

Ο Νόμος 2121/1993 κατοχυρώνει την πνευματική ιδιοκτησία και απαγορεύει την αναπαραγωγή με κάθε τρόπο, καθώς και την αναδημοσίευση, ακόμα και τμήματος του έργου αυτού χωρίς την έγγραφη άδεια των συγγραφέων.

ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ Μ.Ε.Κ.

Κ.Δ. Ρακόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Ε.Γ. Γιακουμής, Επίκ. Καθηγητής ΕΜΠ

Copyright•

Το βιβλίο αυτό εκδόθηκε στην Αθήνα, Ελλάδα. Όλα τα δικαιώματα διατηρούνται. Απαγορεύεται η ανατύπωση, αναδημοσίευση ή αντιγραφή μέρους ή όλου του βιβλίου, η αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, η μετάδοση με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας (ηλεκτρονικό, μηχανικό, φωτογραφικό, φωτοαντιγραφικό, κλπ), χωρίς τη νόμιμη εκχώρηση έγγραφης άδειας από τους συγγραφείς.

Η φωτογραφία στο εξώφυλλο απεικονίζει τη ροή του αερίου στο σύστημα διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης (regulated two-stage turbocharging, R2S) της BorgWarner, και αναδημοσιεύεται κατόπιν άδειας.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το μάθημα «Εναλλαγή Αερίων και Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.» έχει από το 2006 εισαχθεί και διδάσκεται στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Το μάθημα αυτό «έπεται» χρονικώς της διδασκαλίας των μαθημάτων «Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως Ι» και «Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως ΙΙ», που διδάσκονται από μερικών ήδη δεκαετιών στη Σχολή Μηχανολόγων του Ε.Μ.Π., γεγονός που φανερώνει ότι πρόκειται για μάθημα προωθημένων γνώσεων στην περιοχή των Μ.Ε.Κ., γι' αυτό και έχει εισαχθεί ως μάθημα «υποχρεωτικό κατ' επιλογήν» στο 8ο εξάμηνο.

Η συγγραφή του βιβλίου αυτού, με όμοιο τίτλο «Εναλλαγή Αερίων και Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.», έγινε με τη «φιλοσοφία» της παροχής μίας συστηματικής, βαθιάς και επιστημονικής σειράς γνώσεων αντιμετώπισης των πολύ σημαντικών και ενδιαφερόντων θεμάτων των διεργασιών της Ροής των Αερίων και της Υπερπλήρωσης στις εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ., οι οποίες μέχρι προ ολίγων ετών αντιμετωπίζονταν κατά μάλλον εμπειρικό τρόπο. Το μάθημα αυτό «προηγείται» του μαθήματος «Καύση – Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.» που διδάσκεται στο 9ο εξάμηνο, ως «υποχρεωτικό κατ' επιλογήν», στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., αποτελώντας ένα χρησιμότερο «όπλο» για την καλύτερη κατανόηση των διεργασιών της Καύσης και σχηματισμού Ρύπων στις εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ..

Επειδή ακριβώς το παρόν μάθημα είναι «προωθημένο», είναι απαραίτητη η προηγούμενη παρακολούθηση ιδιαίτερα του μαθήματος «Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως Ι» και η αντίστοιχη μελέτη των δύο σχετικών βιβλίων (Εκδ. Οίκος «Γρηγ. Φούντας»), του πρώτου των συγγραφέων,

- α) «ΑΡΧΕΣ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ Μ.Ε.Κ.», και
- β) «ΑΡΧΕΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ»,
καθώς και του βιβλίου του ίδιου συγγραφέα,

γ) «Μ.Ε.Κ. ΙΙ - ΕΜΒΑΘΥΝΣΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ», του ιδίου Εκδ. οίκου, στα οποία και γίνεται αναφορά σε ορισμένα σημεία του παρόντος βιβλίου.

Ένα τέτοιο βιβλίο, που να αντιμετωπίζει δηλαδή συστηματικά και επιστημονικά το θέμα της Ροής των Αερίων και Υπερπλήρωσης στις εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ., δεν υφίσταται στην ελληνική βιβλιογραφία, οπότε τέθηκε και το πρόβλημα της μετάφρασης ορισμένων νέων τεχνικών όρων. Θεωρήθηκε σκόπιμη η παράθεση στα Αγγλικά των κυριότερων σχετικών όρων, όταν συναντώνται για πρώτη φορά στο κείμενο.

Το βιβλίο χωρίζεται σε δύο μεγάλα Μέρη. Το Α΄ ΜΕΡΟΣ ασχολείται με την Εναλλαγή των Αερίων, (Κεφάλαια 1-6), ενώ το Β΄ ΜΕΡΟΣ ασχολείται με την Υπερπλήρωση (Κεφάλαια 7-17). Υπάρχουν επίσης και τέσσερα Παραρτήματα που αναφέρονται στο Α΄ ΜΕΡΟΣ.

Οι συγγραφείς οφείλουν να αναγνωρίσουν ότι η ύλη του βιβλίου, για διδασκαλία ενός εξαμήνου, είναι μάλλον εκτεταμένη. Έτσι, για την πλήρη κάλυψή της, θα μπορούσε κατ' αρχήν να «παραληφθεί» η διδασκαλία ορισμένων παραγράφων Κεφαλαίων, όπως το 5 και το 17, και να αφεθεί αυτή για ατομική μελέτη από τον, «ώριμο» ήδη, μελετητή αυτού του βιβλίου.

Από τα προηγουμένως αναφερόμενα γίνεται φανερό ότι το βιβλίο αυτό αποτελεί σήμερα απαραίτητο βοήθημα για τους φοιτητές Μηχανολόγους του Ε.Μ.Π. Γενικότερα επίσης μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό βοήθημα για τους σπουδαστές των Α.Ε.Ι. και Τ.Ε.Ι., τους ερευνητές που ασχολούνται με τις εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ., καθώς και τους μηχανικούς στην πράξη που θέλουν να ενημερωθούν και να εμπλουτίσουν την εμπειρία τους στην ενδιαφέρουσα αυτή περιοχή.

Τέλος, ευχαριστούμε τις εταιρείες που έδωσαν άδεια για την αναδημοσίευση φωτογραφιών κινητήρων ή/και υπερπληρωτών τους, οι οποίες και μνημονεύονται στα εκάστοτε σχήματα.

Αθήνα, Μάρτιος 2011

Κ.Δ. ΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, Καθηγητής
Ε.Γ. ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ, Επίκ. Καθηγητής
Εργαστήριο Μηχανών Εσωτερικής Καύσης
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. K. ZINNER
Supercharging of Internal Combustion Engines
Springer-Verlag, Berlin, 1978.
2. N. WATSON and M. S. JANOTA
Turbocharging the Internal Combustion Engine
Macmillan Press, London, 1982.
3. J. B. HEYWOOD
Internal Combustion Engine Fundamentals
McGraw-Hill, New York, 1988.
4. C. R. STONE
Introduction to Internal Combustion Engines
3rd edition, Macmillan Press, London, 1999.
5. A. KOWALEVICZ
Combustion Systems of High-Speed Piston I.C. Engines
Elsevier, Amsterdam, 1984.
6. V. L. MALEEV
Internal-Combustion Engines
2nd edition, McGraw-Hill, New York, 1985.
7. R. S. BENSON and N. D. WHITEHOUSE
Internal Combustion Engines
Pergamon Press, 1979.
8. C. R. FERGUSON
Internal Combustion Engines
John Wiley and Sons, New York, 1986.

9. C. F. TAYLOR
The Internal Combustion Engine in Theory and Practice, Vol. I & II
MIT Press, Cambridge MA, 1966 & 1968
10. L. R. C. LILLY
Diesel Engine Reference Book
Butterworths, London, 1984.
11. J. B. HEYWOOD and E. SHER
The Two-Stroke Cycle Engine: Its Development, Operation, and Design
Taylor and Francis, 1999.
12. W. W. PULKRABEK
Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine (2nd Edition)
Pearson Prentice-Hall, New Jersey, 2004.
13. E. F. OBERT
Internal Combustion Engines and Air Pollution
Intext Educational Publ., Michigan, 1972.
14. Κ. Δ. ΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ
Αρχές Εμβολοφόρων Μηχανών Εσωτερικής Καύσεως
Εκδόσεις “Γρηγ. Φούντας”, Αθήνα, 1988.
15. Κ. Δ. ΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ
Μ.Ε.Κ. ΙΙ - Εμβάθυνση στην Κατασκευή και Λειτουργία
Εκδόσεις “Γρηγ. Φούντας”, Αθήνα, 2000.
16. C. D. RAKOPOULOS, E. G. GIAKOUIMIS
Diesel Engine Transient Operation
Springer-Verlag, London, 2009.
17. Ε. Γ. ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ
Μεταβατική Κατάσταση Λειτουργίας Κινητήρων Diesel
Διδακτορική Διατριβή (Επιβλέπων Καθηγητής: Κ. Δ. Ρακόπουλος),
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, 1997.
18. C. D. RAKOPOULOS, E. G. GIAKOUIMIS
Review of Thermodynamic Diesel Engine Simulations under Transient Operating Conditions
SAE Paper No. 2006-01-0884, SAE Transactions, Journal of Engines, Vol. 115,
Section 3, pp. 467-504, 2006.

19.Γ. ΚΟΣΜΑΔΑΚΗΣ

Μελέτη Ροής Αερίων Διαμέσου των Βαλβίδων και Θυρίδων Εισαγωγής και Εξαγωγής σε Εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ.

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία (Επιβλέπων Καθηγητής: Κ. Δ. Ρακόπουλος),

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., 2004.

20.Θ. ΔΗΜΑΡΑΤΟΣ

Παραμετρική Ανάλυση Κύκλου Otto με Ροή Αερίων και Υπερπλήρωση

Διπλωματική Εργασία (Επιβλέπων Καθηγητής: Κ. Δ. Ρακόπουλος),

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., 2005.

21.Κ. Δ. ΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Αρχές Βιομηχανικών Αεριοστροβίλων

Εκδόσεις “Γρηγ. Φούντας”, Αθήνα, 1990.

22.Κ. Δ. ΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ και Δ. Θ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ

Καύση – Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.

Αθήνα, 1998.

23.Κ. Δ. ΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Εργαστηριακές Δοκιμές και Μετρήσεις Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.

Εκδόσεις “Γρηγ. Φούντας”, Αθήνα, 1994.

24. Διάφοροι διαδικτυακοί τόποι, όπως:

www.borgwarner.com,

www.abb.com,

www.manbw.com,

www.honeywell.com, κλπ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

A' ΜΕΡΟΣ - ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΑΕΡΙΩΝ	13
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ	14
2. ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΑΕΡΙΩΝ ΣΕ 4-Χ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	23
2.1 Γενικές αρχές - Χαρακτηριστικά εναλλαγής αερίων	23
2.2 Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης	30
2.2.1 Ημι-στατικά (quasi-static) φαινόμενα	32
2.2.2 Συνδυασμός ημι-στατικών και δυναμικών μεγεθών	37
2.2.3 Εξάρτηση του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης από την ταχύτητα περιστροφής, την επιφάνεια, ανύψωση και χρονισμό των βαλβίδων	42
2.3 Ροή διαμέσου των βαλβίδων	46
2.3.1 Γενικά	46
2.3.2 Ανύψωση βαλβίδας και επιφάνεια ροής διαμέσου αυτής	49
2.3.3 Ροή και συντελεστές αυτής	54
2.3.4 Συστήματα μεταβλητού χρονισμού και ανύψωσης βαλβίδων και επίδραση του τύπου του εκκέντρου	62
2.4 Κατάλοιπο καυσαέριο κατά τη συμπίεση	66
3. ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΑΕΡΙΩΝ ΣΕ 2-Χ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	69
3.1 Γενικά	69
3.2 Βαθμοί απόδοσης και μοντέλα απόπλυσης	76
3.2.1 Μοντέλο τέλει εκτόπισης	78
3.2.2 Μοντέλο πλήρους ανάμιξης	79
3.3 Πραγματικές διαδικασίες απόπλυσης	81
3.4 Μελέτη της ροής διαμέσου των θυρίδων	82

3.4.1 Γενικά	82
3.4.2 Παροχή μάζας διαμέσου των θυρίδων	87
4. ΡΟΗ ΣΤΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗΣ	92
4.1 Ροή του αέρα διαμέσου της ρυθμιστικής δικλείδας.....	92
4.2 Ροή του αέρα στην πολλαπλή εισαγωγής και εξαγωγής	99
4.2.1 Γενικά	99
4.2.2 Ροή του αέρα στους οχετούς εισαγωγής	101
4.2.3 Μοντέλα προσομοίωσης λειτουργίας της πολλαπλής εισαγωγής	104
4.2.4 Βελτιστοποίηση εισαγωγής μέσω μεθόδων ακουστικής - Αντηχεία	107
4.3 Πολλαπλή εξαγωγής - Αποσιωπητήρες	111
5. ΑΡΧΕΣ ΤΥΡΒΗΣ ΣΕ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΣ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ Μ.Ε.Κ.	114
5.1 Γενικές αρχές τυρβώδους ροής	114
5.1.1 Βασικές έννοιες και εξισώσεις τυρβώδους ροής.....	114
5.1.2 Μικροδίνες	117
5.2 Εφαρμογή των σχέσεων της τύρβης στο πεδίο ταχυτήτων εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.....	122
6. ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ	128
6.1 Αξονική ταχύτητα εντός της κοιλότητας εμβόλου	128
6.2 Συστροφή	131
6.2.1 Συστροφή σε 4-Χ κινητήρες	134
6.2.2 Συστροφή σε 2-Χ κινητήρες	152
6.3 Ακτινική περιστροφή ή σύνθλιψη (squish).....	155
6.3.1 Θάλαμος καύσης κοιλότητας εμβόλου.....	156
6.3.2 Σφηνοειδής θάλαμος καύσης	161
6.4 Ροή αερίων σε διμερή θάλαμο καύσης (έμμεσης έγχυσης)	163
6.4.1 Γενικά	163
6.4.2 Απλό μοντέλο ροής.....	166
6.4.3 Συστροφή εντός του στροβιλοθαλάμου	171
Β' ΜΕΡΟΣ - ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ Μ.Ε.Κ.....	173
7. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ.....	174
8. ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ	179
8.1 Ορισμός υπερπλήρωσης.....	179

8.2	Επισκόπηση των μεθόδων υπερπλήρωσης	184
8.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης.....	190
8.4	Ιστορική αναδρομή και εφαρμογές της υπερπλήρωσης	190
8.5	Βασικές αρχές στροβιλο-υπερπλήρωσης	197
8.5.1	Γενικά	197
8.5.2	Βασικές σχέσεις θερμοδυναμικής.....	202
8.5.3	Διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση	205
8.5.4	Ορισμένα κατασκευαστικά θέματα	208
9.	ΕΝΔΙΑΜΕΣΗ ΨΥΞΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ.....	210
9.1	Βασικές αρχές	210
9.2	Σχεδιασμός των ψυγείων του αέρα υπερπλήρωσης	218
9.3	Ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης και επιδόσεις του κινητήρα.....	219
10.	ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ.....	225
10.1	Βασικές αρχές επιλογής συμπιεστή	225
10.2	Τύποι Συμπιεστών.....	228
10.2.1	Συμπιεστές εκτόπισης.....	229
10.2.2	Συμπιεστές δυναμικής ροής	234
10.2.3	Συμπιεστές κυμάτων πίεσης	242
11.	ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ	245
11.1	Ακινικός στρόβιλος.....	246
11.2	Αξονικός στρόβιλος	251
11.3	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου.....	254
12.	Ο ΧΑΡΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	256
12.1	2-Χ κινητήρες.....	258
12.2	4-Χ κινητήρες.....	260
13.	ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ (ΤΑΙΡΙΑΣΜΑ) ΜΕΤΑΞΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ.....	263
13.1	Εισαγωγή	263
13.2	Ταίριασμα κινητήρα με μηχανικό υπερπληρωτή	264
13.3	Ταίριασμα κινητήρα με στροβιλο-υπερπληρωτή	269
13.3.1	Γενικά	269
13.3.2	Ενεργειακό ισοζύγιο ατράκτου στροβιλο-υπερπληρωτή.....	269

13.3.3 Διαφορές στη λειτουργία μεταξύ του στροβιλο-υπερπληρωμένου και του μηχανικά υπερπληρωμένου κινητήρα	272
13.3.4 4-Χ κινητήρες	273
13.3.5 2-Χ κινητήρες	278
13.3.6 Μία διαδικασία ταιριάσματος κινητήρα με στροβιλο-υπερπληρωτή	280
14. ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΟΤΤΟ	283
15. ΙΔΙΑΙΤΕΡΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ	291
15.1 Η επίδραση της πολλαπλής εξαγωγής.....	291
15.1.1 Διάταξη της πολλαπλής εξαγωγής του κινητήρα για διάφορους αριθμούς κυλίνδρων και διαστήματα ανάφλεξης.....	291
15.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της στροβιλο-υπερπλήρωσης σταθερής πίεσης και με παλμούς πίεσης	296
15.2 Χαρακτηριστικά ροπής των κινητήρων με στροβιλο-υπερπλήρωση.....	299
15.3 Η επίδραση της υπερπλήρωσης στις εκπομπές καυσαερίων.....	304
15.3.1 Κινητήρες Diesel	304
15.3.2 Κινητήρες Otto	306
15.4 Η επίδραση της υπερπλήρωσης στη μηχανική και στη θερμική φόρτιση του κινητήρα..	308
15.4.1 Μηχανική φόρτιση.....	308
15.4.2 Θερμική φόρτιση.....	310
15.5 Η στροβιλο-υπερπλήρωση ως μέσο αύξησης της απόδοσης.....	312
16. ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	316
16.1 Γενικά	316
16.2 Μέθοδοι βελτίωσης της επιτάχυνσης κινητήρων με στροβιλο-υπερπλήρωση	322
16.3 Λειτουργία του συμπιεστή στην ασταθή περιοχή	336
17. ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ.....	339
17.1 Στροβιλοψύξη (Turbo-cooling)	339
17.1.1 Εφαρμογή σε 4-Χ κινητήρες Diesel	339
17.1.2 Εφαρμογή σε κινητήρες αερίων καυσίμων	341
17.2 Υπερπλήρωση κατά Miller	343
17.2.1 Εφαρμογή σε 4-Χ κινητήρες Diesel	345
17.2.2 Εφαρμογή σε κινητήρες αερίων καυσίμων	347
17.3 Στροβιλο-υπερπλήρωση Hyperbar	349

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	352
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 0. Σχεδίαση του εκκέντρου και στοιχεία κινηματικής του μηχανισμού των βαλβίδων.....	353
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'. Επιφάνεια ροής διαμέσου της ρυθμιστικής δικλείδας κινητήρα Otto.....	357
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β'. Αποδείξεις εκφράσεων της συστροφής για διάφορους τύπους αγωγών εισαγωγής	360
1. Έκφραση της συστροφής σε εφαπτομενικό αγωγό.....	360
2. Έκφραση της συστροφής σε ελικοειδή αγωγό	362
3. Έκφραση της συστροφής στην κοιλότητα εμβόλου.....	363
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ'. Εξιιώσεις αναλυτικού μοντέλου ροής διμερούς θαλάμου καύσης.....	365
ΠΙΝΑΚΕΣ	371

Α' ΜΕΡΟΣ

ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΑΕΡΙΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

Το Α' Μέρος του παρόντος βιβλίου διαπραγματεύεται το θέμα της ροής των αερίων στους κυλίνδρους εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. Η ροή των αερίων αποτελείται από το κομμάτι της εναλλαγής των αερίων διαμέσου βαλβίδων (Κεφάλαιο 2) ή θυρίδων (Κεφάλαιο 3) καθώς και από τη διατεταγμένη κίνηση εντός του κυλίνδρου (Κεφάλαιο 6) ως αποτέλεσμα της διαδικασίας εισαγωγής. Ο σκοπός της εναλλαγής των αερίων είναι να απομακρυνθούν τα καυσαέρια και να εισέλθουν τα νέα αέρια (αέρας, ή μίγμα αέρα με ατμούς καυσίμου), για να πραγματοποιηθεί ο επόμενος κύκλος λειτουργίας. Επιθυμητό είναι να εισέλθει όσο το δυνατόν περισσότερη μάζα αέρα, ώστε να παραχθεί περισσότερη ισχύς¹, αφού αυτή είναι, γενικά, ανάλογη της μάζας του αέρα.

Για το λόγο αυτό, η μέγιστη (ενδεικνύμενη) ισχύς είναι διαθέσιμη κατά τη λειτουργία σε πλήρες φορτίο, όταν δηλαδή η ρυθμιστική ή στραγγαλιστική δικλείδα (Κεφάλαιο 4) είναι πλήρως ανοικτή σε κινητήρες Otto ή όταν εγχύεται η μέγιστη παροχή καυσίμου σε κινητήρες Diesel. Μερικά μεγέθη που είναι αντιπροσωπευτικά της εναλλαγής των

¹ Το θέμα αυτό σχετίζεται άμεσα και με την έννοια της υπερπλήρωσης, η οποία θα αναλυθεί στο Β' Μέρος, Κεφάλαια 7-17.

αερίων είναι ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης, ο βαθμός πανίδευσης και, ειδικότερα σε δίχρονους κινητήρες, και ο βαθμός σάρωσης. Αυτά τα μεγέθη εξαρτώνται από τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, όπως η γεωμετρία και η διάταξη των αγωγών ή οχετών εισαγωγής (Κεφάλαιο 4), ο τύπος και ο ρυθμός ανοίγματος των βαλβίδων ή θυρίδων, και από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του.

Ένας άλλος σκοπός της εναλλαγής των αερίων, σε κινητήρες Otto, είναι και η όσο το δυνατόν καλύτερη προετοιμασία του εργαζόμενου μέσου, δηλαδή η βέλτιστη ανάμιξη αέρα και ατμών βενζίνης¹. Καλή ανάμιξη θεωρείται όταν υπάρχει η ιδανική αναλογία των διαφόρων αερίων και επίσης η ομοιόμορφη διασπορά τους και όμοια κατανομή τους στους κυλίνδρους.

Μία άλλη σημαντική παράμετρος της διαδικασίας εναλλαγής των αερίων είναι η δημιουργία του κατάλληλου πεδίου ροής μέσα στον κύλινδρο (Κεφάλαιο 6), ώστε οι συνθήκες συμπίεσης και καύσης να είναι οι ιδανικότερες. Χαρακτηριστικά αυτού του πεδίου ροής είναι η τυρβώδης συμπεριφορά του αερίου καθώς και η διατεταγμένη κίνησή του, π.χ. περιστροφή γύρω από τον άξονα του κυλίνδρου (συστροφή).

Στην ανάλυση των επομένων κεφαλαίων θα χρησιμοποιήσουμε διάφορα στοιχειώσες σχέσεις από τη γεωμετρία του κινηματικού μηχανισμού εμβόλου-διωστήρα-στροφάλου. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται, γραφικά, παράσταση αυτού του κινηματικού μηχανισμού με έμβολο τύπου κοιλότητας, που αποτελεί και τη συνηθέστερη περίπτωση σε άμεσης έγχυσης κινητήρες Diesel, και με απεικόνιση των σχετικών διαστάσεων, όγκων και της αντιστοιχίας σε μοίρες γωνίας στροφάλου.

Στο 2-Χ κινητήρα οι διεργασίες ολοκληρώνονται σε μία πλήρη περιστροφή του στροφάλου (=360°) ενώ στον 4-Χ σε δύο περιστροφές (=720°). Για λειτουργία, π.χ. στις 1200 rpm, ένας κύκλος λειτουργίας 4-Χ κινητήρα διαρκεί 100 ms ενώ του 2-Χ κινητήρα διαρκεί 50 ms. Αντίστοιχα, με την αύξηση/μείωση των στροφών μειώνεται/αυξάνεται και ο διαθέσιμος χρόνος ανά κύκλο λειτουργίας βάσει της σχέσης

$$t_{\text{κυλ}} = \frac{180 \cdot K}{6n} \quad (1.1)$$

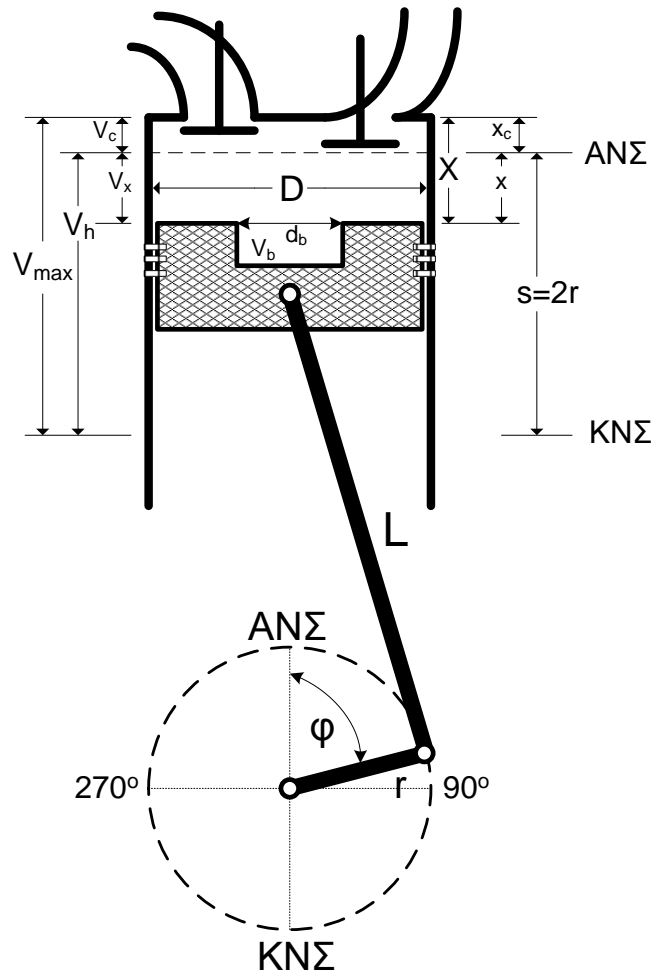
όπου n σε rpm και $K=2$ για 2-Χ ή $K=4$ για 4-Χ. Έτσι, για κινητήρα Otto στις 5000 rpm ένας κύκλος 4-Χ κινητήρα διαρκεί 0,024 s ή σε ένα δευτερόλεπτο ολοκληρώνονται σχεδόν 42 κύκλοι, ή 84 για 2-Χ κινητήρα.

¹ Σε βενζινοκινητήρες το αναρροφώμενο αέριο είναι μίγμα βενζίνης και αέρα και πιθανόν ανακυκλοφορούμενο καυσαέριο στην περίπτωση που θέλουμε να περιορίσουμε τα οξειδία του αζώτου.

Σε κάθε χρονική στιγμή, ο διαθέσιμος όγκος που καταλαμβάνει το αέριο είναι

$$V = V_x + V_c + V_b \quad (1.2)$$

όπου V_b είναι ο όγκος της κοιλότητας (bowl-in) του εμβόλου, $V_c = [V_h / (\varepsilon - 1)] - V_b$ με ε το βαθμό συμπίεσης και $V_h = (\pi D^2 / 4) s$ τον όγκο εμβολισμού.



Σχήμα 1.1. Γεωμετρικά στοιχεία κινηματικού μηχανισμού εμβόλου-διωστήρα-στροφάλου με έμβολο τύπου κοιλότητας

Ειδικά στην περίπτωση κυλινδρικής κοιλότητας εμβόλου, $V_b = (\pi d_b^2 / 4) h_b$ με d_b τη διάμετρο της κοιλότητας και h_b το ύψος της¹. Ακόμα,

$$V_x = \frac{\pi D^2}{4} x, \quad V_c = \frac{\pi D^2}{4} x_c \Rightarrow \quad (1.3)$$

$$V = V_x + V_c + V_b = \frac{\pi D^2}{4} (x + x_c) + V_b = \frac{\pi D^2}{4} X + V_b$$

¹ Βάσει του ορισμού του, ο βαθμός συμπίεσης είναι $\varepsilon = (V_b + V_c + V_h) / (V_b + V_c)$.

Ο μέγιστος όγκος που καταλαμβάνει το αέριο είναι

$$V_{\max} = V_c + V_h + V_b = \frac{\pi D^2}{4} (x_c + s) + V_b \quad (1.4)$$

Ενώ ακόμα,

$$V_h = V_{\max} (\varepsilon - 1) / \varepsilon \quad (1.5)$$

Η απόσταση της άνω ακμής του εμβόλου από το ΑΝΣ σε συνάρτηση με τη γωνία στροφάλου δίνεται από τη σχέση¹

$$x = x(\varphi) = r(1 - \cos \varphi) + L \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi} \right) \quad (1.6)$$

όπου $r=s/2$ η ακτίνα του στροφάλου, φ η γωνία στροφάλου, L το μήκος του διωστήρα και $\lambda=r/L$.

Παραγωγίζοντας τη σχέση (1.6) βρίσκουμε την ταχύτητα του εμβόλου, c

$$c(\varphi) = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \omega r \sin \varphi \left(1 + \frac{\lambda \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}} \right) \quad (1.7)$$

όπου $\omega=\pi n/30$ η γωνιακή ταχύτητα του στροφάλου. Με παραγωγή της ταχύτητας του εμβόλου προκύπτει και η επιτάχυνσή του² b

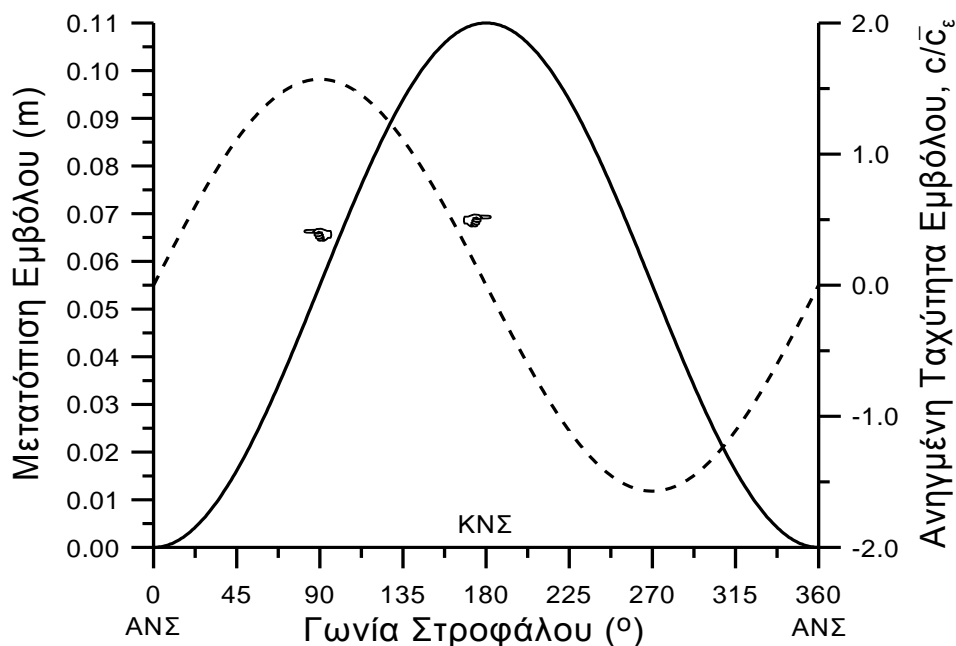
$$b(\varphi) = \frac{dc}{dt} = \frac{dc}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \omega^2 r \left[\cos \varphi + \lambda \frac{\lambda (\cos 2\varphi + \lambda^2 \sin^4 \varphi)}{(1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} \right] \quad (1.8)$$

Η γραφική παράσταση της μετατόπισης του εμβόλου $x(\varphi)$ καθώς και της ανηγμένης ταχύτητάς του $c(\varphi)/\bar{c}_\varepsilon$ (μέση ταχύτητα του εμβόλου $\bar{c}_\varepsilon = sn/30$) δίνονται στο Σχήμα 1.2, συναρτήσεσι της γωνίας στροφάλου για μία περιστροφή της στροφαλοφόρου ατράκτου. Και τα δύο παραπάνω μεγέθη είναι ανεξάρτητα από πιθανές ιδιομορφίες

¹ Βλέπε και «Αρχές Εμβολοφόρων Μηχανών Εσωτερικής Καύσης» και «Μ.Ε.Κ. ΙΙ - Εμβάθυνση στην Κατασκευή και Λειτουργία», υπό του πρώτου των συγγραφέων.

² Η παραπάνω ανάλυση είναι παρόμοια και για θάλαμο καύσης κοιλότητας καλύμματος κυλίνδρου ή με προθάλαμο/στροβιλοθάλαμο (εδώ η κοιλότητα δε βρίσκεται στο έμβολο αλλά στην κεφαλή του κυλίνδρου). Για δισκοειδή θάλαμο καύσης, δηλ. με επίπεδο έμβολο, απλά μηδενίζεται ο όγκος V_b .

της γεωμετρίας του εμβόλου, π.χ. κοιλότητες, προθαλάμους κλπ. Συμπεραίνουμε ότι στις 0° και 360° , δηλαδή όταν το έμβολο βρίσκεται στο ΑΝΣ, θα έχουμε και τον ελάχιστο όγκο V σύμφωνα με την (1.3) αφού τότε μηδενίζεται το x . Στο τέλος του βιβλίου, μετά τα Παραρτήματα, δίνονται πίνακες με αναλυτικές τιμές της ανηγμένης μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης του εμβόλου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου φ , για διάφορες τιμές του λόγου L/r .



Σχήμα 1.2. Μετατόπιση και ανηγμένη ταχύτητα εμβόλου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου ($D=0,10$ m, $s=0,11$ m, $\lambda=0,33$, $n=2000$ rpm)

Στα επόμενα, με τον όρο εισαγωγή ή αναρρόφηση νοείται η διαδικασία που λαμβάνει χώρα από τη στιγμή που ανοίγει η βαλβίδα (ή θυρίδα) εισαγωγής μέχρι τη στιγμή που κλείνει. Με τον όρο νέα γόμωση αναφερόμαστε στην ποσότητα αερίων που εισάγεται στον κύλινδρο διαμέσου των βαλβίδων/θυρίδων εισαγωγής, και η οποία περιλαμβάνει αέρα και ατμούς καυσίμου σε κινητήρες Otto, ή μόνο αέρα σε κινητήρες Diesel ή Otto στρωματικής καύσης. Ο όρος κατάλοιπο ή παραμένον καυσαέριο θα χρησιμοποιηθεί για το καυσαέριο του προηγούμενου κύκλου που παραμένει εγκλωβισμένο εντός του κυλίνδρου. Τέλος, με τον όρο γόμωση του κυλίνδρου αναφερόμαστε στο περιεχόμενο του κυλίνδρου αφότου έχουν κλείσει οι βαλβίδες εισαγωγής, και η οποία περιλαμβάνει τη νέα γόμωση καθώς και το κατάλοιπο καυσαέριο.

Ακολουθεί κατάλογος με όλα τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στο Α' Μέρος, μαζί με τις μονάδες τους.

Σύμβολα

Λατινικοί χαρακτήρες

A	γεωμετρική επιφάνεια, m^2
\bar{A}	ισοδύναμη ενεργός επιφάνεια ροής, m^2
\dot{b}_e	ειδική κατανάλωση καυσίμου, g/kWh
c	ταχύτητα εμβόλου, m/s
\bar{c}_e	μέση ταχύτητα του εμβόλου, m/s
c_d	συντελεστής εκροής
c_p	ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση, J/kgK
d	διάμετρος, m
D	διάμετρος, m (χωρίς δείκτη αναφέρεται στη διάμετρο του κυλίνδρου)
f_r	κλάσμα μάζας καταλοίπου καυσαερίου
h	ειδική ενθαλπία, J/kg
h_b	ύψος κυλινδρικής κοιλότητας εμβόλου, m
K	τυρβώδης κινητική ενέργεια
L	μήκος (διωστήρα), m
L_v	ανύψωση βαλβίδας, mm
m	μάζα, kg
\dot{m}	παροχή μάζας, kg/s
M_σ	στρεπτική ροπή, Nm
n	ταχύτητα περιστροφής, rpm
p	πίεση, N/m^2 ή bar
\bar{p}_e	μέση πραγματική πίεση του κινητήρα, N/m^2
r	ακτίνα στροφάλου, m
R	ειδική σταθερά αερίου, J/kgK
R_s	λόγος συστροφής
s	διαδρομή του εμβόλου, m
T	απόλυτη θερμοκρασία, K
u	ταχύτητα, m/s , ή ειδική εσωτερική ενέργεια, J/kg
u'	ένταση τύρβης, m/s

U	ταχύτητα, m/s, ή εσωτερική ενέργεια, J
V	(στιγμιαίος) όγκος, m ³
V _c	επιζήμιος όγκος του κυλίνδρου, m ³
V _h	όγκος εμβολισμού του κυλίνδρου, m ³
V _H	συνολικός όγκος εμβολισμού του κινητήρα, m ³
x	μοριακό κλάσμα, ή μετατόπιση εμβόλου, m
X	συνολική μετατόπιση εμβόλου, m
W	έργο, J
z	αριθμός κυλίνδρων του κινητήρα

Ελληνικοί χαρακτήρες

α	ταχύτητα του ήχου, m/s, ή γωνία ανοίγματος πεταλούδας, °, ή συντελεστής απωλειών συστροφής
γ	εκθέτης ισεντροπικής μεταβολής
Γ	στροφορμή του αερίου, kg m ² /s
δ	γωνία που ορίζεται στο Σχήμα 6.10γ (4-Χ κινητήρες) και στο Σχήμα 6.16 (2-Χ κινητήρες)
ε	βαθμός συμπίεσης κυλίνδρου Μ.Ε.Κ., ή ρυθμός καταστροφής τυρβώδους κινητικής ενέργειας, m ² /s ³
η	βαθμός απόδοσης
Θ	ροπή αδρανείας, kgm ²
η _λ	βαθμός πλήρωσης
η _ν	βαθμός παγίδευσης
Λ	λόγος κατάθλιψης (2-Χ κινητήρες)
λ _α	λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου
ν	δυναμική συνεκτικότητα, m ² /s
ρ	πυκνότητα, kg/m ³
τ	χρόνος καταστροφής δινών, s, και διατμητική τάση, N/m ²
φ	γωνία στροφάλου, °
ω	γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, rad/s

Δείκτες

0	κατάσταση σε συνθήκες αναφοράς
---	--------------------------------

ο	κατάσταση στην αρχή της συμπίεσης στον κύλινδρο
AC	εισαγωγή στον κύλινδρο
AE	αέρας προς την εξαγωγή
b	κοιλότητα εμβόλου (bowl-in)
c	επιζήμιος (clearance)
e	πραγματικό (effective)
EA	μεσοσταθμική (ταχύτητα) (ensemble averaging)
f	καύσιμο (fuel)
im	πολλαπλή εισαγωγής (inlet manifold)
p	θυρίδα (port), ή αυλός εισαγωγής
pr	προθάλαμος (prechamber)
r	κατάλοιπο (residual), ή ακτινική συνιστώσα (ταχύτητας)
s	συστροφή (swirl)
sc	απόπλυση (scavenge)
sq	ακτινική σύνθλιψη (squish)
T	τυρβώδης (turbulent)
th	στραγγαλιστική/ρυθμιστική δικλείδα («πεταλούδα», throttle)
v	βαλβίδα (valve)
vol	ογκομετρικός (volumetric)
w	υδρατμός (water), ή σφηνοειδής θάλαμος καύσης (wedge)
α	ατμοσφαιρική κατάσταση, αέρας
ε	έμβολο
εε	εσωτερική έδρα (βαλβίδας)
εισ	εισαγωγή
εξ	εξαγωγή
θ	εφαπτομενική συνιστώσα
στ	στερεό
υπ	υπερπλήρωση

Συντομογραφίες

AF	λόγος αέρα-καυσίμου (air-fuel ratio)
FA	λόγος καυσίμου-αέρα (fuel-air ratio)

GDI	άμεση έγχυση βενζίνης (gasoline direct injection)
ΑΝΣ	άνω νεκρό σημείο (TDC - top dead centre)
Α(Θ)Ξ	άνοιγμα βαλβίδας (θυρίδας) εΞαγωγής, ° γωνίας στροφάλου
Α(Θ)Σ	άνοιγμα βαλβίδας (θυρίδας) ειΣαγωγής, ° γωνίας στροφάλου
ΚΝΣ	κάτω νεκρό σημείο (BDC - bottom dead centre)
Κ(Θ)Ξ	κλείσιμο βαλβίδας (θυρίδας) εΞαγωγής, ° γωνίας στροφάλου
Κ(Θ)Σ	κλείσιμο βαλβίδας (θυρίδας) ειΣαγωγής, ° γωνίας στροφάλου
μ. ΑΝΣ	μετά το ΑΝΣ, ° γωνίας στροφάλου
μ. ΚΝΣ	μετά το ΚΝΣ, ° γωνίας στροφάλου
π. ΑΝΣ	πριν το ΑΝΣ, ° γωνίας στροφάλου
π. ΚΝΣ	πριν το ΚΝΣ, ° γωνίας στροφάλου

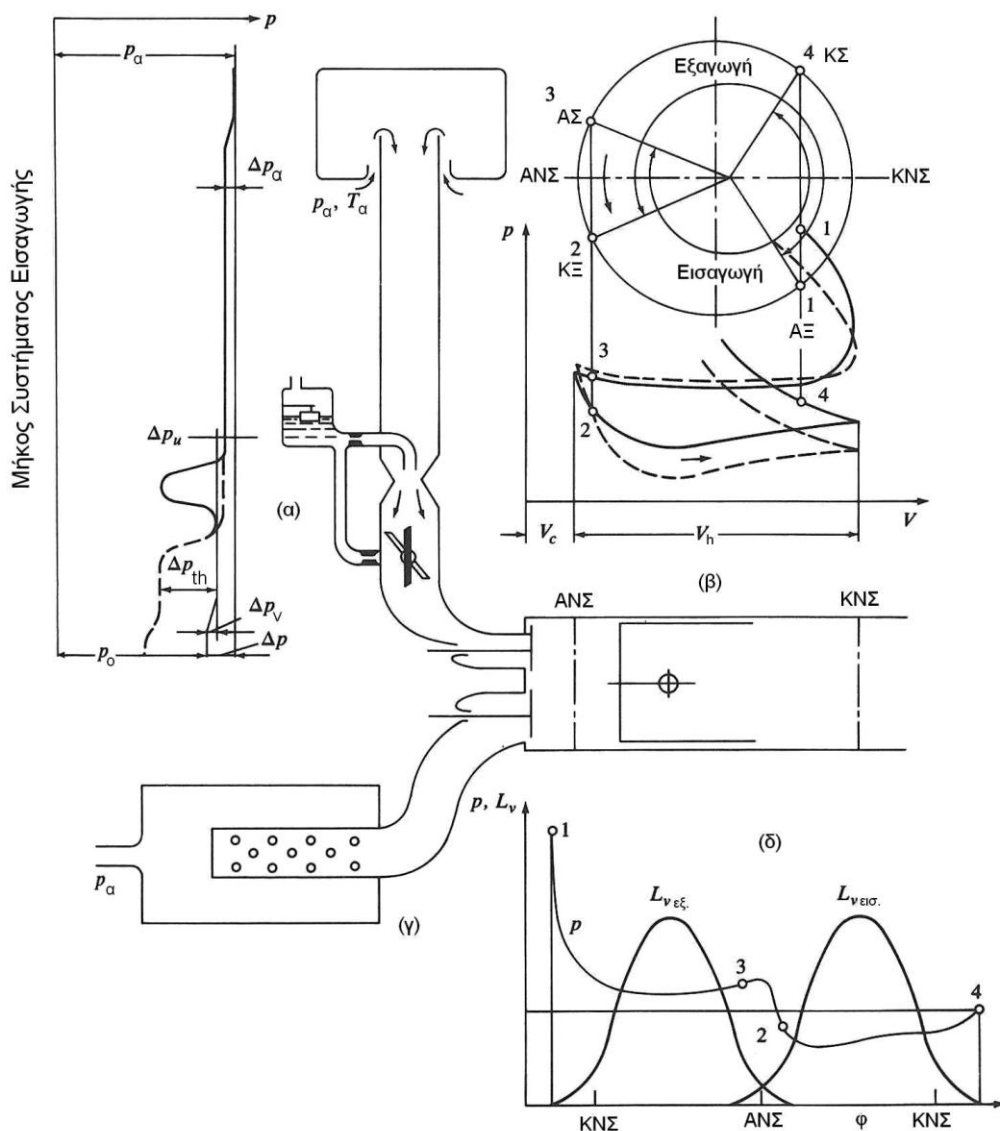
2. ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΑΕΡΙΩΝ ΣΕ 4-Χ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

2.1 Γενικές αρχές - Χαρακτηριστικά εναλλαγής αερίων

Το σύστημα εισόδου στους κυλίνδρους 4-Χ κινητήρα αποτελείται από το φίλτρο αέρα, το σύστημα προετοιμασίας του μίγματος αέρα-καυσίμου και την πολλαπλή σωλήνωση εισαγωγής. Ειδικά όσον αφορά το σύστημα προετοιμασίας καυσίμου σε κινητήρες Otto, αυτό μπορεί να αποτελείται από εξαεριωτή και ρυθμιστική δικλείδα σε παλαιότερης τεχνολογίας βενζινοκινητήρες ή σε κινητήρες Otto πτωχού μίγματος, ή από αντλία καυσίμου και ρυθμιστική δικλείδα ή ρυθμιστική δικλείδα με ξεχωριστή αντλία καυσίμου για κάθε κύλινδρο με έγχυση του καυσίμου λίγο προ της βαλβίδας εισαγωγής σε σύγχρονους βενζινοκινητήρες οχημάτων¹. Κατά τη διάρκεια της αναρρόφησης αερίου παρατηρείται πτώση πίεσης σε κάθε σημείο της ροής, όπως επίσης και στις βαλβίδες εισαγωγής των κυλίνδρων.

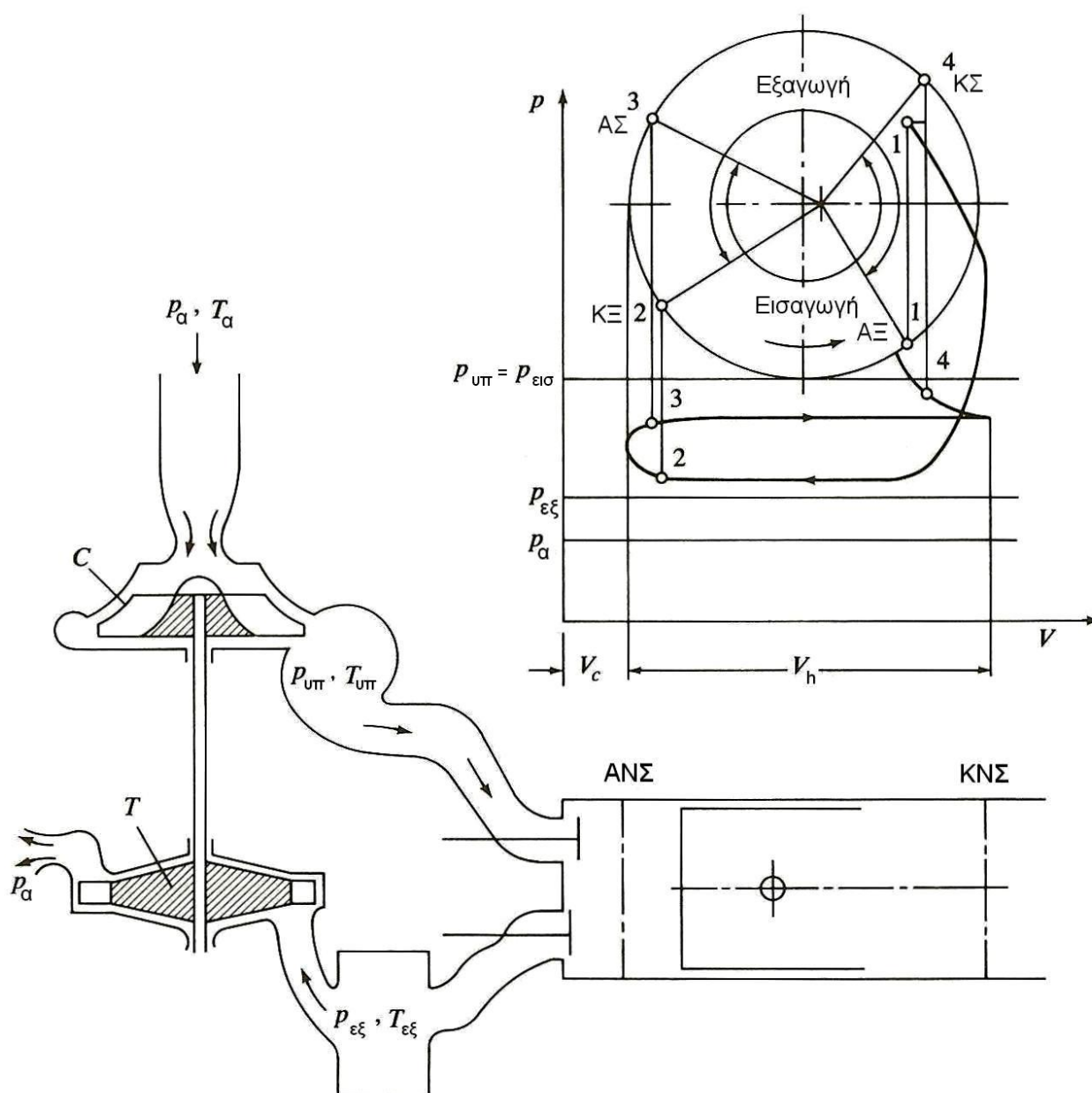
¹ Υπενθυμίζεται, ότι στους κινητήρες Diesel καθώς και σε κινητήρες Otto άμεσης έγχυσης (gasoline direct injection-GDI) η προετοιμασία του μίγματος πραγματοποιείται εντός του κυλίνδρου κατά τη φάση της συμπίεσης, αφού δηλαδή έχει κλείσει η βαλβίδα εισαγωγής.

Μετά την έξοδο από τον κύλινδρο, το καυσαέριο διέρχεται από τους αγωγούς εξαγωγής (πολλαπλή εξαγωγή), το στρόβιλο του συστήματος στροβιλο-υπερπλήρωσης (εάν αυτός υφίσταται), ενδεχομένως από καταλυτικό μετατροπέα για μείωση των ρύπων, και αποσιωπητήρα. Στο Σχήμα 2.1α παρουσιάζεται ένα τέτοιο σύστημα εισαγωγής και εξαγωγής ενός κινητήρα Otto με στραγγαλισμό στην εισαγωγή, για την περίπτωση λειτουργίας με έναν κύλινδρο μόνο, με επιπλέον απεικόνιση της πτώσης πίεσης στα διάφορα τμήματα της εισαγωγής (α), του χρονισμού των βαλβίδων (β), της εξαγωγής (γ), και των καμπυλών ανύψωσης των βαλβίδων εισαγωγής/εξαγωγής συναρτήσει της γωνίας στροφάλου φ (δ).



Σχήμα 2.1α. Σύστημα εισαγωγής μονοκύλινδρου κινητήρα Otto με στραγγαλισμό στην εισαγωγή, με αναφορά στην πτώση πίεσης (α), στο χρονισμό των βαλβίδων και στο διάγραμμα p-V εντός του κυλίνδρου (β), στο σύστημα εξαγωγής (γ), και στην ανύψωση των βαλβίδων και την πίεση εντός του κυλίνδρου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου φ (δ)

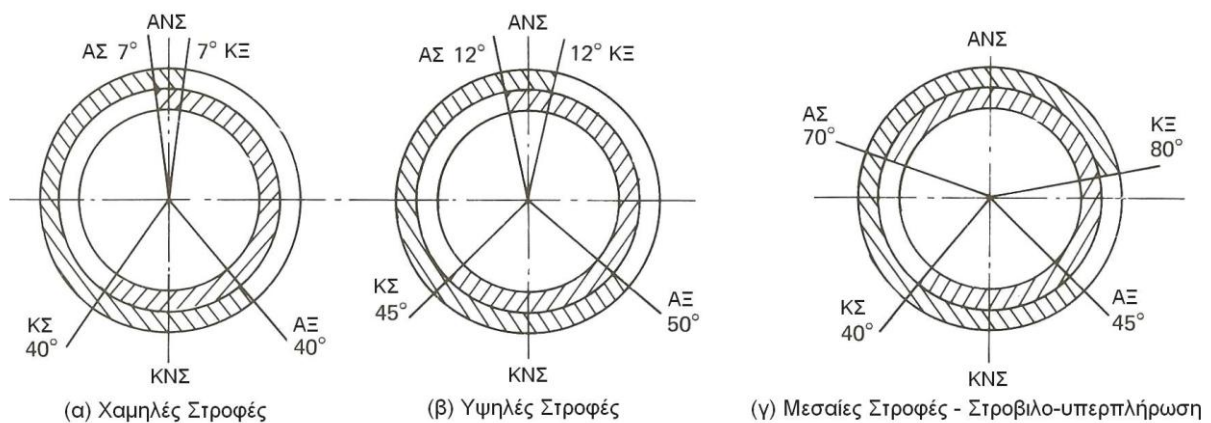
Όλη η διαδικασία εισαγωγής-εξαγωγής γίνεται με παλμούς αερίου αφού η λειτουργία του κινητήρα είναι χρονικά μεταβαλλόμενη συνεχώς. Παρόλα αυτά, υπάρχει δυνατότητα να μελετηθεί το φαινόμενο σε μόνιμες συνθήκες, όπου οι υπολογιζόμενες τιμές πιέσεων είναι οι αντίστοιχες μέσες τιμές των μεγεθών (Σχήμα 2.1α). Ειδικά για πολυκύλινδρους κινητήρες, αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με αρκετά καλή ακρίβεια, αφού ο μεγάλος αριθμός των κυλίνδρων εξομαλύνει τις διακυμάνσεις της ροής μικραίνοντας την απόκλιση από τη μέση τιμή των παλμών.



Σχήμα 2.1β. Σύστημα εισαγωγής-εξαγωγής κινητήρα Diesel με στροβιλο-υπερπληρωτή, με αναφορά στο χρονισμό των βαλβίδων και στο διάγραμμα p-V εντός του κυλίνδρου

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 2.1β παρουσιάζεται το σύστημα εισαγωγής-εξαγωγής τυπικού κινητήρα Diesel¹ με στροβιλο-υπερπλήρωση και, βέβαια, χωρίς οποιοδήποτε τύπου στραγγαλισμό στην εισαγωγή, με αποτέλεσμα την απουσία πτώσης πίεσης του εισερχόμενου αέρα. Εξυπακούεται ότι στην περίπτωση φυσικής αναπνοής κινητήρα Diesel ισχύει: $\rho_{\text{υπ}}=\rho_{\alpha}$, $T_{\text{υπ}}=T_{\alpha}$.

Οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής χαρακτηρίζονται από αδράνεια, και έτσι το άνοιγμα και το κλείσιμό τους δεν πραγματοποιείται ακαριαία. Αυτό συμβαίνει κυρίως για να προστατευτεί ο κινηματικός μηχανισμός τους αλλά και για να αποφευχθεί η εμφάνιση υψηλών πιέσεων λόγω της δυναμικής των αερίων. Οι βαλβίδες δεν ανοίγουν και κλείνουν ακριβώς στο ΑΝΣ και στο ΚΝΣ αλλά σε γωνίες στροφάλου που βρίσκονται πλησίον αυτών, ώστε να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία εναλλαγής των αερίων, Σχήμα 2.2α.



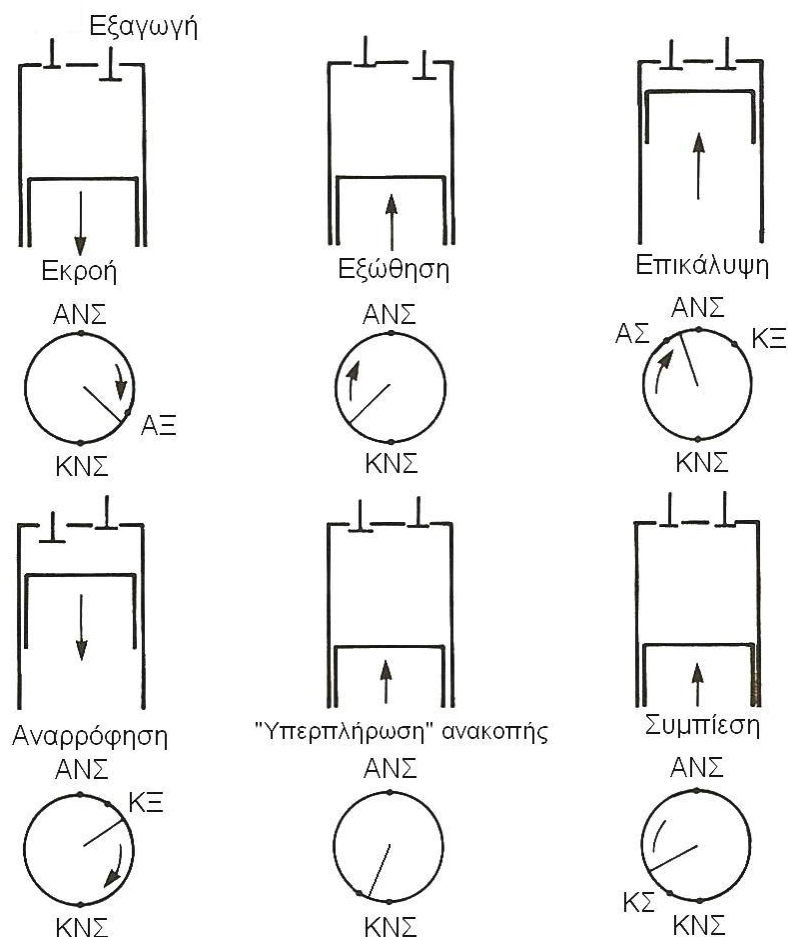
Σχήμα 2.2α. Τυπικά διαγράμματα χρονισμού βαλβίδων: (α) και (β) με μικρή περίοδο επικάλυψης βαλβίδων (φυσικής αναπνοής κινητήρας), (γ) με μεγάλη περίοδο επικάλυψης βαλβίδων (υπερπληρωμένος κινητήρας)

Συγκεκριμένα, η διαδικασία εξαγωγής ξεκινάει με το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής (ΑΞ) που πραγματοποιείται 40–60° πριν τον ΚΝΣ (δηλ. πριν ολοκληρωθεί η αποτόνωση εντός του κυλίνδρου), Σχήματα 2.2α και 2.2β, και αρχικά οφείλεται στη διαφορά πίεσης μεταξύ κυλίνδρου και πολλαπλής εξαγωγής². Κατά το στάδιο αυτό, που αποκαλείται εκροή (blow-down) των καυσαερίων, η πίεση εντός του κυλίνδρου είναι αρκετά υψηλότερη της ατμοσφαιρικής, και η ροή εξαγωγής είναι υπερκριτική.

¹ Όπως θα δούμε στο Β' Μέρος του παρόντος βιβλίου, ο τυπικός κινητήρας Diesel είναι στροβιλο-υπερπληρωμένος.

² Υπενθυμίζεται ότι το έμβολο βρίσκεται ακόμα στη φάση της καθόδου.

Οι σχέσεις που αναφέρονται σε αυτό το φαινόμενο θα παρουσιαστούν στην Παράγραφο 2.3.2. Καθώς προχωράει η εκροή, μειώνεται συνεχώς η πίεση στον κύλινδρο, οπότε, όταν το έμβολο φτάσει στο ΚΝΣ η πίεση είναι πλέον λίγο μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, και η ροή γίνεται υποκριτική. Με την αντιστροφή της κίνησης του εμβόλου προς το ΑΝΣ, η εκροή των καυσαερίων υποχωρεί και η απομάκρυνση των καυσαερίων, δηλαδή η εξώθηση ή εκτόπισή τους (displacement), πραγματοποιείται λόγω της εκτοπιστικής δράσης του εμβόλου. Στον κύλινδρο τώρα επικρατεί μία ελαφρά υπερπίεση, ικανή μόνο να υπερνικήσει την πτώση πίεσης στη βαλβίδα εξαγωγής, η οποία είναι της τάξης του 0,1 bar. Συνήθως, η βαλβίδα¹ εξαγωγής κλείνει (ΚΞ) 15–35° μετά το ΑΝΣ σε φυσικής αναπνοής, και έως 70–90° σε στροβιλο-υπερπληρωμένους κινητήρες (θερμική ανακούφιση κυλίνδρου και ανεκτή θερμοκρασία για το στρόβιλο).

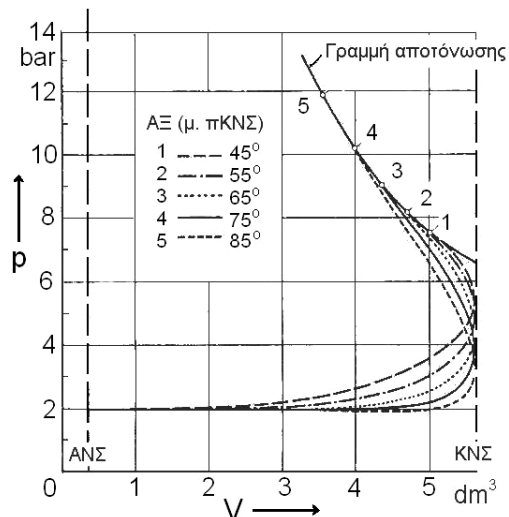


Σχήμα 2.2β. Διαδικασία εναλλαγής αερίων σε 4-Χ κινητήρα

¹ Η βαλβίδες ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ο όρος «βαλβίδα», ο οποίος σημαίνει και «βαλβίδες».

Λίγο πριν το έμβολο φθάσει στο ΑΝΣ (συνήθως $10\text{--}20^\circ$ γωνίας στροφάλου), ανοίγει η βαλβίδα εισαγωγής (ΑΣ), οπότε και τελειώνει ουσιαστικά η περίοδος της εξώθησης. Κατά το επόμενο χρονικό διάστημα (και μέχρι το κλείσιμο της βαλβίδας εξαγωγής, δηλ. για $15\text{--}150^\circ$ ανάλογα με το αν ο κινητήρας είναι φυσικής αναπνοής ή υπερπληρωμένος), είναι ανοικτές και οι δύο βαλβίδες, και η περίοδος αυτή ονομάζεται περίοδος επικάλυψης των βαλβίδων (valve overlap period)¹. Τότε μπορεί να γίνει μία μικρή απόπλυση των καυσαερίων από τη νέα γόμωση του κυλίνδρου.

Αμέσως μετά το κλείσιμο της βαλβίδας εξαγωγής αρχίζει ουσιαστικά η αναρρόφηση της νέας γόμωσης. Κατά την περίοδο αυτή αναρροφάται «φρέσκος» αέρας (κινητήρες Diesel ή κινητήρες Otto άμεσης έγχυσης) ή μίγμα αέρα και ατμών καυσίμου (κινητήρες Otto με στραγγαλισμό στην εισαγωγή). Η πίεση εντός του κυλίνδρου παραμένει σχεδόν σταθερή, έχοντας μία ελαφρά υποπίεση της τάξης του $0,1\text{ bar}$, και με πολύ καλή προσέγγιση μπορούμε να πούμε ότι στο τέλος της αναρρόφησης, δηλαδή τη στιγμή που αρχίζει η συμπίεση, η πίεση στον κύλινδρο είναι περίπου ίση με την ατμοσφαιρική για φυσικής αναπνοής κινητήρες Diesel, ή Otto που λειτουργούν στο πλήρες άνοιγμα (wide open throttle-WOT) της ρυθμιστικής δικλείδας. Κατά το τέλος της φάσης αυτής εκμεταλλευόμαστε την αδράνεια του εισερχόμενου εργαζόμενου μέσου («υπερπλήρωση» ανακοπής), το οποίο συνεχίζει να εισέρχεται στον κύλινδρο παρόλο που η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει (ΚΣ) μετά το ΚΝΣ, συνήθως $40\text{--}70^\circ$.

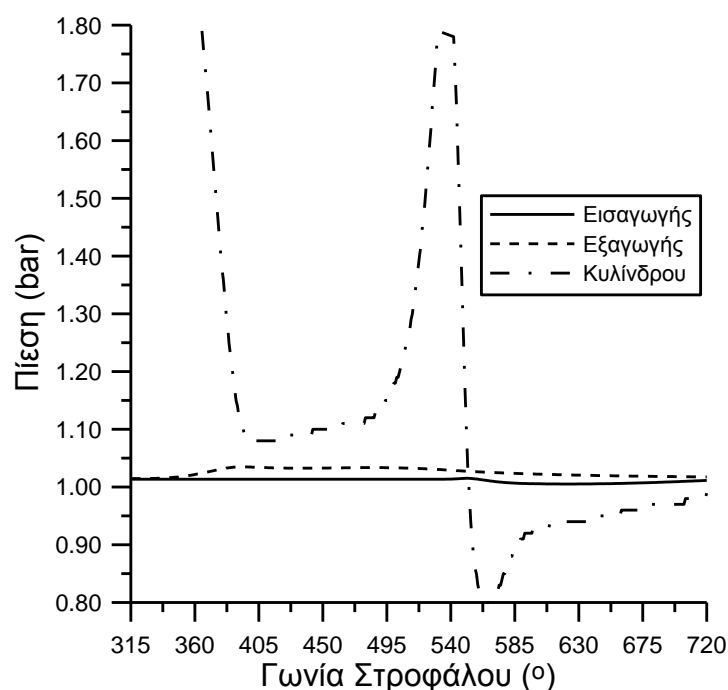


Σχήμα 2.2γ. Διαμόρφωση των πιέσεων, για διάφορους χρόνους ανοίγματος της βαλβίδας εισαγωγής, 4-Χ κινητήρα

¹ Τα πλεονεκτήματα της περιόδου επικάλυψης των βαλβίδων είναι περισσότερο εμφανή σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής και για υπερπληρωμένους κινητήρες, οπότε και το διάστημα αυτό είναι αυξημένο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2α δεξιά.

Λόγω του ενωρίτερου ανοίγματος της βαλβίδας εξαγωγής, δηλ. πριν το ΚΝΣ, είναι προφανές ότι χάνεται κάποια ποσότητα (θετικού) έργου αποτόνωσης. Ταυτόχρονα όμως, διευκολύνεται η εξαγωγή του καυσαερίου με αποτέλεσμα τη μείωση του αρνητικού έργου εξώθησης, οπότε υπάρχει τελικά ένας βέλτιστος χρονισμός βαλβίδων τέτοιος ώστε το μειωμένο έργο που προσφέρουμε για την εξώθηση μείον το έργο που χάνεται κατά την ενωρίτερη αποτόνωση να είναι θετικό και κατά το δυνατόν μέγιστο¹, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2γ.

Στα Σχήματα 2.3 παρουσιάζεται το επίπεδο και η διακύμανση πιέσεων στο σύστημα εισαγωγής και εξαγωγής φυσικής αναπνοής και υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel.

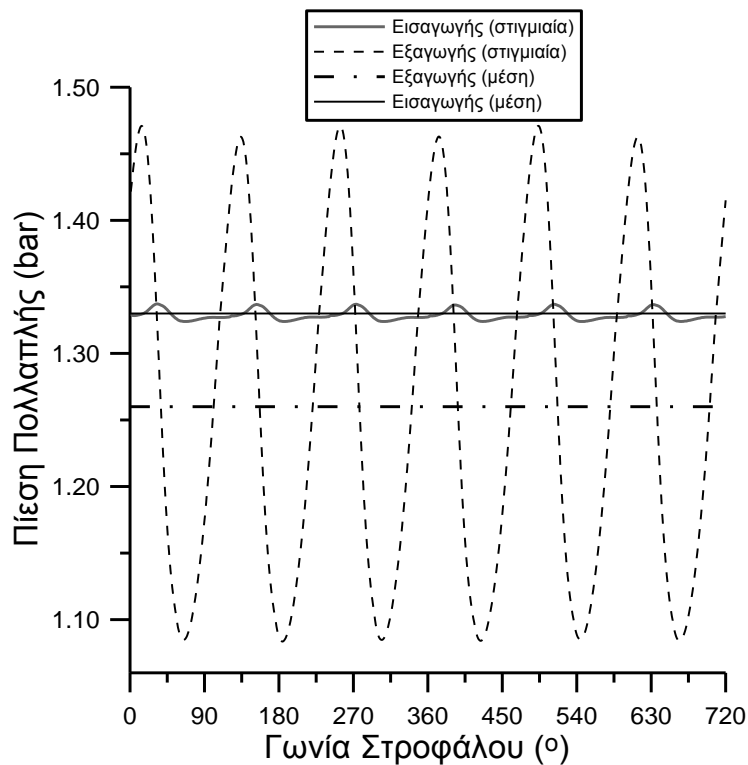


Σχήμα 2.3α. Στιγμιαίες πιέσεις κυλίνδρου και πολλαπλών εισαγωγής και εξαγωγής μονοκύλινδρου, φυσικής αναπνοής κινητήρα Diesel Ricardo E-6, Εργαστηρίου Μ.Ε.Κ. Ε.Μ.Π. (ΑΣ: 8° π.ΑΝΣ, ΚΣ: 36° μ.ΚΝΣ, ΑΞ: 43° π.ΚΝΣ, ΚΞ: 7° μ.ΑΝΣ, διάρκεια επικάλυψης 15°, «θερμό» ΑΝΣ → 180°)

Ειδικότερα σε υπερπληρωμένους κινητήρες, Σχήμα 2.3β, παρατηρούμε ότι το μέσο επίπεδο της πίεσης (πολλαπλής) εισαγωγής είναι μεγαλύτερο από αυτό της εξαγωγής, γεγονός που σε συνδυασμό με τη σημαντικά μεγαλύτερη διάρκεια της φάσης επικάλυψης (έναντι κινητήρα φυσικής αναπνοής) διευκολύνει την απόπλυση και καλή λειτουργία του υπερπληρωμένου κινητήρα. Αντιθέτως, η στιγμιαία πίεση εξαγωγής

¹ Προφανώς η βελτιστοποίηση αυτή δεν μπορεί να επιτευχθεί σε κάθε σημείο λειτουργίας του κινητήρα, εκτός αν υπάρχει σύστημα μεταβλητού χρονισμού των βαλβίδων (VVT).

παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη διακύμανση αλλά και μέγιστη τιμή από αυτήν της εισαγωγής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3β για 6-κύλινδρο στροβιλο-υπερπληρωμένο κινητήρα Diesel με σύστημα υπερπλήρωσης παλμών πίεσης, που είναι και το πλέον συνηθισμένο στην πράξη για μικρών και μέσων διαστάσεων κινητήρες Diesel (περισσότερα στο Κεφάλαιο 15)¹.



Σχήμα 2.3β. Στιγμιαίες και μέσες πιέσεις στο σύστημα εισαγωγής και εξαγωγής 6-κύλινδρου στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel MWM TbRHS 518S, Εργαστηρίου Μ.Ε.Κ. Ε.Μ.Π. (ΑΣ: 51° π.ΑΝΣ, ΚΣ: 60° μ.ΚΝΣ, ΑΞ: 64° π.ΚΝΣ, ΚΞ: 47° μ.ΑΝΣ, διάρκεια επικάλυψης 98°)

2.2 Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης

Ένας τρόπος για να μετρήσουμε την απόδοση της διαδικασίας εναλλαγής των αερίων και του συστήματος εισαγωγής από τον κύλινδρο είναι μέσω του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης η_{vol} . Ο τελευταίος είναι ένας γενικός, εποπτικός βαθμός απόδοσης της αποτελεσματικότητας του κύκλου λειτουργίας του κινητήρα. Όσο περισσότερο χρόνο είναι ανοικτή η βαλβίδα εισαγωγής, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ογκομετρικός βαθμός

¹ Αντιθέτως, σε σύστημα υπερπλήρωσης σταθερής πίεσης η πίεση εξαγωγής έχει περίπου σταθερή τιμή αλλά και πάλι, συνήθως, κάτω από τη μέση τιμή της αντίστοιχης πίεσης της πολλαπλής εισαγωγής.

απόδοσης, πράγμα που είναι επιθυμητό αφού αυξάνεται η μάζα του εργαζόμενου μέσου, οπότε αυξάνεται και η δυνατότητα παραγωγής ισχύος. Τα παραπάνω ισχύουν τόσο σε κινητήρες Otto όσο και σε Diesel.

Ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης 4-Χ κινητήρα ορίζεται ως η μάζα του αέρα που εισρέει στον κύλινδρο, προς τη μάζα του αέρα που θα καταλάμβανε τον όγκο εμβολισμού σε συνθήκες περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα

$$\eta_{vol} = \frac{\dot{m}_{AC}}{\dot{m}_{ae}} = \frac{\dot{m}_{AC}}{\rho_a V_h \left(\frac{n}{30K} \right)} = \frac{K \cdot \dot{m}_{AC}}{\rho_a A_\epsilon \bar{c}_\epsilon} \quad (2.1)$$

όπου ρ_a είναι η πυκνότητα του αέρα σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, n η ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά λεπτό (rpm), \dot{m}_{AC} η παροχή μάζας του αέρα που εισρέει στον κύλινδρο¹, V_h ο όγκος εμβολισμού του κυλίνδρου, A_ϵ η επιφάνεια του εμβόλου, \bar{c}_ϵ η μέση ταχύτητα του εμβόλου, και $K=4$ για 4-Χ κινητήρα.

Τυπικές τιμές του η_{vol} για φυσικής αναπνοής κινητήρες είναι γύρω στο 80–90%, με τις τιμές για κινητήρες Diesel στο άνω όριο του παραπάνω πεδίου τιμών.

Συνήθως, η μάζα στον παρονομαστή του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης αναφέρεται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (όπως ισχύει στη σχέση (2.1)), οπότε αναφερόμαστε στον ολικό ογκομετρικό βαθμό απόδοσης. Αν αναφέρεται, όμως, σε συνθήκες στον αγωγό (πολλαπλή) εισαγωγής, τότε είναι δείγμα της απόδοσης των βαλβίδων εισαγωγής. Η πρώτη έκφραση συναντάται κατά κύριο λόγο, ενώ η δεύτερη πλέον σπάνια. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει αναφέρεται σε λειτουργία κινητήρων Diesel, ή σε κινητήρες Otto με τη ρυθμιστική δικλείδα πλήρως ανοικτή, οπότε και έχουμε τη μέγιστη ισχύ.

Ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Τον τύπο του καυσίμου και τις φυσικές ιδιότητές του, και το λόγο αέρα-καυσίμου,
- Το ποσοστό ατμοποίησης του καυσίμου στο σύστημα της εισαγωγής κινητήρων Otto, και τη θερμοκρασία του μίγματος, όπως επηρεάζεται από τις απώλειες θερμότητας προς και από τα τοιχώματα της πολλαπλής και του κυλίνδρου,

¹ Ένα μέρος της θα διαφύγει στην εξαγωγή κατά τη φάση επικάλυψης των βαλβίδων και το υπόλοιπο \dot{m}_o θα παραμείνει στον κύλινδρο διαθέσιμο προς καύση.

- Το λόγο πιέσεων εισαγωγής/εξαγωγής του κυλίνδρου,
- Το βαθμό συμπίεσης ε ,
- Την ταχύτητα περιστροφής n ,
- Τα χαρακτηριστικά και τη γεωμετρία των αγωγών εισαγωγής και εξαγωγής,
- Τη γεωμετρία, το μέγεθος, την ανύψωση και το χρονοισμό των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής,
- Την ποσότητα του κατάλοιπου καυσαερίου από τον προηγούμενο κύκλο λειτουργίας.

Η επίδραση ορισμένων μεγεθών από τα παραπάνω στον ογκομετρικό βαθμό απόδοσης είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας περιστροφής (ημι-στατικά), ή περιγράφεται ικανοποιητικά αναγόμενη στη μέση ταχύτητα περιστροφής. Κάποιων άλλων μεγεθών, όμως, η επιρροή εξαρτάται από τη μη μόνιμη χρονικά ροή των αερίων και από τα κύματα πίεσης (δυναμικά), οπότε η μελέτη τους είναι σημαντικά πιο περίπλοκη.

Σημειώνεται, ακόμα, ότι σύμφωνα με τους ορισμούς του βαθμού πλήρωσης η_λ και του βαθμού παγίδευσης η_γ ισχύει

$$\eta_{\text{vol}} = \frac{\dot{m}_{\text{AC}}}{\dot{m}_{\text{αε}}} = \frac{\dot{m}_{\text{AC}} / \dot{m}_o}{\dot{m}_{\text{αε}} / \dot{m}_o} = \frac{(\eta_\gamma)^{-1}}{(\eta_\lambda)^{-1}} = \frac{\eta_\lambda}{\eta_\gamma} \quad (2.2)$$

2.2.1 Ημι-στατικά (quasi-static) φαινόμενα

Για να μελετήσουμε την επίδραση ορισμένων από τα παραπάνω μεγέθη στον ογκομετρικό βαθμό απόδοσης, είναι βολικό να αναφερθούμε στην περίπτωση του ιδανικού κύκλου Otto. Ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης, από τη σχέση (2.1), γίνεται

$$\eta_{\text{vol}} = \left(\frac{M}{M_\alpha} \right) \left(\frac{p_{\text{εισ}}}{p_\alpha} \right) \left(\frac{T_\alpha}{T_{\text{εισ}}} \right) \frac{1}{(1+FA)} \left\{ \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} - \frac{1}{\gamma(\varepsilon-1)} \left[\left(\frac{p_{\text{εξ}}}{p_{\text{εισ}}} \right) + \gamma - 1 \right] \right\} \quad (2.3)$$

Αυτή είναι η ακριβής έκφραση του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης στην περίπτωση που θεωρούμε ότι έχουμε ιδανικό κύκλο Otto, και ο κινητήρας λειτουργεί σε πλήρες φορτίο, δηλαδή η ρυθμιστική δικλείδα του είναι πλήρως ανοικτή. Από την εξίσωση (2.3) προκύπτει ότι ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται από την κατάσταση του εισερχόμενου (εγκλωβιζόμενου) μίγματος ($p_{\text{εισ}}$ και $T_{\text{εισ}}$) και την πίεση