει εύκολη μεταφορά των δεδομένων του σε ηλεκτρονικό υπολογιστή προς επεξεργασία.



7. Μετρήσεις στον κινητήρα MAN B&W 9K60MC-S του ΑΣΠ Χίου

7.1 Εισαγωγή

Στις 29 Μαΐου του 2013 μια ομάδα προπτυχιακών και διδακτορικών φοιτητών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου μετέβη στο νησί της Χίου με σκοπό να διενεργήσει μετρήσεις σε κινητήρα ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους στον Αυτόνομο Σταθμό Παραγωγής Χίου της Δ.Ε.Η. Ο κινητήρας αυτός ήταν ο 9K60MC-S της MAN B&W, ο οποίος τροφοδοτεί τη μονάδα Νο.3 του σταθμού. Μέλος της εν λόγω ομάδας ήταν και ο υποφαινόμενος. Σκοπός της επίσκεψης ήταν η λήψη μετρήσεων με χρήση δύο διαφορετικών πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων για την αξιολόγηση της φορητής μετρητικής συσκευής που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 7.1. Ο κινητήρας 9K60MC-S της MAN B&W στη μονάδα Νο.3 του ΑΣΠ Χίου



7.1.1 Ο κινητήρας MAN B&W 9K60MC-S

Πρόκειται για δίχρονο βραδύστροφο στροβιλοϋπερπληρωμένο κινητήρα Diesel, ο οποίος παράγει ιδανικά 14,8 MW (14,4 MW συνολικής ηλεκτρικής ισχύος) στις 142,9 στροφές/λεπτό, με βαθμό απόδοσης που αγγίζει το 50%. Αποτελείται από εννιά κυλίνδρους, καθένας από τους οποίους έχει διάμετρο εμβόλου 600 mm και διαδρομή εμβόλου 1650 mm. Γίνεται κατανοητό πως είναι μια μηχανή μεγάλων διαστάσεων που απαιτεί αντίστοιχα μεγάλο μηχανοστάσιο. Τρία επίπεδα διαμορφώνουν το κλιμακοστάσιο της εγκατάστασης, με τις μετρήσεις της πίεσης να λαμβάνουν χώρα στο τρίτο και ψηλότερο επίπεδο. Αυτό συμβαίνει, γιατί κάθε κύλινδρος έχει στην κορυφή του (στο πώμα) ένα δυναμοδεικτικό κρουνό, όπου μπορεί να προσαρμοσθεί πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας για τη καταγραφή της πίεσης καύσης.



Σχήμα 7.2. Το κλιμακοστάσιο του κινητήρα. Διακρίνονται τα τρία επίπεδα που διαθέτει



Σχήμα 7.3. Τρίτο επίπεδο. Διακρίνονται τα πώματα των 9 κυλίνδρων



7.1.2 Μέθοδος αξιολόγησης της καταγεγραμμένης πίεσης από την φορητή μετρητική συσκευή

Η αξιολόγηση της δυνατότητας καταγραφής του δυναμοδεικτικού διαγράμματος πίεσης με χρήση απλής φορητής συσκευής, που είναι και το ζητούμενο της παρούσας εργασίας, γίνεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη περιλαμβάνει την εκτίμηση της ορθότητας των μετρήσεων, αλλά και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν έπειτα από επεξεργασία των δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική βιβλιογραφία περί των κινητήρων αυτού του είδους (μεγάλοι δίχρονοι βραδύστροφοι κινητήρες Diesel), καθώς και τα στοιχεία που παρέχει ο κατασκευαστής της συγκεκριμένης μηχανής. Το πρώτο αυτό στάδιο της αξιολόγησης χαρακτηρίζεται για την αμεσότητά του, με την έννοια της ταχείας αντίληψης εάν οι μετρήσεις βρίσκονται εντός λογικών ορίων. Δεν επαρκεί, ωστόσο, για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων αναφορικά με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μετρητικής διαδικασίας.

Κρίνεται έτσι απαραίτητη η αντιπαραβολή των μεγεθών που παρέχει, άμεσα ή έμμεσα, η φορητή μετρητική συσκευή με τα αντίστοιχα ενός διαγνωστικού συστήματος, το οποίο εκλαμβάνεται ως πρότυπο στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Η επεξεργασία των δεδομένων πίεσης και η σύγκριση που προαναφέρθηκε, αποτελούν το δεύτερο και κρισιμότερο στάδιο αξιολόγησης του μετρητικού οργάνου. Όπως αναλύεται και σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα συνιστούν το πιο σημαντικό μέσο επιτήρησης της λειτουργίας μηχανών και διάγνωσης βλαβών. Για το λόγο αυτό, η επιδιωκόμενη σύγκριση μεταφράζεται τελικά σε σύγκριση των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων $p - \phi$ και $p - V$, που διαμορφώνονται με βάση τα δεδομένα από τα δύο συστήματα καταγραφής της πίεσης κυλίνδρου. Ως ζητούμενο της επεξεργασίας των μετρήσεων ορίζεται επίσης, η εμβαδομέτρηση, με χρήση γνωστής υπολογιστικής τεχνικής, των διαγραμμάτων $p - V$, με στόχο τον προσδιορισμό της ισχύος (ενδεικνύμενης και πραγματικής, εφόσον δίνεται ο μηχανικός βαθμός απόδοσης) και την εύρεση της μεταβολής αυτής μεταξύ του πρότυπου διαγνωστικού συστήματος και της αξιολογούμενης συσκευής.

7.1.3 Το πρότυπο διαγνωστικό σύστημα και λογισμικό

Το διαγνωστικό σύστημα, που στα πλαίσια αυτής της εργασίας εκλαμβάνεται ως πρότυπο για τις μετρήσεις, έχει αναπτυχθεί από τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Δημήτριο Χουντάλα και τους συνεργάτες του. Διαθέτει την τεχνολογία αυτόματου εντοπισμού του άνω νεκρού σημείου, δυνατότητα που χρησιμοποιήθηκε και για την κατάλληλη μετατόπιση των διαγραμμάτων που προέκυψαν από τα δεδομένα του υπό αξιολόγηση οργάνου. Το πρότυπο διαγνωστικό λογισμικό υπολογίζει, επίσης,



αυτόματα την παραγόμενη ισχύ από κάθε κύλινδρο του κινητήρα, διευκολύνοντας έτσι τον μηχανικό κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Αυτή είναι και η ισχύς με την οποία συγκρίνεται η ισχύς η υπολογιζόμενη από τα δεδομένα της φορητής συσκευής μέτρησης πίεσης καύσης, ώστε να προκύψουν στη συνέχεια τα ανάλογα συμπεράσματα για την ακρίβεια του μετρητικού οργάνου.

7.2 Διαδικασία λήψης μετρήσεων

Στον κινητήρα MAN B&W 9K60MC-S έλαβαν χώρα τρεις σειρές μετρήσεων της πίεσης καύσης. Όλες ακολούθησαν το ίδιο μοτίβο, το οποίο περιγράφεται ακολούθως.

Αρχικά ζητήθηκε από τον μηχανικό της Δ.Ε.Η. να ρυθμίσει (μέσω του ηλεκτρονικού ελέγχου της μηχανής) το φορτίο του κινητήρα σταθερά στο 30% του μέγιστου. Μόλις το φορτίο σταθεροποιήθηκε, με την ταχύτητα του κινητήρα στις 143 rpm (με ελάχιστες διακυμάνσεις), ξεκίνησαν οι μετρήσεις. Εκκινώντας από τον κύλινδρο «1», προσαρμόστηκε στο δυναμοδεικτικό κρουνό ο αισθητήρας τύπου 7613C, με τη βοήθεια του οποίου το πρότυπο διαγνωστικό σύστημα μέτρησε την πίεση του επιλεγμένου αριθμού κύκλων λειτουργίας. Οι μετρήσεις αυτές αποθηκεύτηκαν, ώστε να είναι αξιοποιήσιμες σε μετέπειτα επεξεργασία τους. Στη συνέχεια και με διαφορά λίγων μόλις δευτερολέπτων, συνδέθηκε στο δυναμοδεικτικό κρουνό του κυλίνδρου «1» ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας τύπου 6613CP μέσω κατάλληλου προσαρμογέα τύπου Thompson. Ο αισθητήρας ήταν συνδεδεμένος και στην αντίστοιχη υποδοχή του φορητού μετρητικού οργάνου.



Σχήμα 7.4. Λήψη μετρήσεων πίεσης. Προσαρμογή του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα στο δυναμοδεικτικό κρουνό του κυλίνδρου



Όταν στην οθόνη της συσκευής εμφανίστηκε η κατάλληλη ένδειξη, τότε άρχισε η μέτρηση της πίεσης 20 κύκλων λειτουργίας, η οποία και αποθηκεύτηκε στη μνήμη του οργάνου (βλ. κεφάλαιο 4). Το ιδιαίτερα μικρό χρονικό διάστημα που παρεμβλήθηκε μεταξύ των δύο μετρήσεων διασφάλισε την σχετική ακρίβειά τους, καθώς διατήρησε πολύ περιορισμένη την πιθανότητα διακύμανσης του φορτίου κατά την αλλαγή των αισθητήρων. Η διαδικασία συνεχίστηκε μεταβαίνοντας στον κύλινδρο «2» και ακολουθώντας τα ίδια βήματα.

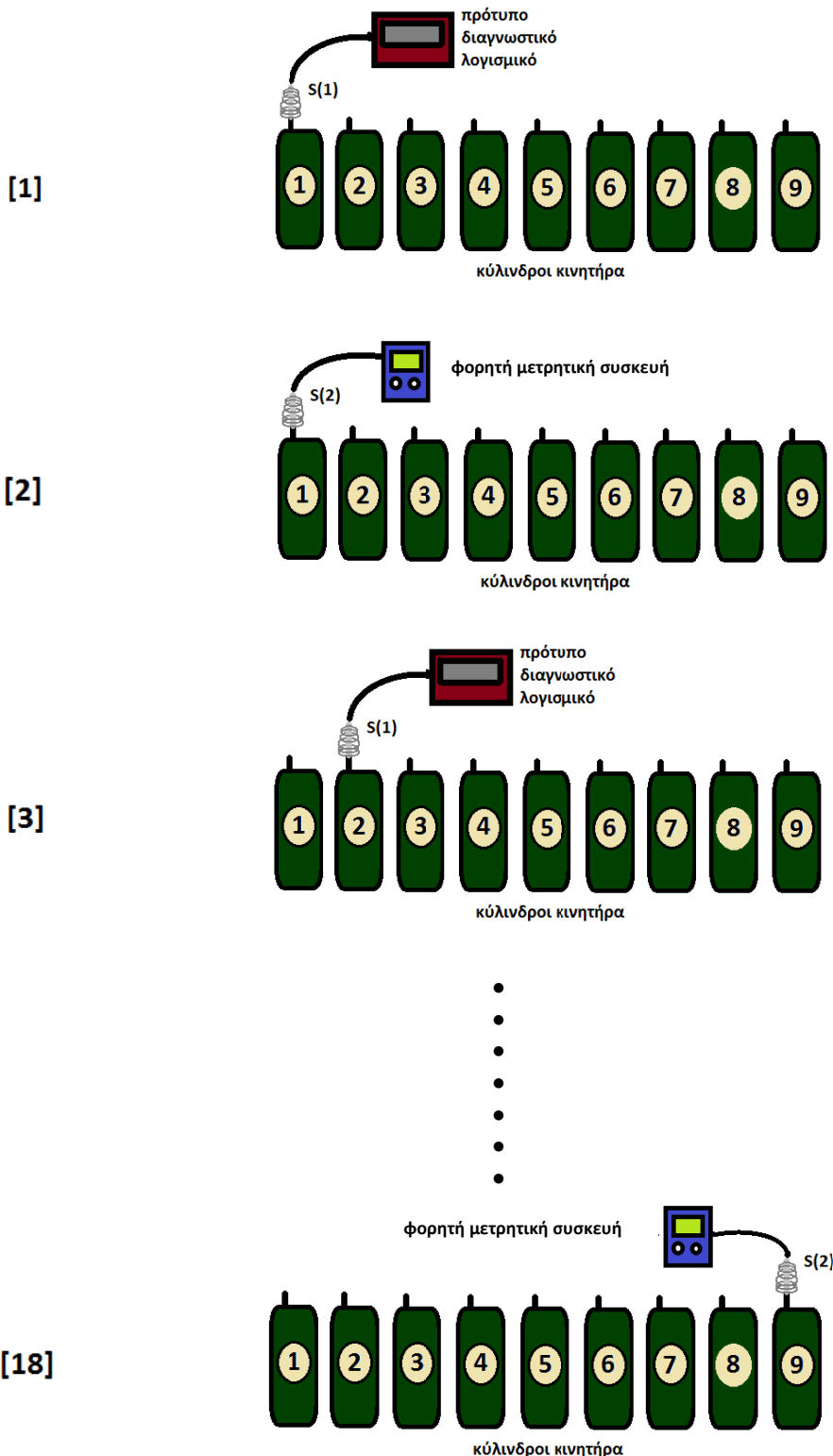


Σχήμα 7.5. Πραγματοποίηση μέτρησης με τη φορητή συσκευή καταγραφής πίεσης καύσης

Με την ίδια ακριβώς διαδικασία, δηλαδή καταγράφοντας την πίεση πρώτα με το πρότυπο διαγνωστικό σύστημα κι έπειτα με το φορητό μετρητικό όργανο, ολοκληρώθηκε η μέτρηση της πίεσης καύσης και στους 9 κυλίνδρους του κινητήρα, για φορτίο 30%. Εφαρμόζοντας το ίδιο μοτίβο (βλ. σχήμα 7.6), ακολούθησαν άλλες δύο σειρές μετρήσεων της πίεσης, μια για σταθερό φορτίο 50% του κινητήρα και μια για φορτίο 75%. Όλες οι τιμές που καταγράφηκαν, αποθηκεύτηκαν στις αντίστοιχες θέσεις μνήμης της υπό αξιολόγηση συσκευής, με σκοπό να μεταφερθούν στη συνέχεια σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και να επεξεργαστούν με τον τρόπο που προαναφέρθηκε. Έτσι, κατέστη δυνατή η σύγκριση των επεξεργασμένων τιμών με τη μορφή δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων και η εξαγωγή των ανάλογων συμπερασμάτων, όσον αφορά την ακρίβεια του οργάνου,



την ορθότητα των μετρήσεών του και την αποδοτική χρήση του σε βιομηχανικές εφαρμογές.



Σχήμα 7.6. Το μοτίβο που ακολουθήθηκε κατά τη διαδικασία της μέτρησης (18 μετρήσεις συνολικά για κάθε φορτίο). Με S(1) συμβολίζεται ο αισθητήρας τύπου 7613C και με S(2) ο αισθητήρας τύπου 6613CP.



7.3 Επεξεργασία των μετρήσεων

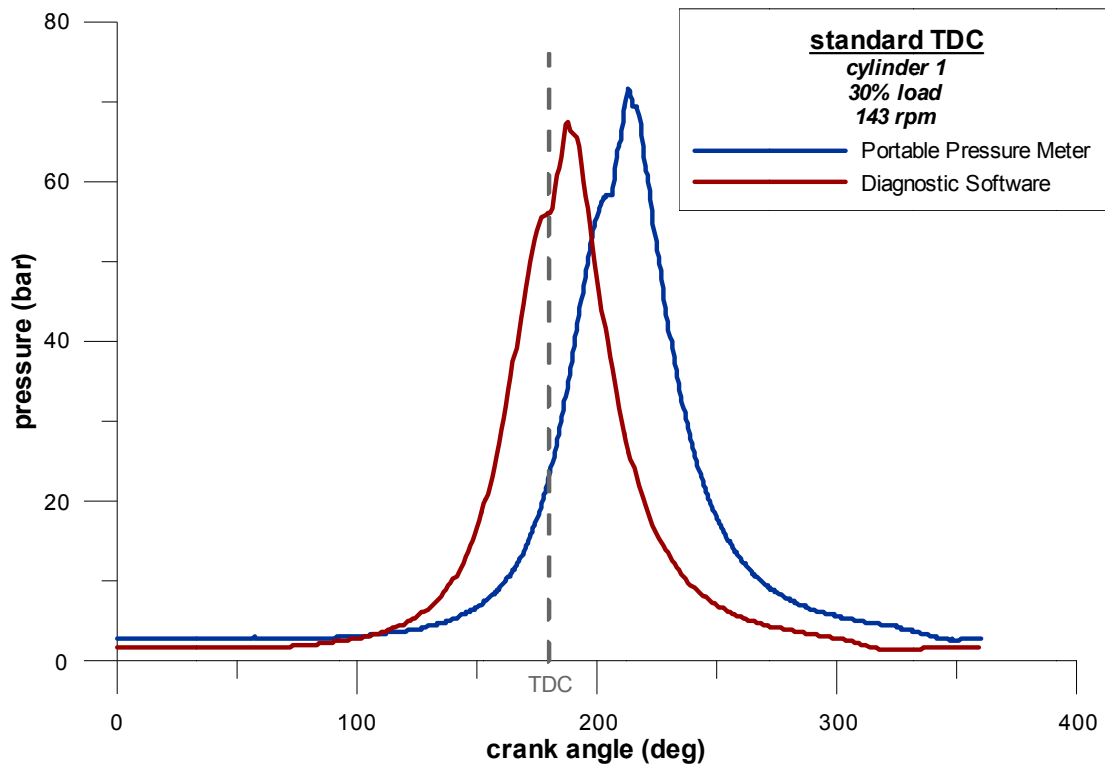
7.3.1 Σύγκριση δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων $p - \phi$

Παρατίθενται για κάθε έναν από τους εννιά κυλίνδρους του κινητήρα δύο δυναμοδεικτικά διαγράμματα. Το πρώτο περιέχει τις καμπύλες πίεσης – γωνίας στροφάλου όπως προκύπτουν από το πρότυπο διαγνωστικό λογισμικό (Diagnostic Software) και τις αντίστοιχες καμπύλες, όπως προκύπτουν από τη φορητή μετρητική συσκευή (Portable Pressure Meter) με χρήση του αισθητήρα τύπου 6613CP (standard Top Dead Center). Το δεύτερο δυναμοδεικτικό διάγραμμα αποτελείται από τις ίδιες καμπύλες, αλλά με τα άνω νεκρά σημεία (Top Dead Center – TDC) κατάλληλα μετατοπισμένα (offset TDC), ώστε να ταυτίζονται όσο το δυνατόν περισσότερο οι εισαγωγές και οι συμπίεσεις των δύο καμπύλων. Στόχος της μετατόπισης αυτής είναι η καλύτερη δυνατή οπτική σύγκριση που θα επιτρέψει την αξιολόγηση της εν λόγω συσκευής όσον αφορά την αξιοπιστία της και την ορθότητα των ενδείξεών της. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα τρεις φορές, μία για κάθε φορτίο στο οποίο ελήφθησαν μετρήσεις. Υπενθυμίζεται εδώ, ότι οι καμπύλες πίεσης που προκύπτουν από το φορητό όργανο μέτρησης της πίεσης καύσης, δεν καταγράφονται σε σχέση με την πραγματική γωνία στροφάλου. Η κλίμακα του άξονα των x σε μοίρες γωνίας στροφάλου έχει επιλεγεί με την παραδοχή ότι το σταθερό χρονικό βήμα, με το οποίο καταγράφονται οι πιέσεις, συνεπάγεται και σταθερό βήμα γωνίας στροφάλου εφόσον δεν παρατηρείται διακύμανση στην ταχύτητα του κινητήρα. Πράγματι, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα MAN B&W 9K60MC-S θεωρητικά παραμένει σταθερή στις 143 rpm. Πρακτικά, παρατηρούνται πολύ μικρές μεταβολές, οι οποίες όμως, δεν επηρεάζουν ουσιαστικά την αξιολόγηση του μετρητικού οργάνου. Σημειώνεται πως το πρότυπο διαγνωστικό λογισμικό διαθέτει τη δυνατότητα ακριβούς εντοπισμού του ΑΝΣ, σε αντίθεση με το υπό μελέτη σύστημα. Επομένως, στα πλαίσια της σύγκρισης των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων, οι καμπύλες που μετατοπίζονται είναι αυτές που προκύπτουν με βάση τα δεδομένα από τη φορητή μετρητική συσκευή.

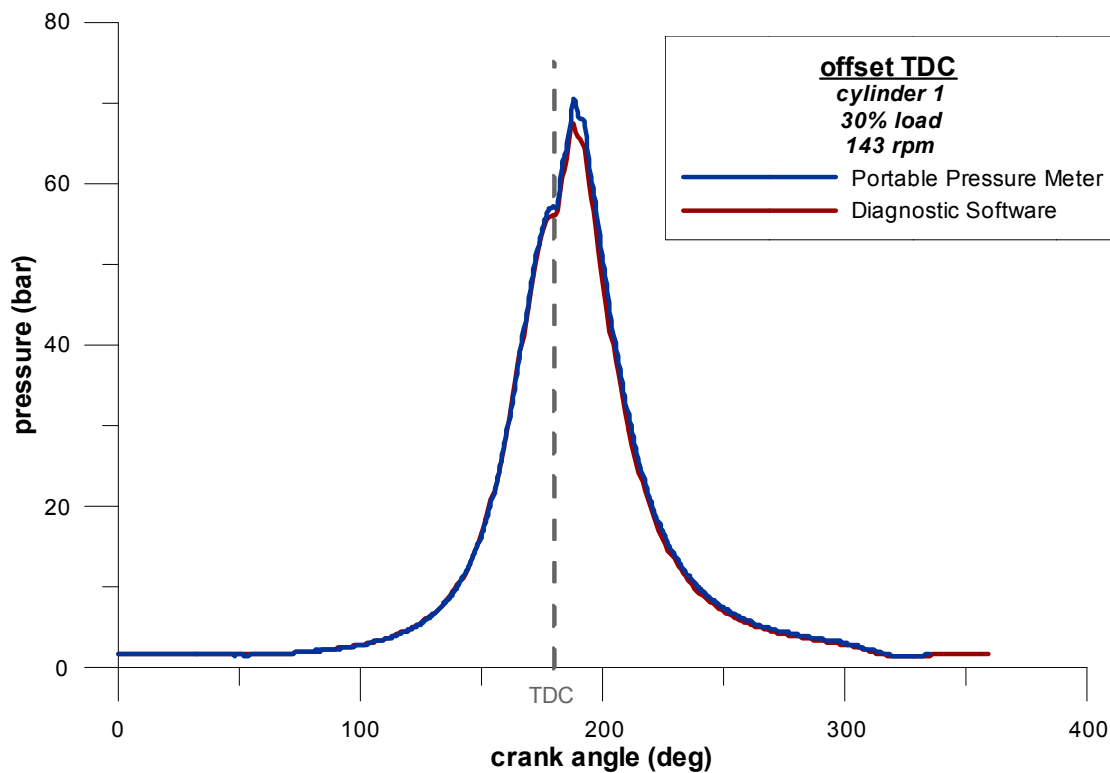
Ξεκινά από την επόμενη σελίδα η παράθεση των διαγραμμάτων ($p - \phi$) για καθένα από τα τρία φορτία στα οποία καταγράφηκαν μετρήσεις. Το πρώτο δυναμοδεικτικό διάγραμμα κάθε κυλίνδρου περιλαμβάνει την καμπύλη πίεσης – γωνίας στροφάλου χωρίς αναφορά στο ΑΝΣ. Αντίθετα, στο δεύτερο δυναμοδεικτικό διάγραμμα οι συγκεκριμένη καμπύλη παρουσιάζεται με αναφορά στο ΑΝΣ, μετά από κατάλληλη μετατόπιση ως προς την αντίστοιχη, εξαγόμενη από το πρότυπο διαγνωστικό λογισμικό, καμπύλη. Εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος σύγκρισης, καθώς το πρότυπο διαγνωστικό σύστημα χρησιμοποιεί υπολογιστικές μεθόδους, ώστε να προσδιορίζει με ακρίβεια τη θέση του ΑΝΣ, η οποία και σημειώνεται σε κάθε διάγραμμα.



- Για σταθερό φορτίο στο 30%
 - Κύλινδρος 1



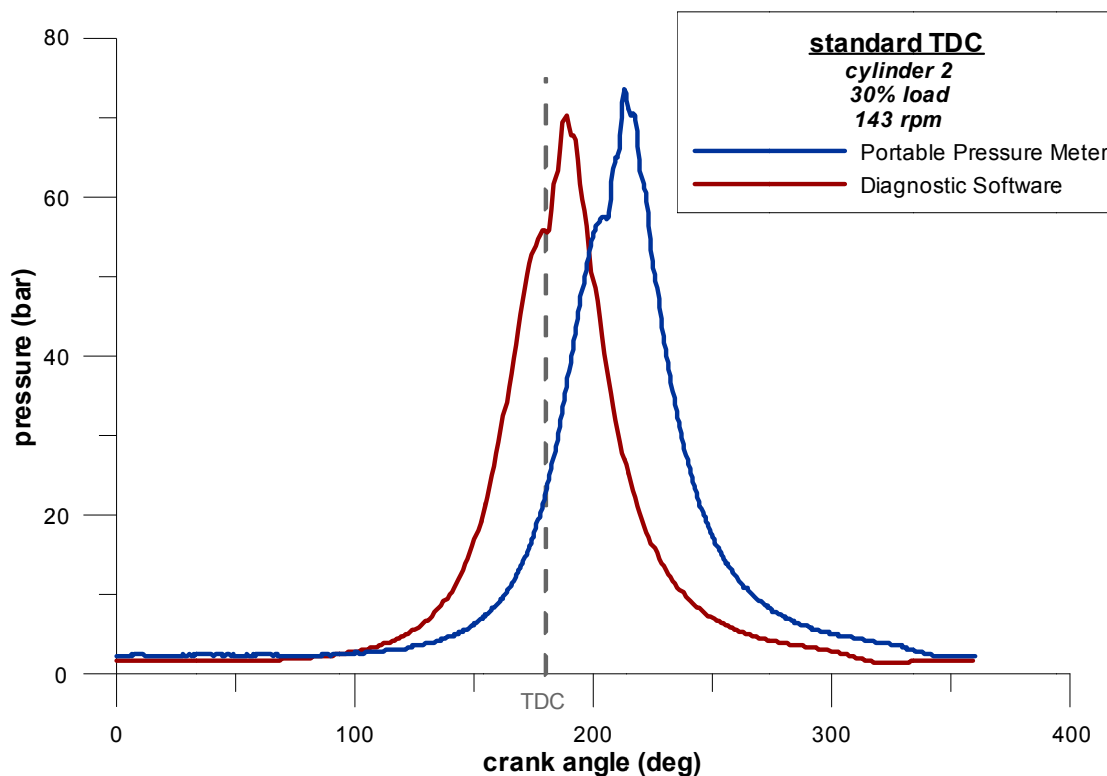
Σχήμα 7.7. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «1» σε πρωτογενή μορφή, στο 30% του φορτίου



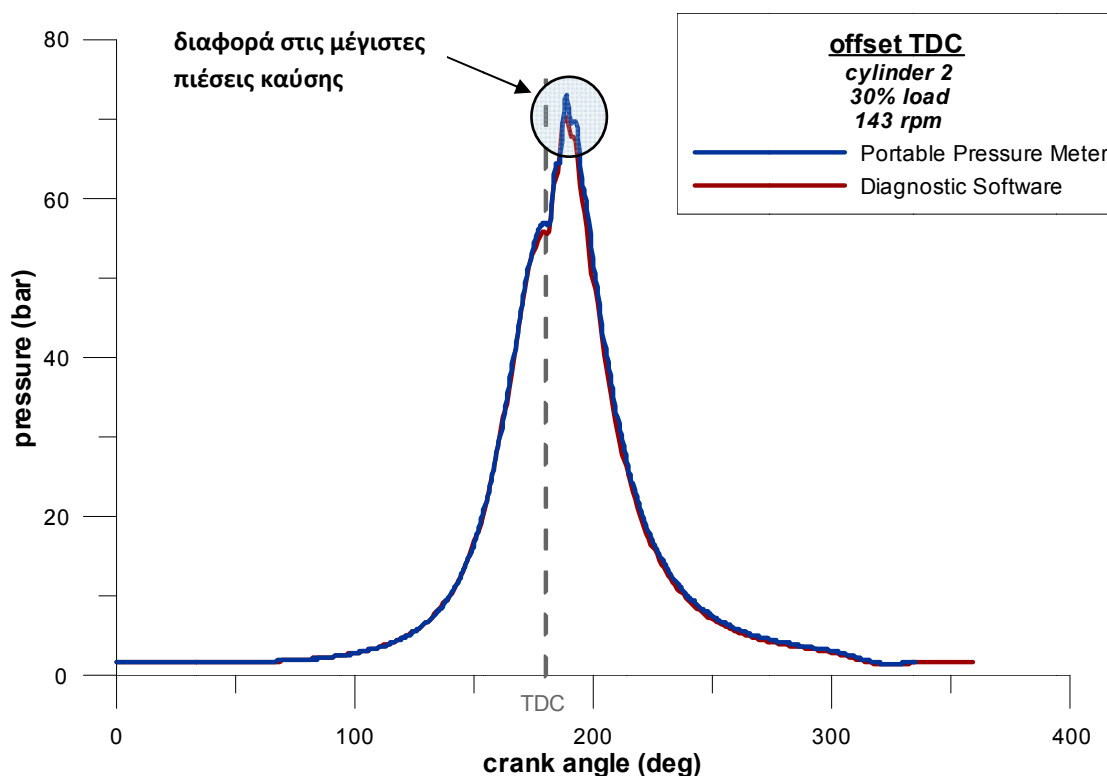
Σχήμα 7.8. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «1», στο 30% του φορτίου



– Κύλινδρος 2



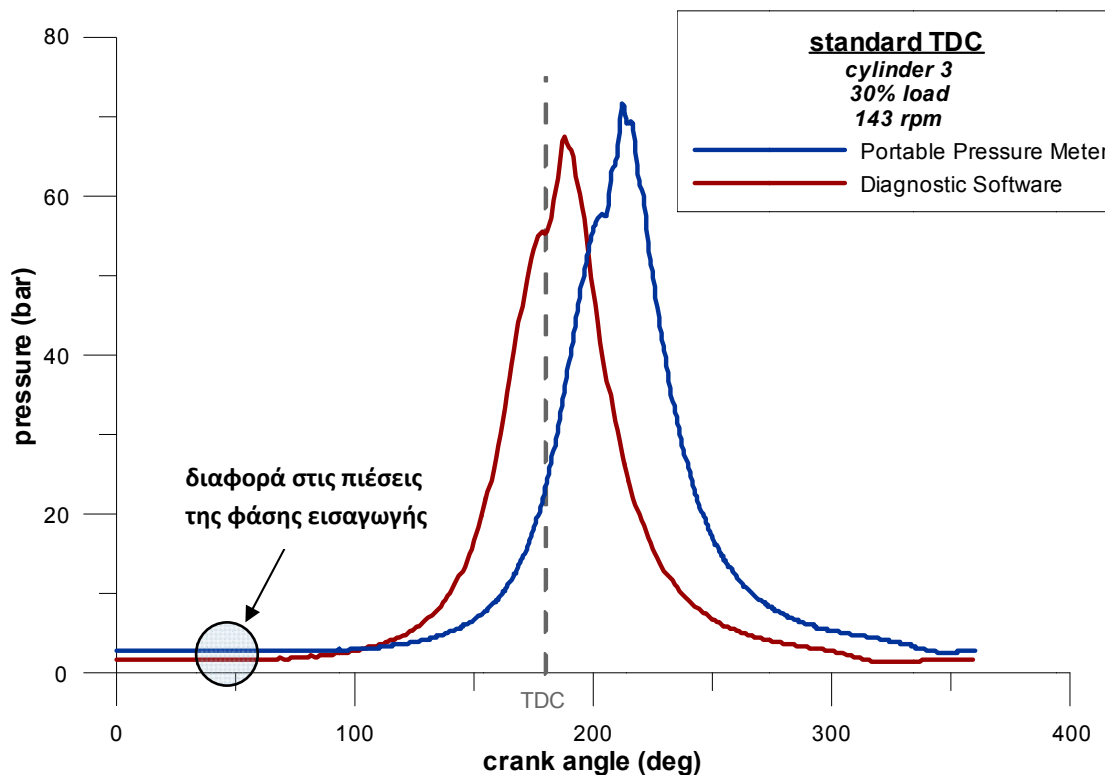
Σχήμα 7.9. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «2» σε πρωτογενή μορφή, στο 30% του φορτίου



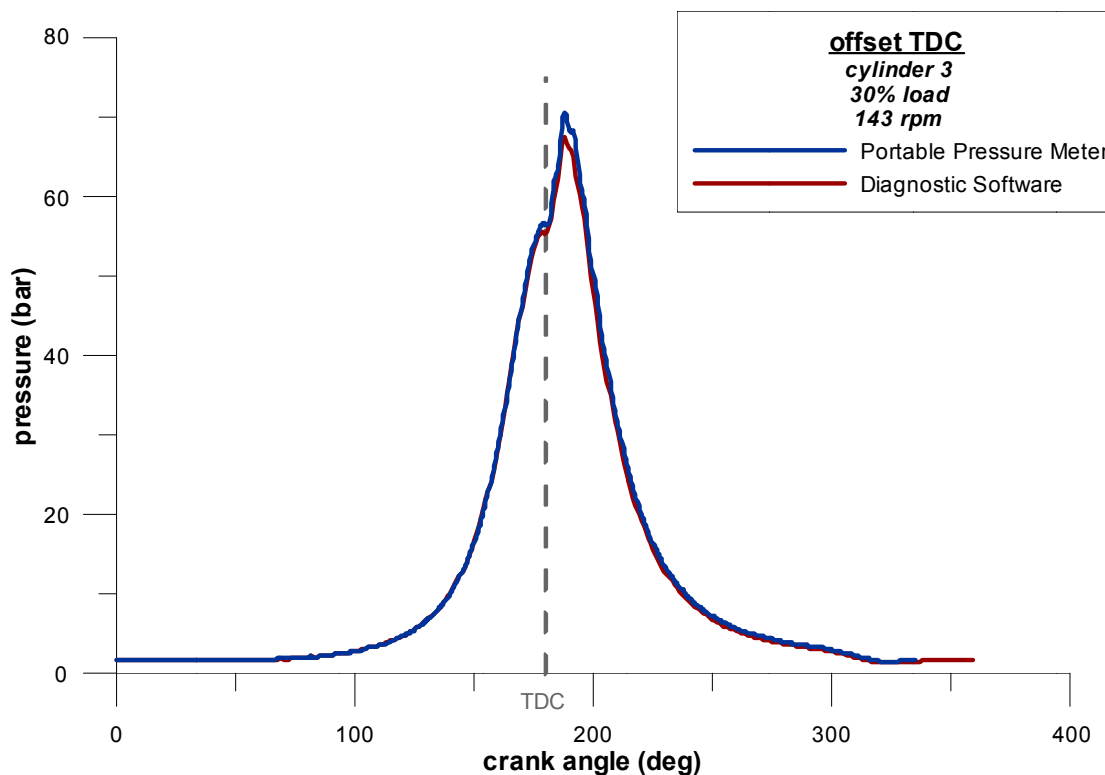
Σχήμα 7.10. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «2», στο 30% του φορτίου. Επισημαίνεται σχηματικά η διαφορά στις μέγιστες πιέσεις καύσης των δύο καμπύλων.



– Κύλινδρος 3



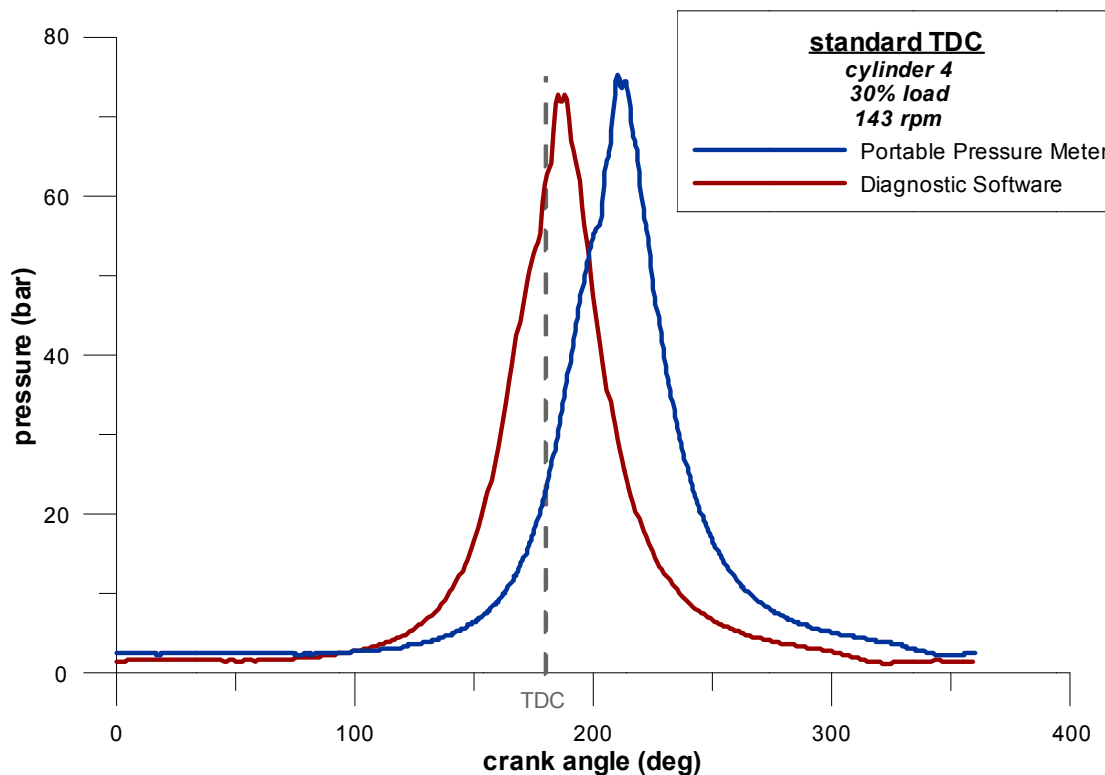
Σχήμα 7.11. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «3» σε πρωτογενή μορφή, στο 30% του φορτίου. Τονίζεται σχηματικά η διαφορά στις πιέσεις των δύο καμπυλών κατά την πλήρωση.



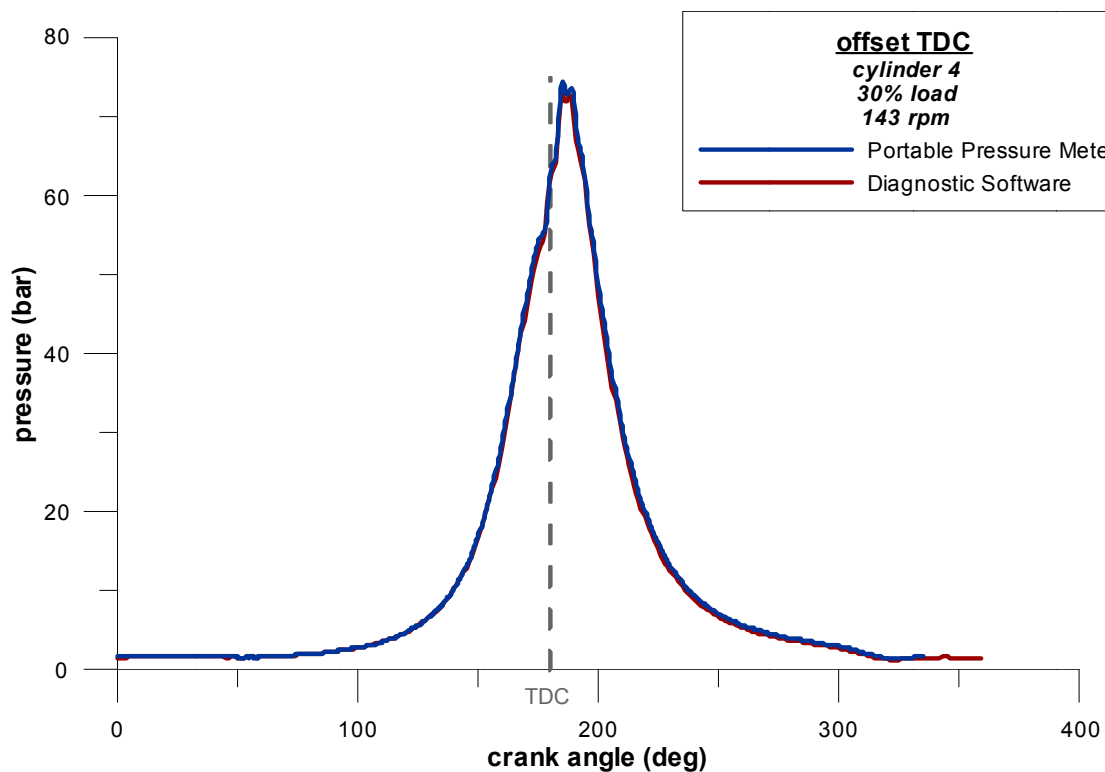
Σχήμα 7.12. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «3», στο 30% του φορτίου



– Κύλινδρος 4



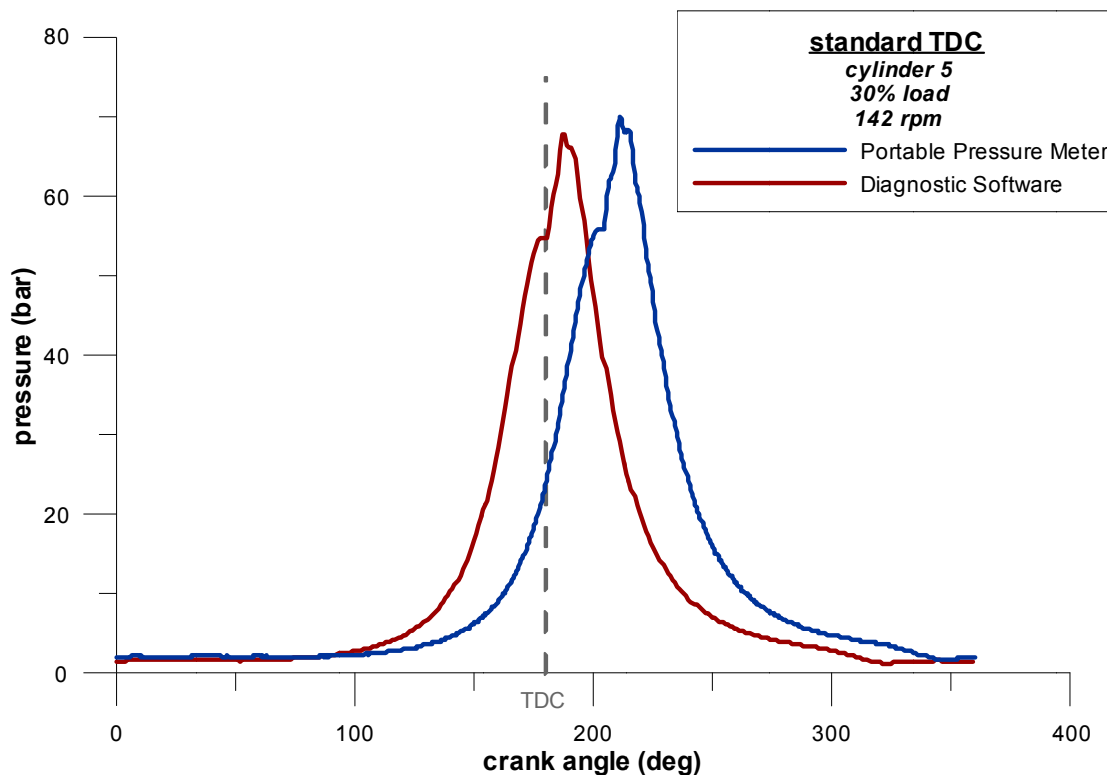
Σχήμα 7.13. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «4» σε πρωτογενή μορφή, στο 30% του φορτίου



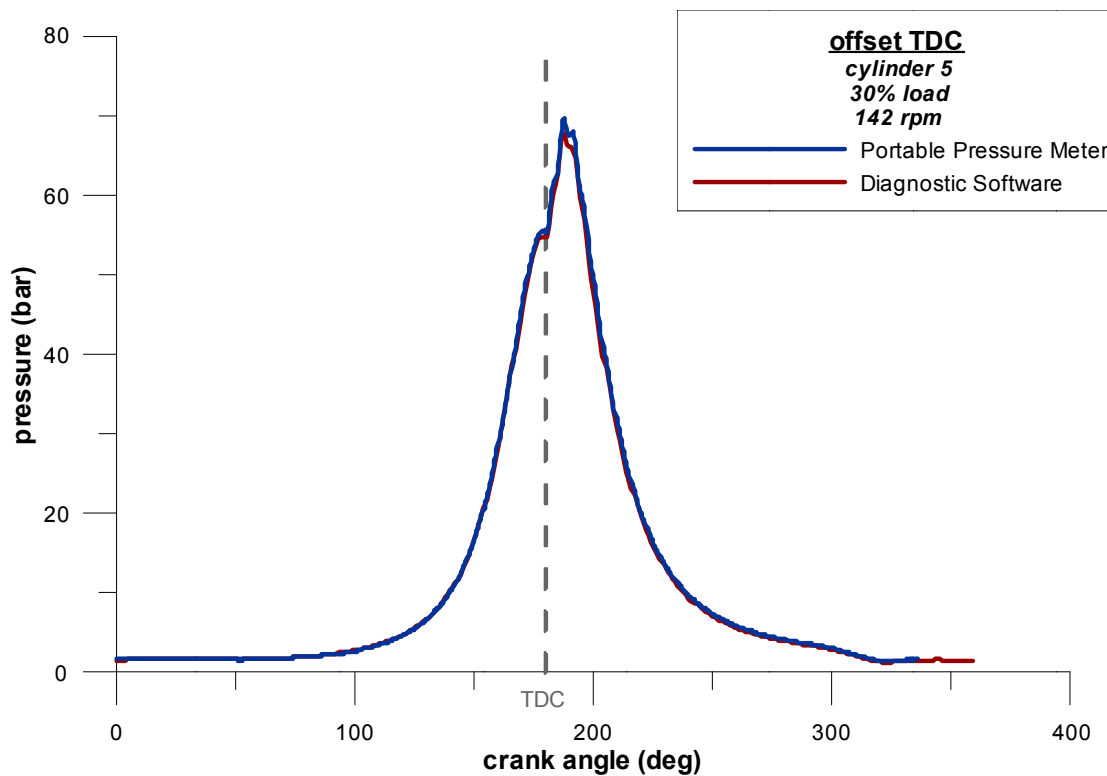
Σχήμα 7.14. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «4», στο 30% του φορτίου



– Κύλινδρος 5



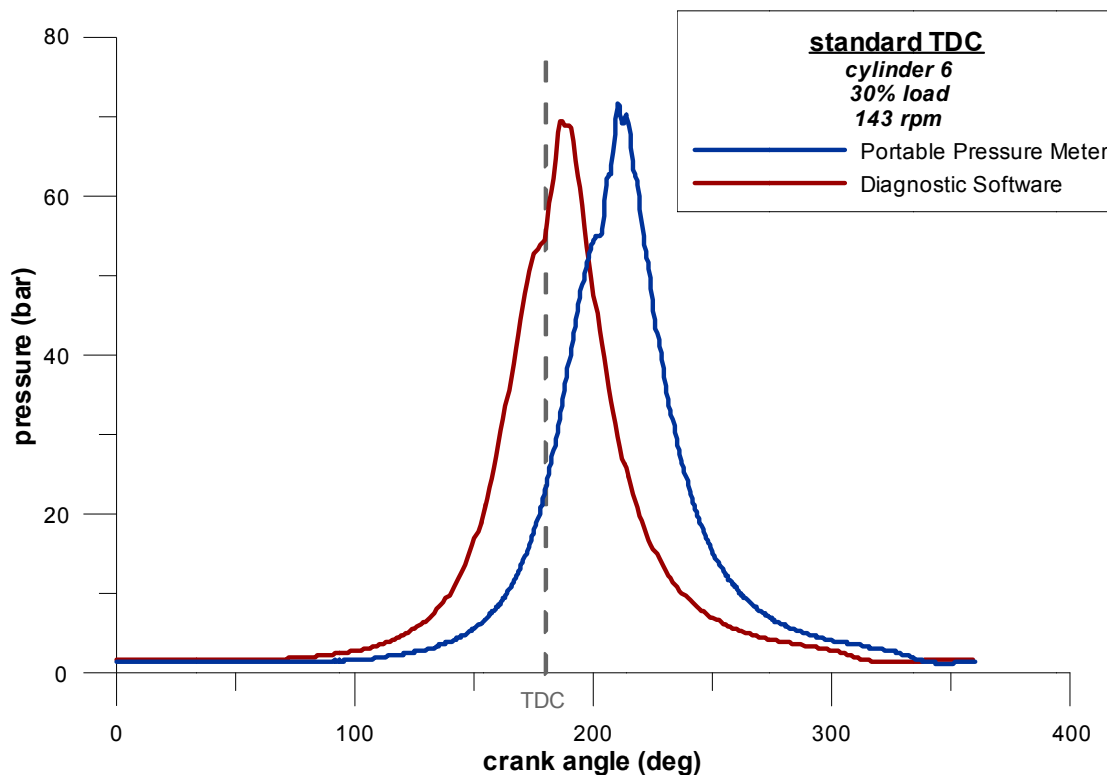
Σχήμα 7.15. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «5» σε πρωτογενή μορφή, στο 30% του φορτίου



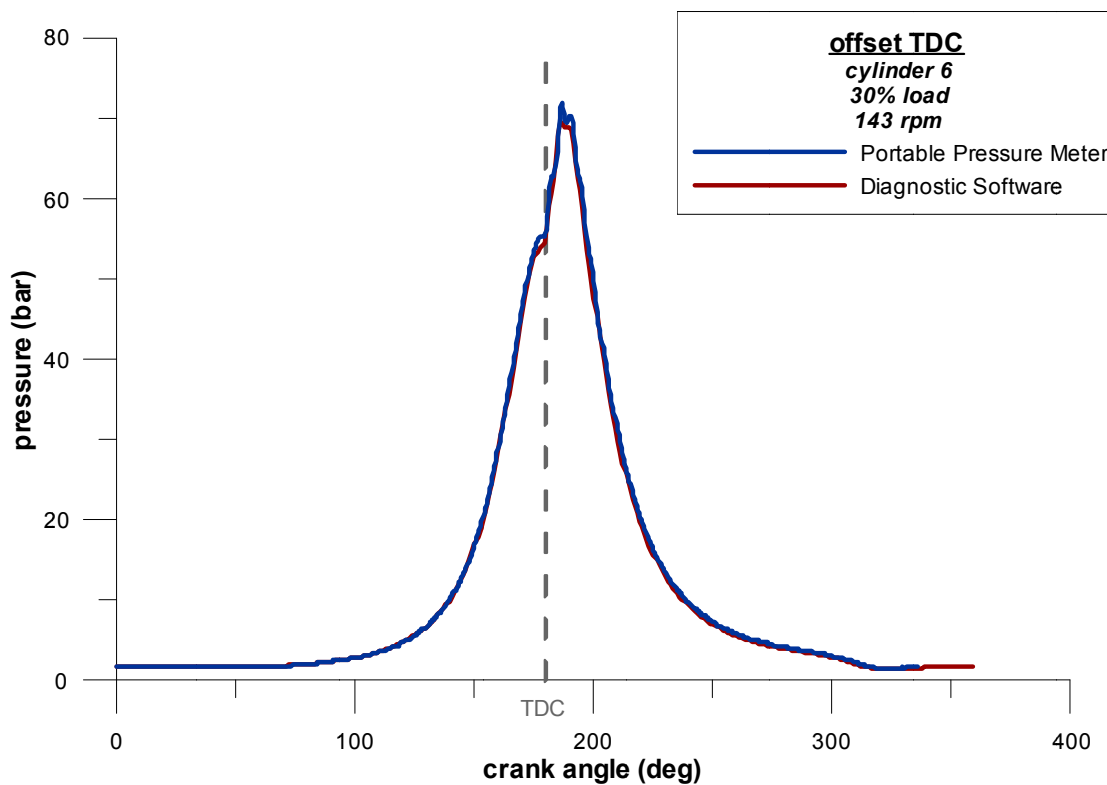
Σχήμα 7.16. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «5», στο 30% του φορτίου



– Κύλινδρος 6



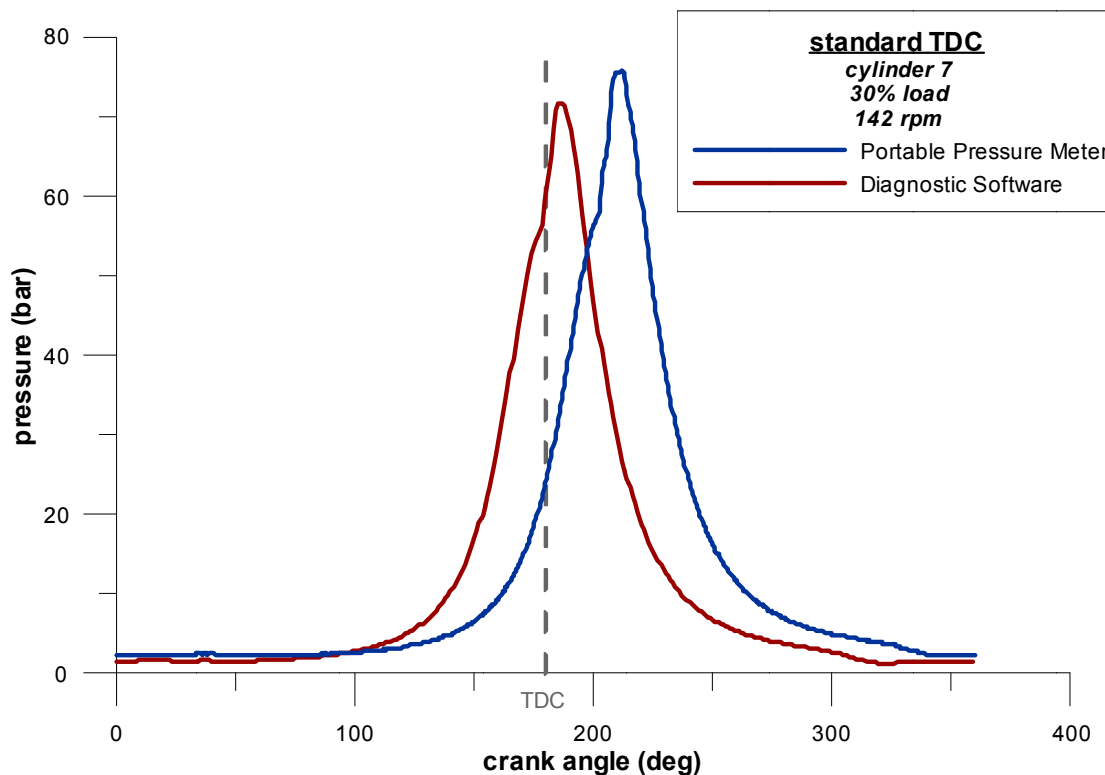
Σχήμα 7.17. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «6» σε πρωτογενή μορφή, στο 30% του φορτίου



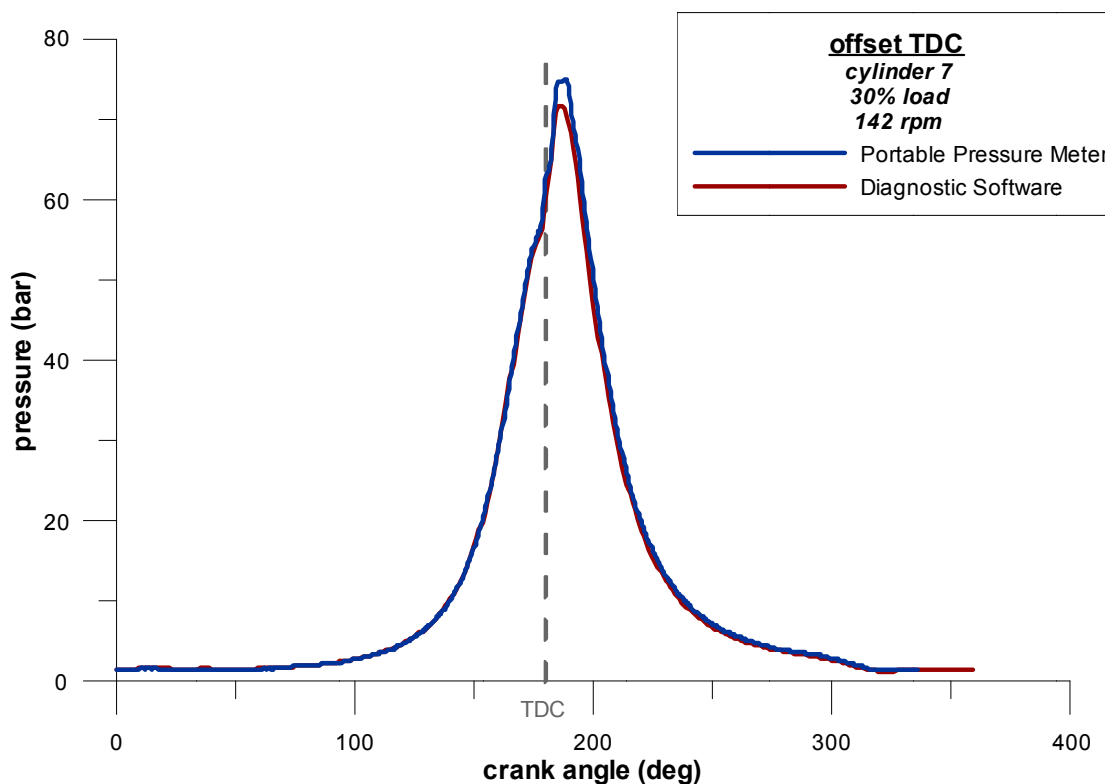
Σχήμα 7.18. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «6», στο 30% του φορτίου



– Κύλινδρος 7



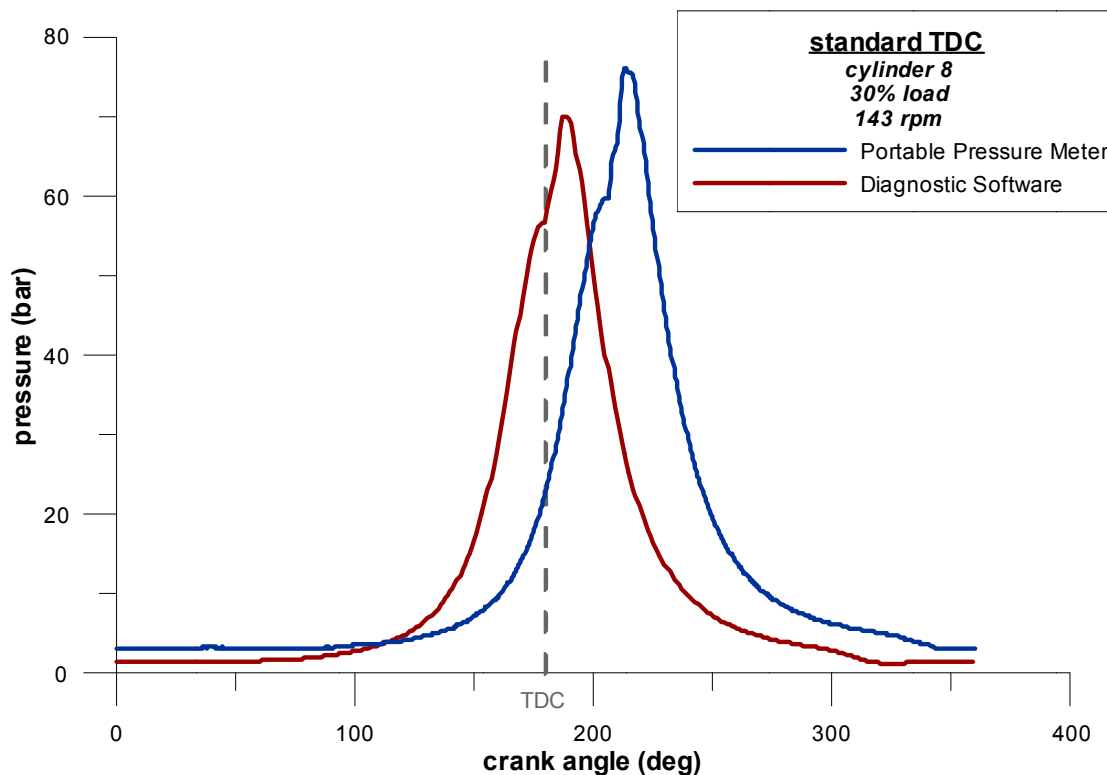
Σχήμα 7.19. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «7» σε πρωτογενή μορφή, στο 30% του φορτίου



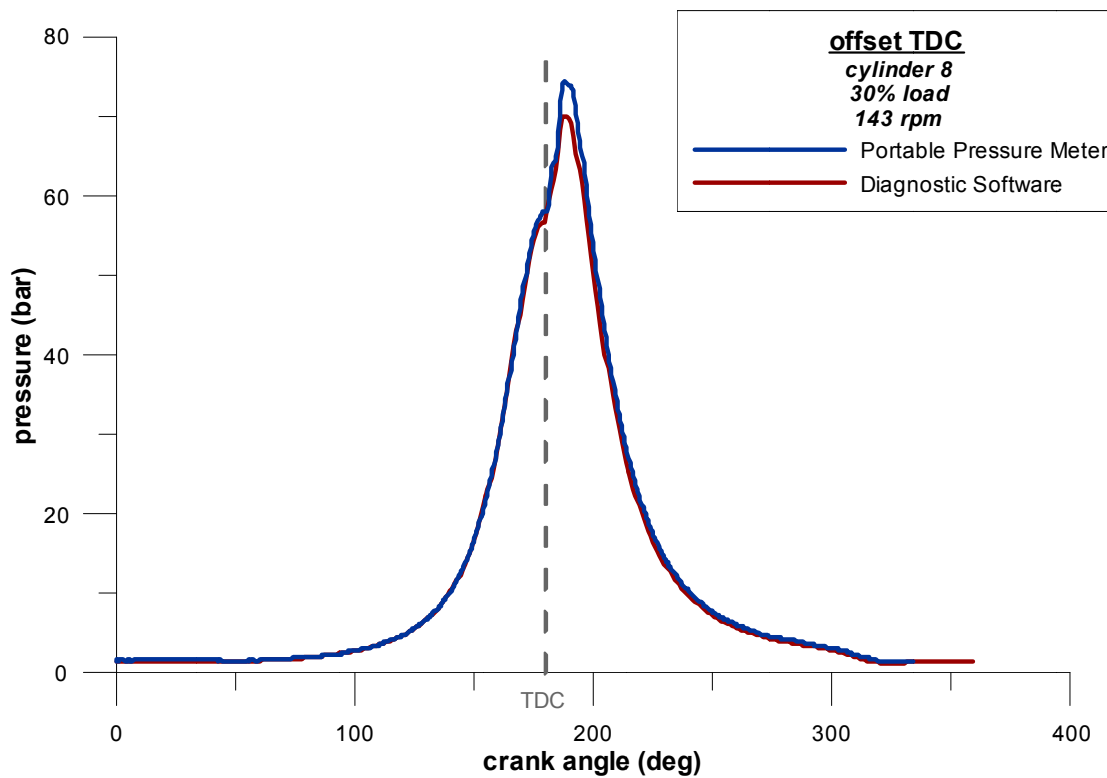
Σχήμα 7.20. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «7», στο 30% του φορτίου



– Κύλινδρος 8

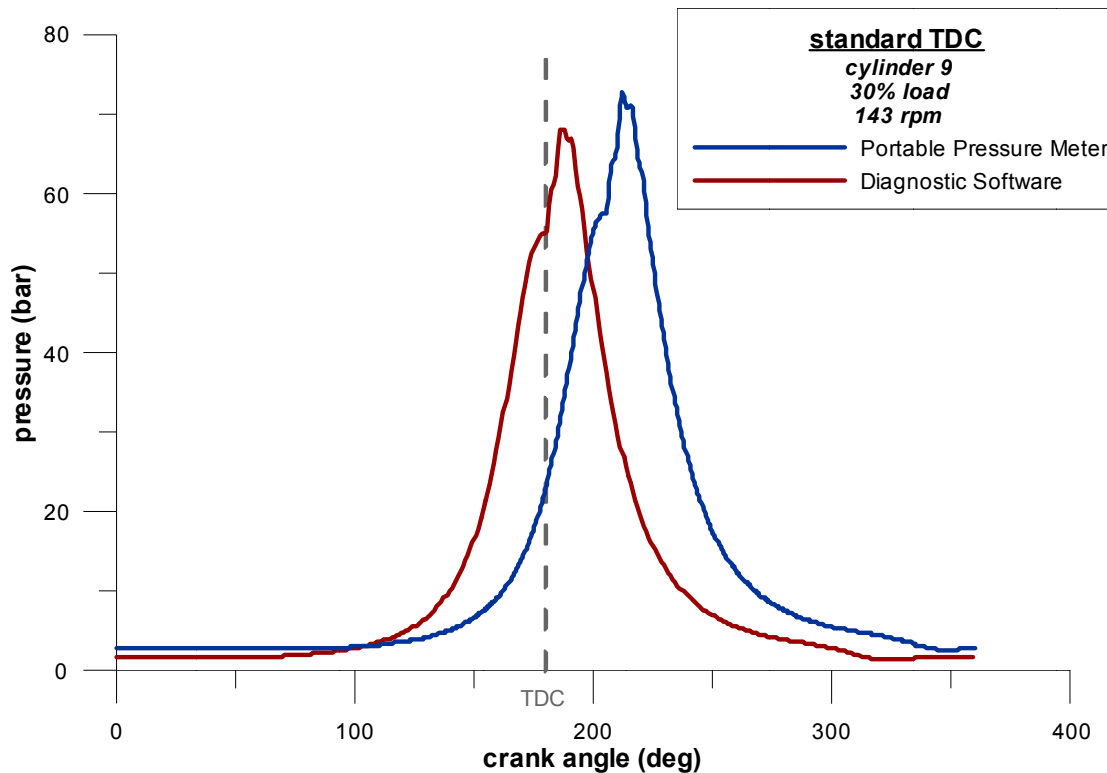


Σχήμα 7.21. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «8» σε πρωτογενή μορφή, στο 30% του φορτίου

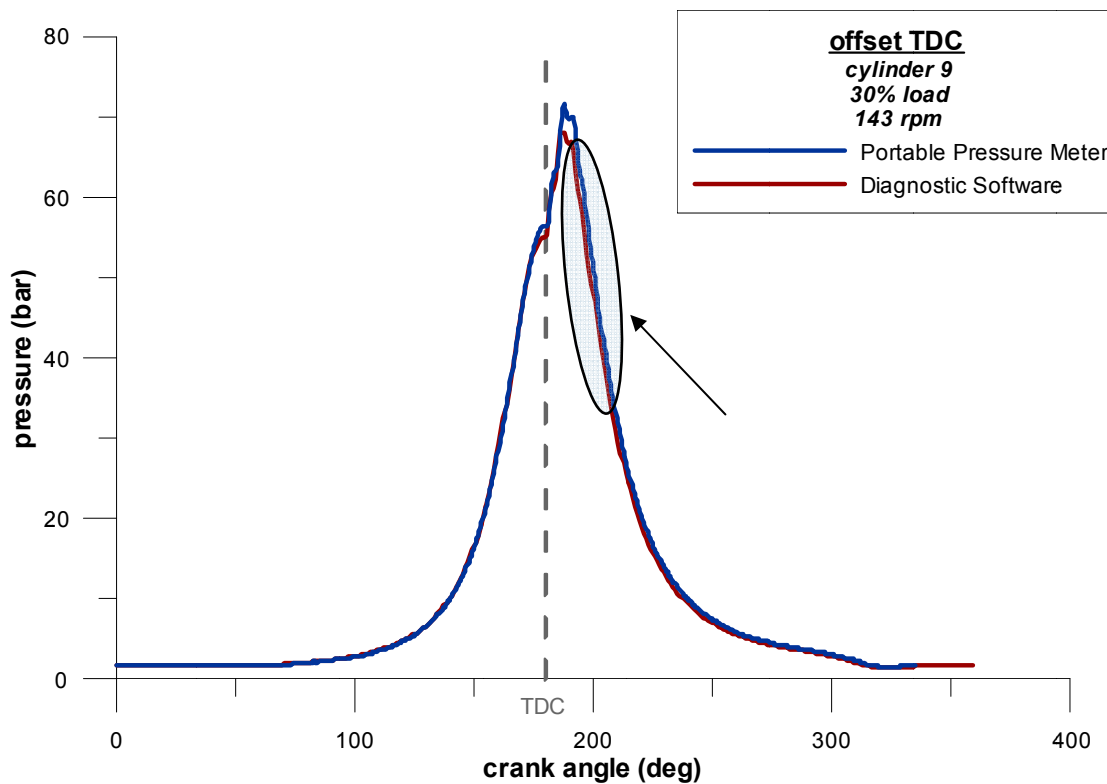




Σχήμα 7.22. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «8», στο 30% του φορτίου
 – Κύλινδρος 9



Σχήμα 7.23. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «9» σε πρωτογενή μορφή, στο 30% του φορτίου





Σχήμα 7.24. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «9» , στο 30% του φορτίου. Επισημαίνεται σχηματικά η διαφορά στις πιέσεις των δύο καμπύλων κατά την εκτόνωση.

Συμπεράσματα

Τα διαγράμματα παρουσιάζουν σημαντική ταύτιση μετά από τον προσδιορισμό τους ΑΝΣ. Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στην πίεση (χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων αποκλίσεων είναι κυκλωμένα σε ορισμένα διαγράμματα) κατά τις φάσεις της συμπίεσης και της καύσης είναι μικρές, της τάξης των 1 έως 5 bar. Είναι απόλυτα αποδεκτές καθώς μπορεί να οφείλονται σε τυχαίους παράγοντες, όπως οι μικρές διακυμάνσεις στην πίεση εντός του κυλίνδρου από τη μια μέτρηση στην άλλη. Ο βασικότερος, όμως, λόγος **διαφορά στις πιέσεις** κυτή η υπερεκτίμηση από το μετρητικό όργανο είναι **της φάσης εκτόνωσης** ιετικού πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα σε κάθε μετρητικό σύστημα που προκαλεί μικρές διαφοροποιήσεις στη μετρημένη πίεση κυλίνδρου. Όπως φαίνεται, ο αισθητήρας τύπου 6613CP προκάλεσε την παρατηρούμενη υπερεκτίμηση. Ο ισχυρισμός αυτός δικαιολογείται και από τις ελάχιστα μεγαλύτερες πιέσεις που καταγράφονται και στη φάση της εκτόνωσης των καυσαερίων, στα δυναμοδεικτικά διαγράμματα του φορητού μετρητικού οργάνου.

Εκτός από τις πιέσεις σε 720 ισαπέχοντα χρονικά σημεία, η μετρητική συσκευή κατέγραψε για το 30% του φορτίου και τα εξής μεγέθη:

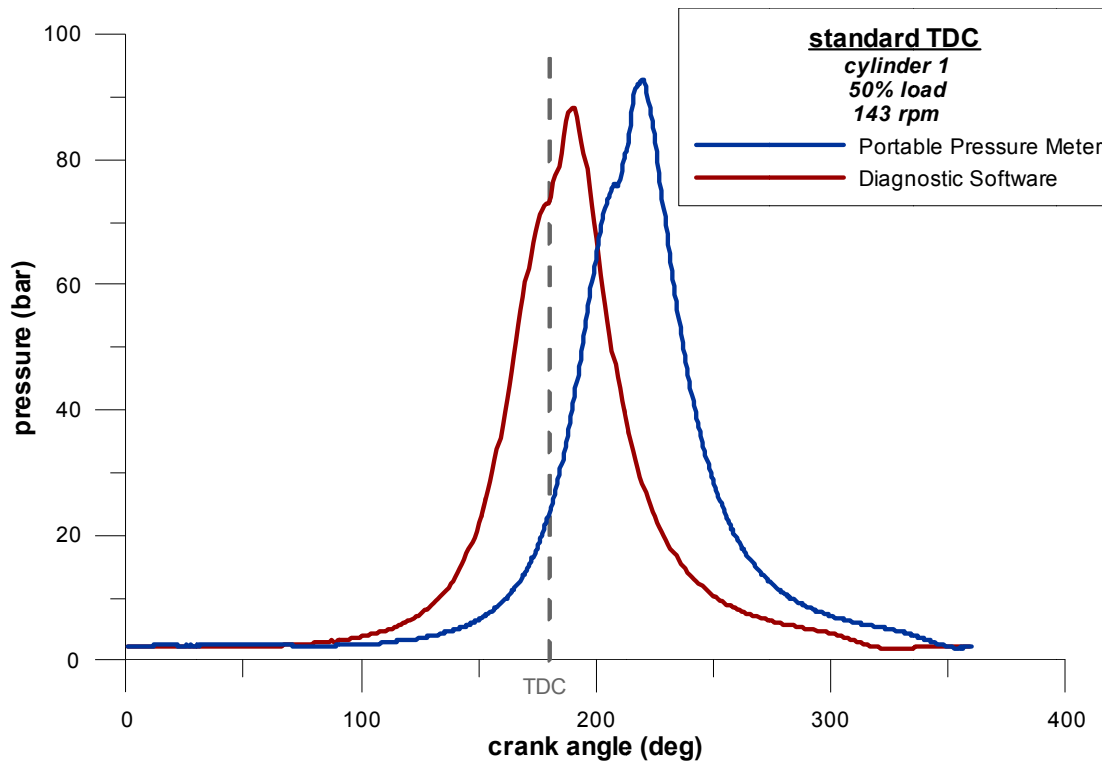
Πίνακας 7.1. Καταγραμμένα μεγέθη από τη φορητή μετρητική συσκευή στο 30% του φορτίου

	Cyl.1	Cyl.2	Cyl.3	Cyl.4	Cyl.5	Cyl.6	Cyl.7	Cyl.8	Cyl.9
Speed (rpm)	143	143	143	143	142	143	142	143	143
p_{av} (bar)	69,3	71,8	69,4	73,2	68,4	70,5	74	73,1	70,3
p_{max} (bar)	70,3	74	70,3	74,8	69,4	71,3	75,4	74	71,8
p_{min} (bar)	68,7	70,5	68,8	72,3	67,6	69,3	72,4	72,2	69,5
p_{sdev}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(dp/dca)_{max} (bar/°ca)	3,1	4,2	3,4	4,5	3,4	4,1	4,4	4,1	3,9

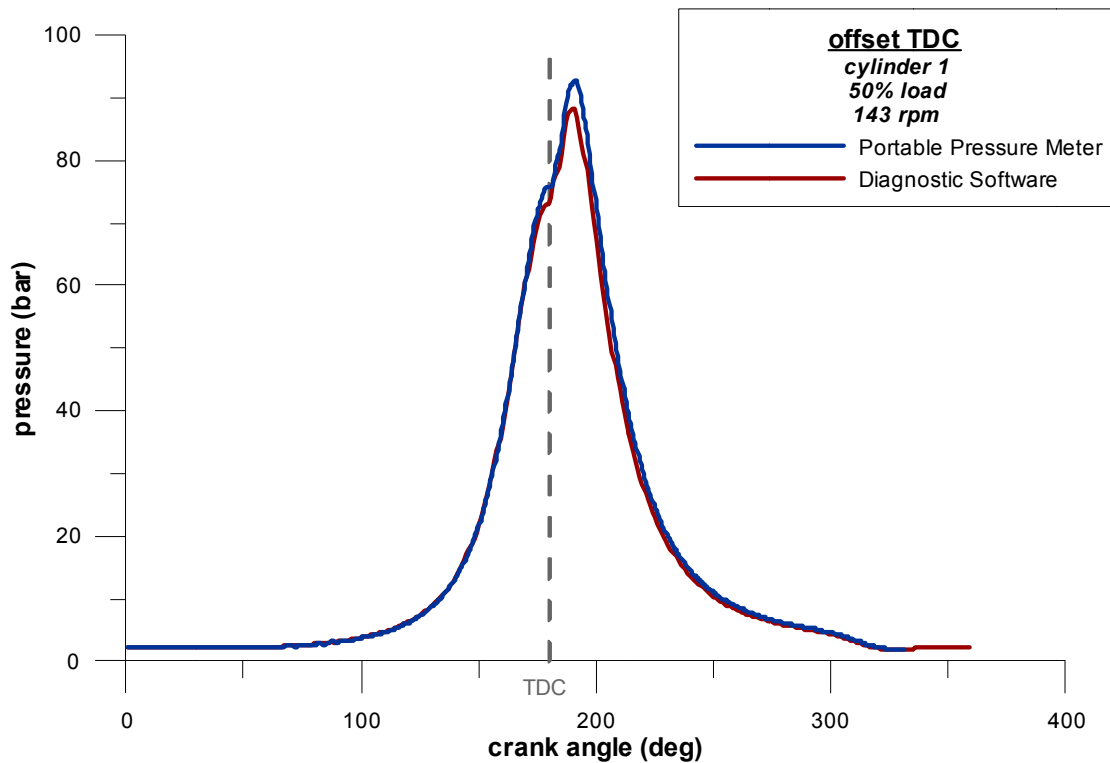
Ακολουθούν τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις που έγιναν στο 50% του φορτίου του κινητήρα.



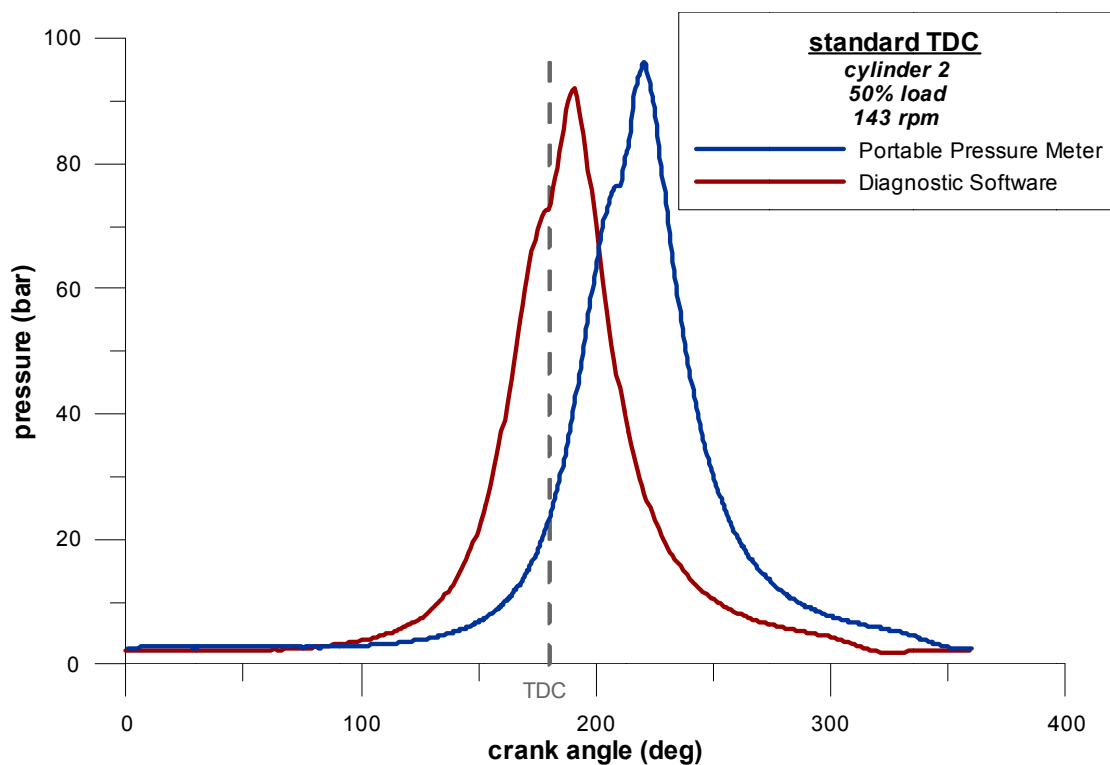
- Για σταθερό φορτίο στο 50%
 - Κύλινδρος 1



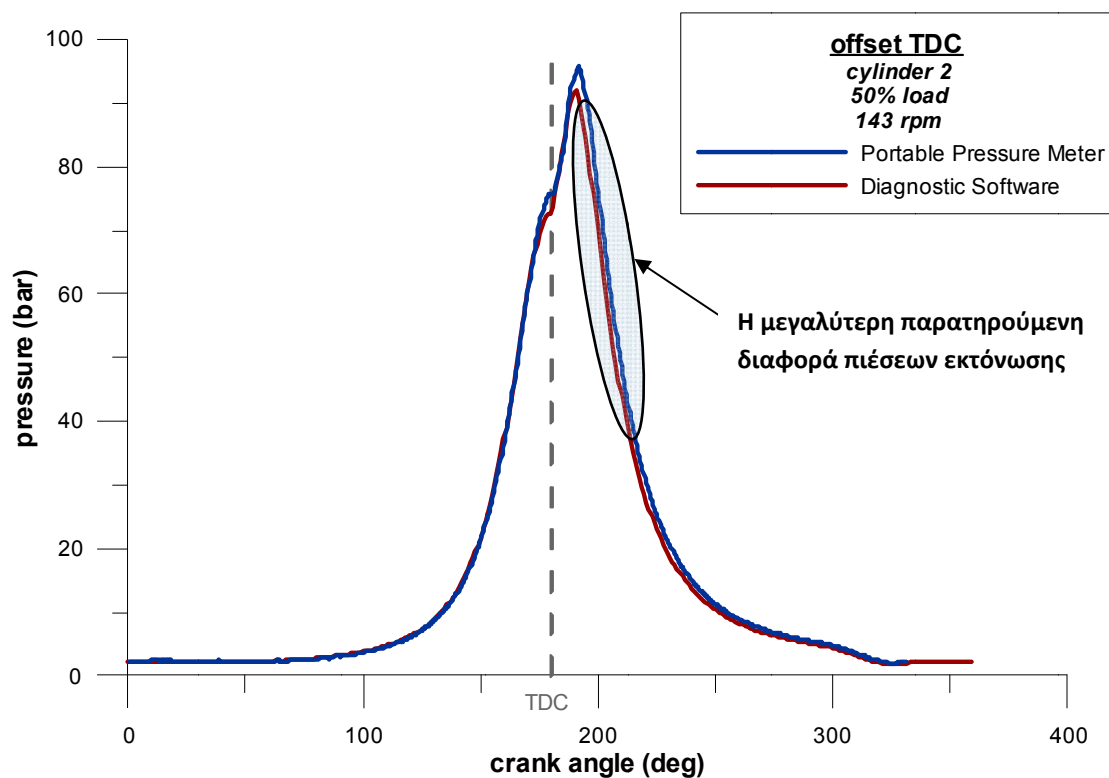
Σχήμα 7.25. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «1» σε πρωτογενή μορφή, στο 50% του φορτίου



Σχήμα 7.26. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «1», στο 50% του φορτίου
 – Κύλινδρος 2

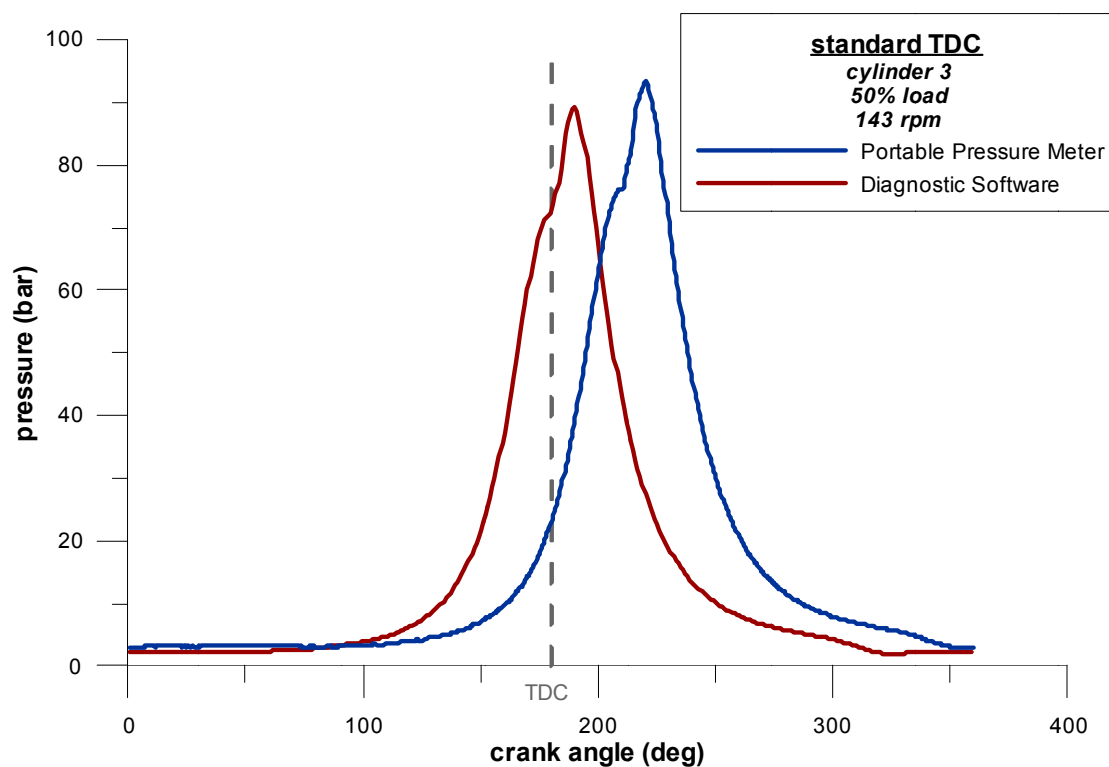


Σχήμα 7.27. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «2» σε πρωτογενή μορφή, στο 50% του φορτίου

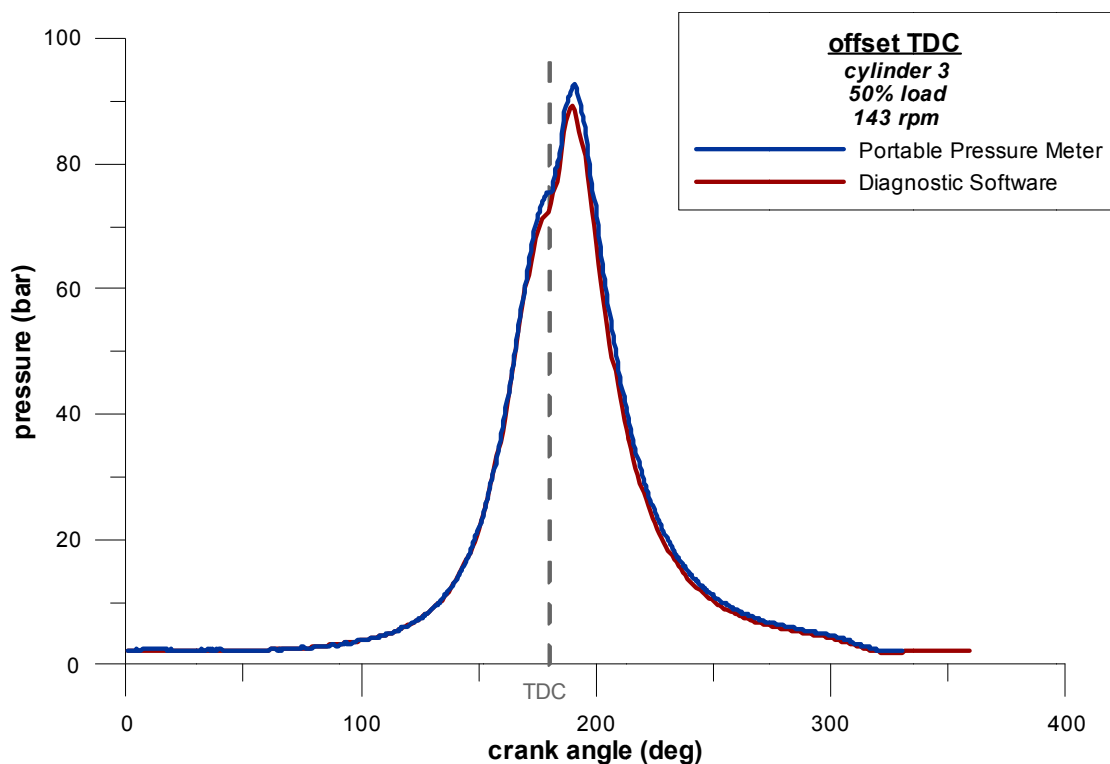


Σχήμα 7.28. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «2», στο 50% του φορτίου. Τονίζεται σχηματικά η μεγαλύτερη διαφορά πιέσεων εκτόνωσης που παρατηρείται για φορτίο 50%.

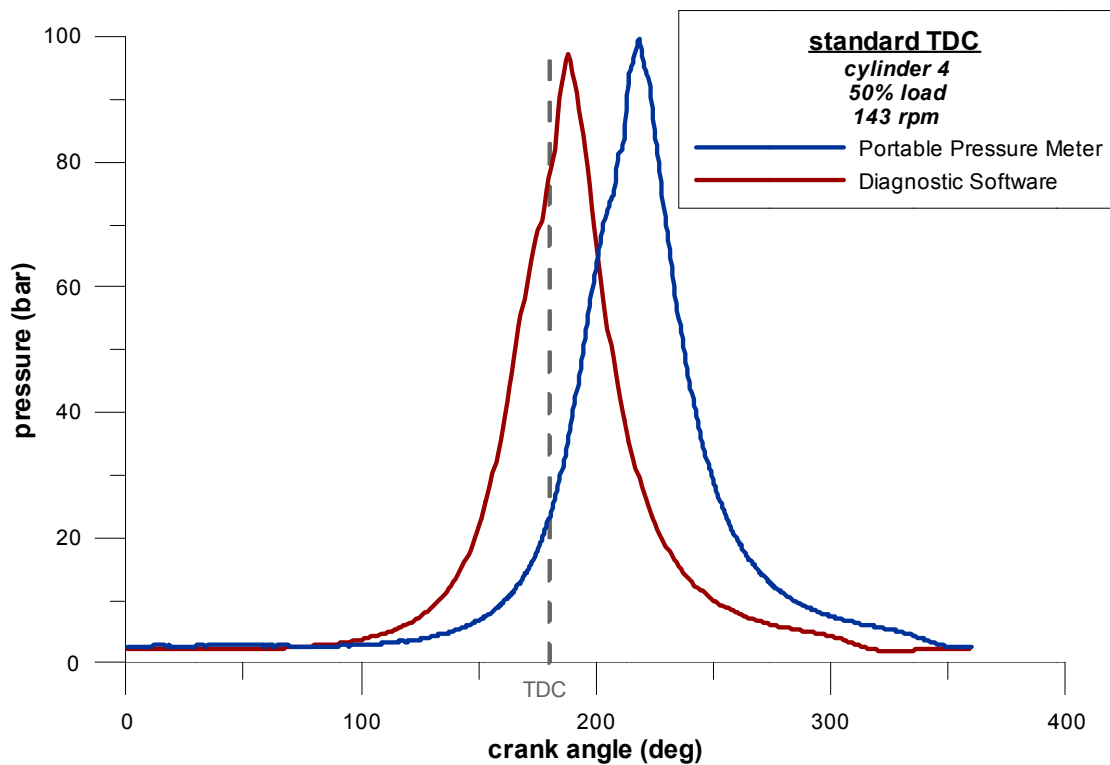
– Κύλινδρος 3



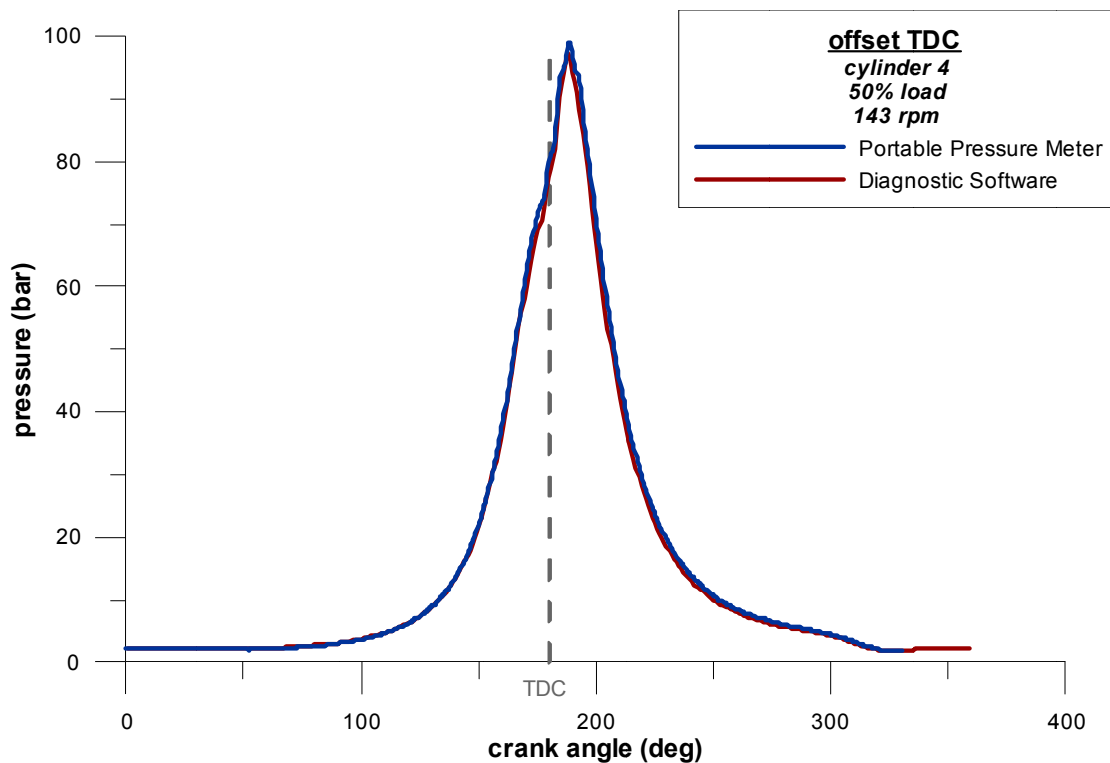
Σχήμα 7.29. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «3» σε πρωτογενή μορφή, στο 50% του φορτίου



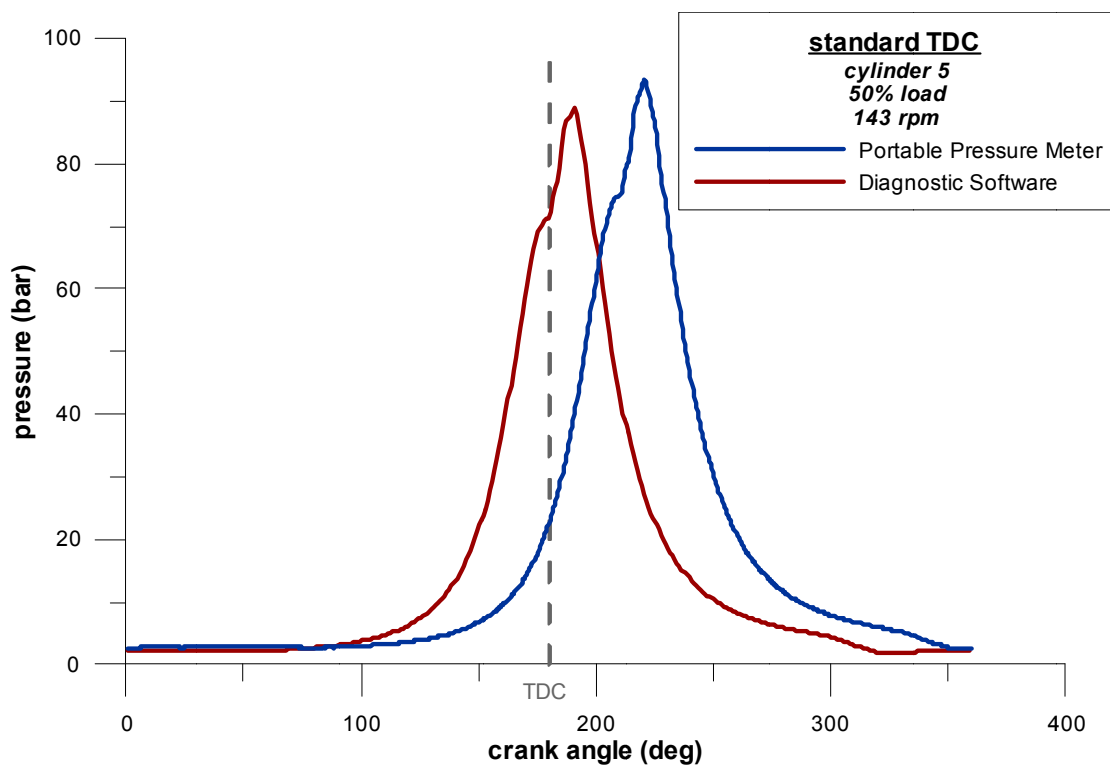
Σχήμα 7.30. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «3», στο 50% του φορτίου
 – Κύλινδρος 4



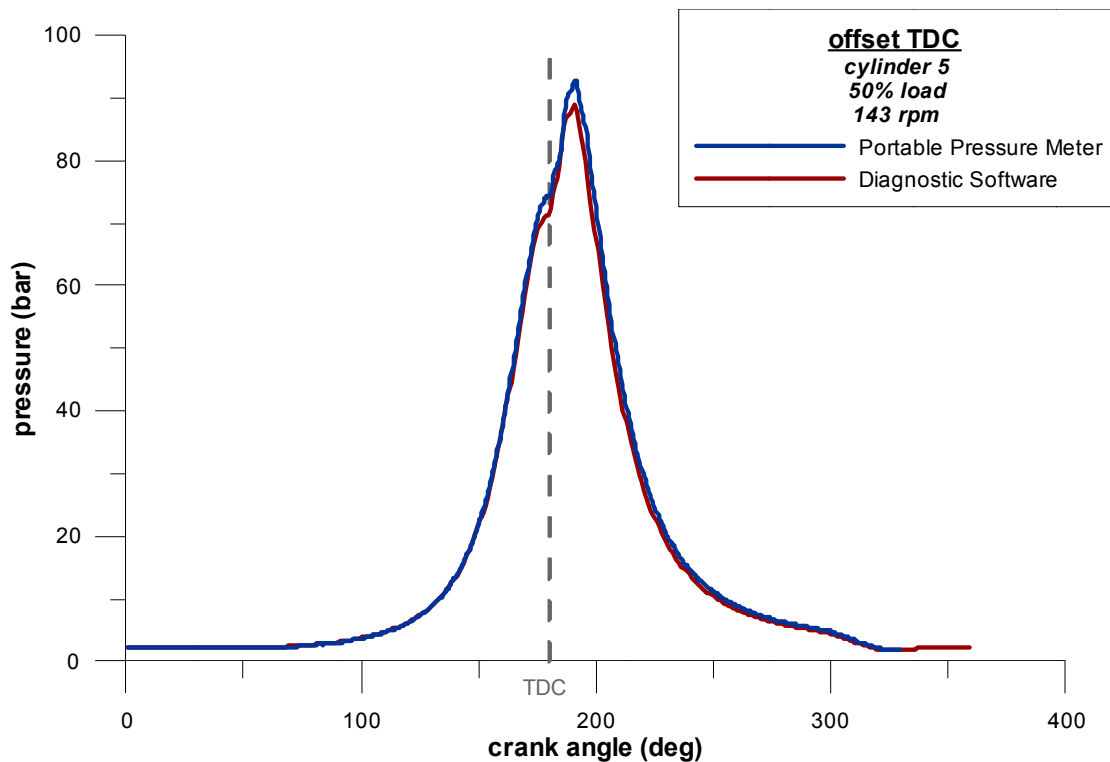
Σχήμα 7.31. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «4» σε πρωτογενή μορφή, στο 50% του φορτίου



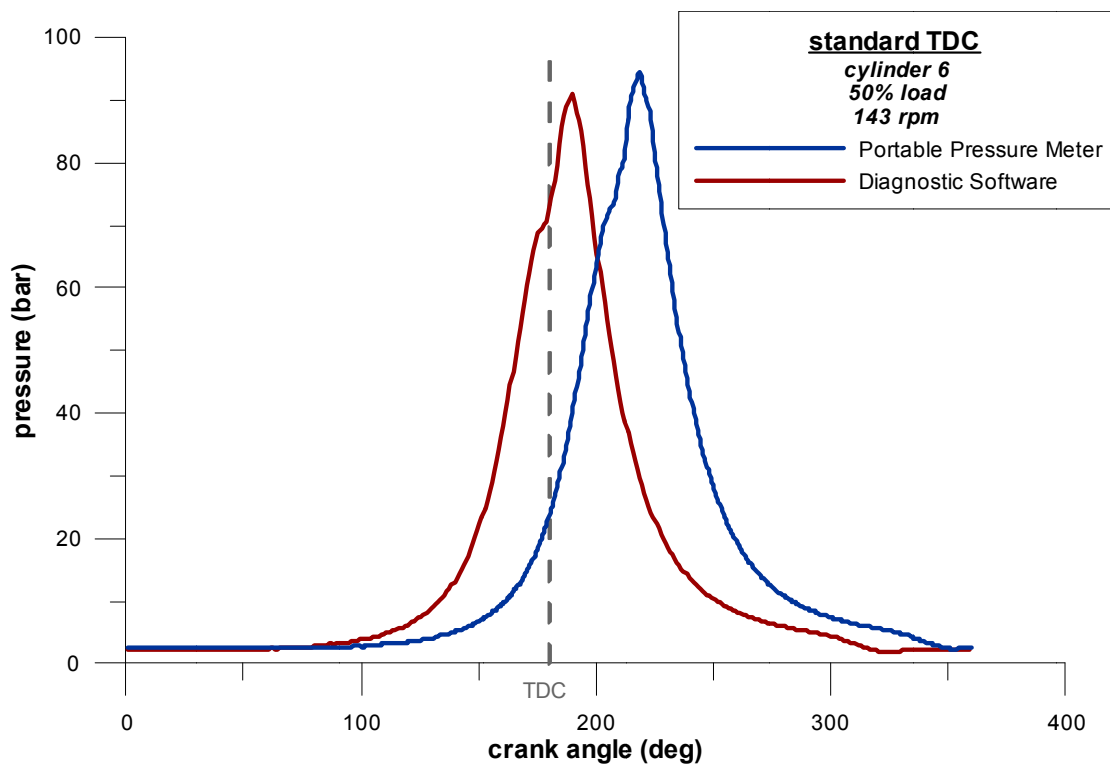
Σχήμα 7.32. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «4», στο 50% του φορτίου
 – Κύλινδρος 5



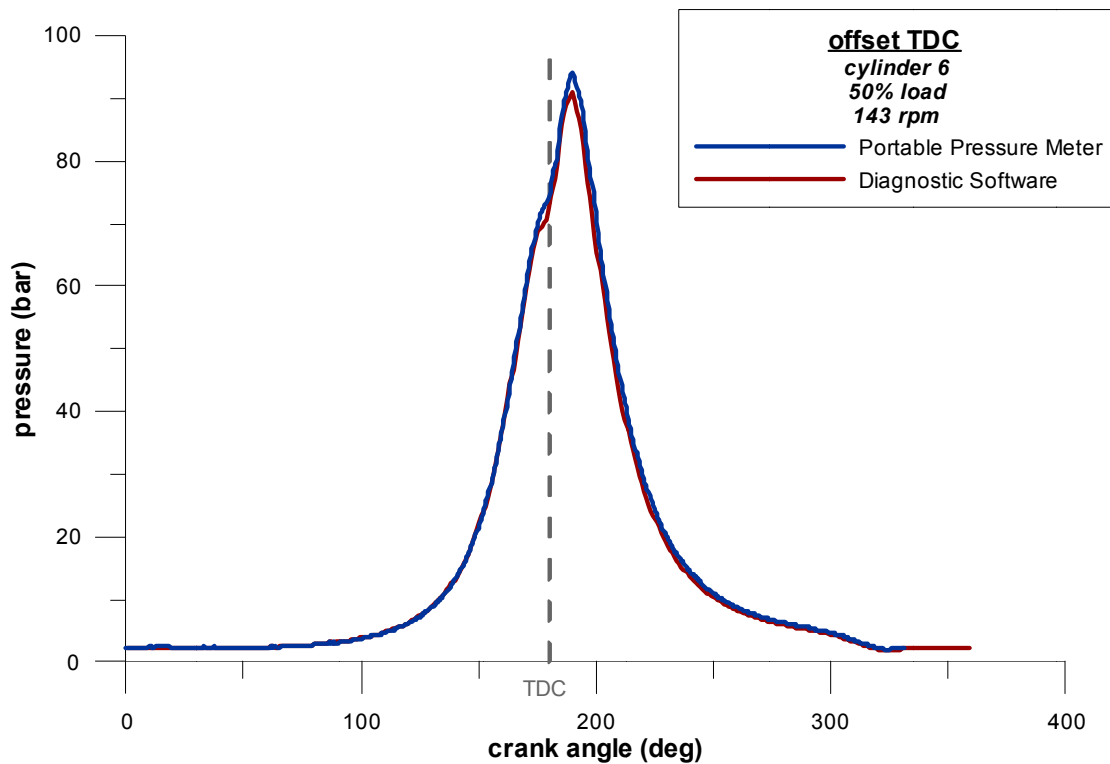
Σχήμα 7.33. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «5» σε πρωτογενή μορφή, στο 50% του φορτίου



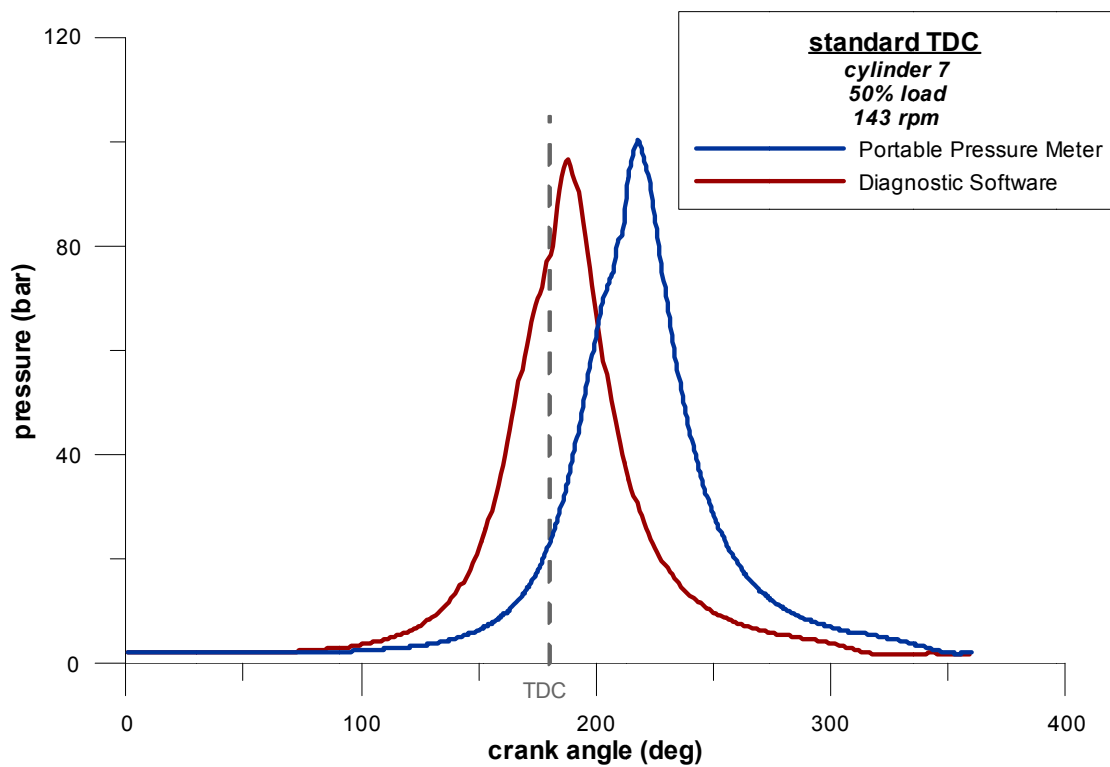
Σχήμα 7.34. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «5», στο 50% του φορτίου
 – Κύλινδρος 6



Σχήμα 7.35. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «6» σε πρωτογενή μορφή, στο 50% του φορτίου

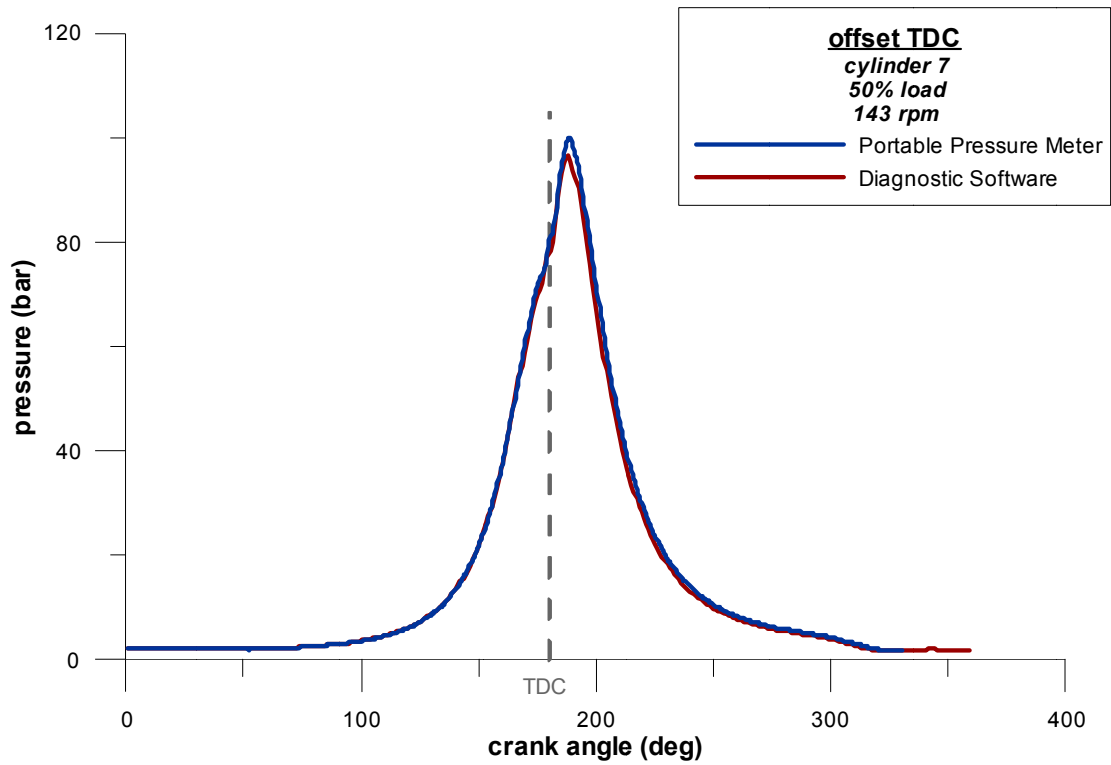


Σχήμα 7.36. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «6», στο 50% του φορτίου
 – Κύλινδρος 7

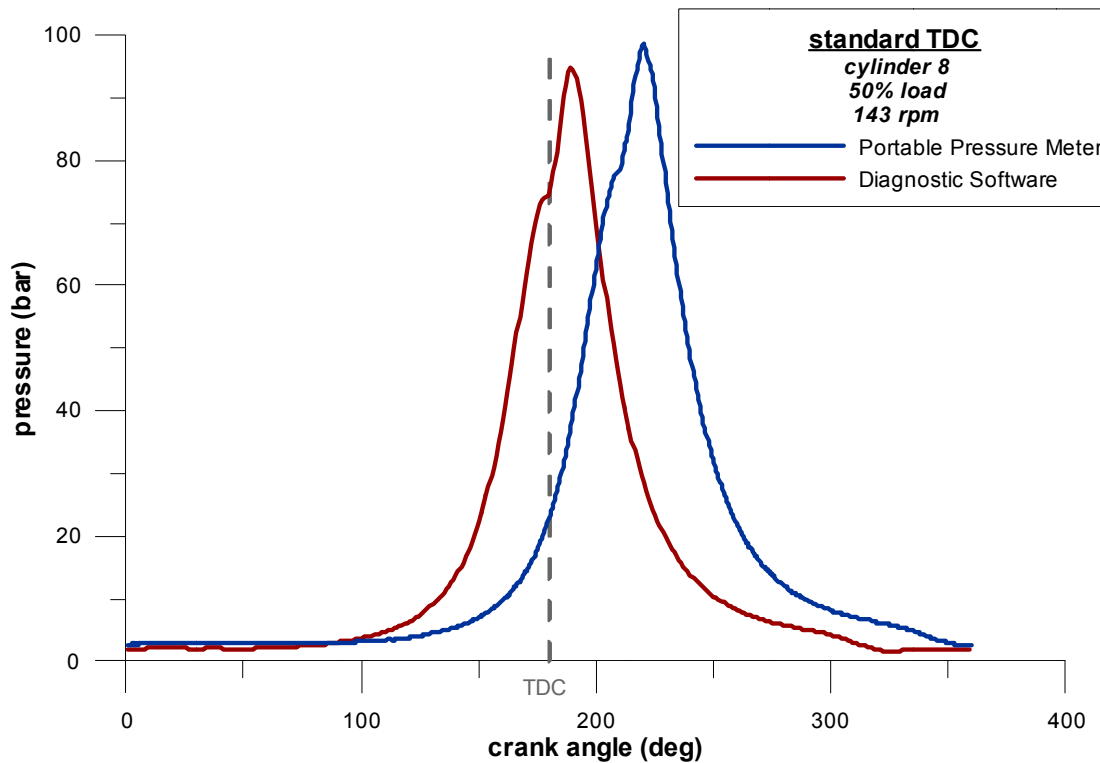




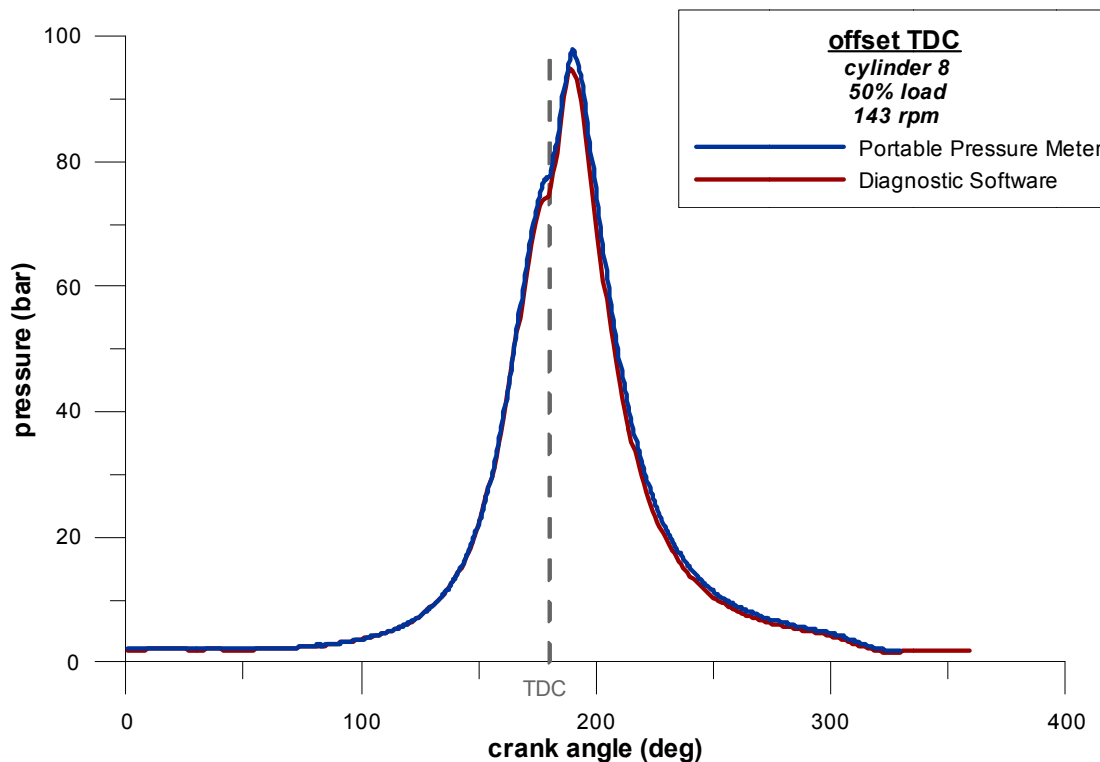
Σχήμα 7.37. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «7» σε πρωτογενή μορφή, στο 50% του φορτίου



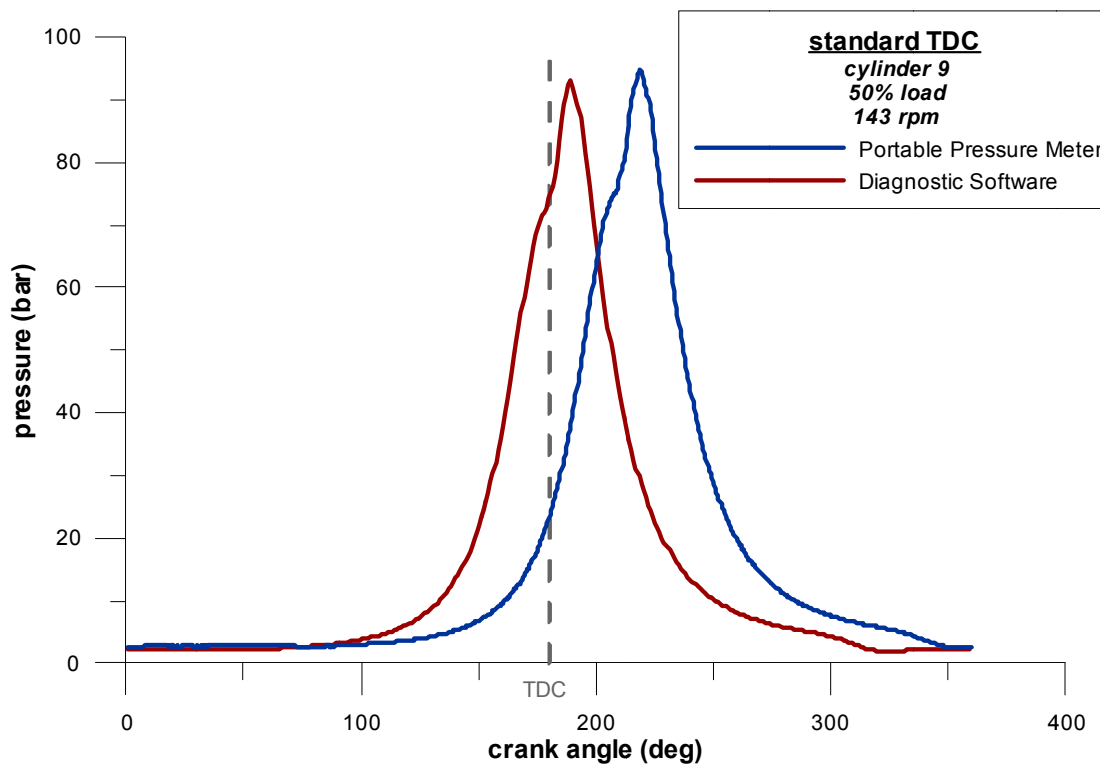
Σχήμα 7.38. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «7», στο 50% του φορτίου
– Κύλινδρος 8



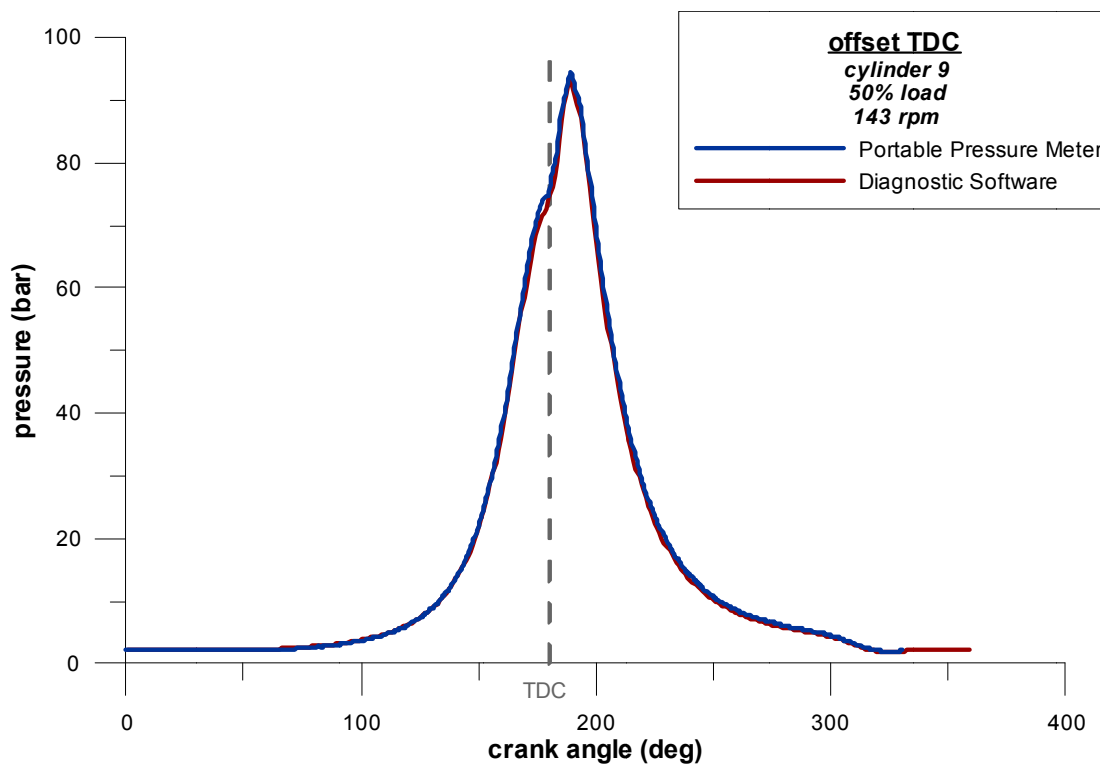
Σχήμα 7.39. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «8» σε πρωτογενή μορφή, στο 50% του φορτίου



Σχήμα 7.40. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «8», στο 50% του φορτίου
 – Κύλινδρος 9



Σχήμα 7.41. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «9» σε πρωτογενή μορφή, στο 50% του φορτίου



Σχήμα 7.42. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «9» , στο 50% του φορτίου

Συμπεράσματα



Η ταύτιση των διαγραμμάτων, μετά από τις κατάλληλες μετακινήσεις των καμπύλων που προκύπτουν από τα δεδομένα του φορητού μετρητικού οργάνου, είναι ικανοποιητική. Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στην μέγιστη πίεση καύσης είναι και σε αυτή την περίπτωση μικρές, της τάξης των 1 έως 5 bar. Οι διαφορές αυτές είναι αποδεκτές και οφείλονται κατά κύριο λόγο στη χρήση διαφορετικών αισθητήρων κατά τη μετρητική διαδικασία. Πιθανές είναι ακόμα διακυμάνσεις μικρής κλίμακας στην πίεση ενός κυλίνδρου, μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων.

Εκτός από τις πιέσεις σε 720 ισαπέχοντα χρονικά σημεία, η μετρητική συσκευή κατέγραψε για το 50% του φορτίου και τα εξής μεγέθη:

Πίνακας 7.2. Καταγεγραμμένα μεγέθη από τη φορητή μετρητική συσκευή στο 50% του φορτίου

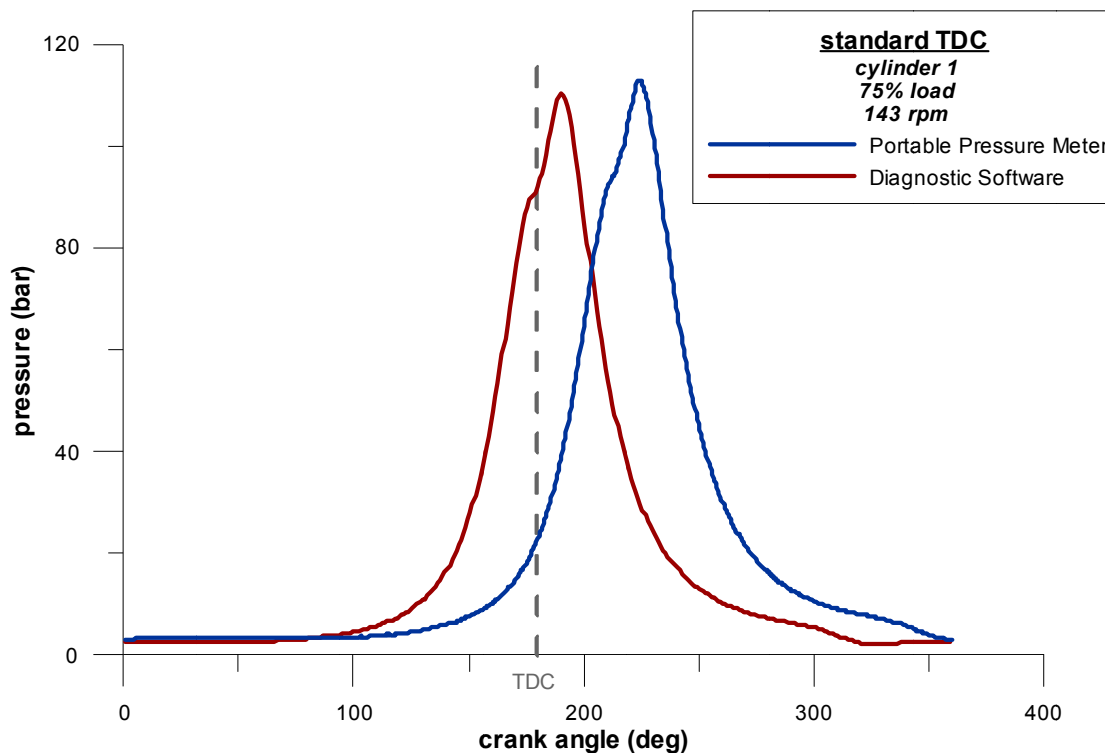
	Cyl.1	Cyl.2	Cyl.3	Cyl.4	Cyl.5	Cyl.6	Cyl.7	Cyl.8	Cyl.9
Speed (rpm)	143	143	143	143	143	143	143	143	143
p_{av} (bar)	91	93,8	90,8	97,3	91,1	92,4	98,4	96,1	92,5
p_{max} (bar)	93,3	95,1	92,1	99,2	93,3	94,1	100,5	98,1	94,3
p_{min} (bar)	89,5	92	89,2	95,6	89,3	90,1	96,2	94	90,9
p_{sdev}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$(dp/dca)_{max}$ (bar/°ca)	3,6	3,7	3,6	4,9	3,7	3,9	4,5	3,6	3,7

Ακολουθούν τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις που έγιναν στο 75% του φορτίου του κινητήρα.

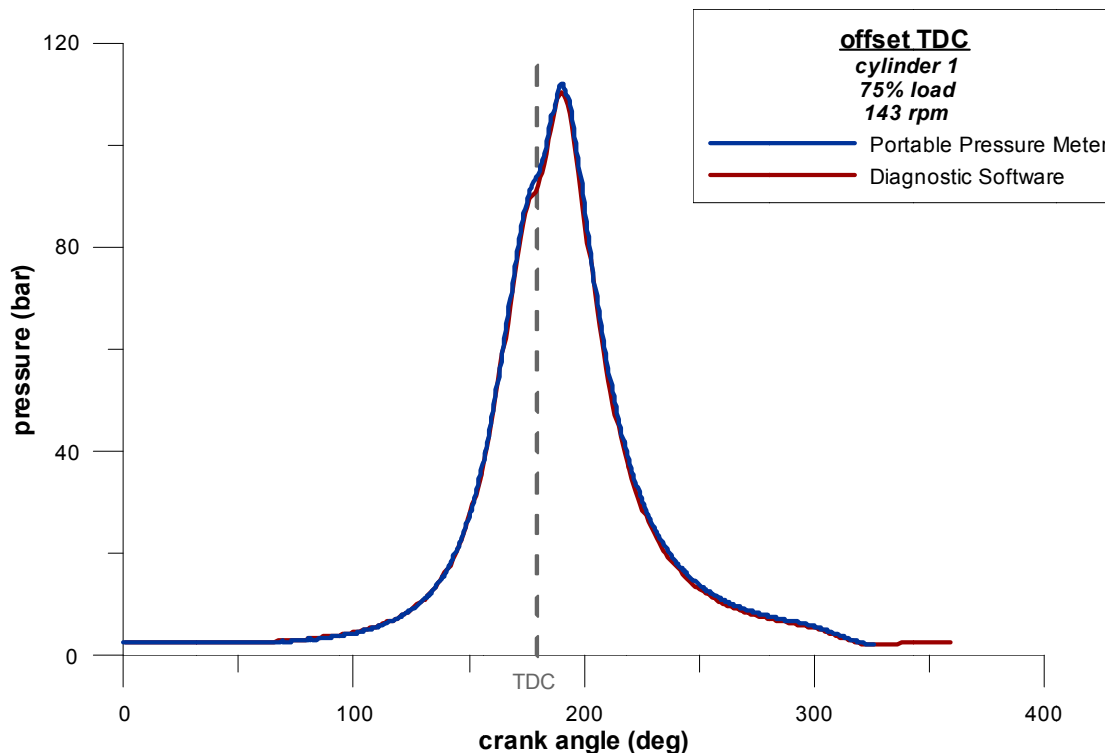
➤ **Για σταθερό φορτίο στο 75%**



– Κύλινδρος 1

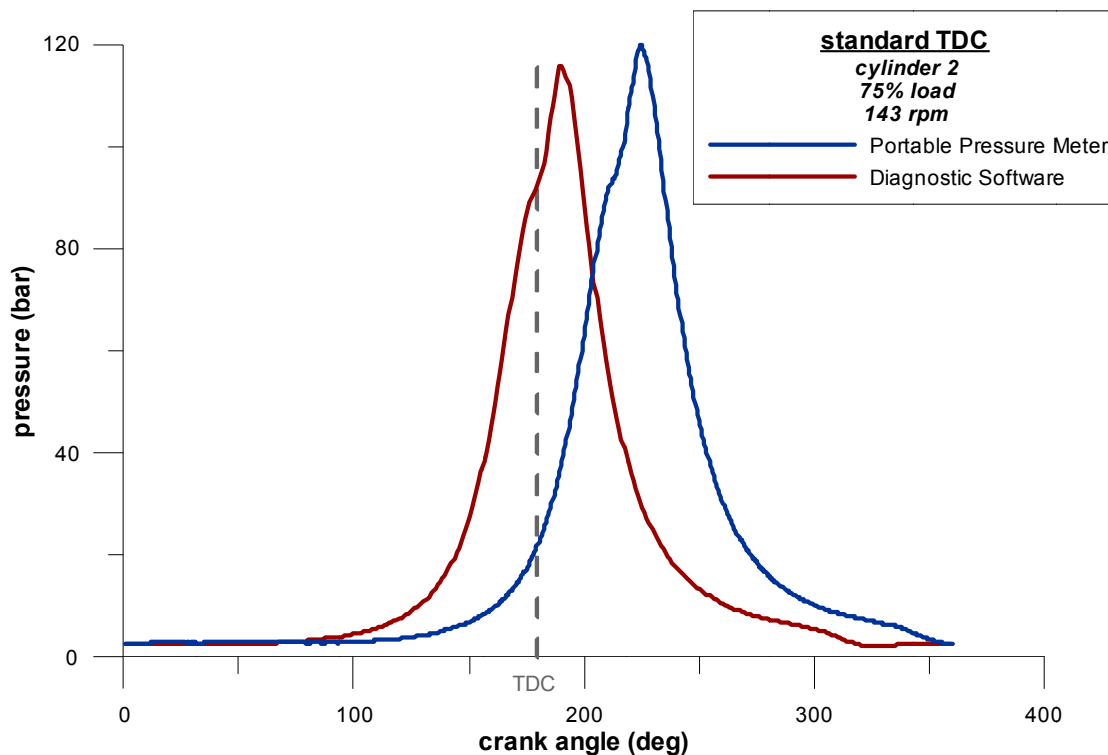


Σχήμα 7.43. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «1» σε πρωτογενή μορφή, στο 75% του φορτίου

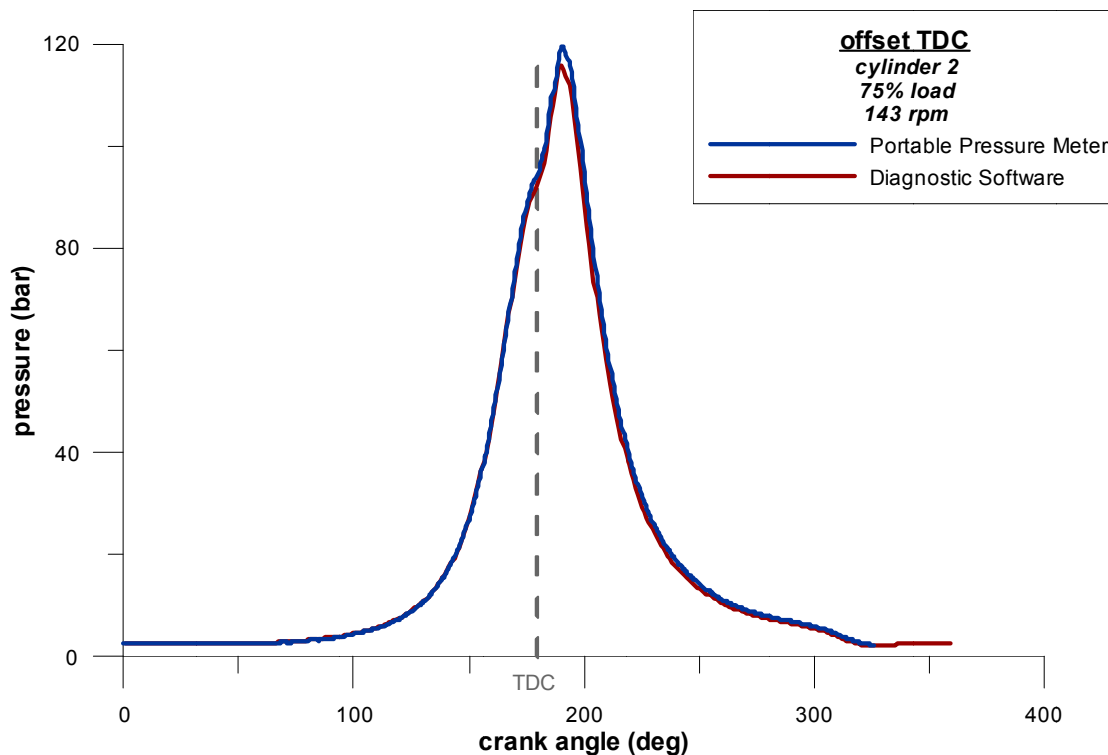


Σχήμα 7.44. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «1», στο 75% του φορτίου

– Κύλινδρος 2

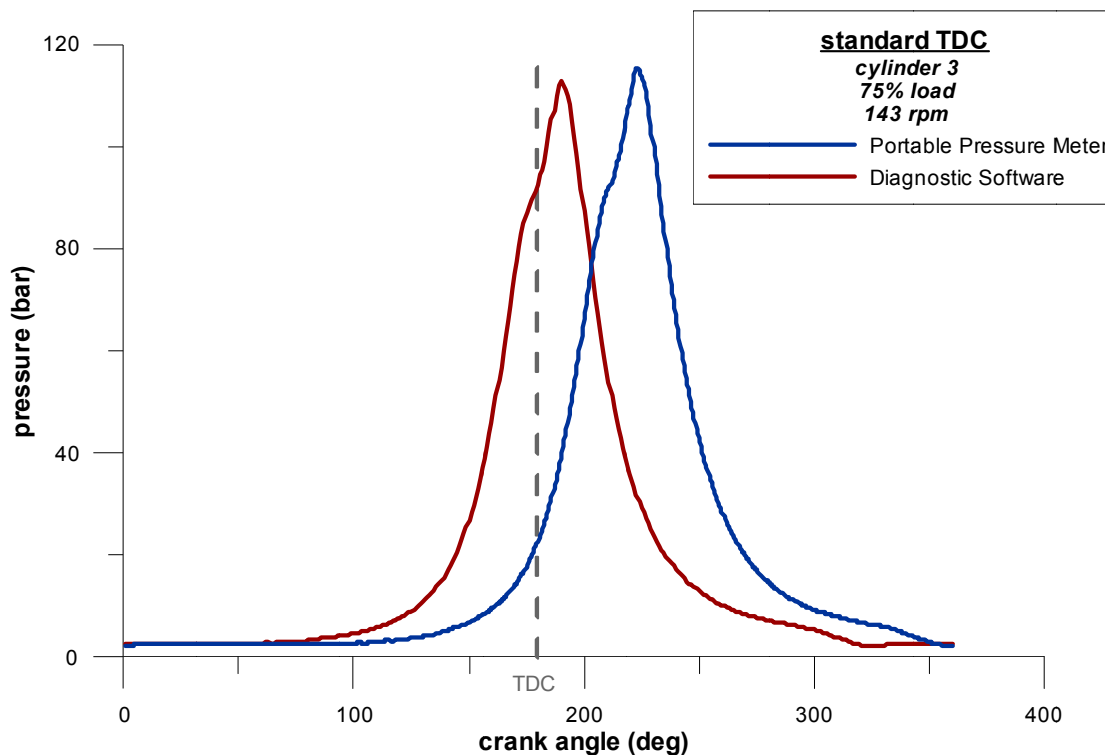


Σχήμα 7.45. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «2» σε πρωτογενή μορφή, στο 75% του φορτίου

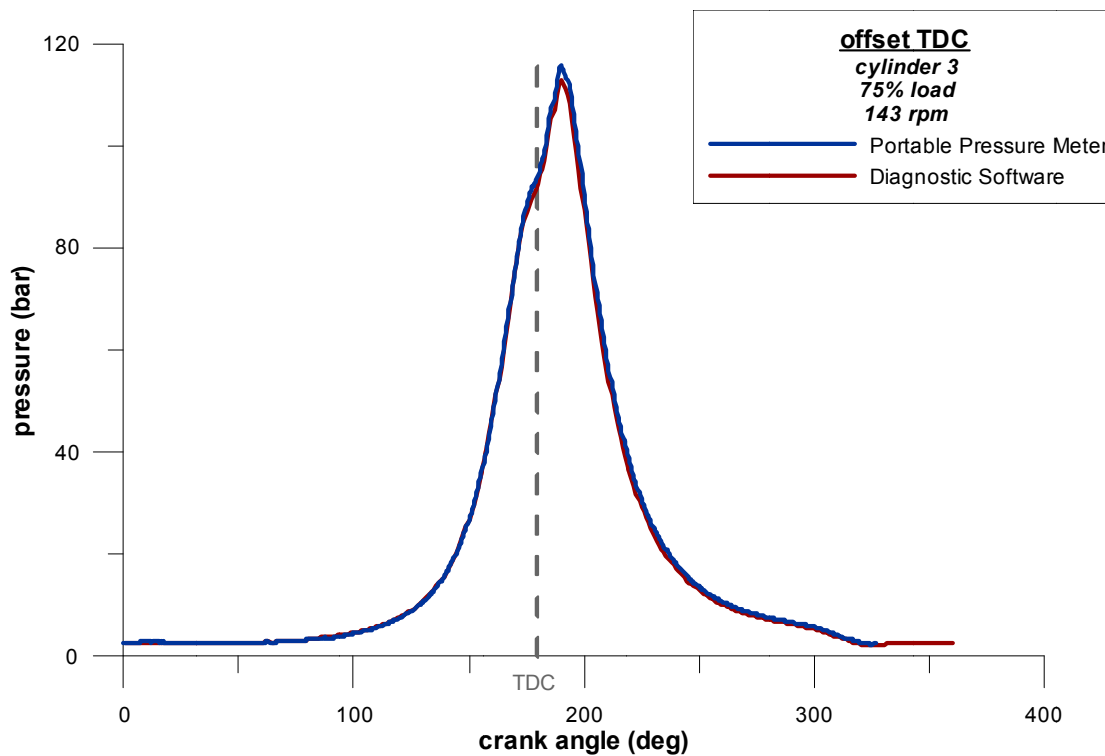


Σχήμα 7.46. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «2», στο 75% του φορτίου

– Κύλινδρος 3

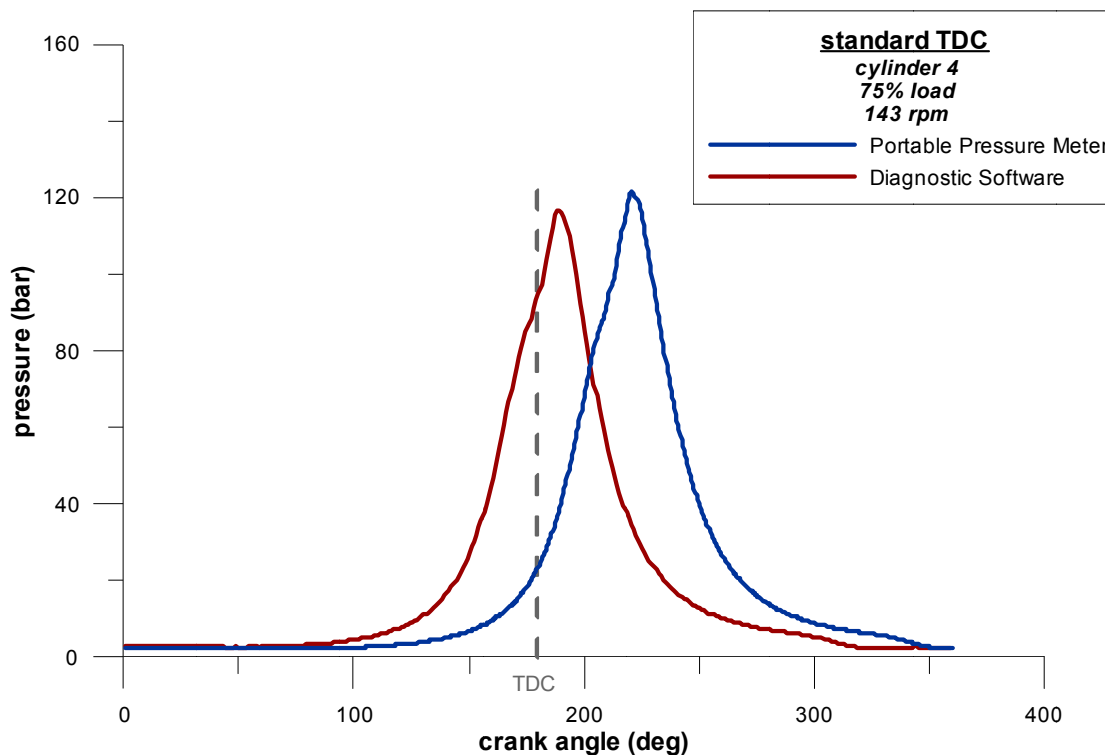


Σχήμα 7.47. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «3» σε πρωτογενή μορφή, στο 75% του φορτίου

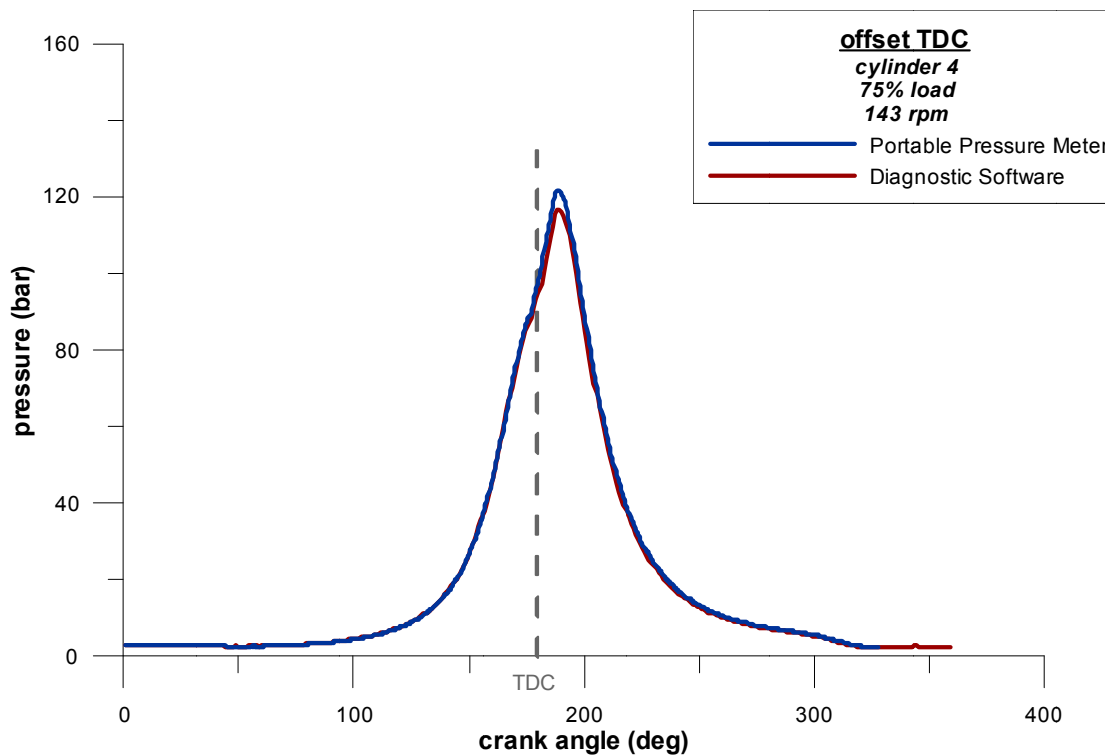


Σχήμα 7.48. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «3», στο 75% του φορτίου

– Κύλινδρος 4

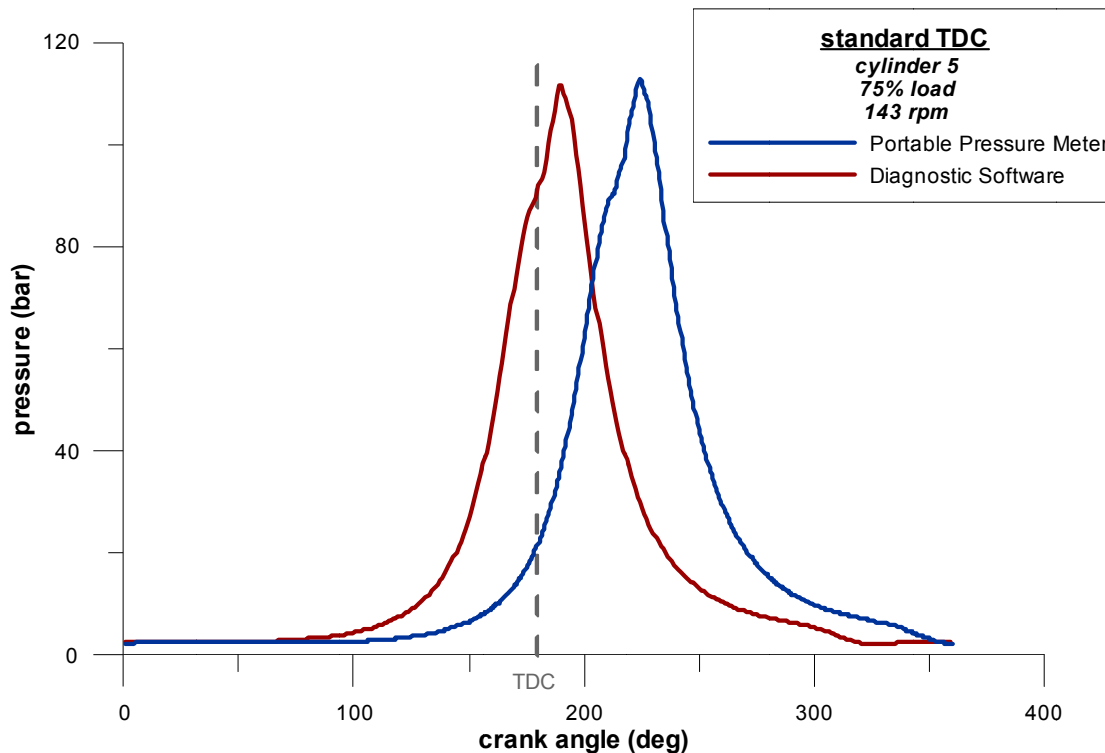


Σχήμα 7.49. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «4» σε πρωτογενή μορφή, στο 75% του φορτίου

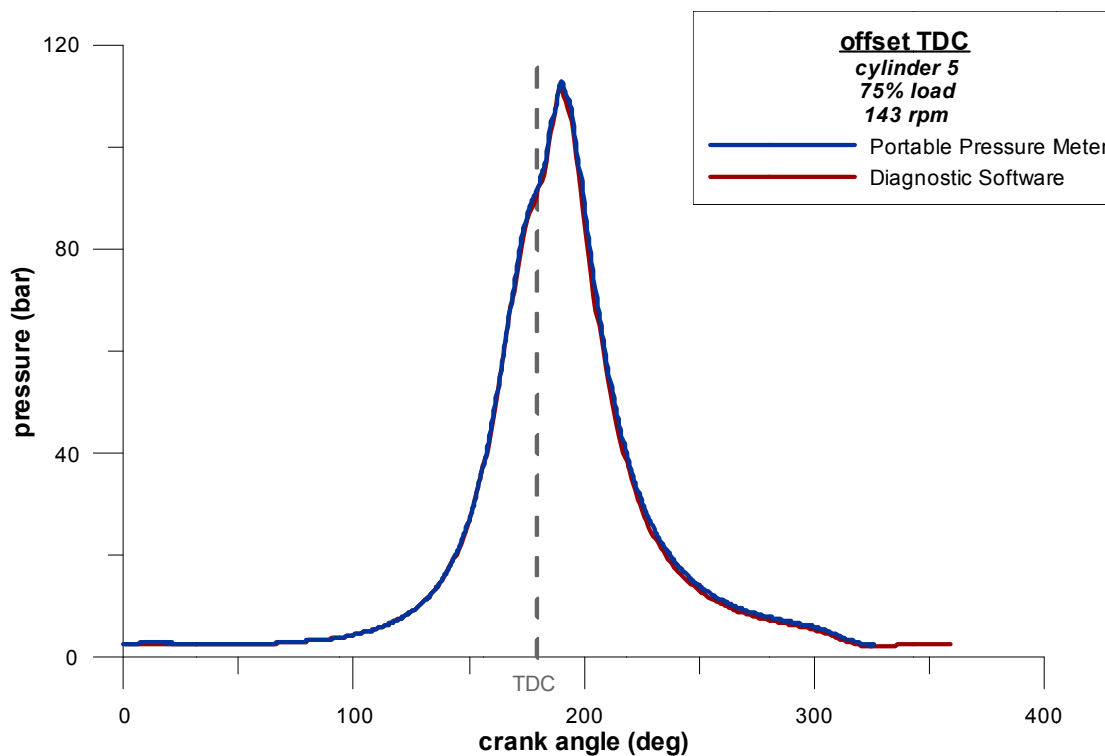


Σχήμα 7.50. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «4», στο 75% του φορτίου

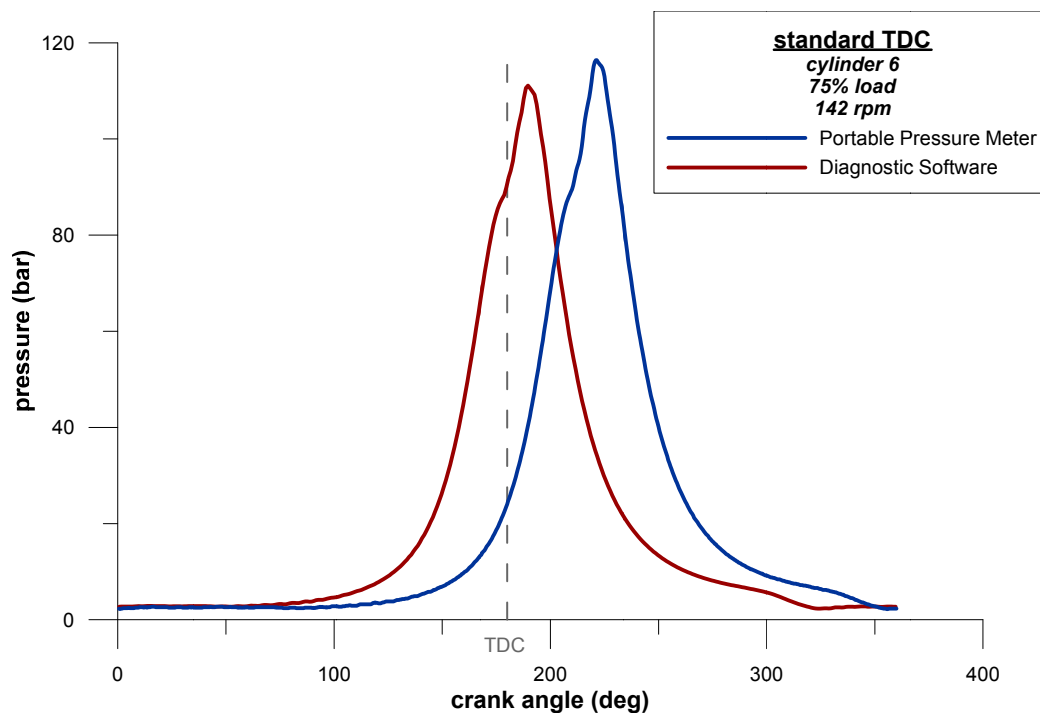
– Κύλινδρος 5



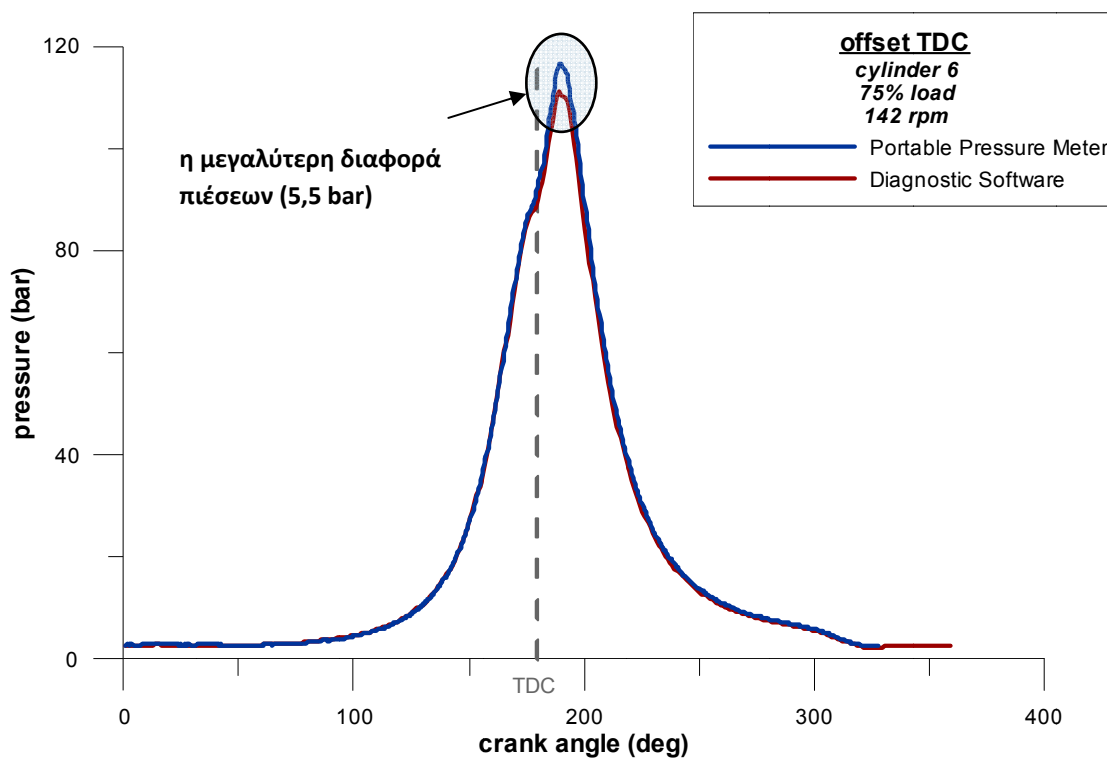
Σχήμα 7.51. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «5» σε πρωτογενή μορφή, στο 75% του φορτίου



Σχήμα 7.52. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «5», στο 75% του φορτίου
 – Κύλινδρος 6

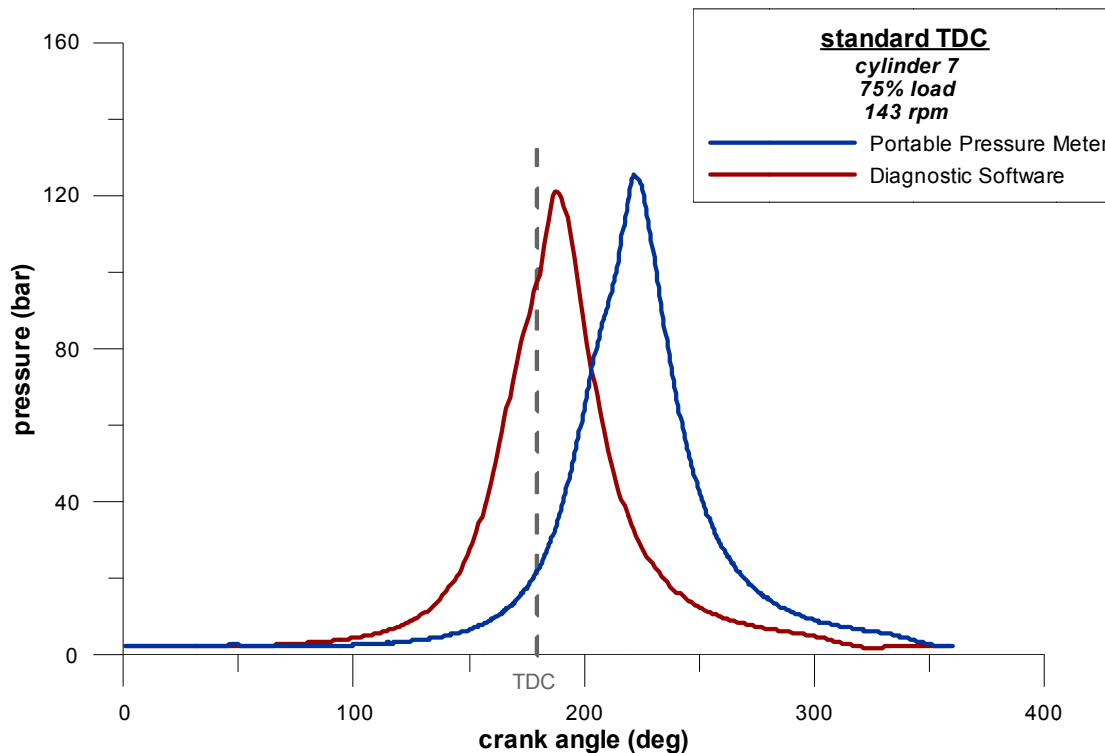


Σχήμα 7.53. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «6» σε πρωτογενή μορφή, στο 75% του φορτίου

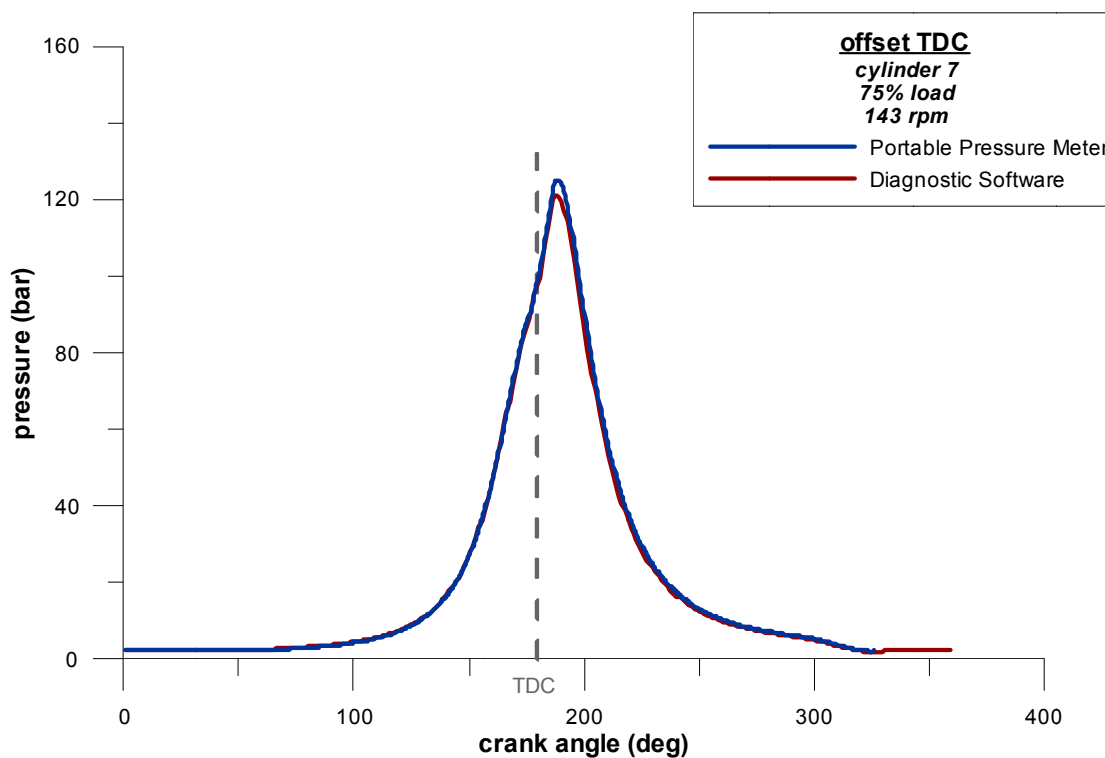


Σχήμα 7.54. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «6», στο 75% του φορτίου. Εδώ εμφανίζεται η μεγαλύτερη διαφορά πιέσεων για αυτό το φορτίο (αγγίζει τα 5,5bar).

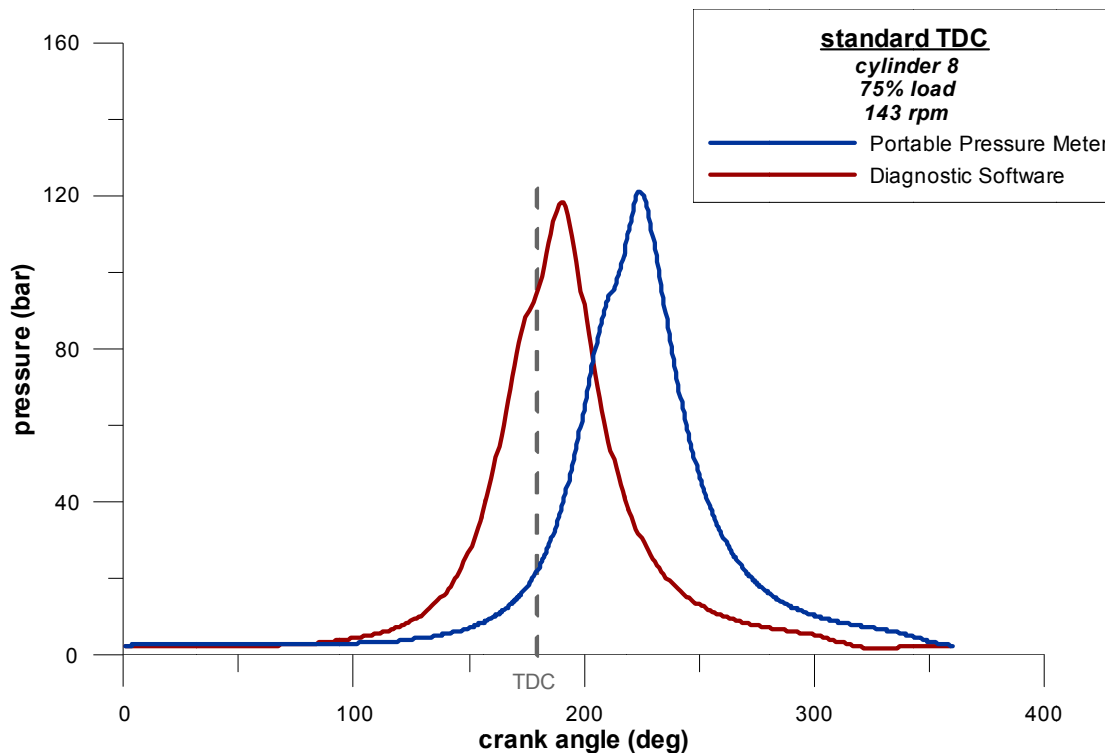
– Κύλινδρος 7



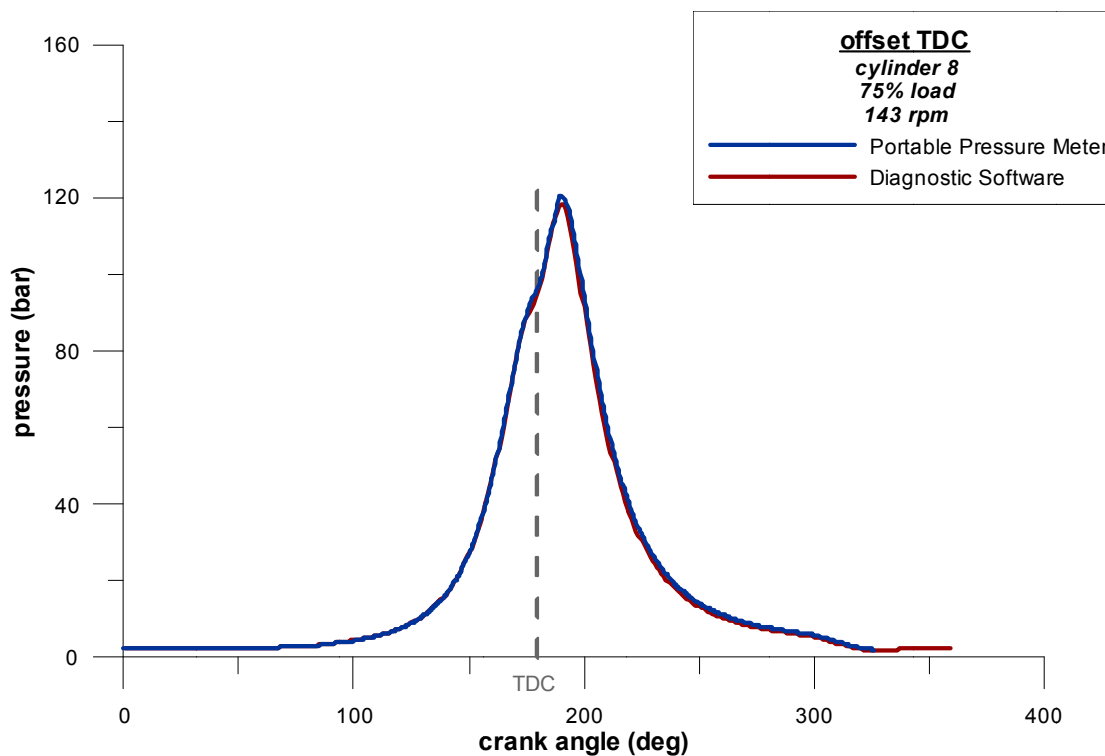
Σχήμα 7.55. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «7» σε πρωτογενή μορφή, στο 75% του φορτίου



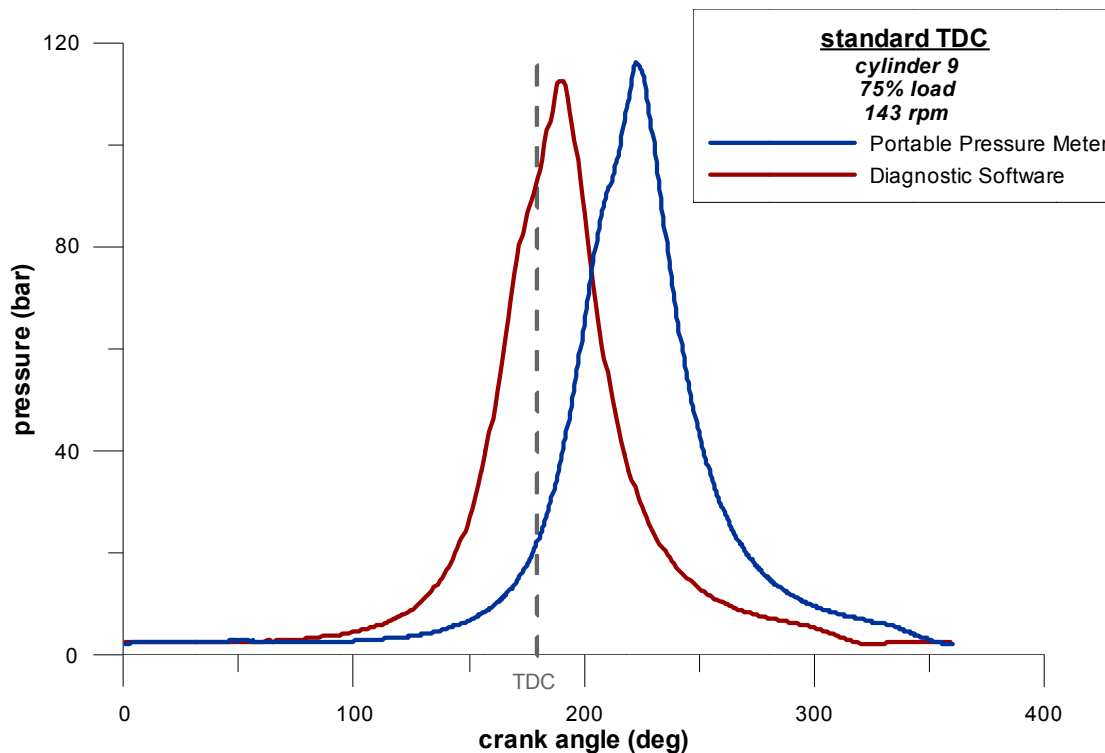
Σχήμα 7.56. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «7», στο 75% του φορτίου
 – Κύλινδρος 8



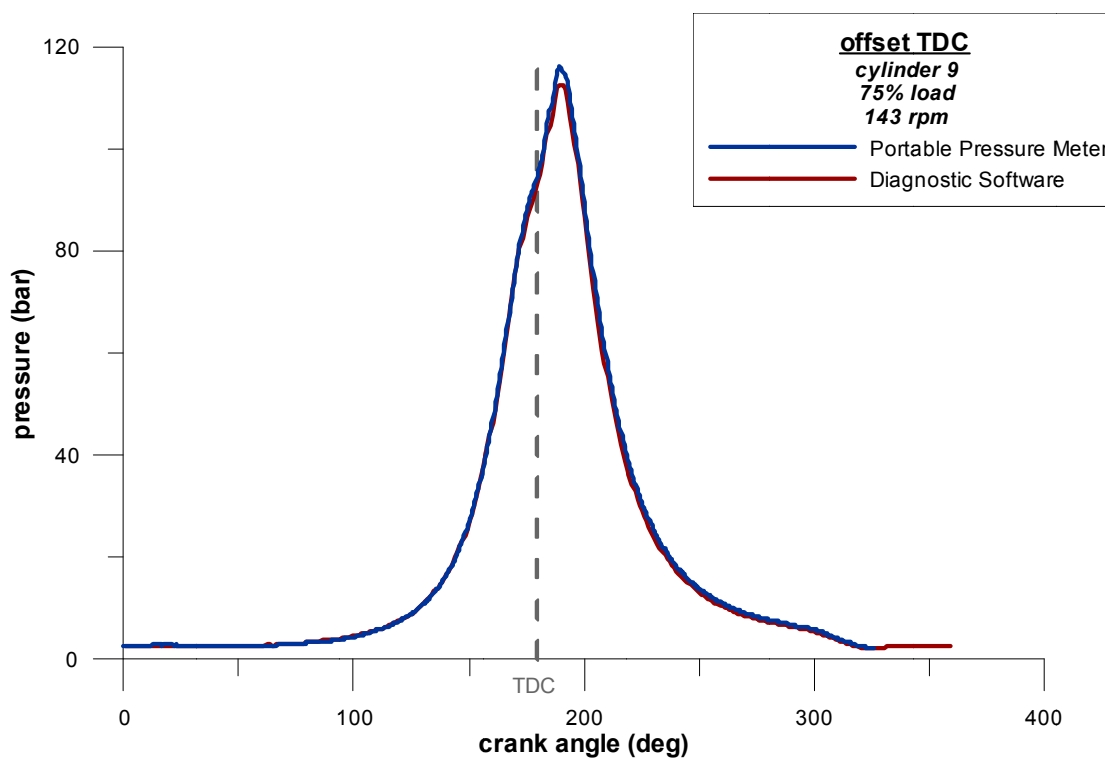
Σχήμα 7.57. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «8» σε πρωτογενή μορφή, στο 75% του φορτίου



Σχήμα 7.58. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «8», στο 75% του φορτίου
 – Κύλινδρος 9



Σχήμα 7.59. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «9» σε πρωτογενή μορφή, στο 75% του φορτίου



Σχήμα 7.60. Ταυτισμένα δυναμοδεικτικά διαγράμματα κυλίνδρου «9», στο 75% του φορτίου
Συμπεράσματα



Τα διαγράμματα, όπως και στα φορτία 30% και 50%, παρουσιάζουν ιδιαίτερα ικανοποιητική ταύτιση, μετά από τις κατάλληλες μετακινήσεις των καμπύλων που προκύπτουν από τις καταγεγραμμένες πιέσεις του φορητού μετρητικού οργάνου. Οι μικρές υπερεκτιμήσεις που παρατηρούνται στην πίεση κρίνονται και εδώ αποδεκτές, καθώς οι αιτίες που τις προκαλούν δεν προέρχονται προφανώς από την συσκευή που αξιολογείται.

Εκτός από τις πιέσεις σε 720 ισαπέχοντα χρονικά σημεία, η μετρητική συσκευή κατέγραψε για το 75% του φορτίου και τα εξής μεγέθη:

Πίνακας 7.3. Καταγραμμένα μεγέθη από τη φορητή μετρητική συσκευή στο 75% του φορτίου

	Cyl.1	Cyl.2	Cyl.3	Cyl.4	Cyl.5	Cyl.6	Cyl.7	Cyl.8	Cyl.9
Speed (rpm)	143	143	143	143	143	142	143	143	143
p_{av} (bar)	110,4	117,6	113,8	120,2	111	124,8	123,3	118,8	114
p_{max} (bar)	112,3	119,9	115,3	122,6	113,9	116,9	125,6	122,8	115,6
p_{min} (bar)	108,4	115,7	112,1	118,2	108,7	112,9	121,1	116,1	112,3
p_{sdev}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(dp/dca)_{max} (bar/°ca)	3,2	3,9	3,4	4,2	3,4	3,9	4,4	3,6	3,6

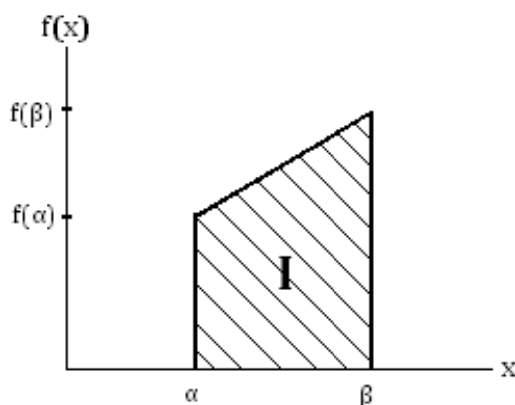
7.3.2 Σύγκριση δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων p – V και τιμών ισχύος



Παρουσιάζονται στη συνέχεια τα συγκριτικά διαγράμματα πίεσης – όγκου για κάθε φορτίο και κάθε κύλινδρο που λήφθηκαν μετρήσεις. Εξετάζεται η ταύτιση των καμπυλών τόσο οπτικά όσο και αριθμητικά. Για το σκοπό αυτό έγινε υπολογισμός του εμβαδού κάθε καμπύλης (ισοδυναμεί με το ενδεικνύμενο έργο) προβαίνοντας σε αριθμητική ολοκλήρωση με τη μέθοδο του τραπεζίου (περιγράφεται στη συνέχεια). Η συγκεκριμένη μέθοδος αποδεικνύεται ακριβής χάρη στο μεγάλο πλήθος σημείων (V , p) που χρησιμοποιούνται, οπότε το πιθανό σφάλμα στους υπολογισμούς καθίσταται ασήμαντο. Έπειτα, γίνεται υπολογισμός της ενδεικνύμενης ισχύος για κάθε φορτίο. Στον πίνακα που ακολουθεί το διάγραμμα κάθε κυλίνδρου παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για την ισχύ σε κάθε περίπτωση. Στο κελί «Διαγνωστικό Λογισμικό» αντιστοιχεί η ισχύς που έχει υπολογιστεί, με δεδομένα την πίεση ανά μοίρα γωνίας στροφάλου, από το διαγνωστικό σύστημα που καθορίστηκε, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, ως πρότυπο. Όμοια, στο κελί «Φορητή Μετρητική Συσκευή» αντιστοιχεί η ισχύς που έχει υπολογιστεί, επίσης στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, με δεδομένα την πίεση ανά μισή μοίρα γωνίας στροφάλου από το όργανο μέτρησης πίεσης καύσης που αξιολογείται.

Περιγράφεται στο σημείο αυτό η αριθμητική τεχνική εμβαδομέτρησης με τη μέθοδο του τραπεζίου.

→ Έστω ότι θέλουμε να μετρήσουμε το εμβαδό που περικλείεται μεταξύ του οριζόντιου άξονα και μια καμπύλης που περνά από τα σημεία (α , $f(\alpha)$) και (β , $f(\beta)$). Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην παραδοχή ότι το εμβαδό αυτό ισούται με το εμβαδό του χωρίου I , όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Το εμβαδό του χωρίου I δίνεται από τον τύπο:
$$I = (\beta - \alpha) \frac{f(\alpha) + f(\beta)}{2}$$

Όταν η καμπύλη που αναφέρεται παραπάνω χωριστεί σε ένα μεγάλο πλήθος σημείων (x , $f(x)$), τότε το σφάλμα της συγκεκριμένης μεθόδου ελαχιστοποιείται. Στην προκειμένη περίπτωση, τα 720 σημεία που αποτελούν την καμπύλη $p - V$, καθιστούν το σφάλμα αμελητέο.

Από την προηγούμενη παράγραφο, κάνοντας τις ανάλογες παραδοχές, έχει αντιστοιχηθεί ή καθεμιά τιμή πίεσης σε ορισμένη γωνία στροφάλου. Εδώ ζητούμενο



είναι η αντιστοίχιση κάθε τιμής πίεσης με ορισμένο όγκο κυλίνδρου. Αυτό κατέστη δυνατό μετά από σειρά υπολογισμών και εφαρμογή γνωστών τύπων, σύμφωνα με την παρακάτω μεθοδολογία:

- Δεδομένα είναι
 - ✓ ο βαθμός συμπίεσης ε
 - ✓ η διάμετρος του εμβόλου D , άρα και η ακτίνα του r
 - ✓ το μήκος διωστήρα l
 - ✓ ταχύτητα περιστροφής n
- Υπολογίζονται άμεσα
 - Ο λόγος λ , όπου $\lambda = r/l$
 - Η διαδρομή του εμβόλου s , όπου $s = 2r$
 - Ο όγκος εμβολισμού V_h , όπου $V_h = \pi D^2 s/4$
 - Ο επιζήμιος όγκος V_c , όπου $V_c = V_h/(\varepsilon - 1)$
 - Το εμβαδό του κυλίνδρου A , όπου $A = \pi D^2/4$
 - Η συχνότητα ν , όπου $\nu = n/30K$, όπου $K=2$ αφού πρόκειται για δίχρονο κινητήρα
- Υπολογίζονται στη συνέχεια για κάθε μισή μοίρα γωνίας στροφάλου
 - Η μετατόπιση x του εμβόλου, όπου

$$x = r(1 + \cos \varphi) + l(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi})$$
 - Ο όγκος κυλίνδρου V , όπου $V = Ax + V_c$
 - Ο διαφορικός όγκος dV , όπου

$$dV = Ar(\pi/180) \sin(\pi\varphi/180) \left[\frac{\lambda \cos(\pi\varphi/180)}{\sqrt{1 - (\lambda \sin(\pi\varphi/180))^2}} - 1 \right] d\varphi$$
 - Το ενδεικνύμενο έργο W_i (με τη μέθοδο του τραπεζίου, όπως περιγράφεται παραπάνω), όπου $W_i = \oint p dV$
- Και τελικά υπολογίζεται η ενδεικνύμενη ισχύς P_i , όπου

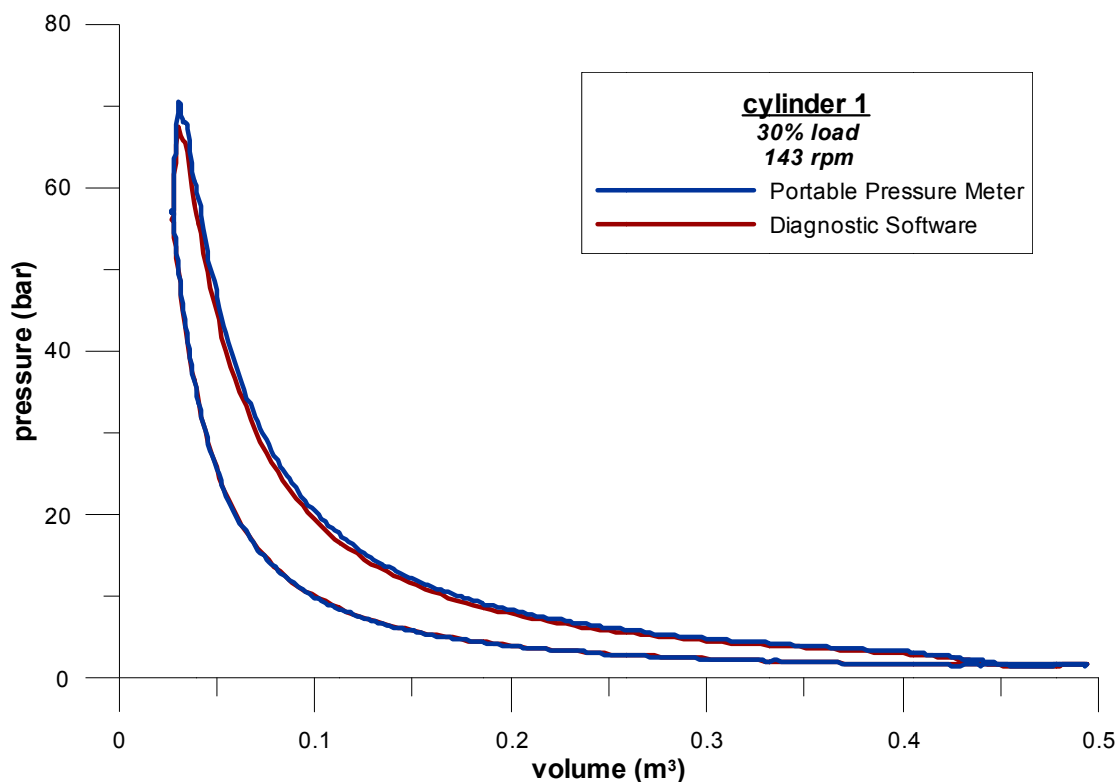
$$P_i = W_i \nu$$

Ξεκινά στο σημείο αυτό η παράθεση των διαγραμμάτων πίεσης - όγκου (pressure - volume) για κάθε φορτίο και κάθε κύλινδρο του κινητήρα.

➤ **Για σταθερό φορτίο στο 30%**



– Κύλινδρος 1



Σχήμα 7.61. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V , για τον κύλινδρο «1» , στο 30% του φορτίου

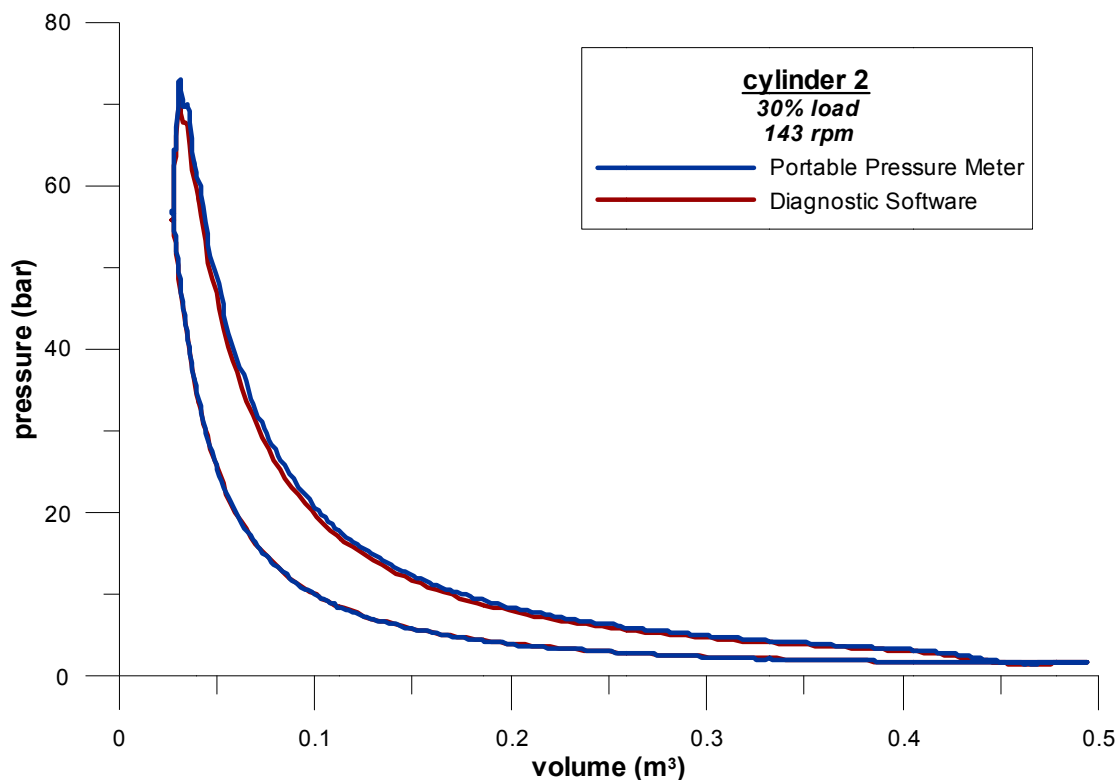
Πίνακας 7.4. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «1», 30% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	576
Φορητή Μετρητική Συσκευή	608,4

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (Portable Pressure Meter – PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (Diagnostic Software – DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,056 \text{ ή } 5,6\%$$

– Κύλινδρος 2



Σχήμα 7.62. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V, για τον κύλινδρο «2», στο 30% του φορτίου

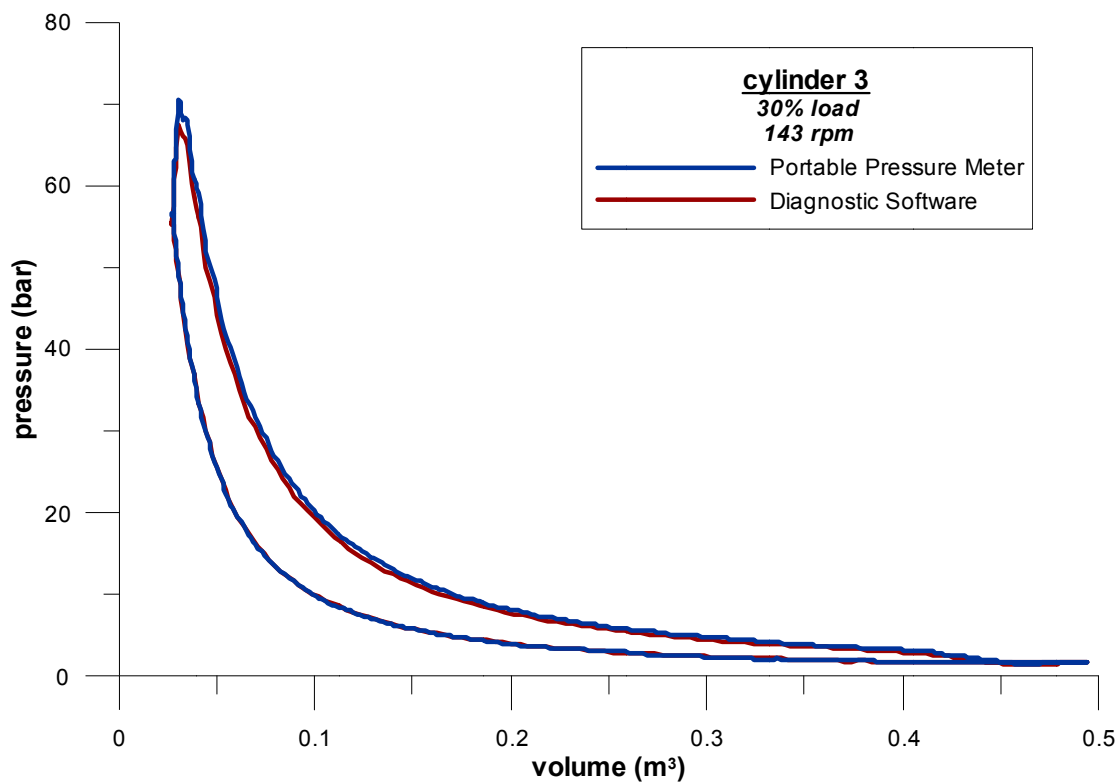
Πίνακας 7.5. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «2», 30% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	606
Φορητή Μετρητική Συσκευή	634,9

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,048 \text{ ή } 4,8\%$$

– Κύλινδρος 3



Σχήμα 7.63. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$, για τον κύλινδρο «3», στο 30% του φορτίου

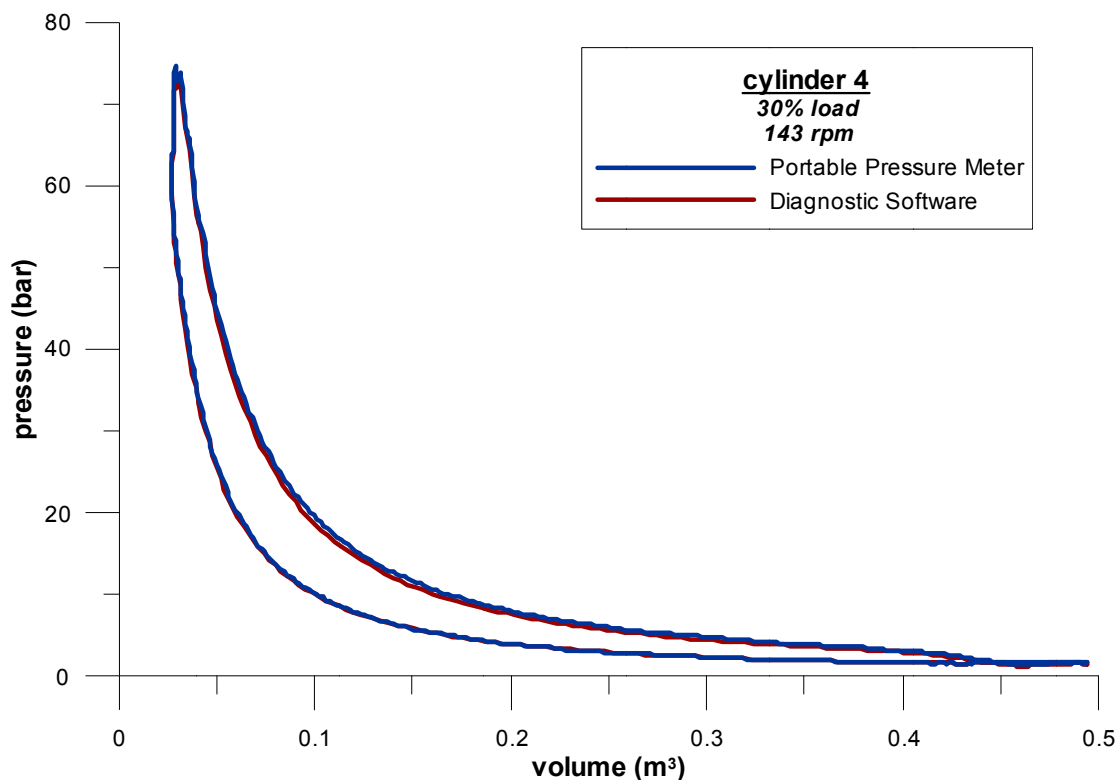
Πίνακας 7.6. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «3», 30% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	567
Φορητή Μετρητική Συσκευή	597,2

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,053 \text{ ή } 5,3\%$$

– Κύλινδρος 4



Σχήμα 7.64. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V, για τον κύλινδρο «4», στο 30% του φορτίου

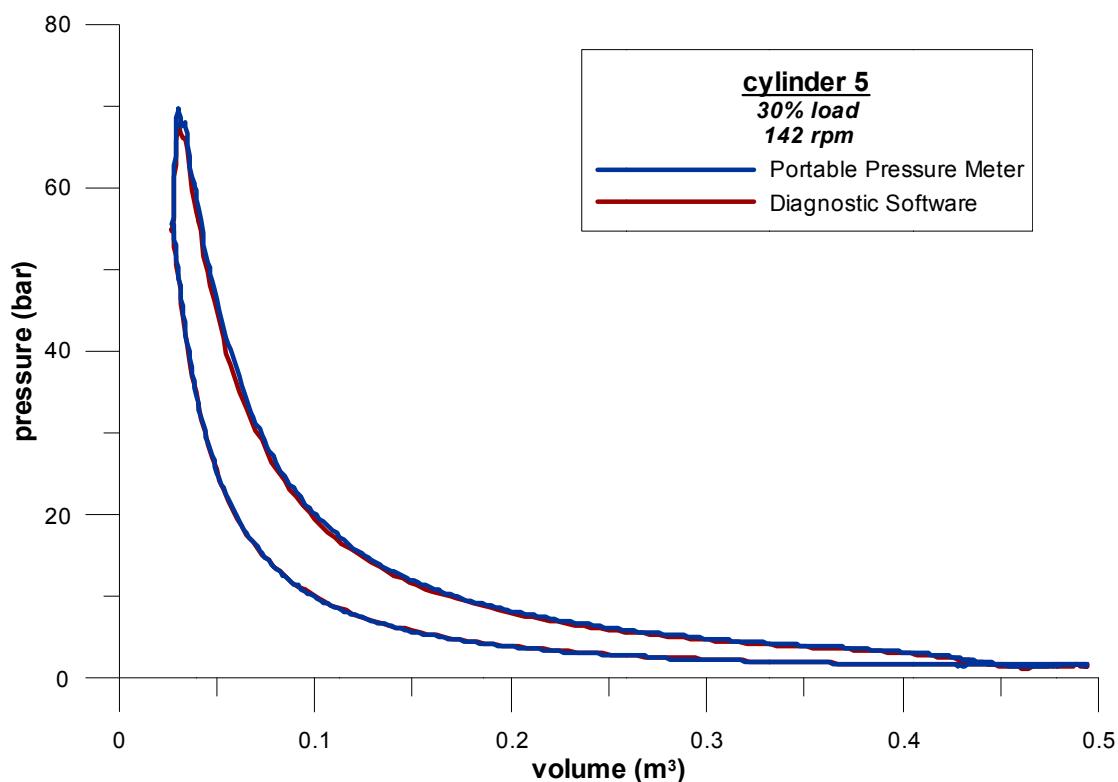
Πίνακας 7.7. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «4», 30% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	562
Φορητή Μετρητική Συσκευή	572,7

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,019 \text{ ή } 1,9\%$$

– Κύλινδρος 5



Σχήμα 7.65. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$, για τον κύλινδρο «5», στο 30% του φορτίου

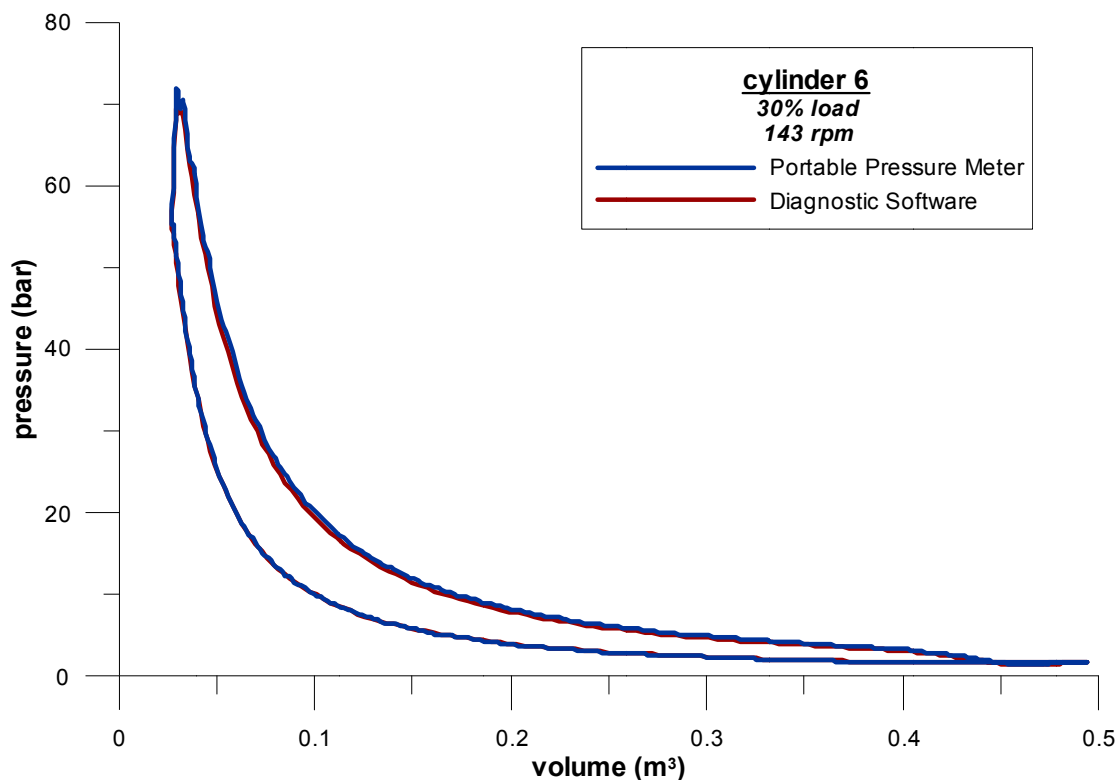
Πίνακας 7.8. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «5», 30% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	593
Φορητή Μετρητική Συσκευή	598,3

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,009 \text{ ή } 0,9\%$$

– Κύλινδρος 6



Σχήμα 7.66. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V, για τον κύλινδρο «6», στο 30% του φορτίου

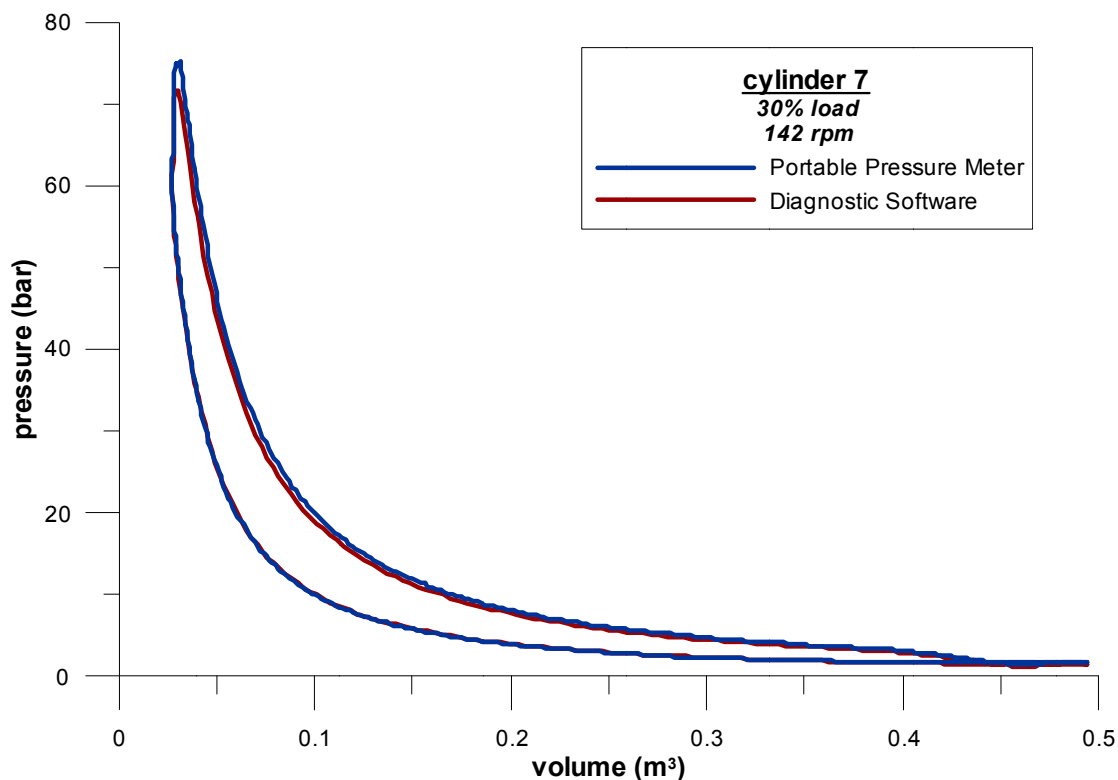
Πίνακας 7.9. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «6», 30% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	592
Φορητή Μετρητική Συσκευή	600,1

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,014 \text{ ή } 1,4\%$$

– Κύλινδρος 7



Σχήμα 7.67. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V, για τον κύλινδρο «7», στο 30% του φορτίου

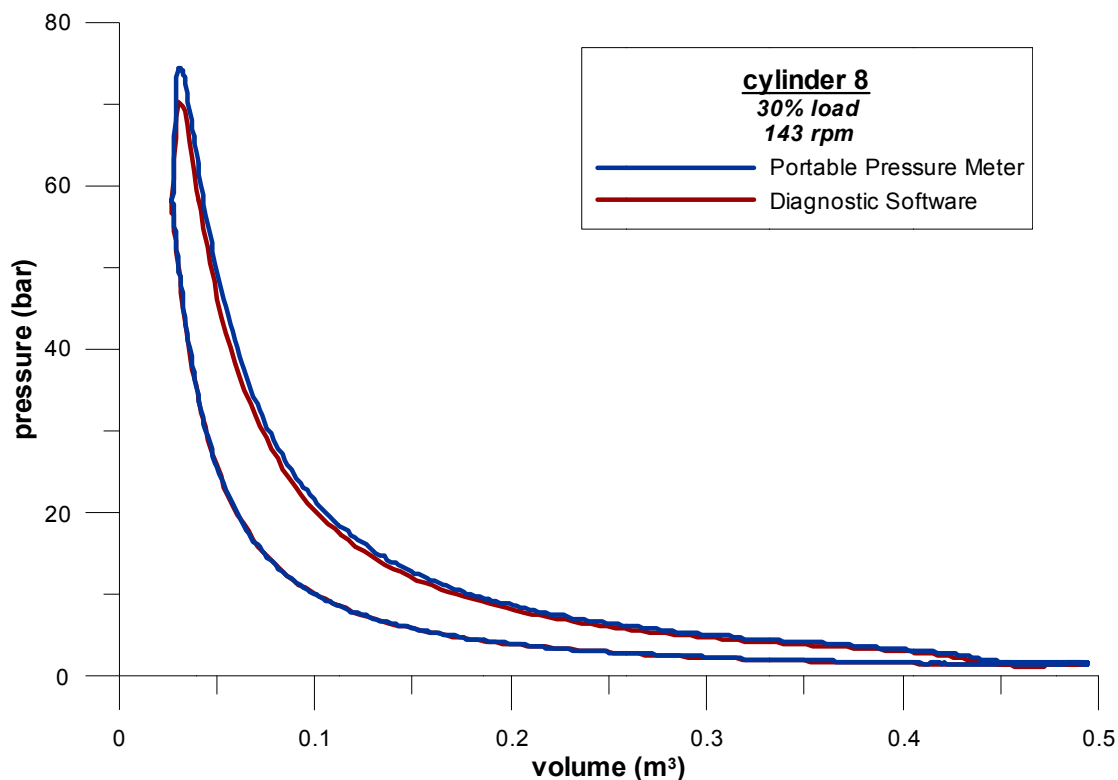
Πίνακας 7.10. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «7», 30% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	566
Φορητή Μετρητική Συσκευή	595,3

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,052 \text{ ή } 5,2\%$$

– Κύλινδρος 8



Σχήμα 7.68. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V, για τον κύλινδρο «8», στο 30% του φορτίου

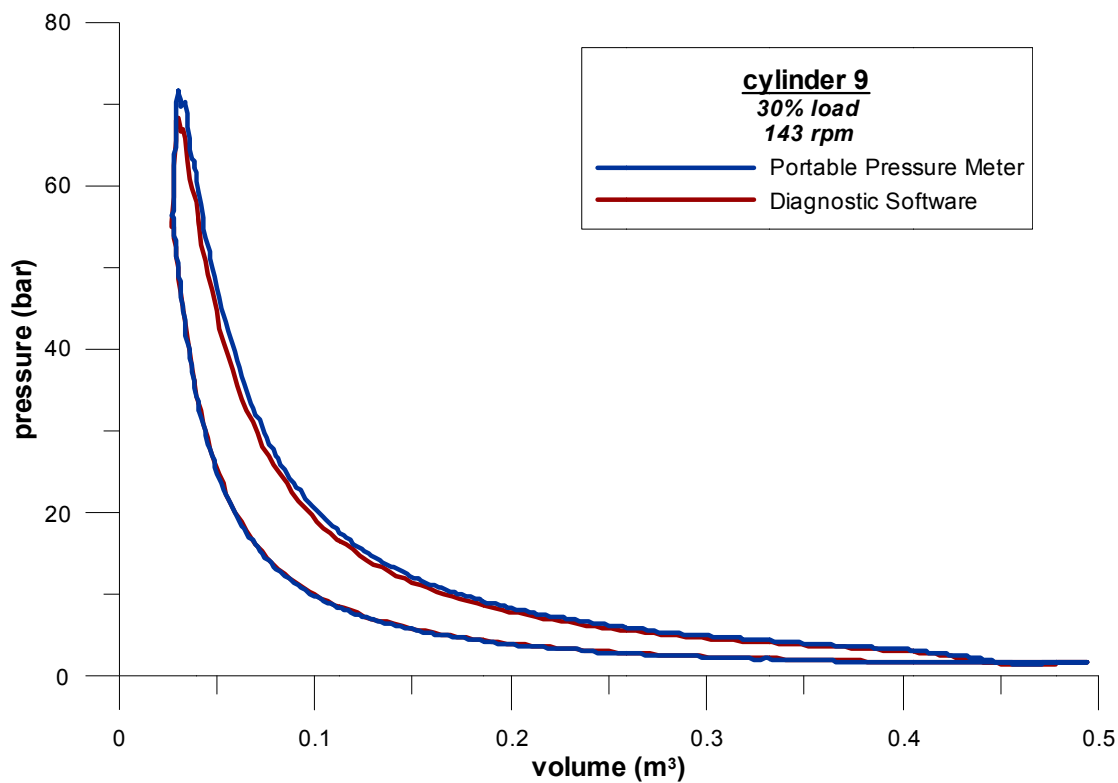
Πίνακας 7.11. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «8», 30% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	632
Φορητή Μετρητική Συσκευή	676,4

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,070 \text{ ή } 7,0\%$$

– Κύλινδρος 9



Σχήμα 7.69. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V, για τον κύλινδρο «9», στο 30% του φορτίου

Πίνακας 7.12. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «9», 30% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	578
Φορητή Μετρητική Συσκευή	628,3

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,087 \text{ ή } 8,7\%$$

Συμπεράσματα



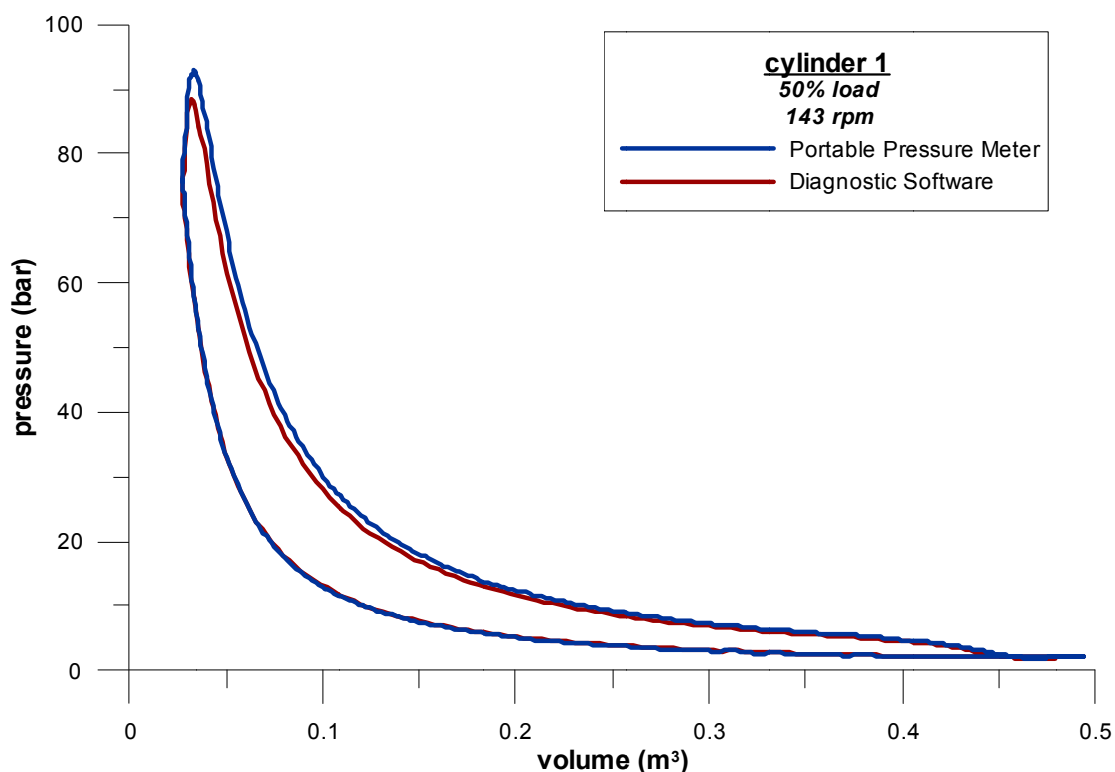
Παρατηρείται μια διαφορά της υπολογισμένης ενδεικνύμενης ισχύος από τα δεδομένα του υπό αξιολόγηση οργάνου και της αντίστοιχης ισχύος υπολογισμένης από το πρότυπο διαγνωστικό λογισμικό. Οι διαφορές στην ισχύ μεταξύ των δύο συστημάτων, όπως προκύπτουν από τους υπολογισμούς θεωρούνται δικαιολογημένες, λαμβάνοντας υπόψη και τις ελαφρώς μεγαλύτερες πιέσεις που κατέγραφε η φορητή συσκευή στη μετρητική διαδικασία. Όπως αναμενόταν, τα διαγράμματα $p - V$ για φορτίο 30% παρουσιάζουν ικανοποιητική ταύτιση. Η διαφορά που εμφανίζεται οφείλεται κύρια στη χρησιμοποίηση δυο διαφορετικών αισθητήρων.

Ακολουθούν τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$ που αντιστοιχούν σε φορτίο 50% και ο υπολογισμός των ανάλογων τιμών ενδεικνύμενης ισχύος.

➤ **Για σταθερό φορτίο στο 50%**



– Κύλινδρος 1



Σχήμα 7.70. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V, για τον κύλινδρο «1», στο 50% του φορτίου

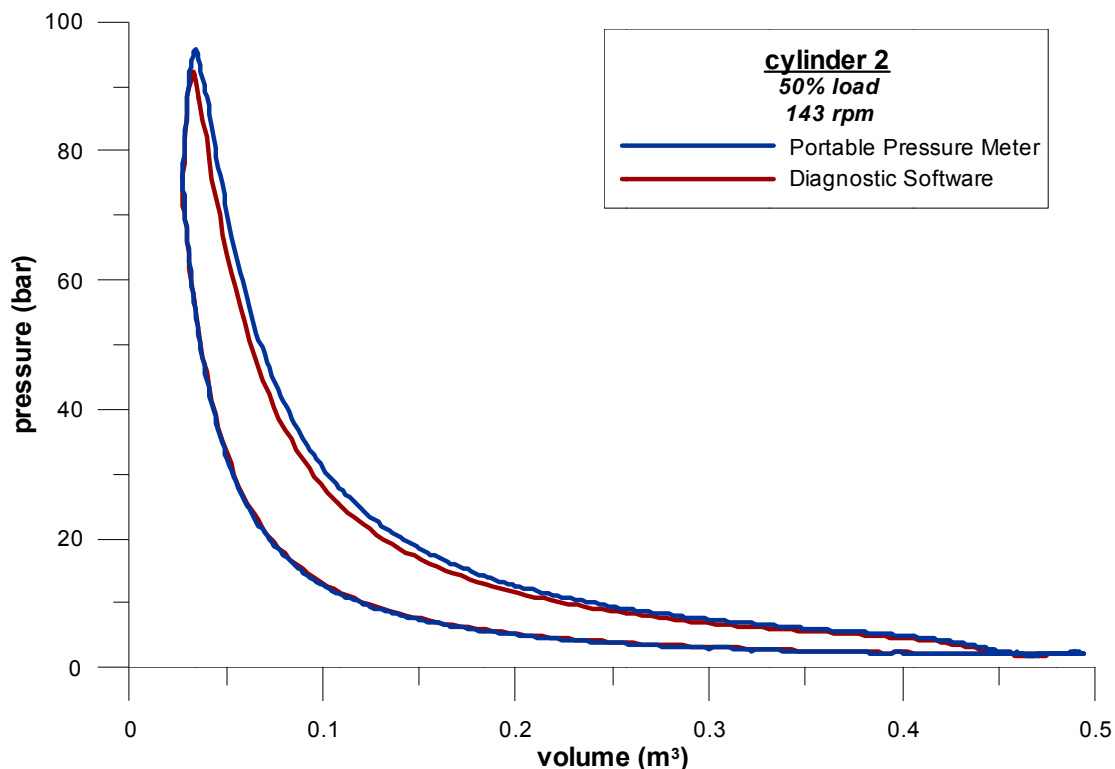
Πίνακας 7.13. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «1», 50% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	901
Φορητή Μετρητική Συσκευή	986,6

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (Portable Pressure Meter – PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (Diagnostic Software – DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,095 \text{ ή } 9,5\%$$

– Κύλινδρος 2



Σχήμα 7.71. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V , για τον κύλινδρο «2» , στο 50% του φορτίου

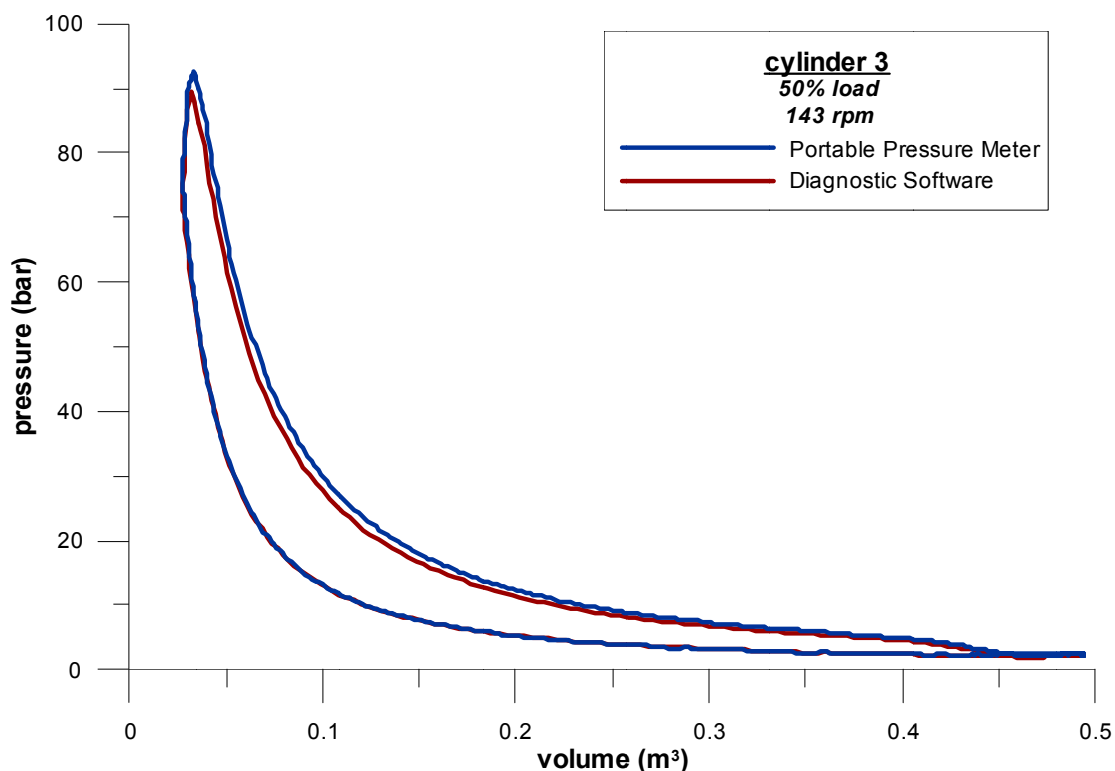
Πίνακας 7.14. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «2», 50% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	930
Φορητή Μετρητική Συσκευή	1054,4

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,134 \text{ ή } 13,4\%$$

– Κύλινδρος 3



Σχήμα 7.72. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$, για τον κύλινδρο «3», στο 50% του φορτίου

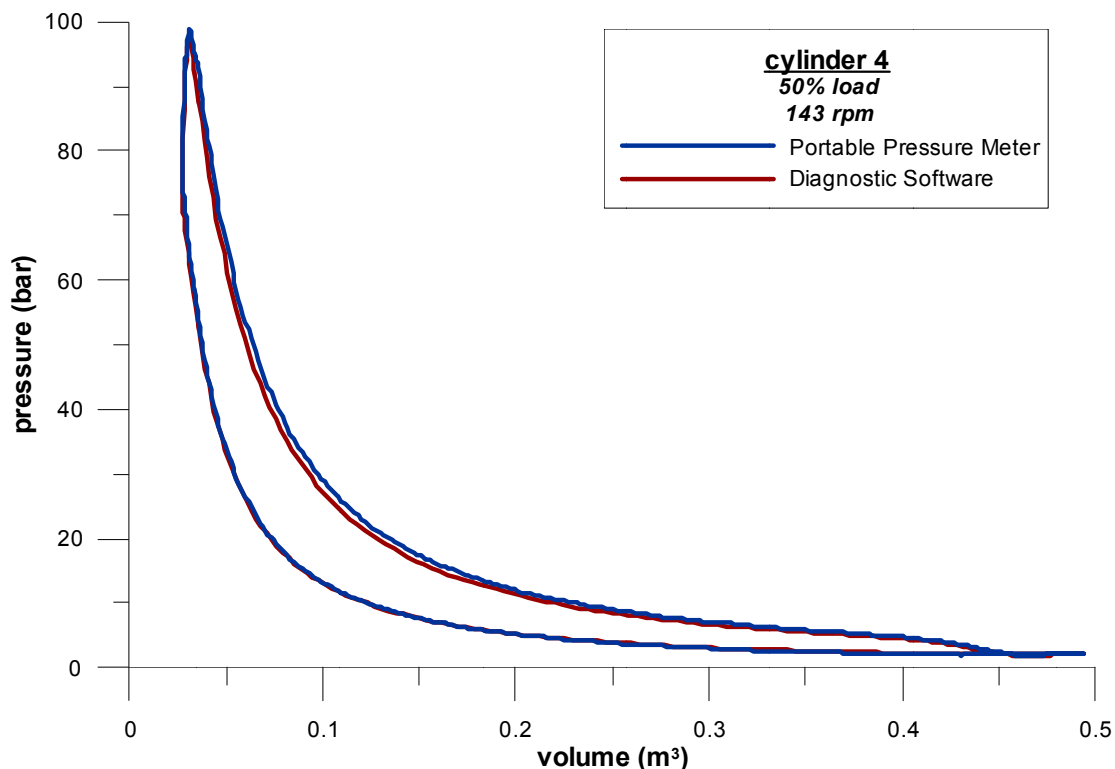
Πίνακας 7.15. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «3», 50% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	884
Φορητή Μετρητική Συσκευή	964,7

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,091 \text{ ή } 9,1\%$$

– Κύλινδρος 4



Σχήμα 7.73. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$, για τον κύλινδρο «4», στο 50% του φορτίου

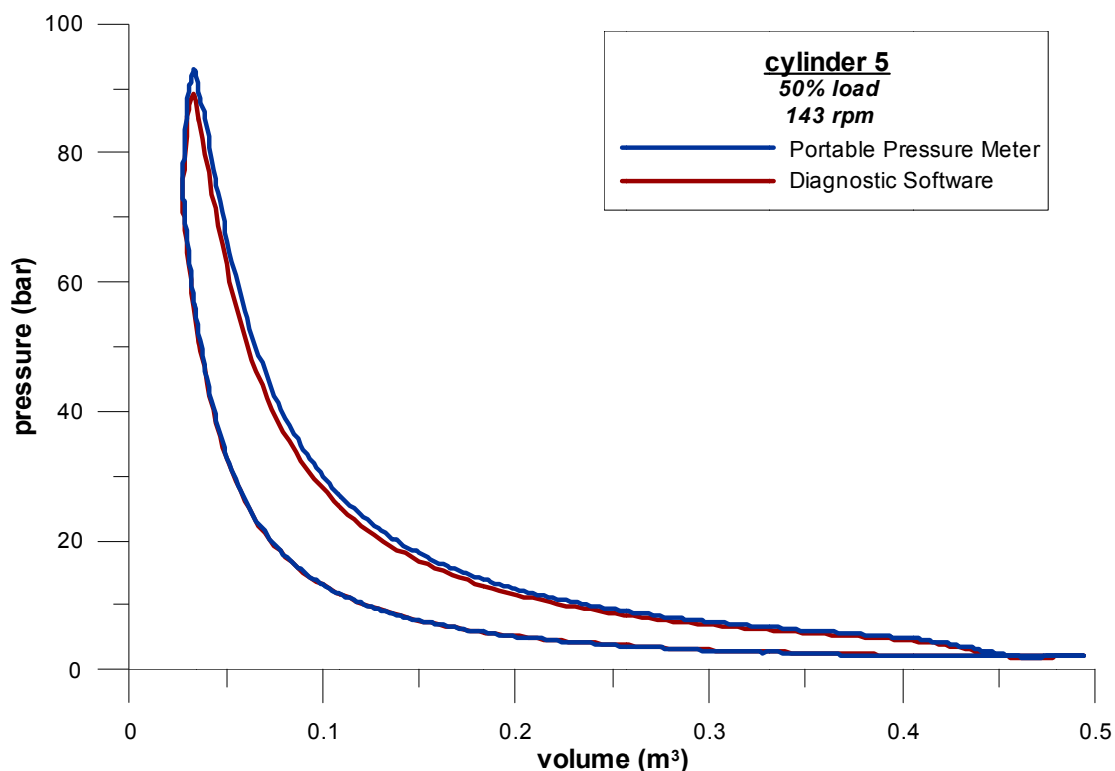
Πίνακας 7.16. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «4», 50% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	896
Φορητή Μετρητική Συσκευή	939

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,048 \text{ ή } 4,8\%$$

– Κύλινδρος 5



Σχήμα 7.74. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$, για τον κύλινδρο «5», στο 50% του φορτίου

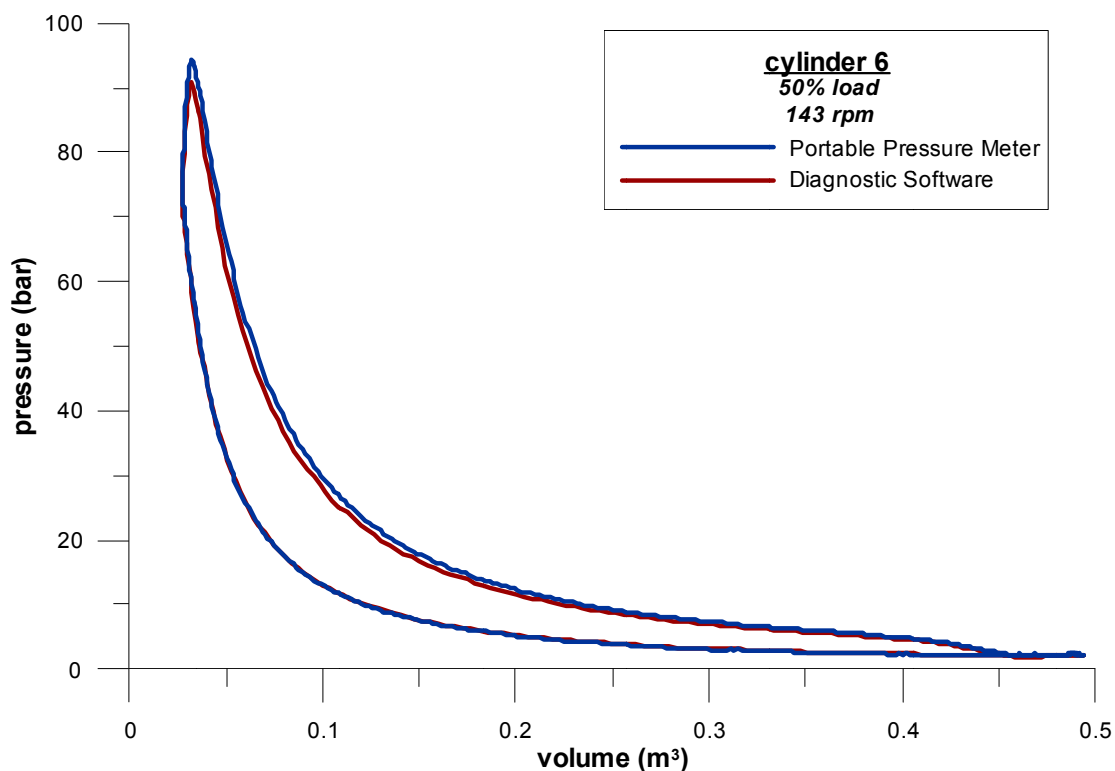
Πίνακας 7.17. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «5», 50% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	914
Φορητή Μετρητική Συσκευή	986,6

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,079 \text{ ή } 7,9\%$$

– Κύλινδρος 6



Σχήμα 7.75. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V , για τον κύλινδρο «6» , στο 50% του φορτίου

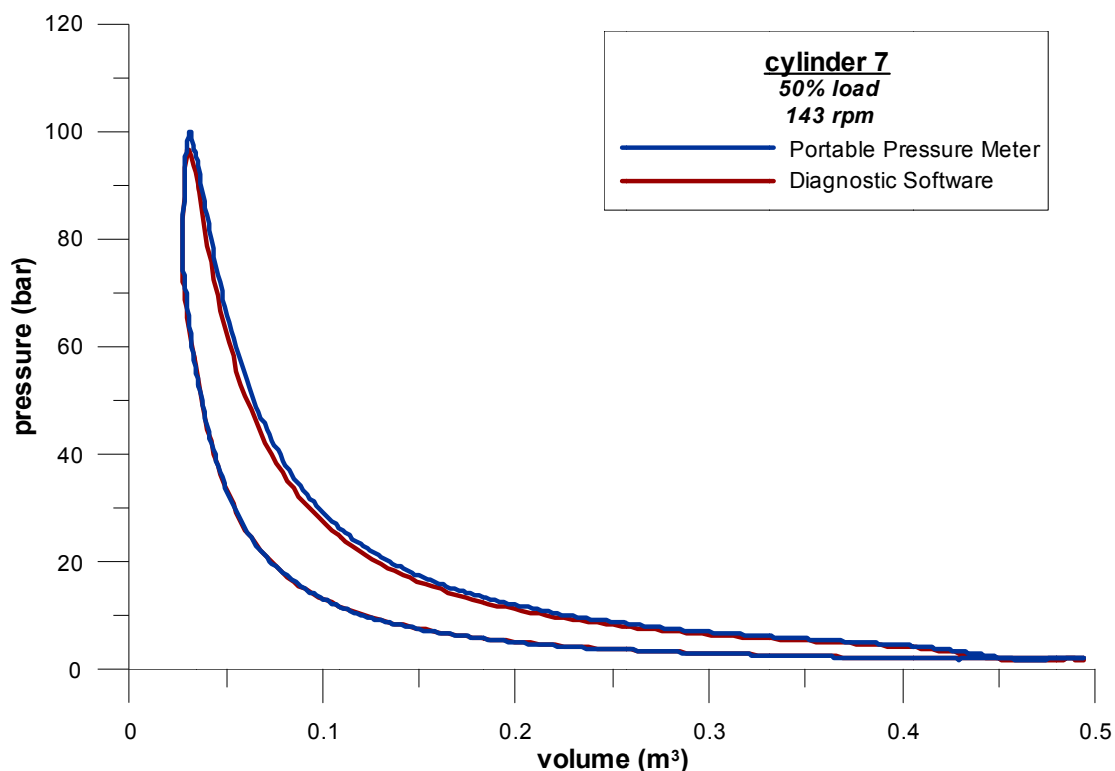
Πίνακας 7.18. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «6», 50% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	912
Φορητή Μετρητική Συσκευή	971,8

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,066 \text{ ή } 6,6\%$$

– Κύλινδρος 7



Σχήμα 7.76. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$, για τον κύλινδρο «7», στο 50% του φορτίου

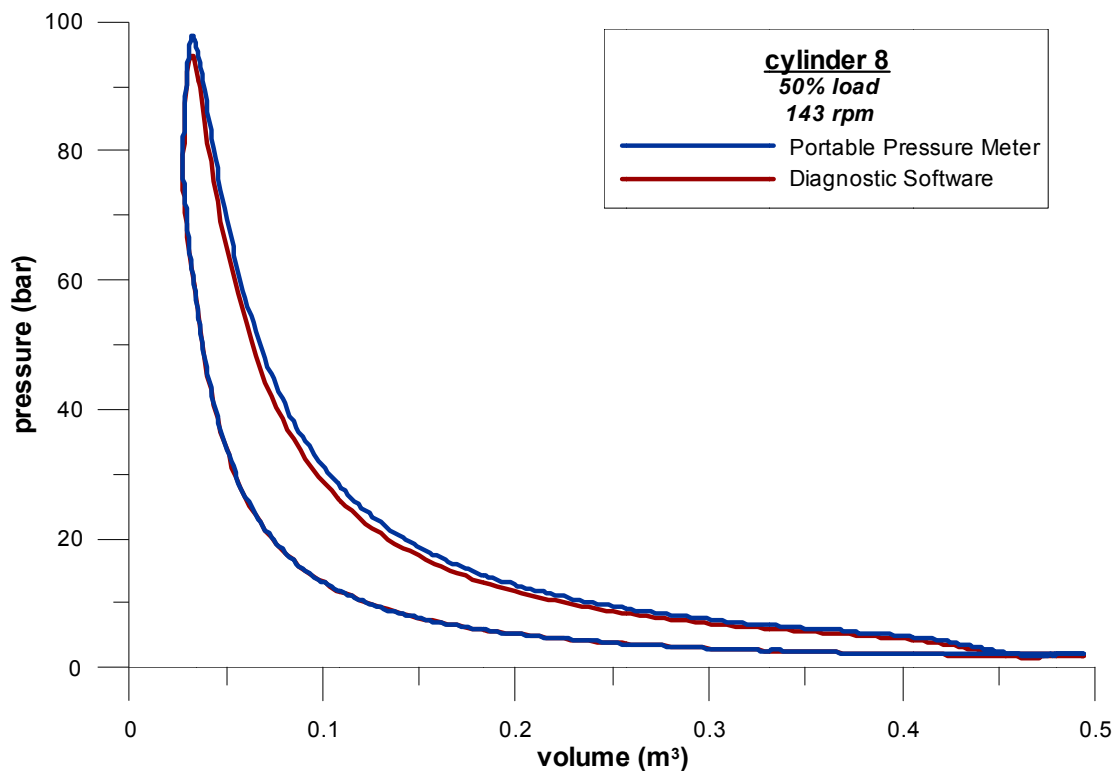
Πίνακας 7.19. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «7», 50% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	888
Φορητή Μετρητική Συσκευή	956,2

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,077 \text{ ή } 7,7\%$$

– Κύλινδρος 8



Σχήμα 7.77. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V , για τον κύλινδρο «8» , στο 50% του φορτίου

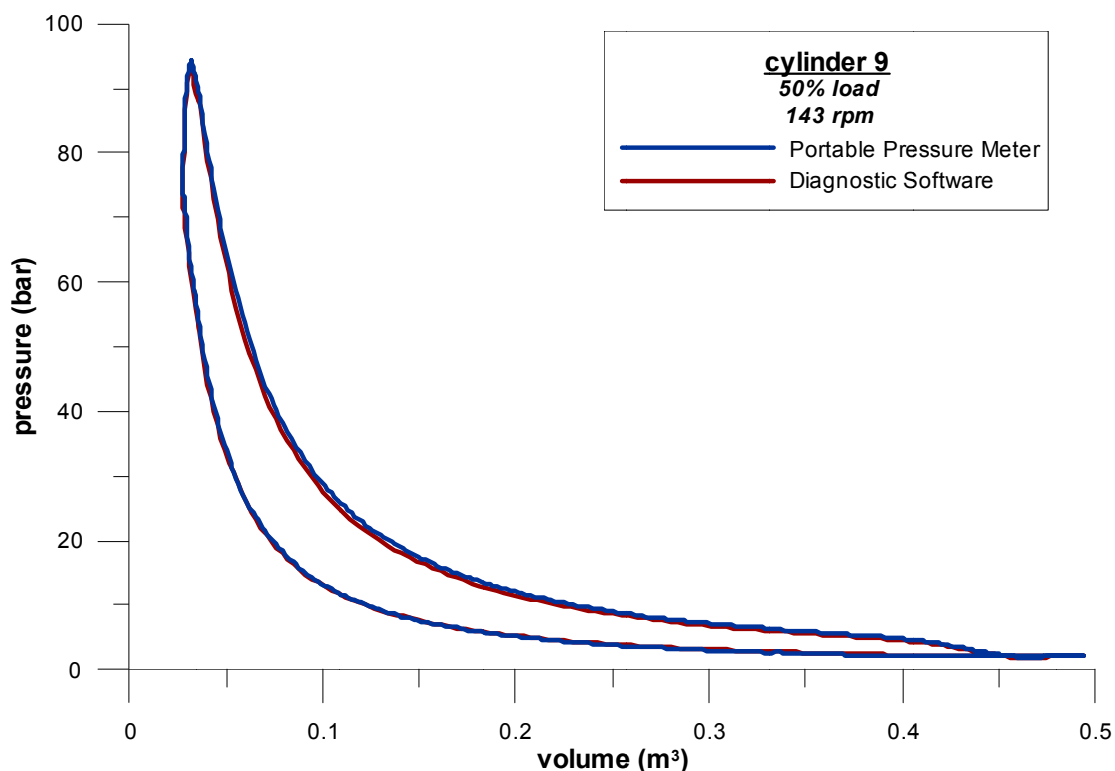
Πίνακας 7.20. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «8», 50% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	957
Φορητή Μετρητική Συσκευή	1037,1

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,084 \text{ ή } 8,4\%$$

– Κύλινδρος 9



Σχήμα 7.78. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$, για τον κύλινδρο «9», στο 50% του φορτίου

Πίνακας 7.21. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «9», 50% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	899
Φορητή Μετρητική Συσκευή	918

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,021 \text{ ή } 2,1\%$$

Συμπεράσματα



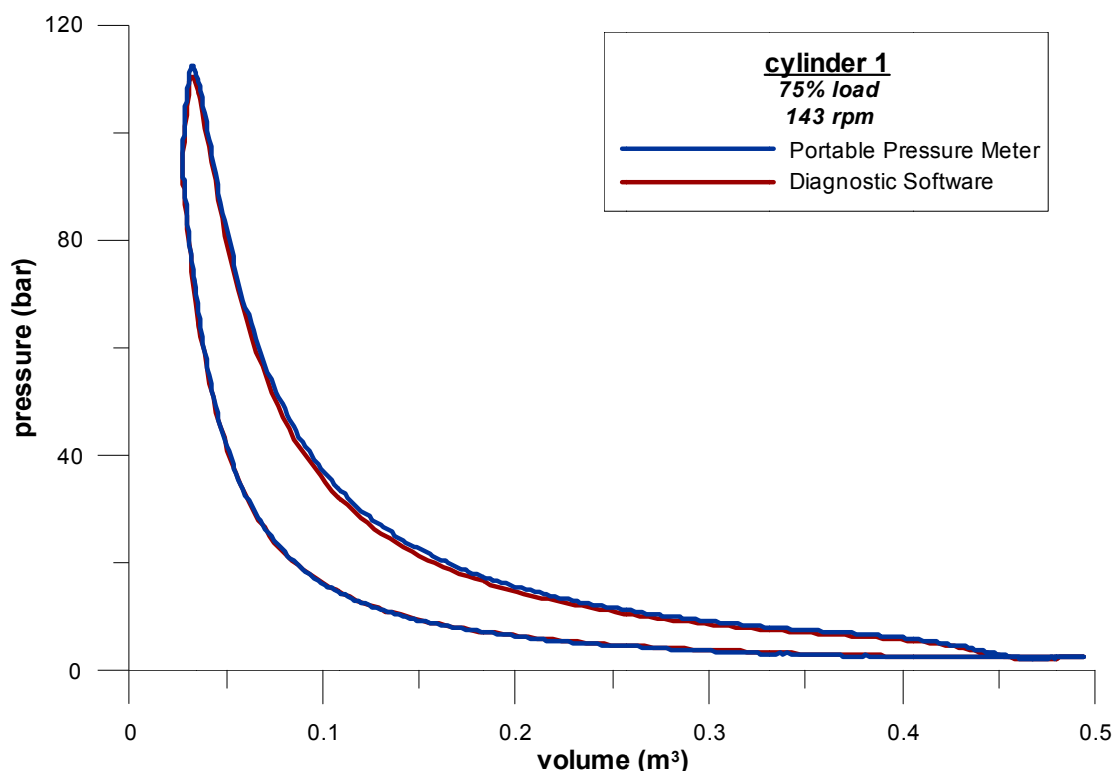
Στο 50% του φορτίου, οι μεταβολές μεταξύ της υπολογισμένης ενδεικνύμενης ισχύος από τα δεδομένα της φορητής μετρητικής συσκευής και της αντίστοιχης ισχύος υπολογισμένης από το πρότυπο διαγνωστικό λογισμικό, παρουσιάζονται αυξημένες. Με δεδομένες πάντα τις υπερεκτιμημένες τιμές της πίεσης που κατέγραφε το πρώτο σύστημα (κυρίως λόγω της χρήσης διαφορετικών πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων), οι διαφορές αυτές θεωρούνται αναμενόμενες και λογικές. Παρά ταύτα, τα διαγράμματα $p - V$ για φορτίο 50% παρουσιάζουν ικανοποιητική ταύτιση.

Ακολουθούν τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$ που αντιστοιχούν σε φορτίο 75% και ο υπολογισμός των ανάλογων τιμών ενδεικνύμενης ισχύος.

➤ **Για σταθερό φορτίο στο 75%**



– Κύλινδρος 1



Σχήμα 7.79. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V, για τον κύλινδρο «1», στο 75% του φορτίου

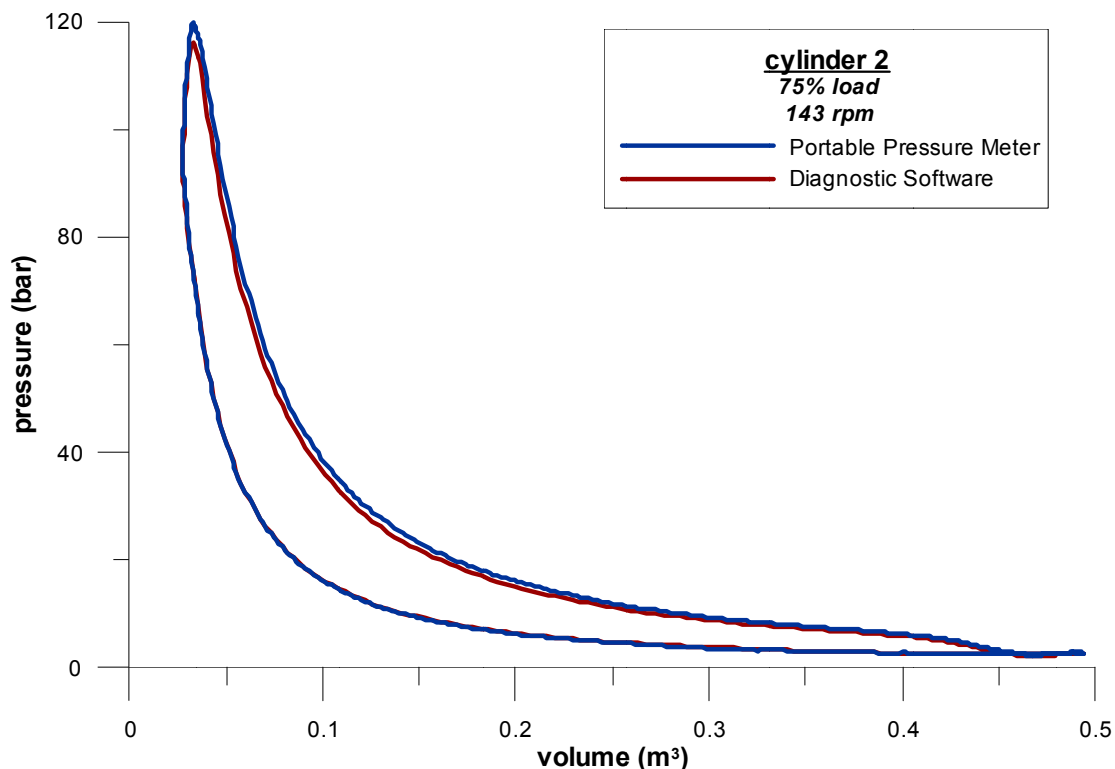
Πίνακας 7.22. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «1», 75% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	1176
Φορητή Μετρητική Συσκευή	1210,1

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (Portable Pressure Meter – PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (Diagnostic Software – DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,029 \text{ ή } 2,9\%$$

– Κύλινδρος 2



Σχήμα 7.80. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V, για τον κύλινδρο «2», στο 75% του φορτίου

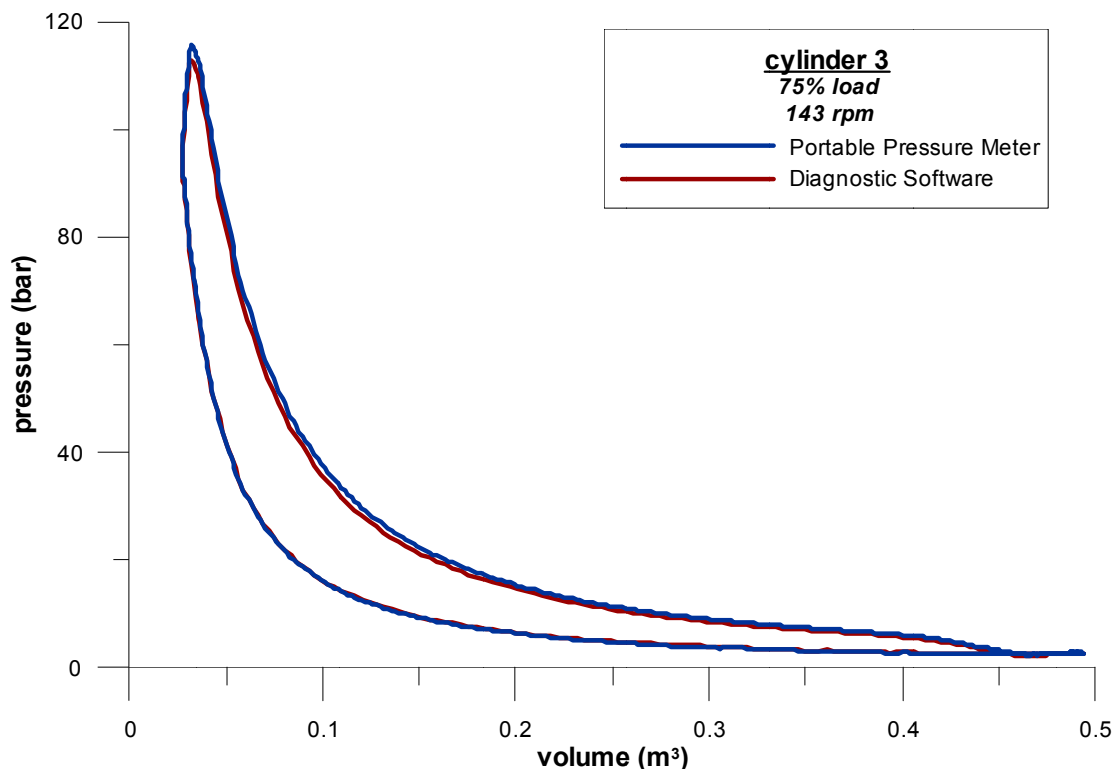
Πίνακας 7.23. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «2», 75% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	1232
Φορητή Μετρητική Συσκευή	1316,1

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,068 \text{ ή } 6,8\%$$

– Κύλινδρος 3



Σχήμα 7.81. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$, για τον κύλινδρο «3», στο 75% του φορτίου

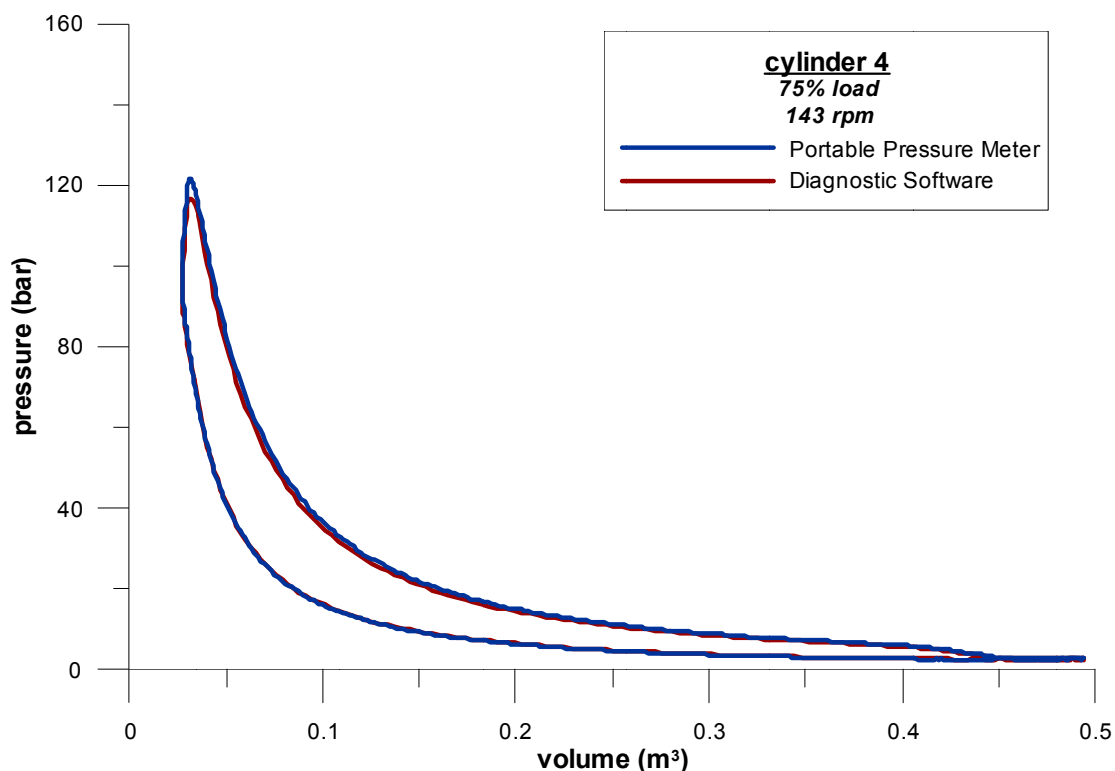
Πίνακας 7.24. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «3», 75% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	1175
Φορητή Μετρητική Συσκευή	1226,6

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,044 \text{ ή } 4,4\%$$

– Κύλινδρος 4



Σχήμα 7.82. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V , για τον κύλινδρο «4» , στο 75% του φορτίου

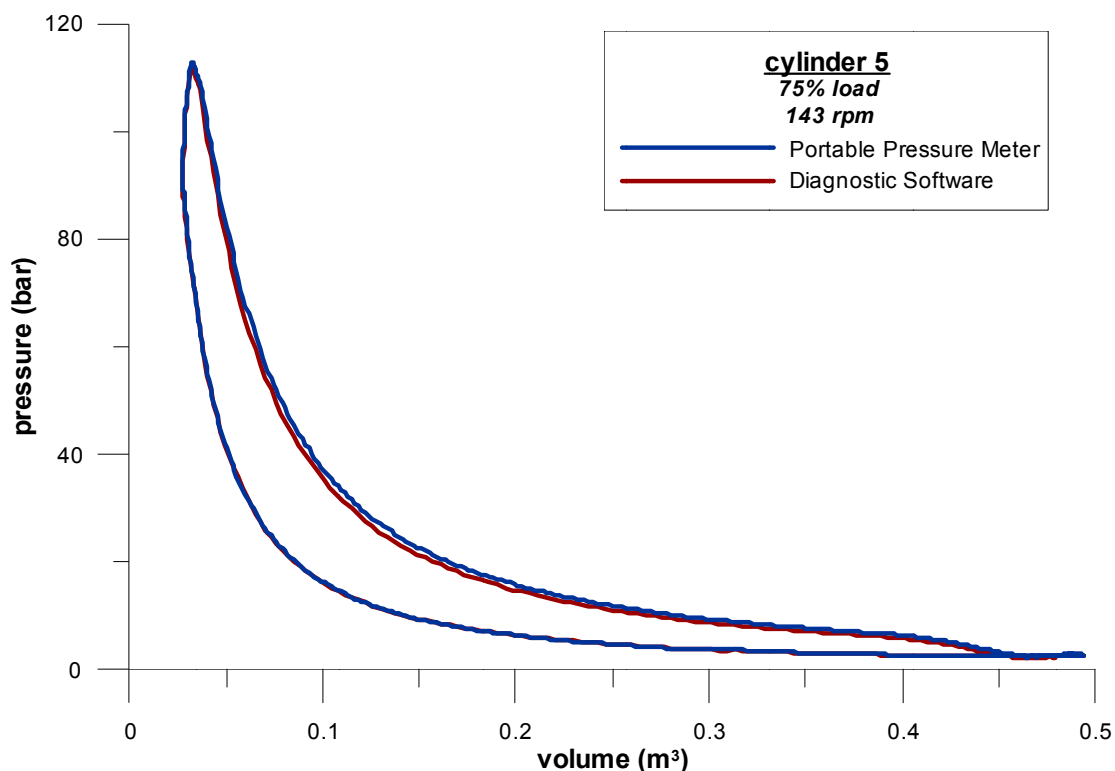
Πίνακας 7.25. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «4», 75% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	1173
Φορητή Μετρητική Συσκευή	1214,7

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,036 \text{ ή } 3,6\%$$

– Κύλινδρος 5



Σχήμα 7.83. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$, για τον κύλινδρο «5», στο 75% του φορτίου

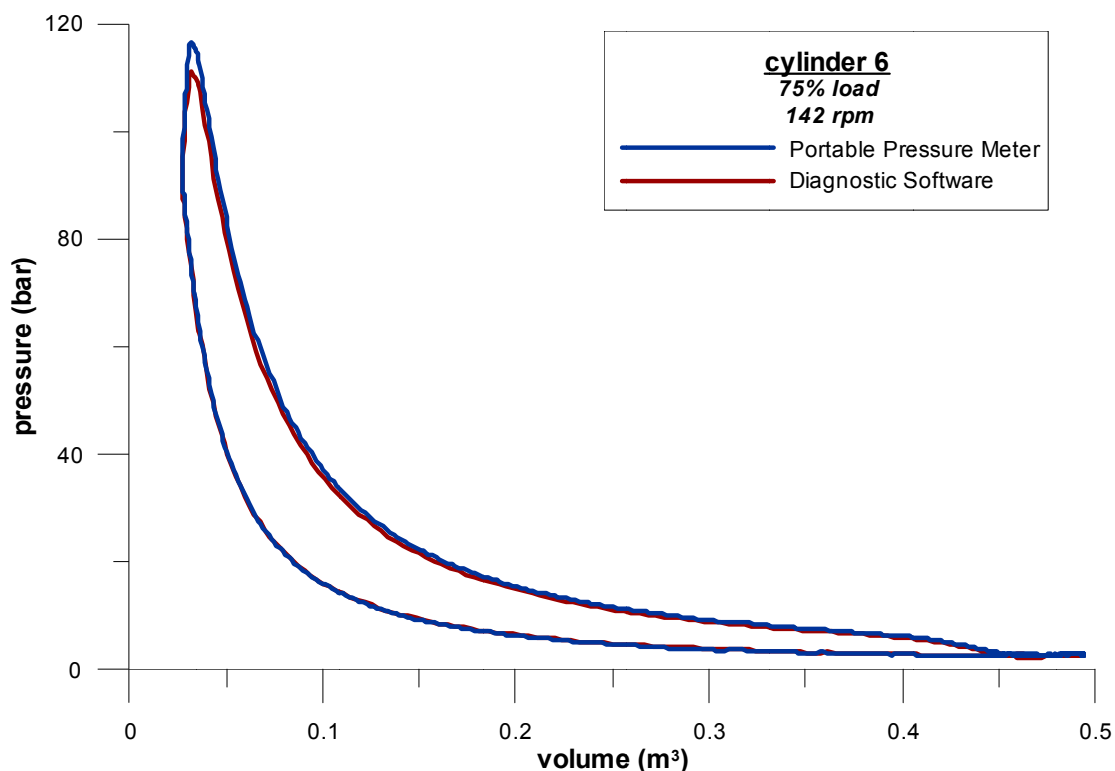
Πίνακας 7.26. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «5», 75% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	1184
Φορητή Μετρητική Συσκευή	1234,3

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,042 \text{ ή } 4,2\%$$

– Κύλινδρος 6



Σχήμα 7.84. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V , για τον κύλινδρο «6» , στο 75% του φορτίου

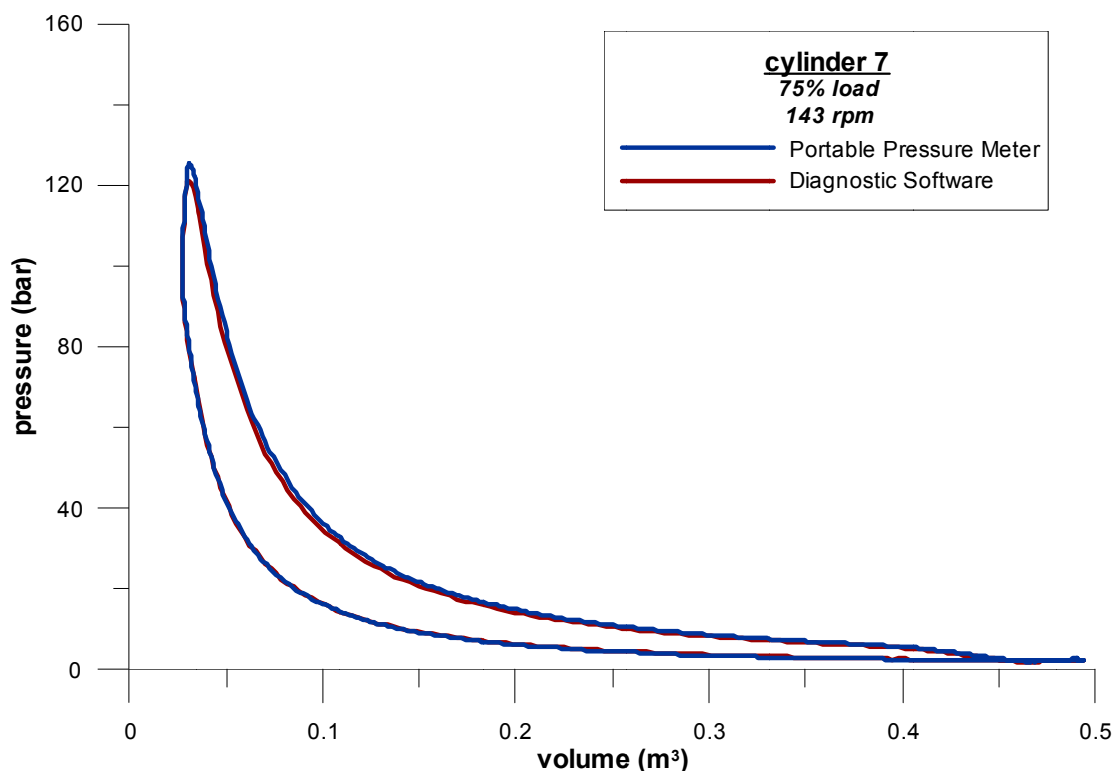
Πίνακας 7.27. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «6», 75% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	1200
Φορητή Μετρητική Συσκευή	1236,4

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,030 \text{ ή } 3,0\%$$

– Κύλινδρος 7



Σχήμα 7.85. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$, για τον κύλινδρο «7», στο 75% του φορτίου

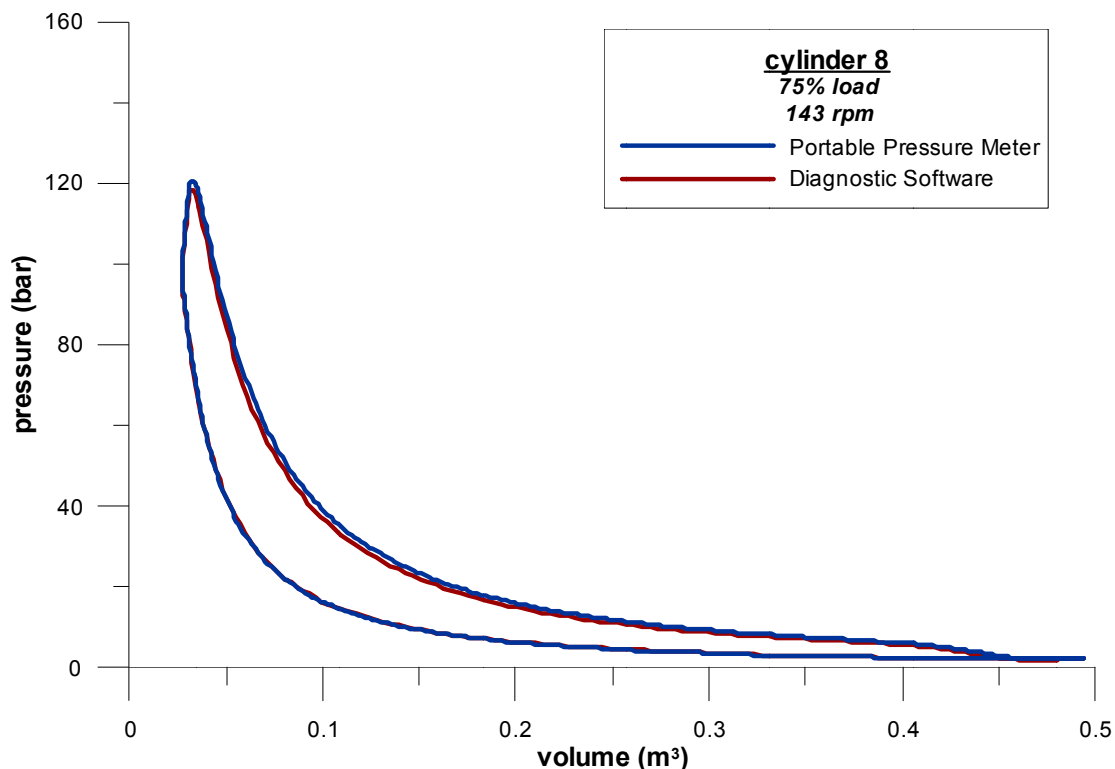
Πίνακας 7.28. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «7», 75% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	1158
Φορητή Μετρητική Συσκευή	1211,5

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,046 \text{ ή } 4,6\%$$

– Κύλινδρος 8



Σχήμα 7.86. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα $p - V$, για τον κύλινδρο «8», στο 75% του φορτίου

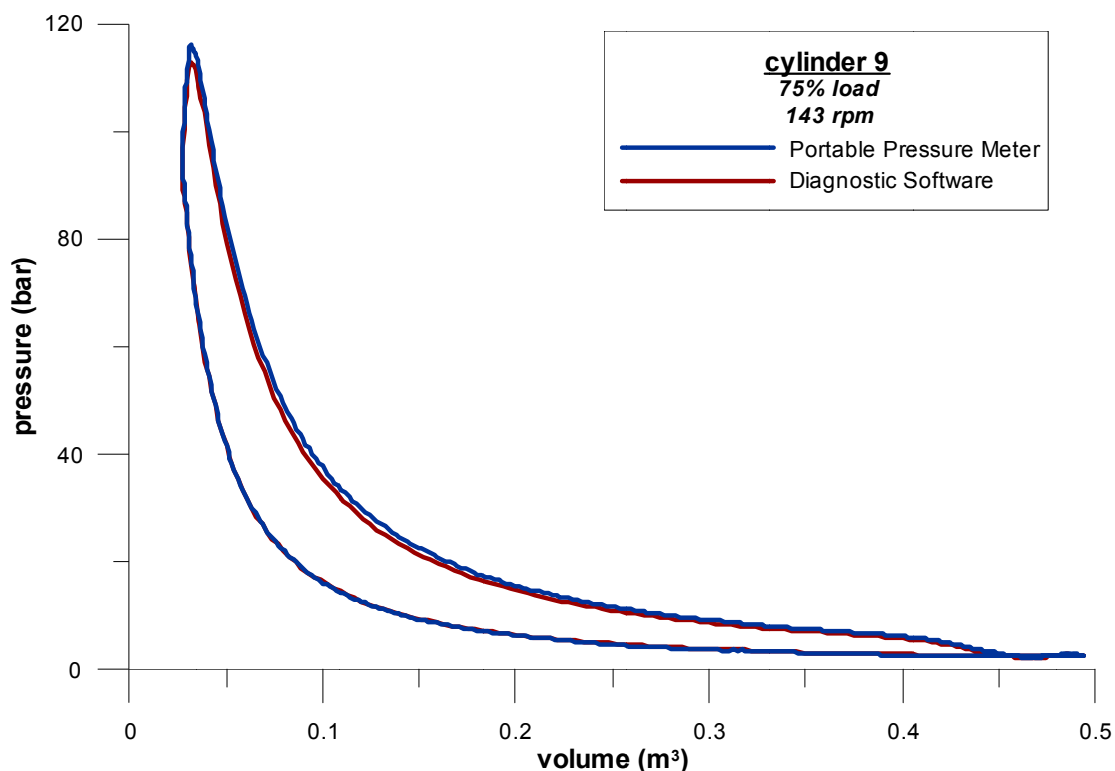
Πίνακας 7.29. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «8», 75% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	1260
Φορητή Μετρητική Συσκευή	1320,5

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,048 \text{ ή } 4,8\%$$

– Κύλινδρος 9



Σχήμα 7.87. Δυναμοδεικτικά διαγράμματα p – V , για τον κύλινδρο «9» , στο 75% του φορτίου

Πίνακας 7.30. Υπολογισμένες τιμές ενδεικνύμενης ισχύος, κύλινδρος «9», 75% του φορτίου

Ενδεικνύμενη Ισχύς (KW)	
Διαγνωστικό Λογισμικό	1181
Φορητή Μετρητική Συσκευή	1233,7

Η μεταβολή της ενδεικνύμενης ισχύος μεταξύ του φορητού μετρητικού συστήματος (PPM) και του πρότυπου διαγνωστικού λογισμικού (DS) είναι:

$$\varepsilon = \frac{P_{i(PPM)} - P_{i(DS)}}{P_{i(DS)}} = 0,045 \text{ ή } 4,5\%$$

Συμπεράσματα



Στο 75% του φορτίου οι διαφορές των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων που προκύπτουν από τα δύο μετρητικά συστήματα είναι σαφώς μικρότερες. Παράλληλα, οι μεταβολές μεταξύ της υπολογισμένης ενδεικνύμενης ισχύος από τα δεδομένα του μετρητικού οργάνου και της αντίστοιχης ισχύος υπολογισμένης από το πρότυπο διαγνωστικό λογισμικό, εμφανίζονται σημαντικά μειωμένες. Οι μικρές αποκλίσεις που παρουσιάζονται, δικαιολογούνται όπως έχει προαναφερθεί, καθώς προκαλούνται εξαιτίας των υπερεκτιμημένων τιμών πίεσης που έχουν καταγραφεί. Η αποτίμηση των αποτελεσμάτων και η εμπειρική επεξεργασία όλων των μετρητικών παραμέτρων, επιτρέπουν την εκτίμηση ότι ενδεχόμενη χρήση του ίδιου πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα στη μέτρηση της πίεσης θα οδηγούσε σε μεγαλύτερη ταύτιση των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων.



8. Τελική αξιολόγηση της μέτρησης του διαγράμματος πίεσης καύσης με χρήση απλής φορητής συσκευής – Συμπεράσματα

Σήμερα διεξάγεται σημαντική έρευνα στον τομέα της επιτήρησης λειτουργίας κινητήρων και της διάγνωσης βλαβών. Η τάση αυτή μπορεί εύκολα να ερμηνευτεί, καθώς η διαγνωστική διαδικασία εν γένει συνεπάγεται αξιοσημείωτα οφέλη για τους κινητήρες, τους μηχανικούς και τη βιομηχανία στο σύνολό της. Προϊόν των ερευνών που γίνονται επί του αντικειμένου, είναι ένα πλήθος μετρητικών και διαγνωστικών συστημάτων που στόχο έχουν τον έγκαιρο εντοπισμό μιας δυσλειτουργίας ή τη βελτιστοποίηση της λειτουργικής κατάστασης του κινητήρα. Ορισμένα εκ των συστημάτων αυτών διακρίνονται για την καινοτομία και την αξιοπιστία τους, αντιπροσωπεύοντας τεχνολογία αιχμής. Η αξιολόγηση τέτοιων οργάνων δύναται να διευρύνει τις σχετικές με την διαγνωστική επιστήμη γνώσεις, αλλά και να εμπνεύσει για περεταίρω έρευνα, ανάπτυξη και βελτίωση των σχετικών μεθόδων και τεχνικών.

Προσβλέποντας σε αυτόν τον εποικοδομητικό ορίζοντα, έγινε και η αξιολόγηση της παρούσας απλοϊκής φορητής συσκευής καταγραφής της πίεσης καύσης. Πρόκειται για ένα εύχρηστο όργανο, το οποίο διευκολύνει σημαντικά τη διαδικασία μέτρησης πίεσης σε οποιαδήποτε βραδύστροφη ή μεσόστροφη μηχανή. Καθίσταται έτσι ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές σε ναυτικούς κινητήρες και σε ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη. Επιπροσθέτως, έπειτα από σύγκριση με εγνωσμένης αξίας διαγνωστικό λογισμικό και εκτενή υπολογιστική επεξεργασία, η αποτιμώμενη συσκευή κρίνεται αξιόπιστη και ικανή για χρήση στη διαγνωστική διαδικασία. Παράλληλα, έχοντας σαν κύριο σκοπό την επιτήρηση της λειτουργίας των μηχανών, προσφέρεται για αξιολόγηση της ομαλότητας του κύκλου λειτουργίας. Αξίζει επισήμανσης και η ευκολία μεταφοράς δεδομένων πίεσης από το φορητό αυτό σύστημα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω της διεπαφής RS-232C. Παρέχεται έτσι, εμμέσως η δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων σχετικά με ποικίλες παραμέτρους του κινητήρα, αφού πρώτα αξιοποιηθούν τα δεδομένα της συσκευής



με κατάλληλη επεξεργασία. Ωστόσο, πρέπει σε κάθε μέτρηση να λαμβάνεται υπόψη και ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας που χρησιμοποιείται, καθώς όπως αποδείχθηκε μπορεί να έχει αισθητή επίδραση στην καταγραφή της πίεσης κυλίνδρου.

Εν κατακλείδι, επιβεβαιώνεται με την παρούσα διπλωματική εργασία, πως το η χρήση απλοϊκού φορητού συστήματος για τη μέτρηση της πίεσης καύσης αποτελεί μια αξιόπιστη επιλογή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαγνωστικές εφαρμογές.



Παράρτημα

Τεχνικά στοιχεία φορητής συσκευής καταγραφής πίεσης κάυσης

		Type 2516A1 (Piezotron®)
Measuring Range (Display FS, depending on sensor sensitivity)	bar psi Mpa	125 ... 684,9 1812 ... 9431 12,5 ... 68,49
Input voltage range	V	1 ... 15
Input voltage compliance (FSO)	V _{pp}	5
Sensor supply (Piezotron)	mA/%	2/±16
Interference signal/sensor supply (0,1 ... 1MHz @ 2mA, 5,6 kΩ)	μApp	<0,5
Sensor sensitivity (adjustable)	Step: 0,1 Step: 0,007 Step: 1	mV/bar mV/psi mV/Mpa
		7,3 ... 40 0,503 ... 2,759 70 ... 400
Display/resolution (12 bits)	bar psi Mpa	Xxx,x/0,1 Xxxx/1 Xx,xx/0,01
Accuracy of the pressure value display	%	±0,5 ±2 Digit
Max. input voltage	V	<±15
Number of measuring points per engine revolution	/360°	720
Input resistance	kΩ	>480
Low-pass filter (5 th order Butterworth), -3 dB	Hz	300, 500, 1 500, 5 000
Speed range	1/min	25 ... 4 000
Speed measurement resolution (time base T _z = 0,102 ms)	1/min	0,004 ... 27
Speed measurement error	%	0,0085 ... 68
Monitor output		
Offset error	mV	<10
Output voltage	V	0 ... 5
Gain: input voltage to monitor output		1
Error	%	<±1
Interference signal without sensor (0,1 ... 1 MHz)	mV _{pp}	<10
Output current	mA	< 2
Output impedance	Ω	10
Serial interface		
Interface, standard	-	RS-232C
Max. input signal level (continuous)	V	<±20
Baud rate, selectable	baud	9 600/19 200
Data bits	-	8
Stop bits	-	1
Parity	-	none
Handshake	-	none
Protocol	-	none

Supply

Battery IEC 6LF22/9 (Recommended: Ultralife Lithium Power Cell, #U9VL-FP)	V	9
External plug-in power unit (see included accessories)	V/%	12/±5
Current consumption	without sensor with Piezotron sensor	mA ≈50 ≈52
Battery life (9 V Lithium battery)	(@50 mA)	h ≈12

Display

LCD graphic display, reflective, green/blue, 6 o'clock	dots	128×64
Number of significant places for measurand display	digits	4

Key pad

Membrane key pad	buttons	10
------------------	---------	----

General data

Operating temperature range	°C	0 ... 50
Min./Max. temperature	°C	0/70
Moisture	RH %	50
Degree of protection EN 60529	IP	50
Dimensions without collision guard (L×W×D)	mm	150×75×35
Dimensions with collision guard (L×W×D)	mm	182,5×92×45
Weight	g	≈500
Automatic shut off (can be deactivated)	min	2
"Battery Low" warning at	V	<7
Real-time clock for date/time	YY.MM.DD	Real-time clock for date/time
Stored energy-time support capacitor for internal clock (no backup battery for battery change)	min	10
Program update via RS-232C (Flash Loader)	-	
Remote control via RS-232C: recall of the display value by commands	-	"V" = (2 decimal places without unit), ":72" (3 decimal places with unit) (see command set)
Number of data records storable	Data records ¹	2x20
Data record consisting of: 1/min, p _{max} , p _{min} , p _{av} , s _{dev} , (dp/dca) max, signal waveform averaged, Data, Time		

Βιβλιογραφία

1. Κ. Δ. ΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ
Αρχές Εμβολοφόρων Μηχανών Εσωτερικής Καύσης
Εκδόσεις «Γρηγ. Χρ. Φούντας», Αθήνα, 1988
2. Κ. Δ. ΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ και Δ. Θ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ
Καύση – Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.
Εκδόσεις «Γρηγ. Χρ. Φούντας», Αθήνα, 1998
3. Κ. Δ. ΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ και Ε. Γ. Γιακουμής
Εναλλαγή Αερίων και Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.
Εκδόσεις «Γρηγ. Χρ. Φούντας», Αθήνα, 2011
4. Ν. Π. ΚΥΡΤΑΤΟΣ
Ναυτικοί Κινητήρες Diesel
Εκδόσεις «Συμμετρία», Αθήνα, 1993
5. Λ. Χ. ΚΛΙΑΝΗ, Ι. Κ. ΝΙΚΟΛΟΥ και Ι. Α. ΣΙΔΕΡΗ
Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως – Τόμος Πρώτος
Ίδρυμα Ευγενίδου | Βιβλιοθήκη του Ναυτικού, Αθήνα, 2002
6. Α. Ν. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ
Ανάπτυξη και Εξέλιξη Τεχνικών Μέτρησης και Επεξεργασίας Λειτουργικών Μεγεθών που Αφορούν στην Πίεση Καύσης και στον Άξονα Μετάδοσης της Ισχύος με Σκοπό τη Διάγνωση – Διδακτορική Διατριβή
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013
7. Ι. ΜΑΡΓΑΡΩΝΗΣ
Συστήματα Διάγνωσης Λειτουργίας σε Ναυτικούς Κινητήρες Diesel – Διδακτορική Διατριβή
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1987
8. Ι. ΓΡΑΒΑΛΟΣ, Ζ. ΤΣΙΡΟΠΟΥΛΟΣ, Θ. ΓΙΑΛΑΜΑΣ, Δ. ΚΑΤΕΡΗΣ & Π. ΞΥΡΑΔΑΚΗΣ
ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας,
Τμήμα Μηχανικής Βιοσυστημάτων, 2009

9. Μ. ΦΟΥΝΤΗ
Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005
10. Θ. Π. ΚΟΥΚΟΡΑΒΑΣ
Αξιολόγηση Νέας Μεθοδολογίας για την Επίδραση Διακύμανσης Φορτίου στην Πίεση Καύσης Κινητήρων Diesel , διπλωματική εργασία
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013
11. **ΤΡΙΜΗΝΙΑΙΑ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΣΧΗΣ ΑΡΧΙΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Ε.Ν.**
Τεύχος Νο. 38 , Πειραιάς, 2000
12. D. WOODYARD
Pounders Marine Diesel Engines and Gas Turbines , ninth edition
Εκδόσεις “Butterworth-Heinemann” , 2009
13. A. F. MOLLAND
The Maritime Engineering Reference Book: A Guide to Ship Design, Construction and Operation
Εκδόσεις “Butterworth-Heinemann” , 2008
14. C. F. TAYLOR
The Internal Combustion Engine in Theory and Practice, Volume 2: Combustion, Fuels, Materials, Design – Revised Edition
MIT Press, 1985
15. D. T. HOUNTALAS & D. A. KOUREMENOS
A Diagnostic Method for Heavy-Duty Engines Used in Stationary Applications
Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.126 , October 2004
16. A. V. BUENO¹, J. A. VELASQUEZ² & L. F. MILANEZ³
Internal Combustion Engine Indicating Measurements
¹Federal University of Ceara, UFC,
²Federal University of Technology - Parana, UTFPR,
³University of Campinas, UNICAMP,
Brazil
17. S. POLANOWSKI, R. PAWLETKO
LOW SPEED MARINE DIESEL ENGINE DIAGNOSIS BASED ON PASSIVE EXPERIMENT
Journal of Polish CIMAC, Gdansk University of Technology, The Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology

18. T. BORKOWSKI¹, P. KOWALAK¹ – M. MARCINEK², M. BONISÁAWSKI²

COMBUSTION PRESSURE APPRAISAL IN MARINE DIESEL ENGINE

¹Maritime University of Szczecin – ²West-Pomeranian University of Technology, Poland, 2011

Χρησίμευσαν επίσης ως πηγές και οι διαδικτυακοί τόποι:

- www.mandieselturbo.com
- www.man.eu
- turbocharger.man.eu
- www.wartsila.com
- en.wikipedia.org
- www.woodward.com
- www.daytronic.com
- www.fairbanks-morse.com
- www.kistler.com
- www.lme.ntua.gr