

7. Μέτρηση κατανάλωσης αέρα Εμβολοφόρων Κινητήρων

Προαπαιτούμενες γνώσεις:

- (α) Βασικές θεωρητικές γνώσεις Μηχανικής των Ρευστών (αρχή Bernoulli, ροή σε σωλήνα Ventouri, αρχή λειτουργίας μανόμετρου).
- (β) Βασικές θεωρητικές γνώσεις για τη λειτουργία Μ.Ε.Κ.

Σκοπός της Άσκησης:

Η εξοικείωση του σπουδαστή με τη μέτρηση παροχής μάζας αναρροφώμενου αέρα στην εισαγωγή Εργαστηριακών Εμβολοφόρων Κινητήρων.

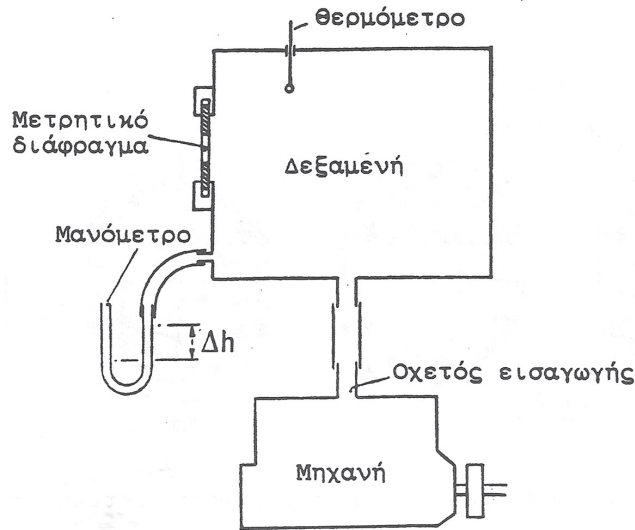
7.1 Μέτρηση Παροχής Αναρροφώμενου Αέρα

Η μέτρηση της παροχής του αναρροφώμενου από την μηχανή αέρα αποτελεί μια από τις πιο αναγκαίες μετρήσεις, ιδιαίτερα κατά το στάδιο εξέλιξης της μηχανής. Η πρώτη δυσκολία αναφέρεται στο ότι ο αέρας μπορεί να διεισδύσει ή να ξεφύγει από τους κυλίνδρους κινητήρων φυσικής αναπνοής ή υπερπληρωμένους αντίστοιχα π.χ. διαμέσου των οδηγών των βαλβίδων. Έτσι η μετρημένη παροχή στην εισαγωγή του κινητήρα δεν είναι κατ' ανάγκη και η εξερχόμενη από την εξαγωγή του. Άρα είναι καλό να γίνεται κάποιος έλεγχος του μετρημένου στην εισαγωγή αέρα με τον υπολογιζόμενο στην εξαγωγή βρίσκοντας τον λόγο αέρα καυσίμου από μετρημένες τιμές του CO_2 ή O_2 στα καυσαέρια και από την μετρημένη τιμή της κατανάλωσης καυσίμου. Ένα άλλο σημείο που χρειάζεται προσοχή είναι ότι ο μετρημένος στην εισαγωγή αέρας δεν είναι συνήθως και ο συγκρατούμενος για καύση στους κυλίνδρους, διότι ένα σημαντικό ποσοστό του διαφεύγει προς την εξαγωγή κατά τη διάρκεια της επικάλυψης των βαλβίδων.

Μια άλλη σημαντική δυσκολία είναι ότι η αναρρόφηση του αέρα στους παλινδρομικούς κινητήρες δεν είναι μια σταθερή διεργασία, αφού διαρκεί περίπου 180° γωνία στροφάλου σε σύνολο 720° του πλήρους κύκλου του τετράχρονου κινητήρα και 120° περίπου σε σύνολο 360° του πλήρους κύκλου του δίχρονου. Έτσι η ροή του αέρα είναι παλμική, συνοδεύεται δηλαδή από κύματα πίεσης, και ως εκ τούτου η ταχύτητα του αέρα δεν είναι σταθερή στους αγωγούς εισαγωγής του κινητήρα. Τα κύματα πίεσης δημιουργούν μη-μονιμότητα στη ροή του αέρα και κατά συνέπεια δυσκολία στη μέτρηση του αναρροφώμενου αέρα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κυλίνδρων και η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα τόσο πιο ομαλή είναι η ροή του αέρα στην εισαγωγή.

Έτσι, όταν γίνεται μέτρηση της παροχής του αέρα στην εισαγωγή του κινητήρα με την βοήθεια ροόμετρων που από την φύση τους μετρούν μόνιμες ροές, είναι απαραίτητο να υπάρχει και μια μεγάλη δεξαμενή απόσβεσης παλμών ροής που τοποθετείται μεταξύ του μετρητή και της μηχανής. Η δεξαμενή αυτή ονομάζεται και δεξαμενή εφησυχασμού της ροής. (σχήμα 7.1.)

Όλες οι μετρητικές μέθοδοι μετρούν παροχή όγκου, οπότε για την εύρεση της παροχής μάζας του αέρα απαιτείται η γνώση της πυκνότητας του, που υπολογίζεται από την καταστατική εξίσωση των τελείων αερίων.



Σχήμα 7.1 Δεξαμενή και ροόμετρο μετρητικού διαφράγματος.

7.2 Υπολογισμός Παροχής Μάζας Αέρα

Αποτελεί την πιο διαδεδομένη και χαμηλού κόστους μέθοδο μέτρησης της παροχής του αναρροφώμενου αέρα. Ο αέρας προτού μπει στον κινητήρα περνά από ένα τέτοιο ροόμετρο που συνήθως έχει ένα μετρητικό διάφραγμα ή ένα ακροφύσιο ροής ή έναν σωλήνα Venturi. Η μετρημένη πτώση πίεσης κατά μήκος τους αποτελεί μέτρο για τον ρυθμό ροής του αέρα.

Η πτώση πίεσης στο ροόμετρο πρέπει να είναι μικρή για να μην στραγγαλίζεται η ροή του αέρα προς τον κινητήρα. Εφαρμόζοντας την εξίσωση της συνέχειας και του Bernoulli για ασυμπιεστη ροή κατά μήκος της στένωσης, δηλαδή από την διατομή A_1 πριν τη στένωση μέχρι την διατομή A_2 που αντιστοιχεί ακριβώς στην στένωση, έχουμε:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_{ατμ} = σταθ. \Rightarrow A_1 \cdot u_1 = A_2 \cdot u_2 \quad (7.1)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση συνέχειας παίρνουμε για την παροχή μάζας αέρα:

$$\dot{m}_a = C_d \cdot A_2 \cdot P_{atm} \cdot u_2 = C_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho_{atm}} \quad (7.2)$$

όπου

$\Delta P = P_1 - P_2$ είναι η πτώση πίεσης που μετράται κατά μήκος της στένωσης της οποίας η διατομή συμβολίζεται με το γενικό σύμβολο $A_0 = A_2$,

$\rho_{ατμ}$ είναι η πυκνότητα του αέρα και

C_d είναι ο συντελεστής εκροής που αποδίδει την πτώση πίεσης λόγω τριβών.

Αφού η πτώση πίεσης θεωρείται και πρέπει να είναι μικρή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μανόμετρο νερού ή άλλου κατάλληλου υγρού για την μέτρησή της. Σε κατακόρυφο μανόμετρο που περιέχει υγρό με πυκνότητα

ρ_{liq} η πτώση πίεσης υπολογίζεται σαν

$$\Delta P = \rho_{liq} \cdot g \cdot \Delta h$$

με τη διαφορά ύψους του μανόμετρου που περιέχει υγρό ρ_{liq} πυκνότητας και ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$ επιτάχυνση βαρύτητας):

$$\dot{m}_a = C_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \rho_{liq} \cdot \Delta h \cdot \rho_{atm}}$$

Η πιο πάνω υπολογιζόμενη παροχή μάζας είναι σωστή με την προϋπόθεση σταθερής ροής πράγμα που δεν συμβαίνει όμως στις παλινδρομικές μηχανές έτσι πρέπει να χρησιμοποιηθεί σαν αποσβεστήρας ένα μεγάλο δοχείο ή δεξαμενή ώστε να αποσβεστούν τα κύματα πίεσης του αέρα στην μετρητική στένωση. Συνήθως τοποθετείται η δεξαμενή δίπλα και πολύ κοντά στον κινητήρα, ενώ η μετρητική στένωση τοποθετείται στο τοίχωμα της σε τέτοια θέση ώστε να είναι εύκολα ανταλλάξιμη με κάποια άλλης διαμέτρου.

Εάν είναι γνωστή η διάμετρος της στένωσης D_0 μπορεί να υπολογιστεί και ο όγκος V_t της δεξαμενής κάνοντας χρήση του εμπειρικού τύπου του Kastner

$$V_t = \frac{4,57 \cdot 10^6 \cdot D_0^4 \cdot C^2}{\omega_{\min}^2 \cdot z \cdot V_H} \quad \text{σε } m^3 \quad (7.4)$$

Η διάμετρος της στένωσης D_0 υπολογίζεται από την σχέση:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_0}{\pi}} \quad (7.5)$$

όπου

C = σταθερά ίση με 1 για δίχρονο και ίση με 2 για τετράχρονο κινητήρα

z = ο αριθμός κυλίνδρων του κινητήρα

V_H = ο συνολικός όγκος εμβολισμού του κινητήρα (m^3)

ω_{\min} = η ελάχιστη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (rad/sec)

Ο όγκος V_t είναι συνήθως δυο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος του όγκου V_H

Εάν υποθεθεί πρώτα μια μέγιστη μικρή πτώση πίεσης σε αυτήν που αντιστοιχεί στη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής όπως φαίνεται από την σχέση $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60}$, όπου N είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε στροφές ανά λεπτό και $K=2$ για δίχρονο και $K=4$ για τετράχρονο κινητήρα, η παροχή μάζας αέρα γράφεται:

$$\dot{m}_a = p \cdot V_H \cdot \left(\frac{N}{30} K \right) = C_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \rho_{liq} \cdot \Delta h \cdot \rho_{atm}} \quad (7.6)$$

Βασικό μειονέκτημα από την χρήση τέτοιων ροόμετρων οφείλεται στην εξάρτηση παροχής μάζας $\dot{m}_a \sim \sqrt{\Delta p}$ που δείχνει η παραπάνω σχέση, διότι αν λάβουμε υπόψη ότι στους φυσικής αναπνοής κινητήρες Diesel η απαιτούμενη περιοχή μετρήσεως παροχής μάζας κυμαίνεται στο 6:1, στους υπερπληρωμένους στο 20:1 και στους κλασσικούς Otto 30:1, τότε συνεπάγεται ότι η αντίστοιχη πτώση πίεσης κυμαίνεται στο 36:1, στο 400:1 και στο 900:1. Αυτό δημιουργεί προβλήματα, διότι η πτώση πίεσης ΔP στις μεγάλες \dot{m}_a είναι πλέον πολύ μεγάλη και στραγγαλίζεται ο κινητήρας.

Το πρόβλημα αυτό βελτιώνεται κάπως, εάν αντί χρήσεως διαφράγματος που έχει $C_d = 0,6$ γίνει χρήση ακροφυσίου ροής ή σωλήνα Venturi που έχει $C_d = 0,95$, έχει όμως μεγαλύτερο κόστος.

7.3 Περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης

Η πειραματική εγκατάσταση του εργαστηρίου αποτελείται από τα εξής μέρη:

7.3.1 Κινητήρας

Ο κινητήρας είναι Αγγλικής κατασκευής τύπου PETTER PJ2W, τετράχρονος, δίκύλινδρος, υδρόψυκτος πετρελαιοκινητήρας με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Διάμετρος εμβόλου: 3,8125 in (96,8 mm)

Διαδρομή εμβόλου: 4,33 in (110 mm)

Κυβισμός: 1620 cc

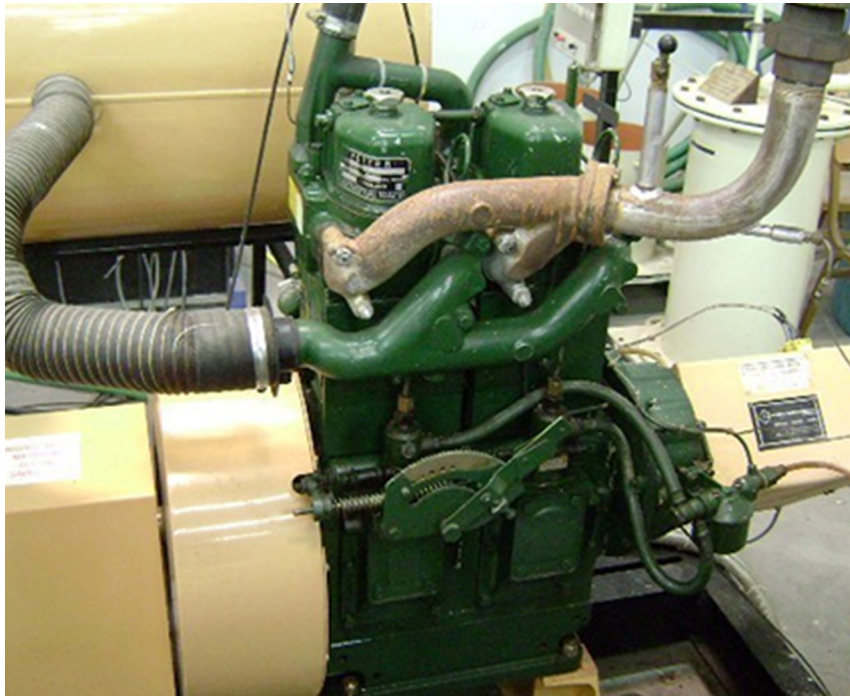
Σχέση Συμπίεσης: 17,5:1

Μέγιστη Ταχύτητα: 2000 rev/min

Χωρητικότητα ανά κύλινδρο: 49,4 in³ (810,1 cm³)

Πίεση Λιπαντικού: 40 lbf / in² (2.81 kgf/cm²)

Πίεση Έγχυσης Καυσίμου: 2850/3150 lbf / in² (200/221 bar)



Σχήμα 7.2 Κινητήρας PETTER.



Σχήμα 7.3 Δυναμόμετρο τύπου DAVID Mc CLURE.

7.3.2 Η Κονσόλα Χειρισμού

Η κονσόλα χειρισμού είναι το κέντρο ελέγχου της εγκατάστασης και μέσω αυτής μπορούμε να ελέγξουμε την λειτουργία του δυναμόμετρου και να καταγράψουμε τις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής σε κάθε χρονική στιγμή.

Η κονσόλα χειρισμού αποτελείται από 8 σημεία ελέγχου:

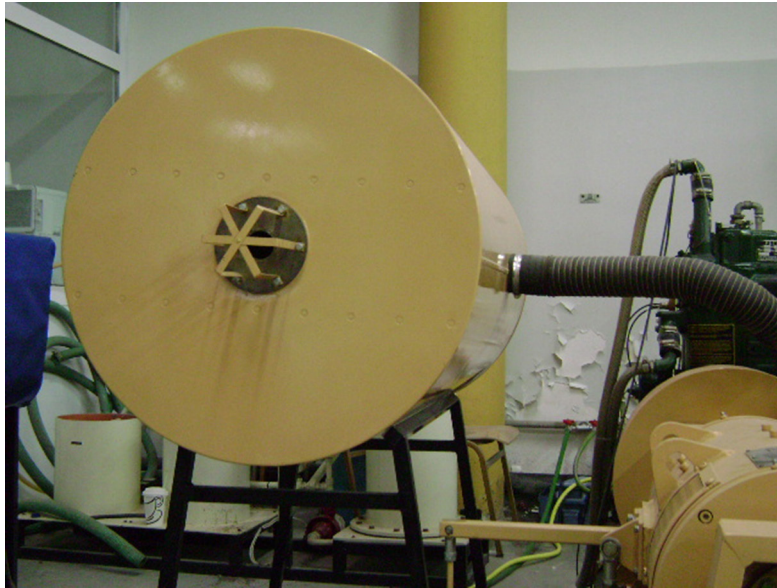
1. **Διακόπτης ON/OFF (MAINS):** Ενεργοποιεί τις παροχές του συστήματος εκτός από το δυναμόμετρο.
2. **Διακόπτης ON/OFF (DYNAMOMETER):** Ενεργοποιεί την παροχή ισχύος στο δυναμόμετρο.
3. **Μεταβλητοί Διακόπτες Λειτουργίας:** Υπάρχουν δύο ποτενσιόμετρα, το “SPEED CONTROL” και το “LOAD CONTROL”, η θέση αυτών των δύο ορίζει αντίστοιχα την «απαιτούμενη ταχύτητα» και το «όριο επαγωγικού ρεύματος» του δυναμόμετρου.
4. **Αναλογικός Μετρητής Ταχύτητας:** Απεικονίζει την ταχύτητα του δυναμόμετρου
5. **Αναλογικός Μετρητής Φορτίου:** Απεικονίζει το μέγεθος και την διεύθυνση του φορτίου.
6. **Απεικονιστής Θερμοκρασίας:** Περιλαμβάνει ψηφιακό απεικονιστή και επιλογή τριών θέσεων. Οι θέσεις υποδηλώνουν:
 - T_1 : Θερμοκρασία καυσαερίων
 - T_2 : Θερμοκρασία νερού εισόδου στο ψυκτικό κύκλωμα της μηχανής
 - T_3 : Θερμοκρασία νερού εξόδου
7. **Ψηφιακός Απεικονιστής Ροπής (TORQUE N·m):** Όργανο της ανάπτυξης της ροπής στρέψης ανάμεσα σε κινητήρα και δυναμόμετρο.
8. **Ψηφιακό Χρονόμετρο (TIMER sec).**



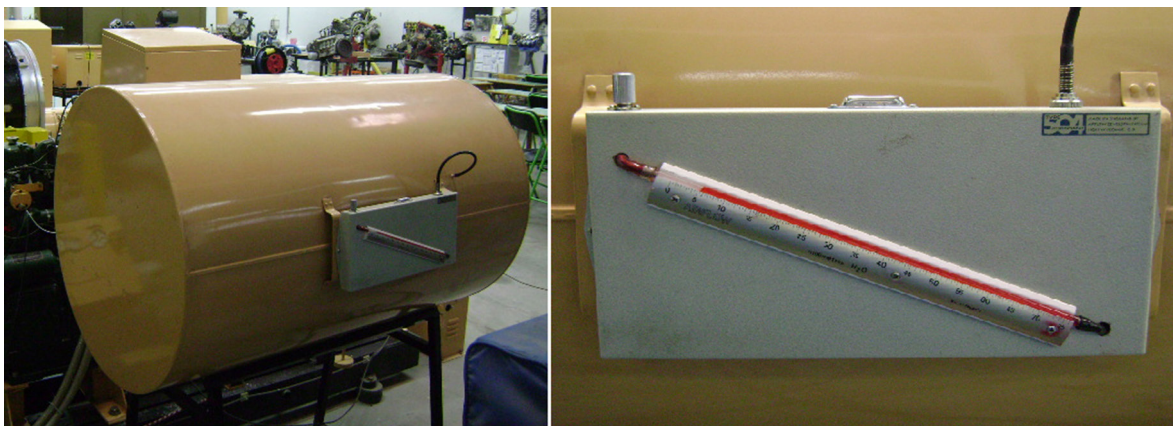
Σχήμα 7.4 Κονσόλα χειρισμού.

7.3.3 Δεξαμενή Εφησυχασμού της ροής (air box)

Η δεξαμενή εφησυχασμού της ροής (air box) που φαίνεται στο σχήμα 7.5, είναι ένας κύλινδρος διαστάσεων διαμέτρου 680mm και μήκους 1070mm. Έχει μια οπή αναρρόφησης (στένωση) διαμέτρου 43,95 mm.



Σχήμα 7.5 Δεξαμενή εφησυχασμού της ροής (air box).



Σχήμα 7.6 Μανόμετρο υγρού συνδεδεμένο με τη δεξαμενή εφησυχασμού της ροής.

Η πτώση πίεσης μετράται με επικλινές μανόμετρο, το οποίο περιέχει υγρό πυκνότητας $\rho_{liq} = 784 \text{ kg/m}^3$, προσαρτημένο στη δεξαμενή εφησυχασμού της ροής, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.6.

7.4 Διαδικασία Εκτέλεσης Πειραμάτων

A) Βήματα για τον έλεγχο της εγκατάστασης

- Γεμίζουμε με πετρέλαιο το μετρητικό δοχείο της εγκατάστασης.
- Ελέγχουμε τα λάδια της μηχανής & αν χρειάζεται συμπληρώνουμε.
- Ελέγχουμε την στάθμη του μανομετρικού υγρού στον θάλαμο εφισυχασμού της ροής (Air Box).
- Ελέγχουμε την στάθμη του νερού ψύξης στο ροόμετρο-φλοτέρ.

B) Εκκίνηση της μηχανής

- Ανοίγουμε τον γενικό διακόπτη (ηλεκτρικός πίνακας).
- Ανοίγουμε τον διακόπτη της κεντρικής κονσόλας ελέγχου (που βρίσκεται πίσω από τη κεντρική κονσόλα).
- Ανοίγουμε την βάνα τροφοδοσίας νερού στο σωλήνα του αισθητήρα πίεσης.
- Ελέγχουμε την κυκλοφορία του νερού μέσω της αντλίας (ρύθμιση στα 17 lit/min).
- Ανοίγουμε τη βάνα πετρελαίου.
- Ανοίγουμε τους διακόπτες, MAINS ON, DYNAMOMETER ON και τον διακόπτη του παλμογράφου.
- Ρυθμίζουμε το γκάζι του κινητήρα (χειροκίνητα) στο μέσο της διαδρομής.
- Ρυθμίζουμε τις στροφές του ηλεκτροκινητήρα (χειροκίνητα), αυξάνουμε τις στροφές (RPM) μέχρι τις 1000-1500 RPM περίπου & μετά το φορτίο του δυναμομέτρου από την κεντρική κονσόλα μέχρι να αρχίσει να περιστρέφεται η μηχανή.
- Απελευθερώνουμε τις βαλβίδες κατεβάζοντας τον μοχλό αποσυμπίεσης.
- Μηδενίζουμε τις στροφές & το φορτίο του δυναμομέτρου (η μηχανή δουλεύει μόνη της).

1. Αρχικές μετρήσεις σε χαμηλές στροφές (ρελαντί).

- Μέτρηση παροχής νερού.
- Μέτρηση Δh του μανομετρικού υγρού στην στένωση της δεξαμενής εφισυχασμού της ροής.
- Χρονομέτρηση κατανάλωσης καυσίμου.

2. Ανεβάζουμε χειροκίνητα για κάθε set μετρήσεων τον μοχλό του γκαζιού (2 σκάλες) για αύξηση των στροφών του κινητήρα.

- Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία μετρήσεων όπως και παραπάνω.

3. Μέτρηση ροπής κινητήρα υπό φορτίο.

- Αφού έχουμε επαναφέρει τις στροφές του κινητήρα στο ρελαντί καταγράφουμε τις στροφές και την ροπή στρέψης της μηχανής με μηδενικό φορτίο.
- Αυξάνουμε το φορτίο του δυναμομέτρου από την κεντρική κονσόλα (π.χ 10 Amp) και τις στροφές του RPM μέχρι το τράνταγμα της μηχανής.
- Περιμένουμε ένα λεπτό μέχρι την σταθεροποίηση των τιμών και παίρνουμε τις μετρήσεις αυτών (ροπή στρέψης, στροφές, φορτίο).
- Μηδενίζουμε το φορτίο & τις στροφές του δυναμομέτρου από την κεντρική κονσόλα.
- Αυξάνουμε το γκάζι χειροκίνητα (2 σκάλες) και καταγράφουμε τις στροφές και την ροπή στρέψης του κινητήρα.
- Αυξάνουμε το φορτίο του δυναμομέτρου από την κεντρική κονσόλα (π.χ ανά 5 Amp) και τις στροφές του RPM μέχρι το τράνταγμα της μηχανής.
- Περιμένουμε ένα λεπτό μέχρι την σταθεροποίηση των τιμών και παίρνουμε τις μετρήσεις αυτών (ροπή στρέψης, στροφές, φορτίο).
- Μηδενίζουμε το φορτίο & τις στροφές του δυναμομέτρου από την κεντρική κονσόλα.
- Αυξάνουμε το γκάζι χειροκίνητα άλλες 2 σκάλες και εργαζόμαστε όπως παραπάνω.

Γ) Διαδικασία διακοπής λειτουργίας πετρελαιοκινητήρα

- Λειτουργούμε την μηχανή σε χαμηλές στροφές (ρελαντί).
- Μειώνουμε τον αριθμό των στροφών και παράλληλα χαμηλώνουμε το γκάζι μέχρι τέλους και ανεβάζουμε τον μοχλό των βαλβίδων αποσυμπίεσης.
- Κλείνουμε τους διακόπτες MAINS OFF, DYNAMOMETER OFF και τον παλμογράφο.
- Κλείνουμε τον διακόπτη της κεντρικής κονσόλας ελέγχου.

- Κλείνουμε τις βάνες τροφοδοσίας νερού του αισθητήρα πίεσης.
- Κλείνουμε τις βάνες τροφοδοσίας καυσίμου.
- Κλείνουμε τον γενικό διακόπτη (πίνακας).

ΦΥΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

	A	B	Γ	Δ	E	ΣΤ
<i>Στροφές λειτουργίας N (rpm)</i>						
<i>Πτώση πίεσης στη στενύωση Δh (mm)</i>						
<i>Παροχή μάζας αέρα \dot{m}_a (Kg/s)</i>						

7.5 Βιβλιογραφία

1. Ganesan, V., “*Internal Combustion Engines*”, McGraw-Hill, 3rd edition, 2011.
2. Heywood, J.B., “*Internal Combustion Engine Fundamentals*”, McGraw-Hill, 1988.
3. Stone R., “*Introduction to Internal Combustion Engines*”, MacMillan, 3rd edition, 1999.
4. Taylor C.F., “*The internal Combustion Engine in Theory and Practice*”, Vol. 1, Vol. 2, 2nd edition, MIT Press, 1985.
5. Ρακόπουλος Κ.Δ., “*Εργαστηριακές Δοκιμές και Μετρήσεις Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.*”, Εκδόσεις Φούντας, 1994.
6. Φατσής, Α., “*Θερμικές Εμβολοφόρες Μηχανές*”, Εκδόσεις Πατάκη, 2011.

Ασκήσεις – Κριτήρια Αξιολόγησης

1. Για κάθε ένα από τα σετ μετρήσεων (που αντιστοιχεί και σε διαφορετικό αριθμό στροφών του κινητήρα) συμπληρώστε τον παραπάνω πίνακα μετρήσεων και υπολογίστε στη τρίτη γραμμή του φύλλου μετρήσεων τη παροχή μάζας αέρα σε Kg/s για τα έξι διαφορετικά σημεία λειτουργίας.
2. Να κάνετε τη γραφική παράσταση: Παροχή μάζας αέρα \dot{m}_a σε συνάρτηση με τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (rpm).