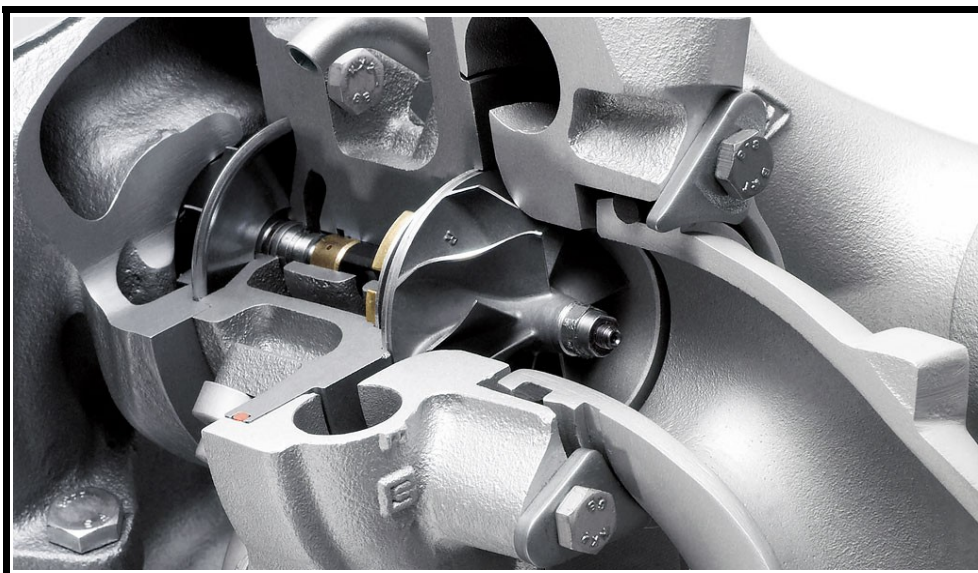




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ - ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL



ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΕΤΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ε.Γ. ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ, ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2012

Πρόλογος

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ψηφιοποίηση των χαρτών λειτουργίας συμπιεστή - στροβίλου κινητήρα Diesel, που βρίσκεται στο εργαστήριο Μ.Ε.Κ. του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Οι χάρτες αυτοί υλοποιήθηκαν με πειραματικές μετρήσεις στον συμπιεστή και τον σρόβιλο, οι οποίες διατέθηκαν από τον κατασκευαστή.

Για την ψηφιοποίηση των χαρτών δημιουργήθηκαν δύο κώδικες σε γλώσσα προγραμματισμού fortran. Το πρώτο πρόγραμμα με ονομασία cmap.for αφορά τον συμπιεστή, ενώ το δεύτερο με ονομασία tmap.for αφορά το σρόβιλο. Οι κώδικες διαχειρίζονται τέσσερις μεταβλητές: το λόγο πίεσης, την παροχή μάζας, το βαθμό απόδοσης και την ταχύτητα περιστροφής. Ο χρήστης αρχικά επεμβαίνει στα αρχεία εισόδου εισάγοντας δύο μεταβλητές με τις οποίες θα εκτελεστεί το πρόγραμμα και στη συνέχεια λαμβάνει αποτελέσματα για τις άλλες δύο. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να απεικονιστούν διαγραμματικά συγκροτώντας τους ψηφιοποιημένους χάρτες λειτουργίας .

Στην περίπτωση του συμπιεστή προκύπτουν τρεις συνδιασμοί ζευγών μεταβλητών εισόδου/εξόδου, ενώ στο σρόβιλο δύο (δεν χρησιμοποιείται το ζεύγος λόγος πίεσης – παροχή μάζας ως μεταβλητή εισόδου).

Το θεωρητικό μέρος της παρούσης διπλωματικής εργασίας (Κεφάλαια 1-5) αντλήθηκε ως επί το πλείστον από το σύγγραμμα «Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ», Κ.Δ. Ρακόπουλου, Ε.Γ. Γιακουμή (2006), Εκδόσεις ΕΜΠ. Η λεπτομερής επεξήγηση της διαδικασίας ψηφιοποίησης των χαρτών και τα αποτελέσματά της απαντώνται στο Κεφάλαιο 6.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κ. Ρακόπουλο και τον Καθηγητή κ. Δ. Χουντάλα, οι οποίοι συνδιδάσκουν τα μαθήματα που αφορούν τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης. Η διδασκαλία τους μου κίνησε το ενδιαφέρον για την περαιτέρω ενασχόλησή μου με τη μελέτη των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης. Ήταν το έναυσμα για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος.....	1
Πίνακες συμβόλων/ακρωνυμίων.....	4
1. Υπερπλήρωση ΜΕΚ	
1.1. Ορισμός υπερπλήρωσης.....	5
1.2. Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα υπερπλήρωσης.....	7
1.3. Μέθοδοι υπερπλήρωσης	
1.3.1. Τρόπος κίνησης συμπίεστή.....	9
1.3.2. Σχεδιασμός του συμπίεστή.....	11
1.3.3. Σύνδεση κινητήρα – διάταξης υπερπλήρωσης. Μετάδοση ισχύος.....	12
1.3.4. Είδος κινητήρα.....	12
1.4. Υπερπλήρωση και ταχύτητα περιστροφής	
1.4.1. Εισαγωγή.....	13
1.4.2. Αύξηση ταχύτητας περιστροφής.....	13
1.4.3. Αύξηση μέσης πίεσης.....	14
1.5. Ιστορική αναδρομή – σύγχρονες τάσεις.....	15
2. Βασικές αρχές στροβιλο-υπερπλήρωσης	
2.1. Αρχή λειτουργίας.....	20
2.2. Συμπίεστής.....	22
2.3. Στρόβιλος.....	23
2.4. Βασικές εξισώσεις θερμοδυναμικής.....	23
2.5. Μεγέθη – υλικά κατασκευής – θόρυβος	
2.5.1. Μεγέθη.....	27
2.5.2. Υλικά κατασκευής.....	27
2.5.3. Λίπανση.....	29
2.5.4. Θόρυβος.....	29
3. Συμπίεστές	
3.1. Εισαγωγή.....	31
3.2. Υπολογισμός της ισχύος συμπίεστή.....	31
3.3. Συμπίεστής δυναμικής ροής	
3.3.1. Εισαγωγή.....	34
3.3.2. Περιγραφή της ροής.....	35
3.3.3. Χάρτης λειτουργίας αξονικού συμπίεστή.....	38

4. Στρόβιλοι

4.1. Εισαγωγή.....	42
4.2. Ακτινικός στρόβιλος	
4.2.1. Περιγραφή.....	42
4.2.2. Ρύθμιση ακροφυσίων.....	47
4.2.3. Βαθμός αντίδρασης.....	48
4.2.4. Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου.....	48
4.2.5. Ισχύς στροβίλου.....	49

5. Ταίριασμα ΜΕΚ - Υπερπληρωτή

5.1. Εισαγωγή.....	51
5.2. Ταίριασμα κινητήρα στροβιλο-υπερπληρωτή	
5.2.1. Εισαγωγή.....	52
5.2.2. Ενεργειακό ισοζύγιο ατράκτου στροβιλο-υπερπληρωτή.....	53
5.2.3. Χάρτες στροβιλο-υπερπληρωτή.....	55
5.3. Στροβιλο-υπερπλήρωση 4-Χ κινητήρα.....	56
5.4. Διαφορές στροβιλο-υπερπλήρωσης - μηχανικής υπερπλήρωσης....	59
5.5. Παρατηρήσεις.....	60

6. Ανάλυση προγράμματος

6.1. Εισαγωγή.....	61
6.2. Κώδικας CMAP	
6.2.1. Εισαγωγή.....	62
6.2.2. Περιγραφή αρχείου εισόδου.....	63
6.2.3. Επεξήγηση κώδικα CMAP.....	64
6.2.4. Υπολογισμός μεγεθών.....	69
6.3. Κώδικας TMAP	
6.3.1. Εισαγωγή.....	73
6.3.2. Περιγραφή αρχείου εισόδου.....	74
6.3.3. Επεξήγηση κώδικα TMAP.....	75
6.4. Πίνακες αποτελεσμάτων.....	79

Βιβλιογραφία.....	87
--------------------------	-----------

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
Q_c, Q_t	Προσδιδόμενη/απορροφώμενη θερμότητα συμπιεστή/στροβίλου	Joule
W_c, W_t	Ισχύς συμπιεστή/στροβίλου	Watt
\dot{m}_c, \dot{m}_t	Παροχή μάζας συμπιεστή/στροβίλου	kg
\bar{p}_e	Μέση πραγματική πίεση κινητήρα	Pa
m_i	Συνολική μάζα εμβόλου-διωστήρα	kg
r	Ακτίνα στροφάλου	m
p_{max}	Μέγιστη πίεση κινητήρα	Pa
D	Διάμετρος εμβόλου	m
C	Ταχύτητα ρευστού	m/sec
$p_{01,2,3,...}$	Ολική πίεση κατάστασης 1,2,3...	Pa
$p_{1,2,3,...}$	Στατική πίεση κατάστασης 1,2,3...	Pa
$T_{01,2,3,...}$	Ολική θερμοκρασία κατάστασης 1,2,3...	K
$h_{01,2,3,...}$	Ολική ειδική ενθαλπία κατάστασης 1,2,3...	J/kg
$T_{1,2,3,...}$	Στατική θερμοκρασία κατάστασης 1,2,3...	K
$h_{1,2,3,...}$	Στατική ειδική ενθαλπία κατάστασης 1,2,3...	J/kg
c_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ανά kg μάζας ρευστού	J/kg.K
$\eta_{t-t, t-s,...}$	Βαθμός απόδοσης (ολικά/ολικά μεγέθη, ολικά/στατικά.....)	-

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΩΝ

Αρκτικόλεξο	Επεξήγηση
ΜΕΚ	Μηχανή εσωτερικής καύσης
4-Χ	Τετράχρονος
ΔΕ	Δυναμική ενέργεια ρευστού

Κεφάλαιο 1. Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ

1.1. Ορισμός υπερπλήρωσης

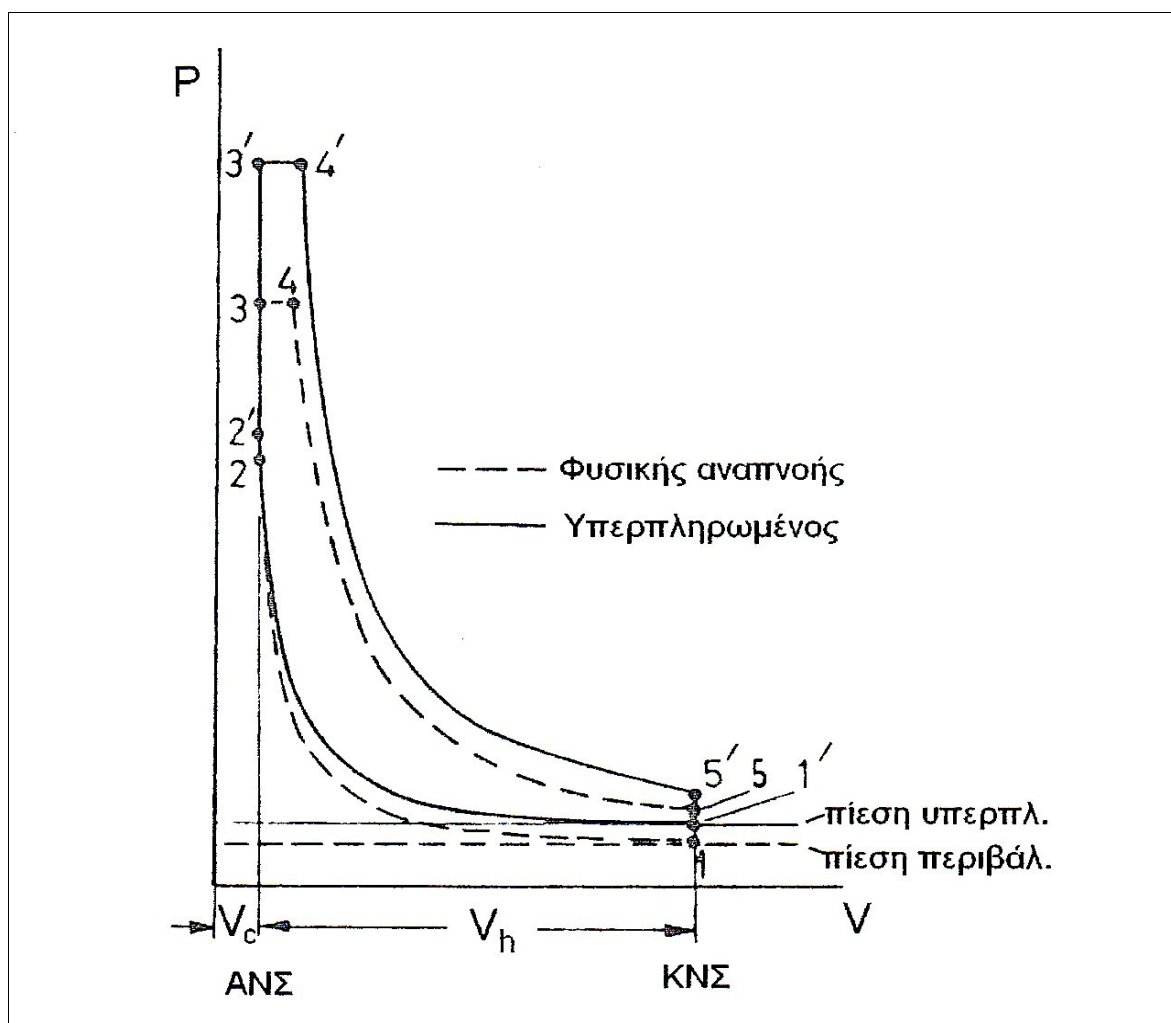
Με τον όρο “υπερπλήρωση” (supercharging) στις ΜΕΚ ορίζουμε την προσυμπίεση του εργαζόμενου μέσου (αέρας) εξωτερικά του κυλίνδρου με τη βοήθεια μηχανικού μέσου (συμπιεστής). Έτσι ο αέρας συμπιέζεται τελικά τόσο εντός όσο και εκτός κυλίνδρου.

Η υπερπλήρωση, σε συνδυασμό με την ενδιάμεση ψύξη (cooling) του συμπιεζόμενου αέρα, υπήρξε σημαντικός παράγοντας στην προσπάθεια αύξησης της ισχύος των κινητήρων, πέραν της βελτίωσης των επιμέρους διεργασιών εντός του κυλίνδρου. Είναι αξιοσημείωτο ότι με την πάροδο των δεκαετιών σημειώθηκε τετραπλασιασμός της ισχύος τους χωρίς ουσιαστική μεταβολή του όγκου εμβολισμού. Κατά συνέπεια προκύπτει και τετραπλασιασμός της χωρικής τους ισχύος p_H ή (ισοδύναμα) της μέσης πραγματικής τους πίεσης p_e , δεδομένου ότι η ταχύτητα περιστροφής n αυξήθηκε σε μικρότερο βαθμό στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύριότερα χαρακτηριστικά κινητήρων Diesel που χρησιμοποιήθηκαν για την κίνηση βαρέων φορτηγών αυτοκινήτων στη χρονική περίοδο 1930 – 1996.

Μέγιστη Ισχύς (kW)	70-110	92-110	110-125	107-132	140-154	283-304	309-441
Μέγιστη Ροπή (Nm)	520-1010	610-660	660-1050	620-1050	680-760	1285-1300	1850-2700
Όγκος Εμβολισμού (lt)	16,6	13,5	18,1	11,6	18,7	18,3	18,3
Έτος	1930	1936	1939	1955/6	1960	1985	1996

Πίνακας 1.1. Χαρακτηριστικά κινητήρων Diesel βαρέων φορτηγών (1930 – 1996).



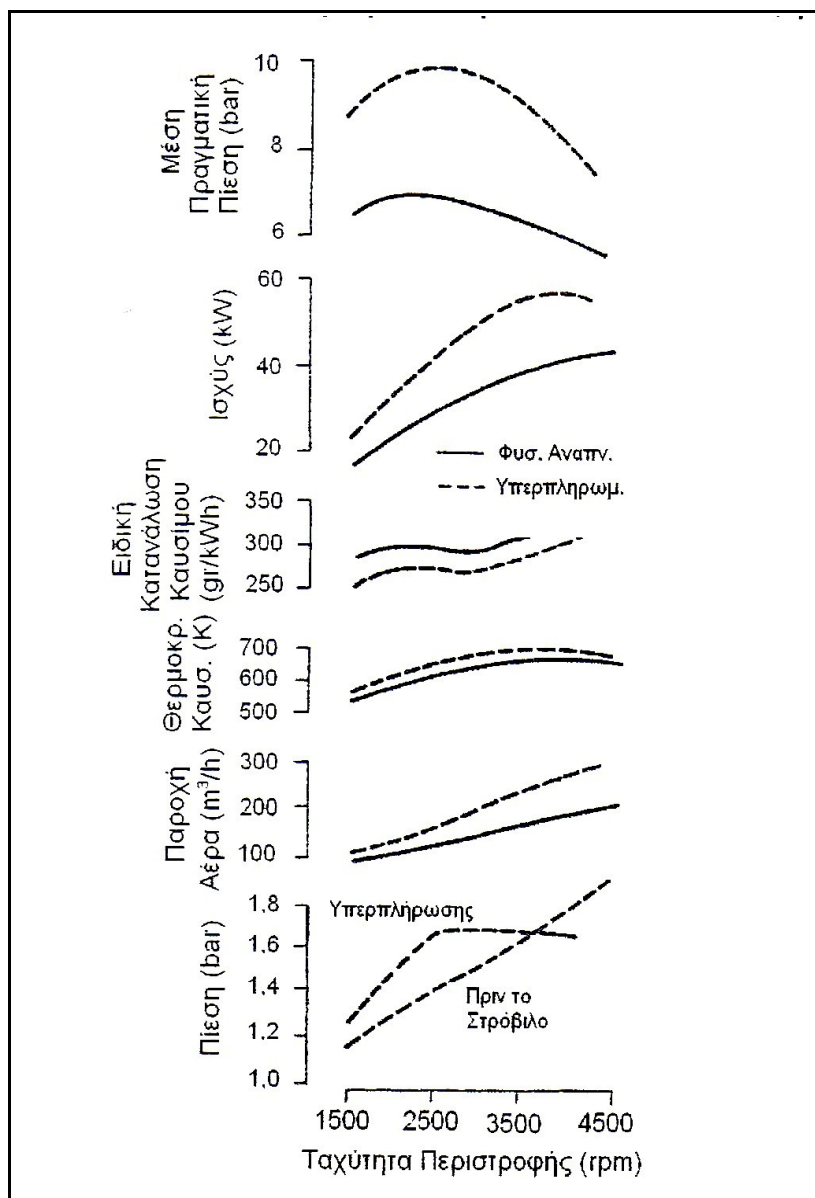
Διάγραμμα 1.1. Γραφική σύγκριση μικτού κύκλου κινητήρα φυσικής αναπνοής (123451) και υπερπληρωμένου κινητήρα ίδιου βαθμού συμπίεσης (1'2'3'4'5'1').

Στο Διάγραμμα 1.1 συγκρίνεται ο ιδανικός μικτός κύκλος αέρα κινητήρα φυσικής αναπνοής με τον αντίστοιχο κύκλο υπερπληρωμένου. Οι δύο κινητήρες έχουν τον ίδιο βαθμό συμπίεσης ϵ . Δεδομένου ότι στον υπερπληρωμένο κινητήρα οι πιέσεις εισαγωγής και εξαγωγής είναι μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής (και κατά συνέπεια καίγεται περισσότερο καύσιμο), το επίπεδο πιέσεων καθ'όλη τη διάρκεια του θερμοδυναμικού κύκλου είναι σημαντικά υψηλότερο.

1.2. Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα υπερπλήρωσης

Τα οφέλη της υπερπλήρωσης, για δεδομένη ισχύ κινητήρα, είναι:

- 1) μικρότερος φυσικός όγκος (μείωση αριθμού κυλίνδρων και μεγέθους κινητήρα)
- 2) μικρότερο βάρος, μεγαλύτερη ειδική ισχύς (kW/kg)
- 3) μειωμένο κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος (πιο σημαντικό σε μεγάλα μεγέθη κινητήρων)
- 4) μειωμένος θόρυβος εξαγωγής καυσαερίων λόγω της ύπαρξης στροβίλου
- 5) μικρότερη επίδραση της μειωμένης πυκνότητας αναρροφώμενου αέρα (λόγω υψηλής θερμοκρασίας)
- 6) μειωμένες εκπομπές καυσαερίων (σε ορισμένες συνθήκες)
- 7) αποτελεσματική μείωση της καθυστέρησης αυτανάφλεξης μίγματος σε κινητήρες Diesel λόγω αυξημένων θερμοκρασιών εντός του κυλίνδρου.



Διάγραμμα 1.2. Σύγκριση επιδόσεων υπερπληρωμένου και μη υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel.

Στο Διάγραμμα 1.2 παρουσιάζονται οι παράμετροι επιδόσεων ενός τυπικού κινητήρα Diesel κυβισμού 2.1lt, χωρίς και με υπερπλήρωση. Παρατηρούμε ότι στην υπερπληρωμένη έκδοση (πέραν της προφανούς αύξησης της ισχύος) έχουμε υψηλότερη μέση πίεση λειτουργίας, μεγαλύτερη ποσότητα αναρροφώμενου αέρα, καθώς και μειωμένη ειδική κατανάλωση καυσίμου.

Η υπερπλήρωση παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

- 1) Υψηλότερη μηχανική και θερμική φόρτιση
- 2) Αργή απόκριση – αυξημένο διάστημα μεταβατικής λειτουργίας
- 3) Αυξημένη εκπομπή ρύπων κατά την εκκίνηση (λόγω καθυστερημένης προθέρμανσης του καταλύτη) και οξειδίων του αζώτου – NO_x (λόγω υψηλότερων θερμοκρασιών κύκλου σε περιπτώσεις που δεν έχουμε ενδιάμεση ψύξη του αέρα πλήρωσης)

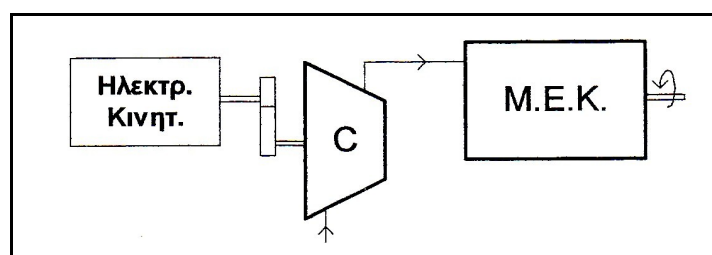
1.3. Μέθοδοι υπερπλήρωσης

Η συμπίεση εργαζόμενου μέσου (αέρας για κινητήρες Diesel ή μίγμα αέρα/καυσίμου για κινητήρες Otto) γίνεται σε συγκεκριμένο τμήμα της διάταξης (συμπιεστής υπερπλήρωσης). Τα συστήματα αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει διαφόρων κριτηρίων, όπως:

- 1) Τρόπος κίνησης συμπιεστή υπερπλήρωσης
- 2) Σχεδιασμός του συμπιεστή
- 3) Σύνδεση κινητήρα – διάταξης υπερπλήρωσης, τρόπος μετάδοσης ισχύος
- 4) Είδος κινητήρα

1.3.1. Τρόπος κίνησης συμπιεστή

A) Κίνηση μέσω ηλεκτροκινητήρα ή βοηθητικής διάταξης (εξωτερική υπερπλήρωση). Απαντάται σε κινητήρες Diesel και σε αεροπορικούς, ενώ αποτελεί διάταξη σάρωσης 2- Χ κινητήρων φυσικής αναπνοής (αντλία απόπλυσης)

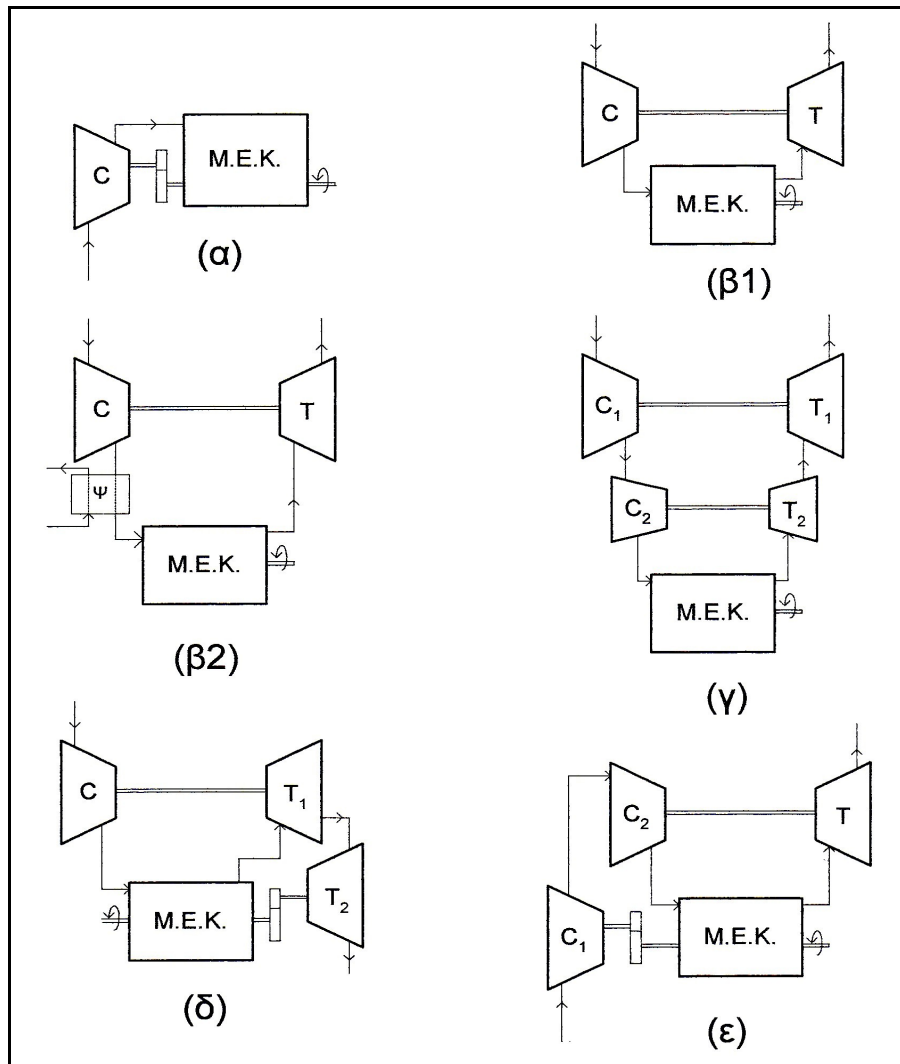


Σχήμα 1.1. Διάταξη υπερπλήρωσης με συμπιεστή κινούμενο εξωτερικά από ηλεκτροκινητήρα.

B) Κίνηση με απορρόφηση έργου από τη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (μηχανική υπερπλήρωση - Σχήμα 1.2.α). Χρησιμοποιείται σε κινητήρες Otto με ή χωρίς ενδιάμεση ψύξη εργαζόμενου μέσου. Η σχέση μετάδοσης μπορεί να είναι είτε σταθερή είτε μεταβλητή.

Γ) Κίνηση μέσω στροβίλου καυσαερίων (στροβιλο-υπερπλήρωση - Σχήμα 1.2.β2). Η διάταξη αυτή μπορεί με τη σειρά της να είναι μονοβάθμια χωρίς ενδιάμεση ψύξη αέρα, με ενδιάμεση ψύξη αέρα ή να περιλαμβάνει δύο στάδια συμπίεσης και δύο αποτόνωσης (διβάθμια). Είναι ο πλέον διαδεδομένος τύπος υπερπλήρωσης.

Δ) Συμπίεση μέσω κύματος πίεσης (σύστημα Comprex “πτερυγωτού δρομέα” της Brown Boveri).



Σχήμα 1.2. Διατάξεις υπερπλήρωσης. (α) μηχανική υπερπλήρωση, (β1) στροβιλο-υπερπλήρωση, (β2) στροβιλο-υπερπλήρωση με ενδιάμεση ψύξη, (γ) στροβιλο-υπερπλήρωση δύο βαθμίδων, (δ) στροβιλο-υπερπλήρωση με στρόβιλο ισχύος, (ε) διπλή στροβιλο-υπερπλήρωση με δύο συμπιεστές εν σειρά, ο πρώτος συζευγμένος με τον κινητήρα και ο δεύτερος με στρόβιλο.

1.3.2. Σχεδιασμός του συμπιεστή

Εδώ έχουμε δύο κατηγορίες:

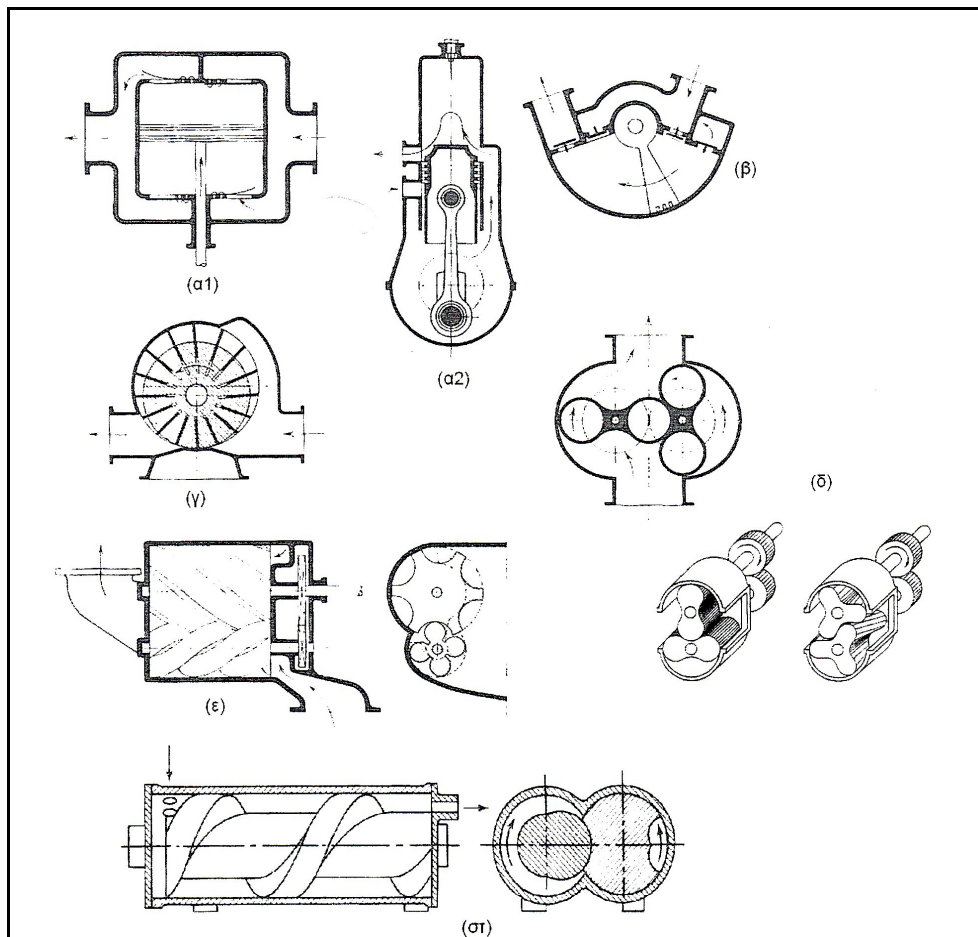
A) Συμπιεστές θετικού εκτόπισματος. Αυτοί με τη σειρά τους χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους παλινδρομικούς και τους περιστροφικούς.

Είδη παλινδρομικών: εμβολοφόροι, τύπου στροφαλοθαλάμου, τύπου ταλαντώμενων πτερυγίων

Είδη περιστροφικών: λοβοειδείς τύπου Roots, τύπου ολισθαινόντων πτερυγίων, κοχλιοειδείς τύπου Lysholm, κοχλιωτού τύπου(screw)

B) Συμπιεστές δυναμικής ροής. Εδώ έχουμε τρεις κατηγορίες: αξονικοί, φυγοκεντρικοί και συμπιεστές μικτής ροής.

Στο Σχήμα 1.3 παριστάνονται οι διάφοροι τύποι συμπιεστών θετικού εκτοπίσματος.



Σχήμα 1.3. Κατηγορίες συμπιεστών θετικού εκτοπίσματος. (α1) τυπικός εμβολοφόρος, (α2) τύπου στροφαλοθαλάμου, (β) ταλαντούμενων πτερυγίων, (γ) ολισθαινόντων πτερυγίων, (δ) λοβοειδής – Roots, (ε) κοχλιοειδής – Lysholm, (στ) κοχλιωτός – screw.

1.3.3. Σύνδεση κινητήρα – διάταξης υπερπλήρωσης. Μετάδοση ισχύος.

Υπάρχει πληθώρα μεθόδων σύνδεσης της διάταξης υπερπλήρωσης με τον κινητήρα, ανάλογα με τη χρήση που θέλουμε. Συνήθεις περιπτώσεις είναι οι εξείς:

1) Άμεση σύζευξη συμπιεστή στη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (μηχανική υπερπλήρωση – Σχήμα 1.2.α)

2) Ζεύγος συμπιεστή – στρόβιλου χωρίς άμεση σύμπλεξη με τον κινητήρα (στροβιλο-υπερπλήρωση – Σχήμα 1.2.β, γ)

3) Σύζευξη συμπιεστή - στρόβιλου υψηλής πίεσης και στρόβιλος ισχύος χαμηλής πίεσης συνδεδεμένος στη στροφαλόφορο (turbocompound engines – Σχήμα 1.2.δ). Χρήση σε αεροσκάφη.

4) Σύζευξη συμπιεστή υψηλής πίεσης – στρόβιλου και συμπιεστής χαμηλής πίεσης συνδεδεμένος στη στροφαλοφόρο (Σχήμα 1.2.ε). Χρήση σε 2-Χ κινητήρες και σε περιπτώσεις όπου απαιτείται βελτίωση της μεταβατικής λειτουργίας του κινητήρα.

5) Στρόβιλος ισχύος συνδεδεμένος με ζεύγος συμπιεστή - ΜΕΚ. Στην περίπτωση αυτή η στροφαλοφόρος άτρακτος αποδίδει εξ' ολοκλήρου την ισχύ της στο συμπιεστή. Χρησιμοποιείται σε μονάδες παραγωγής ισχύος (στην περίπτωση αυτή ο κινητήρας είναι τύπου ελεύθερων εμβόλων).

1.3.4. Είδος κινητήρα

A) 4-Χ ή 2-Χ κινητήρας

B) κινητήρας Otto ή Diesel.

1.4. Υπερπλήρωση και ταχύτητα περιστροφής

1.4.1. Εισαγωγή

Η ισχύς ενός κινητήρα είναι αντίστοιχη της ποσότητας του καυσίμου που αυτός διαχειρίζεται. Κατά συνέπεια εξαρτάται και από την παροχή του αναρροφώμενου αέρα. Γενικά επιδιώκεται η αύξηση της ισχύος μέσω υπερπλήρωσης χωρίς την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του. Τόσο η υπερπλήρωση όσο και οι αυξημένες στροφές μπορούν να βελτιώσουν την αναπνοή του κινητήρα, ωστόσο και οι δύο υπόκεινται σε τεχνολογικούς περιορισμούς της παραγόμενης ισχύος.

Η ισχύς ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης δίδεται από τη σχέση

$$P_e = zV_h \bar{p}_e \frac{n}{30K} = zA_e s \bar{p}_e \frac{n}{30K} = zA_e \bar{p}_e \frac{\bar{c}_e}{30K} \quad (1.1)$$

όπου $K=4$ για 4-Χ κινητήρα και $K=2$ για 2-Χ. Για δεδομένο αριθμό κυλίνδρων z και επιφάνεια εμβόλου $A_e = \pi D^2/4$, η αύξηση της ισχύος επιτυγχάνεται κυρίως με δύο μεθόδους: είτε με αύξηση της ταχύτητας περιστροφής (και συνεπώς της μέσης ταχύτητας εμβόλου c_e), είτε με αύξηση της μέσης πραγματικής πίεσης.

Ακολουθεί η σύγκριση των δύο μεθόδων.

1.4.2. Αύξηση ταχύτητας περιστροφής

Με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής ο κινητήρας υπόκειται σε μεγαλύτερες δυναμικές φορτίσεις. Οι φορτίσεις αυτές είναι ανάλογες του τετραγώνου της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής και οφείλονται σε παλινδρομούσες μάζες της μορφής

$$F_i = -m_i r \omega^2 (b/r \omega^2) \quad (1.2)$$

όπου b η επιτάχυνση του εμβόλου, και m_i το άθροισμα μαζών εμβόλου (m_e) και διωστήρα ($m_{\delta i}$).

Παράλληλα έχουμε σημαντική αύξηση των μηχανικών απωλειών της μορφής

$$\bar{p}_r = a + \beta p_{\max} + \gamma n^\delta \quad (1.3)$$

με $\delta > 1$.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι στην περίπτωση αύξησης της ταχύτητας περιστροφής (και συνεπώς της μέσης ταχύτητας εμβόλου), απαιτούνται κινούμενα μέρη λιγότερους βάρους για ελαχιστοποίηση των αδρανειακών φαινομένων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ακριβή σχεδιασμό και υλικά υψηλού κόστους, ενώ κατά τη μελέτη λαμβάνεται υπόψη η σχέση

$$I \cdot n = \text{σταθ} \quad (1.4)$$

όπου I κάποια χαρακτηριστική διάσταση του κινητήρα όπως είναι η διάμετρος του εμβόλου D .

Η μέση ταχύτητα εμβόλου κυμαίνεται από τιμές της τάξεως των 10m/sec (κινητήρες Diesel οχημάτων) έως 14m/sec (αντίστοιχοι κινητήρες Otto). Υψηλές ταχύτητες των 20m/sec απαντώνται μόνον σε κινητήρες αγωνιστικών οχημάτων οι οποίοι λειτουργούν σε πλήρης φορτίο και για μικρά χρονικά διαστήματα.

1.4.3. Αύξηση μέσης πίεσης

Στην περίπτωση όπου έχουμε αύξηση της ισχύος του κινητήρα μέσω υπερπλήρωσης (μεγαλύτερη μέση πραγματική πίεση), έχουμε γραμμική αύξηση των δυνάμεων εξ αερίων

$$F_g = p_g D^2/4 \quad (1.5)$$

Οι μηχανικές απώλειες διατηρούνται σε λογικά πλαίσια, ενώ τα θερμικά φορτία αυξάνουν με τον ίδιο τρόπο είτε με την υπερπλήρωση είτε με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής.

Κατά κανόνα οι δυνάμεις εξ' αερίων αντιμετωπίζονται πιο εύκολα σε σχέση με τις δυναμικές φορτίσεις, και συνεπώς η υπερπλήρωση δημιουργεί λιγότερο έντονες συνθήκες καταπονήσεων σε σχέση με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Για την αντιμετώπιση των φορτίσεων αυτών επιλέγονται κατάλληλα υλικά ώστε να προκύψει στιβαρή κατασκευή που θα αντέχει στις καταπονήσεις. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερο βάρος κινητήρα, όμως κατά κανόνα η τιμή του ειδικού βάρους (kg/kW παραγόμενης ισχύος) μειώνεται διότι η ισχύς αυξάνεται πολύ περισσότερο.

Τυπικές τιμές μέσης πραγματικής πίεσης κυμαίνονται από 10 (4-X Otto) μέχρι 16bar (υπερπληρωμένοι 4-X Diesel). Ωστόσο, σε ορισμένες κατηγορίες κινητήρων Diesel, όπως οι ναυτικοί, συναντάμε μέσες πιέσεις της τάξεως των 18-25 bar (πολύ μεγαλύτερες από το

συνηθισμένο), και μάλιστα σε μόνιμες καταστάσεις πλήρους φορτίου.

Οι μειωμένες φορτίσεις, το χαμηλότερο ειδικό βάρος και ευελιξία επιλογής τιμών πίεσης υπερπλήρωσης (σε αντίθεση με τις πιο περιορισμένες τιμές ταχύτητας περιστροφής) καθιστούν την υπερπλήρωση ως την καταλληλότερη μέθοδο αύξησης ισχύος στις ΜΕΚ. Εκτός αυτού, η υπερπλήρωση μπορεί να εφαρμοστεί πιο εύκολα σε υπάρχοντες κινητήρες, χωρίς να χρειαστεί να γίνει εκ νέου μελέτη και σχεδίαση (όπως θα συνέβαινε αν επιχειρούσαμε να αυξήσουμε την ταχύτητα περιστροφής).

1.5. Ιστορική αναδρομή – Σύγχρονες τάσεις

Το ζήτημα εφαρμογής της υπερπλήρωσης ανάγεται στην εποχή της εφεύρεσης των ΜΕΚ. Ο Gottlieb Daimler είχε ήδη κατοχυρώσει ευρεσιτεχνία από το 1885 όπου εφαρμοζόταν η μέθοδος, ενώ το 1905 ο Alfred Buchi κατέθεσε νέα εφεύρεση σύνθετου κινητήρα εξωτερικής πλήρωσης και μηχανικά συνδεδεμένο στρόβιλο. Το 1915 παρουσιάστηκε το πρώτο ανεξάρτητο ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης, στην οποία θα αναφερθούμε σε επόμενη παράγραφο.

Ήδη από το 1850 οι αδερφοί Roots στις Ηνωμένες Πολιτείες είχαν κατασκευάσει τον πρώτο συμπιεστή θετικού εκτοπίσματος, ενώ το 1878 ο Γερμανός Heinrich Krigar κατέθεσε ευρεσιτεχνία για τον κοχλιωτό συμπιεστή, τον οποίο επέλεξε ο Σουηδός Alf Lysholm 50 χρόνια αργότερα.

Η εφαρμογή της υπερπλήρωσης σε αεροπορικούς εμβολοφόρους κινητήρες βοήθησε στο να αντιμετωπιστεί η μείωση της απόδοσής τους σε μεγάλο υψόμετρο. Ο πρώτος υπερπληρωμένος κινητήρας τέτοιου είδους κατασκευάστηκε το 1910 από τους Murray – Willat. Ήταν 2-Χ περιστροφικός και μπορούσε να επιτύχει ατμοσφαιρικές συνθήκες στην αναρρόφηση ακόμη και σε υψόμετρο 5,2km. Η αντίστοιχη εφαρμογή στροβιλο-υπερπλήρωσης ανάγεται στα 1915 από τον Rateau.

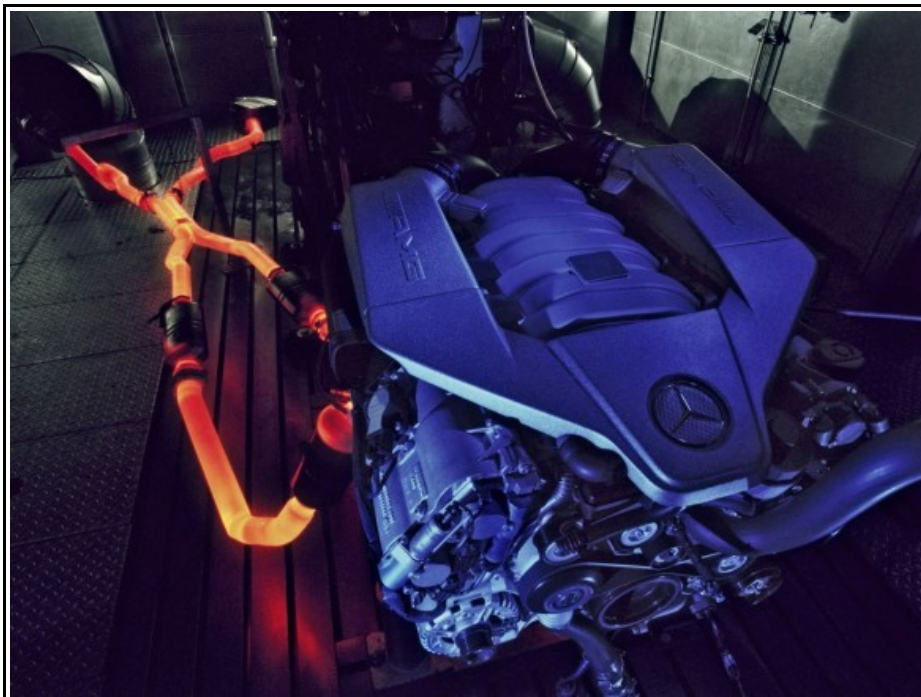
Το 1912 ο Daimler κατασκεύασε το πρώτο αυτοκίνητο με συμπίεση αέρα “Roots” (αναφέρεται παρακάτω) Ένας συμπλέκτης πραγματοποιούσε τη σύνδεση του συμπιεστή – κινητήρα μόνο για υψηλές ταχύτητες περιστροφής.

Η πρώτη πρακτική χρήση συμπιεστών πραγματοποιήθηκε στα αυτοκίνητα αγώνων, ενώ στη συνέχεια επεκτάθηκε σε όλες τις μορφές αυτοκίνησης (1938 – πρώτο αυτοκίνητο υπερπληρωμένου κινητήρα ευρείας παραγωγής της ελβετικής εταιρίας Sauer). Στα μέσα τις δεκαετίας του '50 ξεκίνησε η μαζική κατασκευή στροβιλοϋπερπληρωμένων 2-Χ κινητήρων Diesel. Συγκεκριμένα, το 1962 η General Motors λάνσαρε τα πρώτα αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής με κινητήρες Otto τέτοιου είδους (Oldsmobile Cutlass και

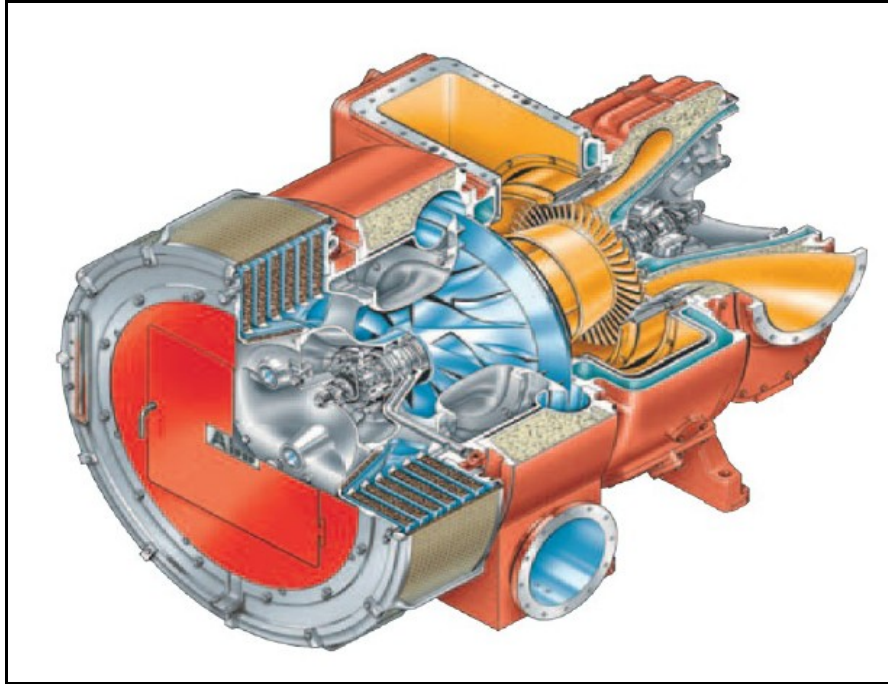
Chevrolet Convoir). Το πρώτο αυτοκίνητο με υπερπληρωμένο κινητήρα Diesel κατασκευάστηκε το 1978 από την Mercedes (SD 300) , ενώ ακολούθησε το Volkswagen Golf TD το 1981. Από το 1970 η υπερπλήρωση εφαρμόζεται και στο χώρο της Formula 1.

Στις μέρες μας, η υπερπλήρωση (για την ακρίβεια η στροβιλο-υπερπλήρωση) έχει επικρατήσει πλήρως στους κινητήρες Diesel, από εφαρμογές αυτοκινήτων όγκου εμβολισμού 2lt μέχρι μεγάλους ναυτικούς 2-Χ κινητήρες συνολικής ισχύος μέχρι και 100000HP και όγκου εμβολισμού 2m³ ανά κύλινδρο. Ωστόσο στους κινητήρες Otto η εφαρμογή είναι πιο περιορισμένη λόγω φαινομένων κρουστικής καύσης.

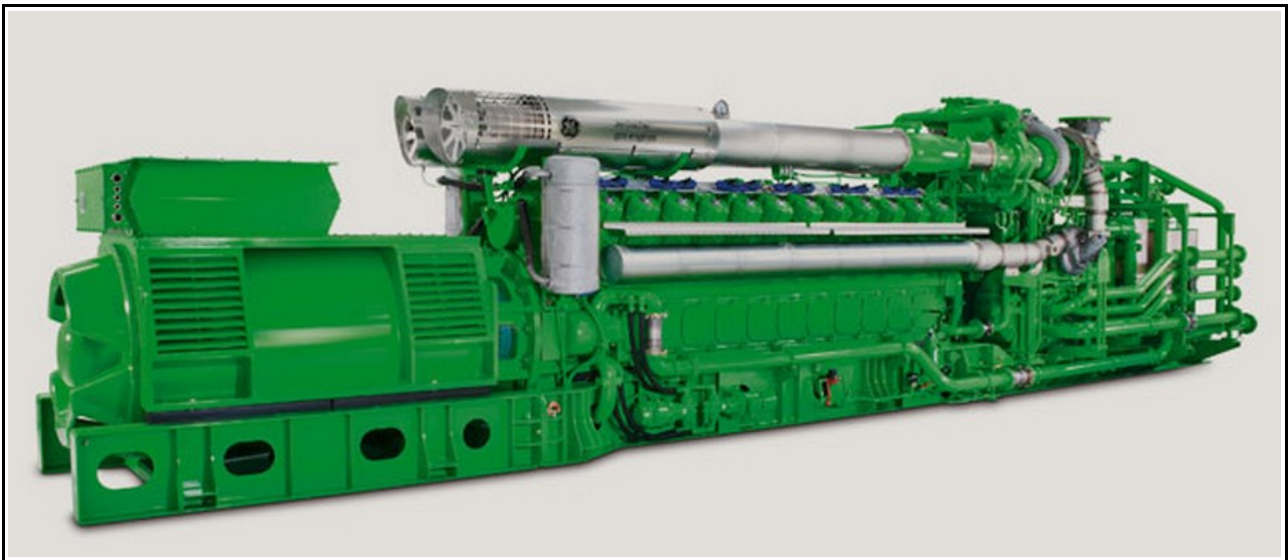
Στα παρακάτω σχήματα παρατίθενται υπερπληρωτές διαφόρων ειδών καθώς και εφαρμογές υπερπληρωμένων ΜΕΚ.



Σχήμα 1.4. V8 Κινητήρας 5.5lt της Mercedes Benz με διπλή στροβιλο-υπερπλήρωση (biturbo).



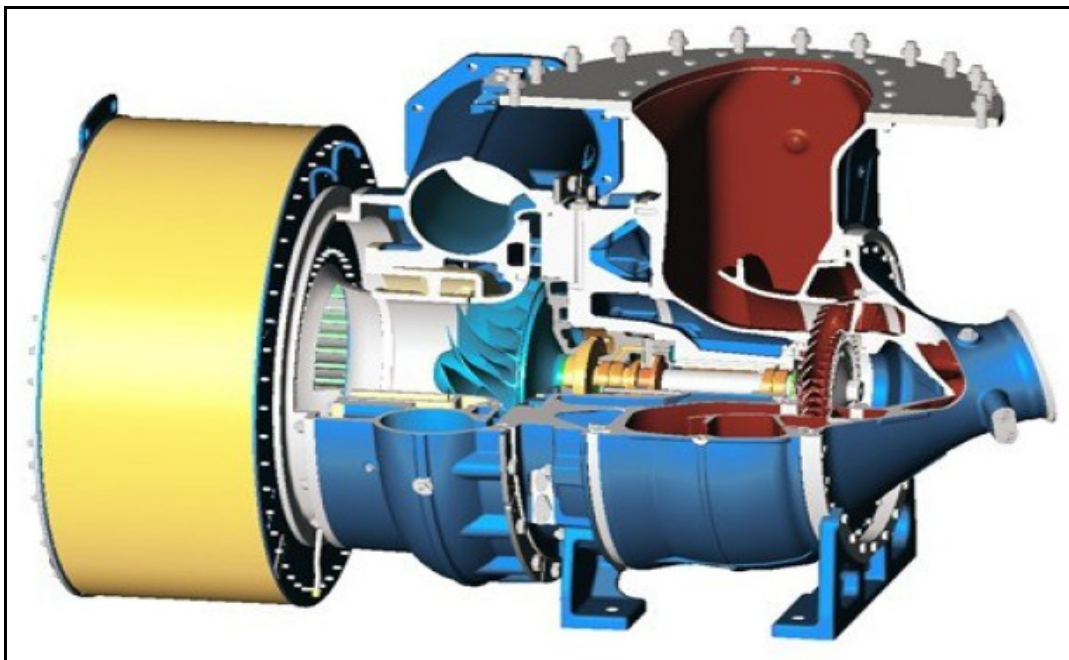
Σχήμα 1.5. στροβιλο-υπερπληρωτής VTR4 ναυτικών εφαρμογών της εταιρίας ABB.



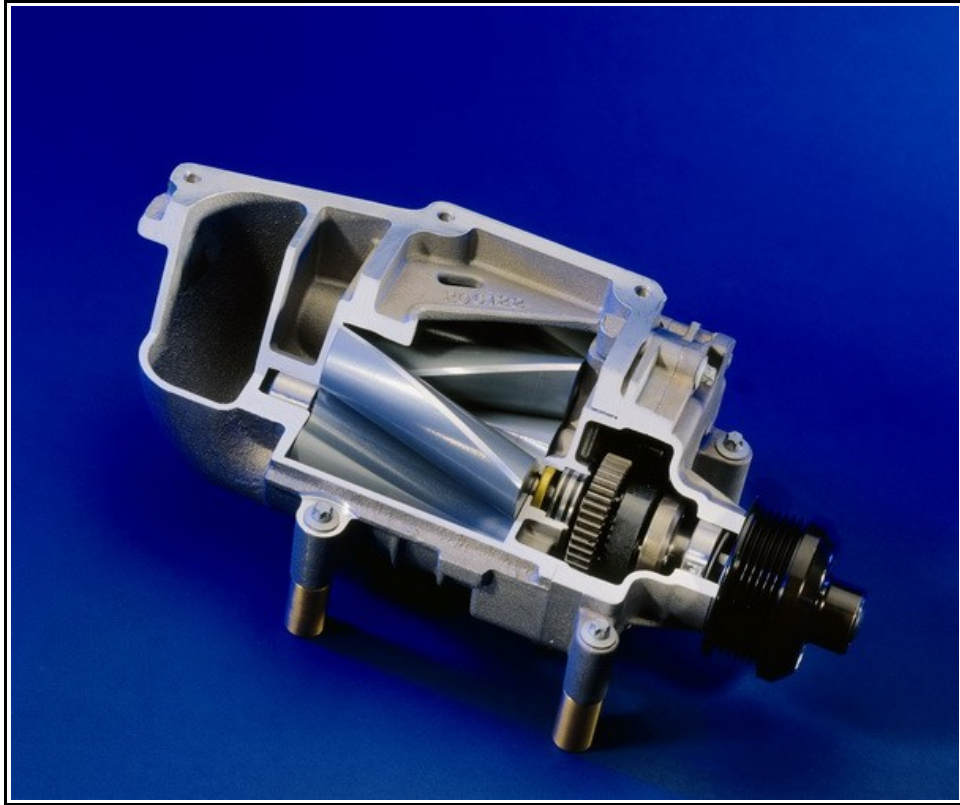
Σχήμα 1.6. Κινητήρας αερίου Otto Jenbacher με διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση (General Electric). Ισχύς 4.4MW στις 1500RPM.



Σχήμα 1.7. Ναυτικός στροβιλο-υπερπληρωμένος κινητήρας Diesel MTU ισχύος 1470KW στις 2000 RPM.



Σχήμα 1.8. στροβιλο-υπερπληρωτής TCA ναυτικών εφαρμογών της εταιρίας MAN B&W.



Σχήμα 1.9. Συμπιεστής Roots της Mercedes.

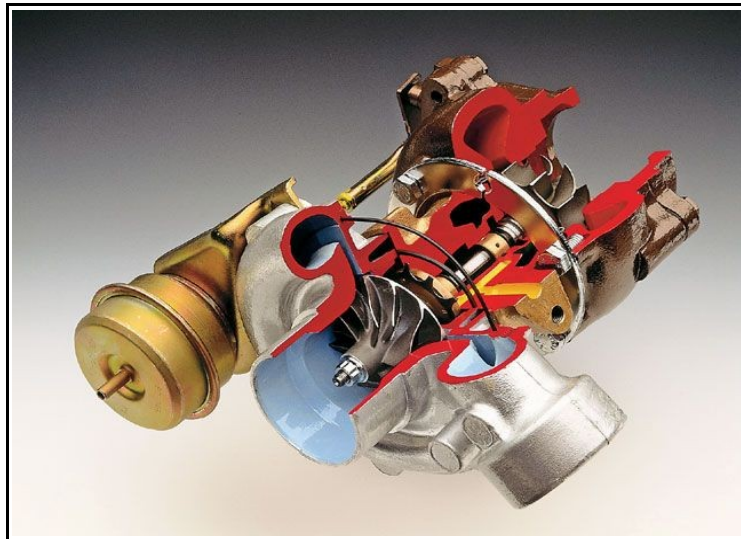
Κεφάλαιο 2. Βασικές αρχές στροβιλο-υπερπλήρωσης

2.1. Αρχή λειτουργίας

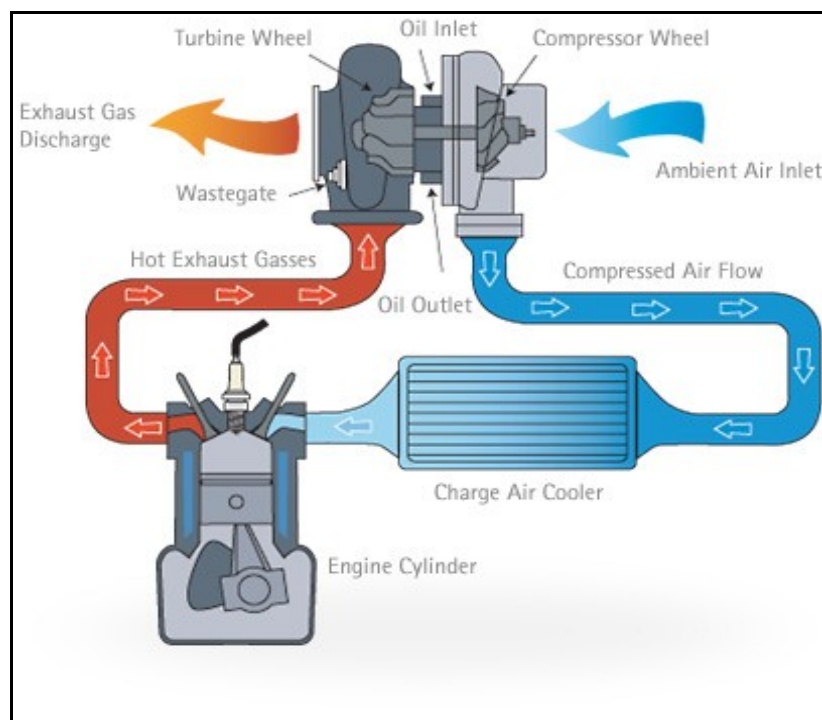
Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν διάφορες διατάξεις υπερπλήρωσης. Ο πιο διαδεδομένος συνδιασμός σήμερα αφορά τη χρήση στροβιλοϋεραπληρωτή (turbocharging) με ενδιάμεση ψύξη αέρα (cooling).

Ο στροβιλο-υπερπληρωτής αποτελείται από συμπιεστή ακτινικής μορφής και στρόβιλο ακτινικής (μικρά μεγέθη - εφαρμογές στην αυτοκίνηση) ή αξονικής (μεγάλα μεγέθη – βιομηχανικές εφαρμογές) μορφής. Ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι μηχανικά συζευγμένοι σε κοινή άτρακτο, και συνεπώς το έργο για την κίνηση του συμπιεστή παρέχεται από το στρόβιλο χωρίς να απορροφάται μηχανικό έργο από τη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (Σχήμα 2.1). Η ανεξαρτησία στροβιλο-υπερπληρωτή – ΜΕΚ εξασφαλίζει απλότητα κατασκευής και ιδιαίτερα υψηλή συγκέντρωση ισχύος, ενώ έχουμε και μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.

Στο Σχήμα 2.2 παριστάνεται η αρχή λειτουργίας της στροβιλο-υπερπλήρωσης: Ο αέρας περιβάλλοντος (ψυχρό τμήμα/μπλέ χρώμα) αναρροφάται από το συμπιεστή, ψύχεται και οδηγείται στην εισαγωγή του κινητήρα, ενώ τα καυσαέρια (θερμό τμήμα/κόκκινο χρώμα) διέρχονται από το στρόβιλο και παράγεται ωφέλιμο έργο προς εκμετάλλευση του συμπιεστή. Διακρίνονται επίσης τα σημεία εισόδου/εξόδου του ελαίου λίπανσης των ένσφαιρων τριβών του στροβιλο-υπερπληρωτή (oil inlet/outlet).



Σχήμα 2.1. Ζεύγος στροβιλο-υπερπλήρωσης της Mercedes.



Σχήμα 2.2. Αρχή λειτουργίας στροβιλο-υπερπλήρωσης

Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο μονοβάθμιοι στροβιλοϋπερπληρωτές με λόγο πιέσεων συμπιεστή περίπου 3,5:1, για μέσες πραγματικές πιέσεις λειτουργίας κινητήρα της τάξης των 20-25bar. Για υψηλότερες πιέσεις χρησιμοποιούνται διβάθμιες διατάξεις.

2.2. Συμπιεστής

Ο συμπιεστής αποτελείται από δύο κύρια μέρη (Σχήμα 2.3), την πτερωτή (περιστρεφόμενο τμήμα) και το κέλυφος ή διαχύτη (ακίνητο τμήμα). Το κέλυφος διαθέτει ρυθμιστικά πτερύγια.



Σχήμα 2.3. Πτερωτή και κέλυφος ακτινικού συμπιεστή.

Ο αέρας διερχόμενος από την πτερωτή αποκτά υψηλή ταχύτητα και συνεπώς αυξημένη κινητική ενέργεια. Στη συνέχεια η ροή επιβραδύνεται εντός του κελύφους με αποτέλεσμα την αύξηση της στατικής πίεσης, ώστε να τροφοδοτηθεί ο κινητήρας.

2.3. Στρόβιλος

Ο στρόβιλος αποτελείται επίσης από δύο τμήματα: την κινητή πτερύγωση (ρότορα) και το κέλυφος (διαχύτη). Τα καυσαέρια διέρχονται από το σταθερό κέλυφος, όπου αποκτούν υψηλή κινητική ενέργεια (πτώση στατικής πίεσης) και αποτονώνονται στο ρότορα αποδίδοντας μηχανική ενέργεια στην άτρακτο του στροβιλο-υπερπληρωτή.

Ο στρόβιλος μπορεί να έχει μία ή δύο εισόδους καυσαερίου, ανάλογα με το είδος της πολλαπλής εξαγωγής του κινητήρα (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4. Πολλαπλή εξαγωγή καυσαερίων κινητήρα.

2.4. Βασικές εξισώσεις θερμοδυναμικής

Το διάγραμμα παριστάνει τις θερμοδυναμικές μεταβολές τυπικού ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης σε άξονες θερμοκρασίας – εντροπίας.

Ο πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής για το συμπιεστή έχει ως εξής:

$$Q_c - W_c = \dot{m} \left[\left(h_2 + \frac{C_2^2}{2} + \Delta E_2 \right) - \left(h_1 + \frac{C_1^2}{2} + \Delta E_1 \right) \right] \quad (2.1)$$

όπου Q_c η εισερχόμενη ροή θερμότητας, W_c η απαγόμενη ισχύς, m η παροχή μάζας και ΔE η δυναμική ενέργεια του ρευστού.

Εισάγοντας την έννοια της ενθαλπίας ανακοπής h_o

$$h_o = h + \frac{C^2}{2} \quad (2.2)$$

και αγνοώντας τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας ως πρακτικά αμελητέα, η (2.1) καταλήγει στην

$$-\dot{W}_c = \dot{m}(h_{02} - h_{01}) \quad (2.3)$$

με ανάλογο τρόπο έχουμε την εξίσωση του στροβίλου

$$-\dot{W}_T = \dot{m}(h_{03} - h_{04}) \quad (2.4)$$

Ορίζουμε ως ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή το πηλίκο

$$\eta_{ic} = \frac{\text{ισεντροπικό έργο}}{\text{πραγματικό έργο}} = \frac{h'_{02} - h_{01}}{h_{02} - h_{01}} = \frac{T'_{02} - T_{01}}{T_{02} - T_{01}} \quad (2.5)$$

όπου η τρίτη ισότητα ισχύει για σταθερό c_p .

Ο παραπάνω βαθμός απόδοσης είναι γνωστός ως “ολικά προς ολικά/total to total”, διότι συσχετίζει ολικές συνθήκες τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του συμπιεστή.

Για την ισεντροπική μεταβολή 1- 2' η πίεση και η θερμοκρασία συνδέονται με την εξίσωση

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \left(\frac{T'_{02}}{T_{01}} \right)^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a - 1}} \quad (2.6)$$

όπου $p_{02} = p_{02}'$

οπότε η εξίσωση (2.5) γίνεται

$$\eta_{ic \text{ t-t}} = \frac{T_{01} \left[\left(\frac{T'_{02}}{T_{01}} \right) - 1 \right]}{T_{02} - T_{01}} = \frac{T_{01} \left[\left(\frac{p_{02}}{p_{01}} \right)^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a - 1}} - 1 \right]}{T_{02} - T_{01}} = \frac{\left(\frac{p_{02}}{p_{01}} \right)^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a - 1}} - 1}{\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1} \quad (2.7)$$

Κατ'αναλογία με τον βαθμό απόδοσης “total to total” ορίζεται ο βαθμός απόδοσης “στατικά προς ολικά/total to static”:

$$\eta_{ic\ t-s} = \frac{h'_2 - h_{01}}{h_2 - h_{01}} = \frac{T'_2 - T_{01}}{T_2 - T_{01}} = \frac{\left(\frac{p_2}{p_{01}}\right)^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a - 1}} - 1}{\frac{T_2}{T_{01}} - 1} \quad (2.8)$$

Εδώ χρησιμοποιούνται οι στατικές ενθαλπίες εξόδου του συμπιεστή, οι οποίες έχουν περίπου ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες ολικές ενθαλπίες εξόδου διότι η κινητική ενέργεια του ρευστού είναι πλέον κατά πολύ μικρότερη. Συνεπώς οι δύο βαθμοί απόδοσης αποτελούν παραπλήσια μεγέθη.

Τέλος, ορίζεται ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή

$$\eta_{c\infty} = \frac{dT'}{dT} = \frac{\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a - 1}}}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} \quad (2.9)$$

ο οποίος συνδέεται με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης μέσω της (2.10):

$$\eta_{ic} = \frac{\left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a - 1}} - 1}{\left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a - 1}} \eta_{c\infty} - 1} \quad (2.10)$$

Η θερμοκρασία T_2 στην έξοδο του στροβίλου μπορεί να υπολογιστεί μέσω του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης “στατικά προς στατικά/static to static”:

$$\eta_{ic\ s-s} = \frac{T'_2 - T_1}{T_2 - T_1} \quad (2.11)$$

ΟΠΟΤΕ

$$T_2 = T_1 \left[1 + \frac{\left(\frac{p_2}{p_{01}} \right)^{\frac{\gamma_a}{\eta_{ic}} - 1}}{\eta_{ic}} \right] \quad (2.12)$$

Για το στρόβιλο ορίζονται ανάλογες σχέσεις:

Ισεντροπικός βαθμός στροβίλου “ολικά προς ολικά”

$$\eta_{iT-t} = \frac{h_{03} - h_{04}}{h_{03} - h'_{04}} = \frac{T_{03} - T_{04}}{T_{03} \left[1 - \frac{T_{04}}{T_{03}} \right]} = \frac{T_{03} - T_{04}}{T_{03} \left[1 - \left(\frac{p_{04}}{p_{03}} \right)^{\frac{\gamma_R - 1}{\eta_{ic}}} \right]} = \frac{1 - \frac{T_{04}}{T_{03}}}{1 - \left(\frac{p_{04}}{p_{03}} \right)^{\frac{\gamma_R - 1}{\eta_{ic}}}} \quad (2.13)$$

Ισεντροπικός βαθμός στροβίλου “ολικά προς στατικά”

$$\eta_{iT-t-s} = \frac{T_{03} - T_4}{T_{03} - T'_4} = \frac{1 - \frac{T_4}{T_{03}}}{1 - \left(\frac{p_4}{p_{03}} \right)^{\frac{\gamma_R - 1}{\eta_{ic}}}} \quad (2.14)$$

Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου

$$\eta_{T\infty} = \frac{\ln \left(\frac{T_3}{T_4} \right)^{\frac{\gamma_R}{\eta_{ic}} - 1}}{\ln \left(\frac{p_3}{p_4} \right)} \quad (2.15)$$

ενώ η θερμοκρασία T_4 στην έξοδο του στροβίλου υπολογίζεται με τη βοήθεια του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης “στατικά προς στατικά”:

$$\eta_{iT-s-s} = \frac{T'_3 - T_4}{T_3 - T'_4} \quad (2.16)$$

ΟΠΟΤΕ

$$T_4 = T_3 \left[1 - \eta_{iT} \left(1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma_R - 1}{\gamma_R}} \right) \right] \quad (2.17)$$

2.5. Μεγέθη – Υλικά κατασκευής - Θόρυβος

2.5.1. Μεγέθη

Όπως προαναφέρθηκε, οι συμπιεστές των υπερπληρωτών που απαντώνται στις εμβολοφόρες ΜΕΚ είναι συνήθως ακτινικοί, για λόγους κόστους και μεγέθους. Γενικότερα οι ακτινικοί στρόβιλοι χρησιμοποιούνται σε μικρές μονάδες, δεδομένου ότι κατασκευάζονται με χύτευση μεγάλης ακρίβειας και με υλικά υψηλής αντοχής, κάτι το οποίο είναι οικονομικά συμφέρον μόνο σε περίπτωση παραγωγής μικρών μονάδων σε μεγάλες ποσότητες. Το όριο διαμέτρου πτερωτής για τους ακτινικούς είναι γύρω στα 160 mm, ενώ για μεγέθη μεγαλύτερα των 300mm χρησιμοποιούνται αξονικοί στρόβιλοι.

2.5.2. Υλικά κατασκευής

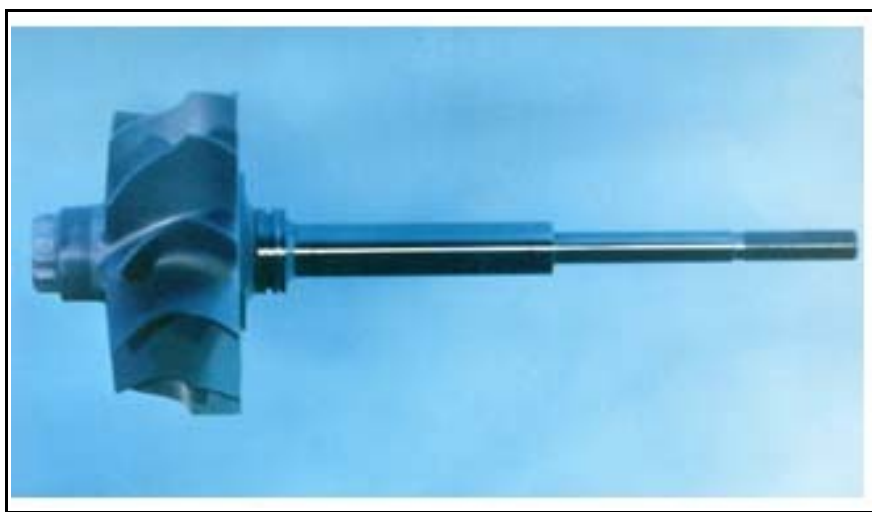
Οι πτερωτές των συμπιεστών κατασκευάζονται είτε από χυτά υλικά είτε από σφυρήλατα, όπως κράματα αλουμινίου (Σχήμα 2.5), χάλυβας (για υψηλή αντοχή), ή ακόμη και τιτάνιο (λύση υψηλότερου κόστους). Το κέλυφος του συμπιεστή κατασκευάζεται συνήθως από χυτό αλουμίνιο.



Σχήμα 2.5. Πτερωτή ακτινικού συμπιεστή κατασκευασμένη από αλουμίνιο.

Οι πτερωτές των στροβίλων παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες ως προς την επιλογή των υλικών, καθώς ανήκουν στο θερμό τμήμα του στροβιλο-υπερπληρωτή, και συνεπώς οι απαιτήσεις τόσο θερμικής όσο και μηχανικής αντοχής είναι ιδιαίτερα υψηλές. Οι ακτινικοί στρόβιλοι κατασκευάζονται μέσω χύτευσης ακριβείας, ενώ οι αξονικοί στρόβιλοι αποτελούνται από σφυρήλατο δίσκο με ξεχωριστά πτερύγια. Ο δίσκος του ρότορα συνήθως αποτελείται από κράμα χάλυβα – χρωμίου - νικελίου (chrome – nickel steel) και τα πτερύγια από Nimonic 80A (τυπική σύσταση 50%Ni-20%Cr με προσμίξεις τιτανίου και αλουμινίου).

Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή του υλικού εξαρτάται από το πεδίο χρήσης του εκάστοτε στροβιλο-υπερπληρωτή. Για παράδειγμα, σε μεγάλους 2-Χ κινητήρες η θερμοκρασία των καυσαερίων που διέρχονται απ το στρόβιλο δεν ξεπερνά τους 500°C, ενώ σε 2-Χ Otto κινητήρες στοιχειομετρικής καύσης οι θερμοκρασίες μπορεί να ξεπεράσουν τους 1000°C. Συνεπώς έχουμε διαφορετικά κριτήρια επιλογής υλικού λόγω των διαφορετικών θερμοκρασιακών συνθηκών στα πτερύγια. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια κερδίζουν συνεχώς έδαφος τα κεραμικά υλικά (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6. Πτερωτή αξονικού στροβίλου κατασκευασμένη από κεραμικό υλικό.

Όσον αφορά το κέλυφος του στροβίλου, χρησιμοποιούνται υλικά όπως σίδηρος με προσμίξεις σφαιροειδή γραφίτη ώστε να αντιμετωπιστούν οι δυσμενείς θερμικές καταπονήσεις.

2.5.3. Λίπανση

Για τη λίπανση του υπερπληρωτή συνήθως χρησιμοποιείται έλαιο του συστήματος λίπανσης του κινητήρα. Το έλαιο διοχετεύεται στους τριβείς υπό πίεση, ενώ ειδικά για το θερμό τμήμα του στροβιλο-υπερπληρωτή χρησιμεύει και ως ψυκτικό μέσο (η ψύξη σε μεγάλα μεγέθη ναυτικών κινητήρων γίνεται και με νερό).

Στους στροβιλοϋπερπληρωτές χρησιμοποιούνται ειδικοί ορειχάλκινοι τριβείς με χυτοσιδηρά κελύφη. Επειδή οι υψηλές ταχύτητες περιστροφής των σύγχρονων διατάξεων μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα αντοχής, χρησιμοποιούνται σύγχρονα υδροστατικά έδρανα με φιλμ ελαίου (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7. Σύγχρονο υδροστατικό έδρανο της ABB.

2.5.4. Θόρυβος

Συνήθως τα τμήματα του στροβιλο-υπερπληρωτή λειτουργούν σε αρκετά χαμηλά επίπεδα θορύβου. Ωστόσο, είναι δυνατόν να παράγονται ανομοιομορφίες και εντάσεις ηχητικού πεδίου στο συμπιεστή, και συγκεκριμένα κατά την είσοδο του αέρα στο διαχύτη. Αυτό συμβαίνει λόγω ανομοιομορφίας του πεδίου ροής στο άκρο της κινητής πτερύγωσης.

Η ένταση του θορύβου εξαρτάται από τον αριθμό πτερυγίων του ρότορα και την ταχύτητα περιστροφής του.

Για την ελαχιστοποίηση του θορύβου συνηθίζεται η εισροή αέρα στο διαχύτη διαμέσου διάταξης ηχητικής απόσβεσης, του αποσιωπητήρα (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8. Αποσιωπητήρας προσαρμοσμένος σε στροβιλο-υπερπληρωτή μεγάλου μεγέθους της εταιρίας ABB.

Κεφάλαιο 3. Συμπιεστές

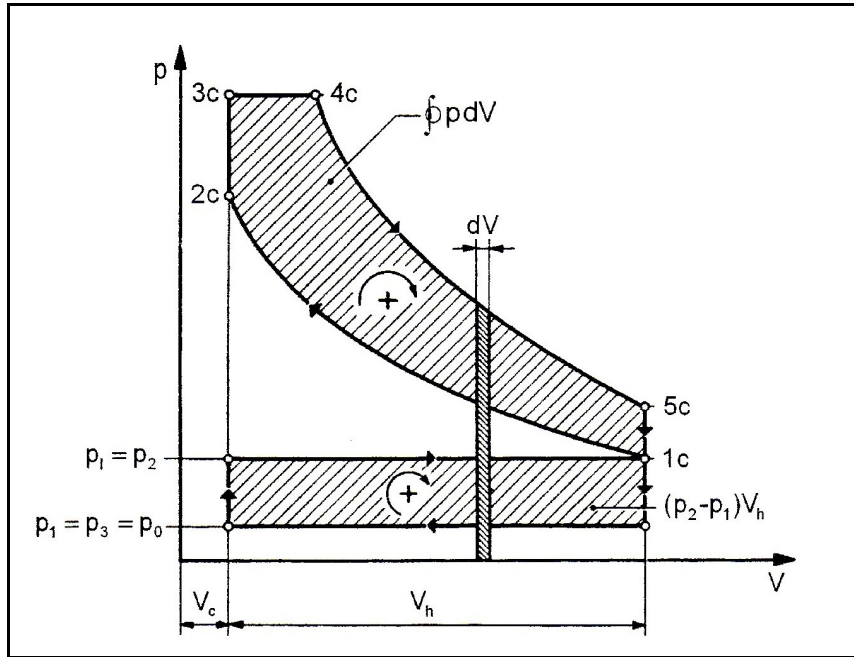
3.1. Εισαγωγή

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 1, στις συνήθεις εφαρμογές υπερπλήρωσης η προσυμπύεση της γόμωσης του κυλίνδρου πραγματοποιείται σε κάποιο συμπιεστή. Το μέγεθός του είναι πολύ σημαντικό για το ταίριασμα κινητήρα – συστήματος υπερπλήρωσης και καθορίζεται από παράγοντες όπως η παροχή εργαζόμενου μέσου και ο λόγος πιέσεων p_2/p_1 κατάντι και ανάντι του συμπιεστή αντίστοιχα.

3.2. Υπολογισμός της ισχύος συμπιεστή

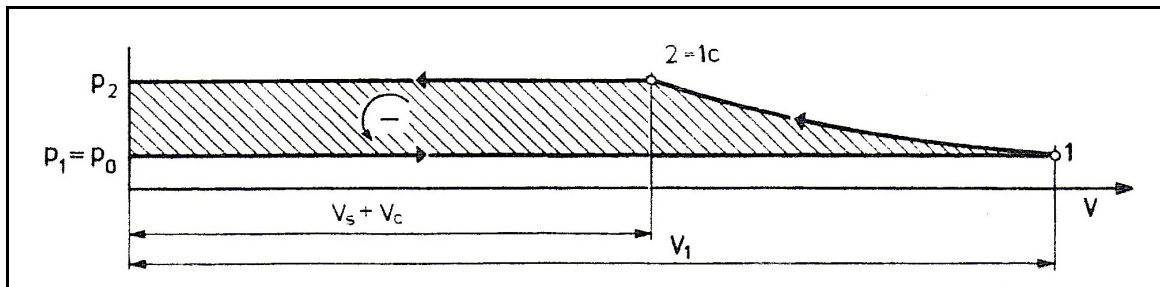
Στο σχήμα 3.1 παριστάνεται το εξιδανικευμένο δυναμοδεικτικό διάγραμμα 4-Χ μηχανικά υπερπληρωμένου κινητήρα. Το ενδεικνυμένο έργο W_{id} του ιδανικού κινητήρα περιέχει τον όρο πίεσης $p \cdot dV$ και τον όρο του βρόγχου αναρρόφησης $(p_2 - p_1)V_h$:

$$W_{id} = \oint p dV + (p_2 - p_1)V_h \quad (3.1)$$



Σχήμα 3.1. Εξιδανικευμένο δυναμοδεικτικό διάγραμμα 4-χρονου μηχανικά υπερπληρωμένου κινητήρα

Το θετικό έργο αναρρόφησης του 4-χρονου κινητήρα πρέπει να εξασφαλιστεί από το έργο που καταναλώνει ο συμπιεστής. Ο όγκος $V_h + V_c$ του κυλίνδρου του ιδανικού κινητήρα πληρώνεται εκ νέου με εργαζόμενο μέσο, οπότε η επιφάνεια που αντιστοιχεί στο έργο του συμπιεστή (Διάγραμμα 3.1) πρέπει να επεκταθεί μέχρι τον κατακόρυφο άξονα.



Διάγραμμα 3.1. Καμπύλη p-V συμπιεστή.

Το έργο της ισεντροπικής συμπίεσης είναι:

$$W_{ic} = p_1 V_1 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] \quad (3.2)$$

Στην παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται η πίεση ανακοπής (=στατική + δυναμική πίεση). Εφόσον $p_2/p_1 > 0$, το έργο συμπίεσης είναι αρνητικό.

Κατά την ισεντροπική συμπίεση έχουμε μεταβολή ενθαλπίας

$$\Delta h_{iC} = c_p (T_2' - T_1) = c_p T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_\alpha - 1}{\gamma_\alpha}} - 1 \right] \quad (3.3)$$

και το ισεντροπικό έργο συμπίεσης είναι

$$W_{iC} = m R T_1 \frac{\gamma_\alpha}{\gamma_\alpha - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_\alpha - 1}{\gamma_\alpha}} \right] = -m \Delta h_{iC} \quad (3.4)$$

Συνήθως το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω εξίσωση παραλείπεται.

Το έργο πραγματικής συμπίεσης είναι:

$$W_c = \frac{m \Delta h_{iC}}{\eta_{iC}} \quad (3.5)$$

Όπου η_{iC} είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή. Εάν η μάζα m στην παραπάνω εξίσωση αντικατασταθεί με την παροχή μάζας τότε έχουμε την ισχύ του συμπιεστή

$$P_c = \dot{W}_{iC} = \frac{\dot{m} \Delta h_{iC}}{\eta_{iC}} \quad (3.6)$$

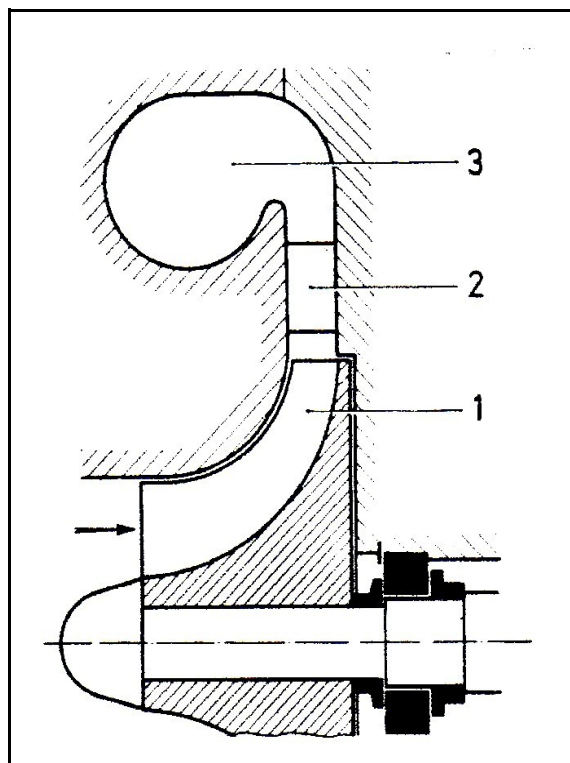
3.3. Συμπιεστής δυναμικής ροής

3.3.1. Εισαγωγή

Ο σημαντικότερος εκπρόσωπος της κατηγορίας αυτής είναι ο ακτινικός (φυγοκεντρικός) συμπιεστής, και ονομάζεται έτσι λόγω της ακτινικής έξοδου του αέρα κατάντι. Η κατεύθυνση της εισερχόμενης ροής είναι συνήθως αξονική. Οι ακτινικοί συμπιεστές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά σε εφαρμογές στροβιλο-υπερπλήρωσης με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης ενώ ο λόγος πίεσης φθάνει μέχρι το 3,5:1 ανά βαθμίδα.

Η ταχύτητα περιστροφής τους είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτήν της εμβολοφόρου Μ.Ε.Κ. Συνεπώς είναι αδύνατον να συνδεθούν μηχανικά με τη στροφαλοφόρο άτρακτο, όπως γίνεται με τους συντελεστές θετικού εκτοπίσματος.

Στο Σχήμα 3.2 διακρίνουμε τα κύρια μέρη ενός ακτινικού συμπιεστή. Διαμέσου της πτερωτής (1) η ταχύτητα του ρευστού αυξάνει λόγω μεταφοράς ορμής από τα πτερύγιά της και στη συνέχεια η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε στατική πίεση στο διαχύτη (2) και στο σπειροειδές κέλυφος (3).

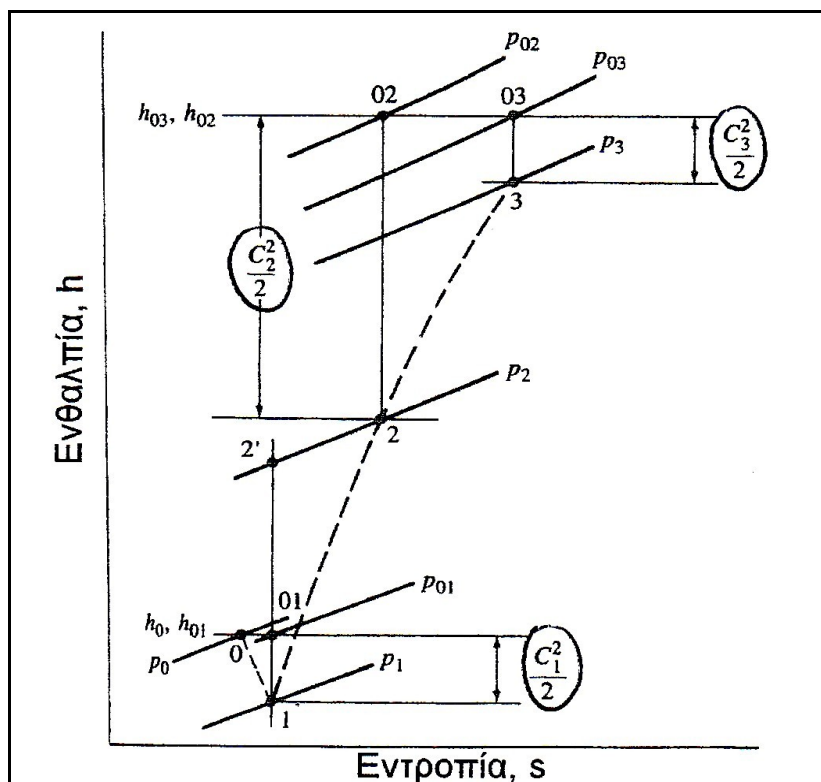


Σχήμα 3.2. Τμήματα ακτινικού συμπιεστή: 1. πτερωτή, 2. διαχύτης, 3. σπειροειδές κέλυφος.

Σε συμπιεστές υπερπλήρωσης προτιμώνται πτερωτές με μη συνδεδεμένα πτερύγια στο επάνω τμήμα τους (shroudless impeller). Στην περίπτωση αυτή η διεύθυνση της ροής ορίζεται από τα πτερύγια και το πίσω μέρος της πτερωτής στη μια πλευρά και το περιβάλλον τοίχωμα στην άλλη.

3.3.2. Περιγραφή της ροής

Στο διάγραμμα 3.2 παριστάνεται η καμπύλη h-s τυπικού φυγοκεντρικού συμπιεστή.



Διάγραμμα 3.2. Καμπύλες ενθαλπίας- εντροπίας φυγοκεντρικού συμπιεστή.

Ο αέρας από την κατάσταση 0 (περιβάλλον) επιταχύνεται στη εισαγωγή (πίεση p_1 , ταχύτητα C_1). Η ολική ενθαλπία (κατάσταση ανακοπής 01) διαφέρει από την στατική ενθαλπία κατά τον όρο κινητικής ενέργειας $(C_1)^2/2$. Στη συνέχεια το ρευστό συμπιέζεται στην πτερωτή και μεταβαίνει στην κατάσταση 2 (p_2, C_2). Η αντίστοιχη ισεντροπική συμπίεση έχει κατάσταση εξόδου τη 2'. Με 2' συμβολίζεται η αντίστοιχη ισεντροπική κατάσταση συμπίεσης, ενώ η κατάσταση 02 αναφέρεται στα μεγέθη ανακοπής.

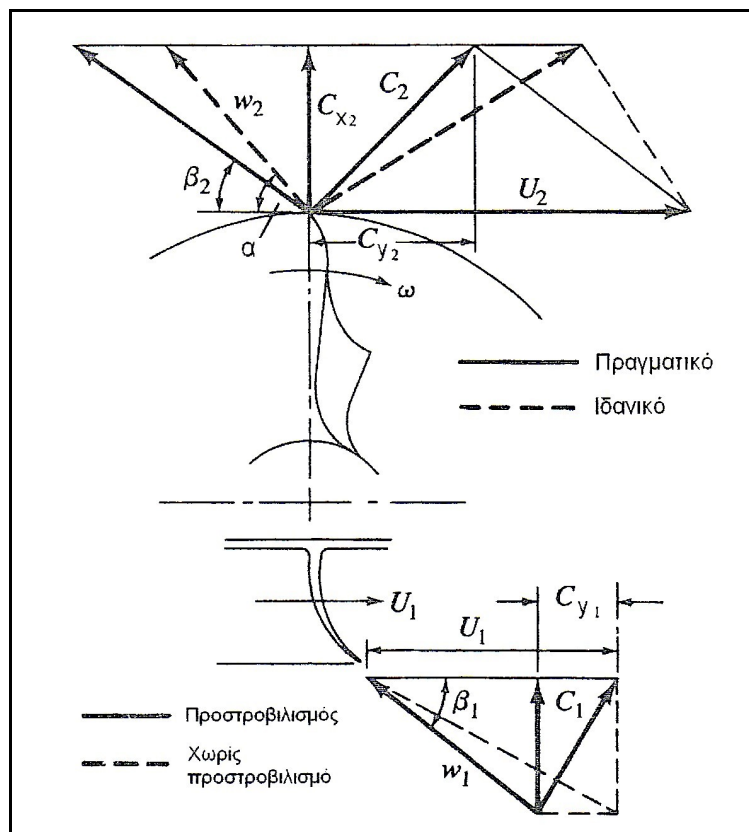
Στο κέλυφος (μεταβολή 2-3), το μεγαλύτερο ποσοστό κινητικής ενέργειας ρευστού στην έξοδο της πτερωτής - όρος $(C_2)^2/2$ - μετατρέπεται σε αύξηση στατικής πίεσης από p_2 σε p_3 (επιβράδυνση της ροής). Στην έξοδο του κελύφους (p_3, C_3) έχουμε πλέον χαμηλή

κινητική ενέργεια και πίεση ανακοπής p_{03} πολύ μικρότερη της p_{02} , (μη αναστρέψιμη διεργασία).

Η βασική εξίσωση υπολογισμού αυτού του είδους συμπιεστών είναι η γνωστή από τις στροβιλομηχανές εξίσωση Euler (Σχήμα 3.3):

$$-W_c = M\omega_{TC} = m\omega_{TC}(r_2 C_{y2} \pm r_1 C_{y1}) = m(U_2 C_{y2} \pm U_1 C_{y1}) \quad (3.7)$$

Οι δείκτες 1, 2 αντιστοιχούν στην είσοδο και στην έξοδο της πτερωτής αντίστοιχα. Με U συμβολίζεται η εφαπτομενική και με C η απόλυτη ταχύτητα, ενώ r είναι η αντίστοιχη ακτίνα (εισόδου/εξόδου) της πτερωτής.



Σχήμα 3.3. Τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο (1) και έξοδο (2) πτερωτής φυγοκεντρικού συμπιεστή.

Από την εξίσωση Euler βρίσκουμε η αντίστοιχη θερμοκρασιακή άνοδος ΔT_c εντός της πτερωτής συναρτήσει των ταχυτήτων:

$$-W_c = \dot{m}(h_{03} - h_{01}) = \dot{m}c_p(T_{03} - T_{01}) = \dot{m}(U_2 C_{y2} \pm U_1 C_{y1}) \quad (3.8)$$

άρα

$$\Delta T_c = T_{03} - T_{01} = \frac{U_2 C_{y2} \pm U_1 C_{y1}}{c_p} \quad (3.9)$$

Συνήθως η ροή στην πτερωτή εισέρχεται αξονικά ($C_{y1}=0$), οπότε η εξίσωση Euler τροποποιείται:

$$-W_c = \dot{m}U_2 \left(1 \pm \frac{C_{x2}}{U_2} \cot\beta_2\right) \quad (3.10)$$

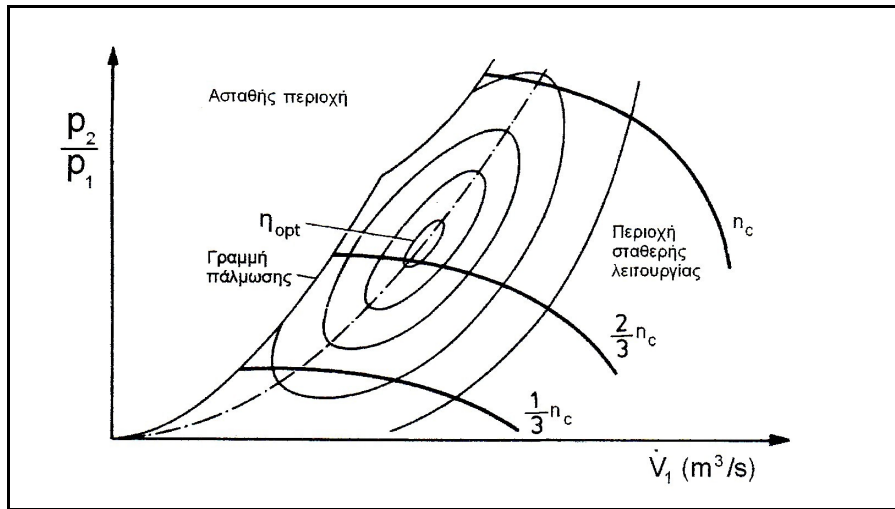
Στην ιδανική περίπτωση (Σχήμα 3.3 - διακεκομμένη γραμμή) η γωνία β_2 ταυτίζεται με την γωνία α του πτερυγίου. Στην πραγματικότητα όμως εμφανίζεται ολίσθηση οπότε η β_2 είναι μικρότερη.

Στις παραπάνω εξισώσεις το αρνητικό πρόσημο αντιστοιχεί σε θετική συστροφή (στροβιλισμός του ρευστού πριν την εισαγωγή στην πτερωτή), ενώ το θετικό πρόσημο σε αρνητική συστροφή.

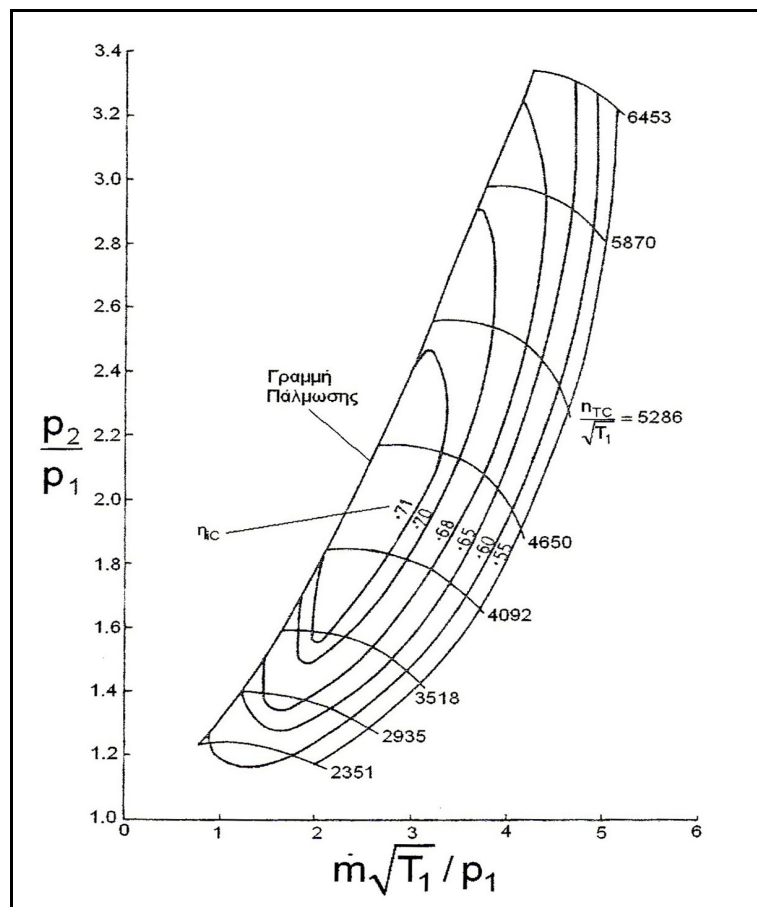
Τέλος, η παροχή ενέργειας (συνεπώς και ο λόγος πιέσεων) είναι ανάλογη του τετραγώνου της περιφερειακής ταχύτητας.

3.3.3. Χάρτης λειτουργίας αξονικού συμπιεστή

Στα Διαγράμματα 3.3 και 3.4 δίνονται χάρτες λειτουργίας τυπικού ακτινικού συμπιεστή συναρτήσει της παροχής όγκου αέρα (είτε καθαρή είτε σε μορφή αδιαστατοποιημένης μάζας).



Διάγραμμα 3.3. Χάρτης λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή.



Διάγραμμα 3.4. Χάρτης λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή.

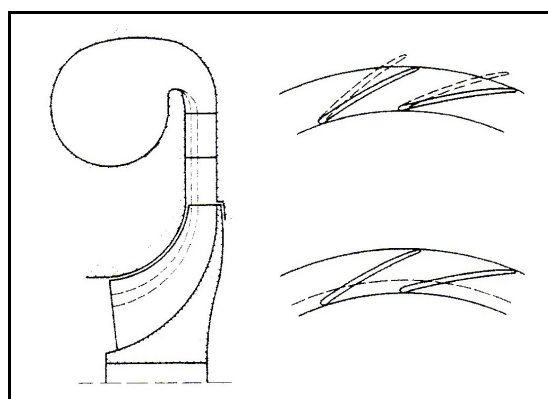
Στους χάρτες αυτούς διακρίνονται δυο περιοχές, μια ευσταθούς και μια ασταθούς λειτουργίας. Οι δύο περιοχές διαχωρίζονται από τη γραμμή πάλμωσης. Όταν το σημείο λειτουργίας του συμπιεστή βρεθεί αριστερά της γραμμής αυτής, εμφανίζονται ανεπιθύμητα φαινόμενα τα οποία διαταρράσουν σημαντικά τη λειτουργία του (πάλμωση, περιστροφική αποκόλληση). Με άλλα λόγια, δε γίνεται να επιτευχθεί υψηλός λόγος πίεσης με μικρή παροχή.

Επιπλέον παρατηρούμε ότι οι καμπύλες σταθερών στροφών γίνονται σχεδόν κάθετες αυξανόμενης της ανηγμένης παροχής, που σημαίνει ότι έχουμε στραγγαλισμό της ροής (ηχητικές συνθήκες). Τέτοιες συνθήκες μπορεί να προκύψουν στη είσοδο ενός διαχύτη χωρίς πτερύγια ή σε στένωση διαχύτη με πτερύγια.

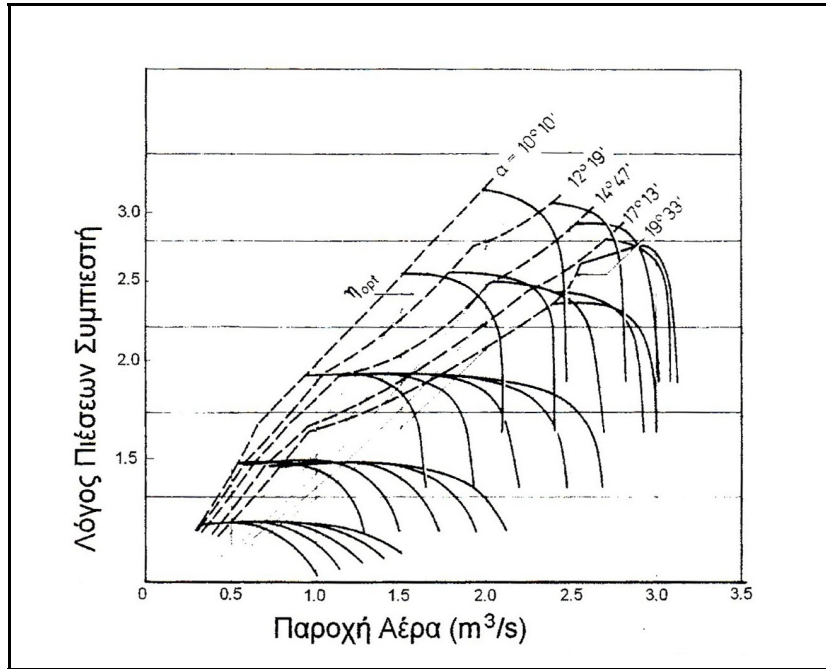
Αντίθετα, για ανηγμένη παροχή κοντά στη γραμμή πάλμωσης οι καμπύλες σταθερής ταχύτητας είναι σχεδόν οριζόντιες (κάποιες φορές ανεβαίνουν ελαφρώς), ενώ πέφτουν απότομα καθώς απομακρύνονται από αυτήν.

Οι καμπύλες σταθερού βαθμού απόδοσης ομαδοποιούνται κατά μήκος της καμπύλης στραγγαλισμού της ροής, ελάχιστα δεξιά της γραμμής πάλμωσης.

Για δεδομένες διαμέτρους περιβλήματος και πτερωτής, ο χάρτης του συμπιεστή μπορεί να μεταβληθεί από ποικίλους κατασκευαστικούς παράγοντες, όπως είναι η γωνία α των ρυθμιστικών πτερυγίων στην είσοδο του διαχύτη, το διάκενο διαχύτη - πτερωτής, από τη μορφή του διαχύτη (με/χωρίς πτερύγια), τη γεωμετρία του κ.α. (Σχήματα 3.4,3.5).

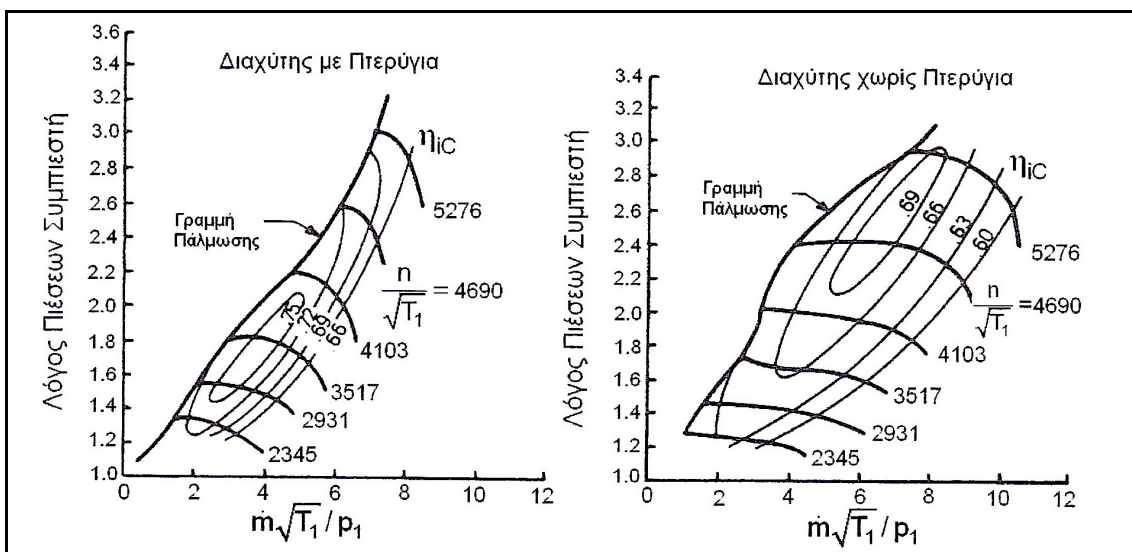


Σχήμα 3.4. Ρύθμιση της παροχής του συμπιεστή με μεταβολή της γεωμετρίας πτερωτής – διαχύτη.



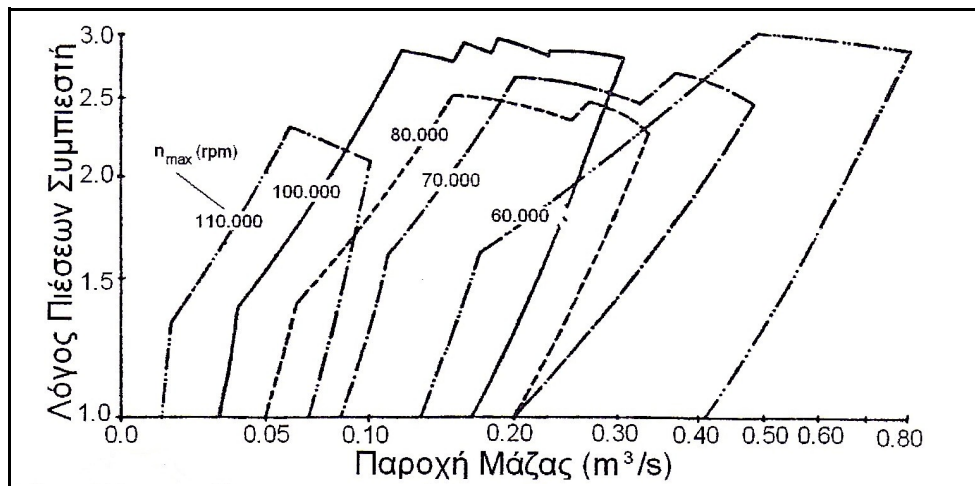
Σχήμα 3.5. Επίδραση της γωνίας των πτερυγίων του διαχύτη στο χάρτη του συμπιεστή (όπου η_{opt} ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης).

Στο Διάγραμμα 3.6 συγκρίνονται οι χάρτες λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή με διαχύτη χωρίς και με πτερύγια. Ο διαχύτης χωρίς πτερύγια οδηγεί σε μεγαλύτερο εύρος παροχών αέρα και άρα μεγαλύτερο φάσμα σημείων λειτουργίας στο χάρτη. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται σε οχήματα, αν και εμφανίζει ως μειονέκτημα χαμηλότερους βαθμούς απόδοσης.



Διάγραμμα 3.6. Χάρτες λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή με διαχύτη, με ή χωρίς πτερύγια.

Τέλος, στο Διάγραμμα 3.7 απεικονίζεται οικογένεια ακτινικών συμπιεστών και σκιαγραφείται το φάσμα λειτουργίας της κάθε μονάδας.



Διάγραμμα 3.7. Οικογένεια ακτινικών συμπιεστών.

Κεφάλαιο 4. Στρόβιλοι

4.1. Εισαγωγή

Στις εφαρμογές στροβιλο-υπερπλήρωσης χρησιμοποιούνται είτε ακτινικοί είτε αξονικοί στρόβιλοι. Οι ακτινικοί χρησιμοποιούνται σε μικρές εφαρμογές (οχήματα), ενώ οι αξονικοί χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικούς, σιδηροδρομικούς και ναυτικούς κινητήρες Diesel.

Οι στρόβιλοι είναι προορισμένοι λειτουργούν σε σταθερό σημείο λειτουργίας. Συνεπώς η κατάλληλη σύνδεσή τους στην εξαγωγή κινητήρων που χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα συνθήκες είναι εκ των πραγμάτων δύσκολη. Ωστόσο η απόδοση του στροβίλου παραμένει ικανοποιητική σε κάθε περίπτωση.

4.2. Ακτινικός στρόβιλος

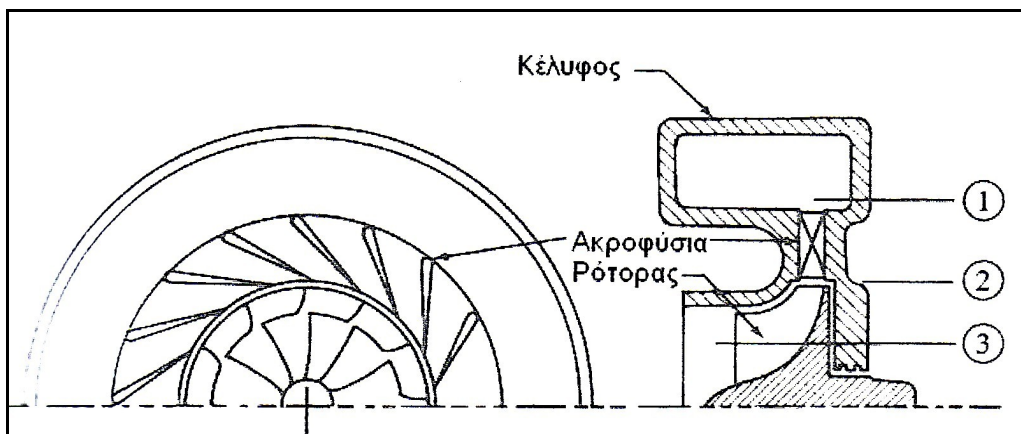
4.2.1. Περιγραφή

Ο ακτινικός στρόβιλος έχει μορφή φυγοκεντρικού συμπιεστή. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι εδώ η ροή εισέρχεται ακτινικά με κατεύθυνση προς το κέντρο της πτερωτής, ενώ έχουμε την ύπαρξη πτερυγίων ακροφύσιου (αντί διαχύτη) μεταξύ πτερωτής και κελύφους.

Ο ακτινικός στρόβιλος μπορεί να λειτουργήσει με υψηλούς λόγους αποτόνωσης (έως 4:1) και με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης, καλύπτοντας ευρύ φάσμα εφαρμογών στις

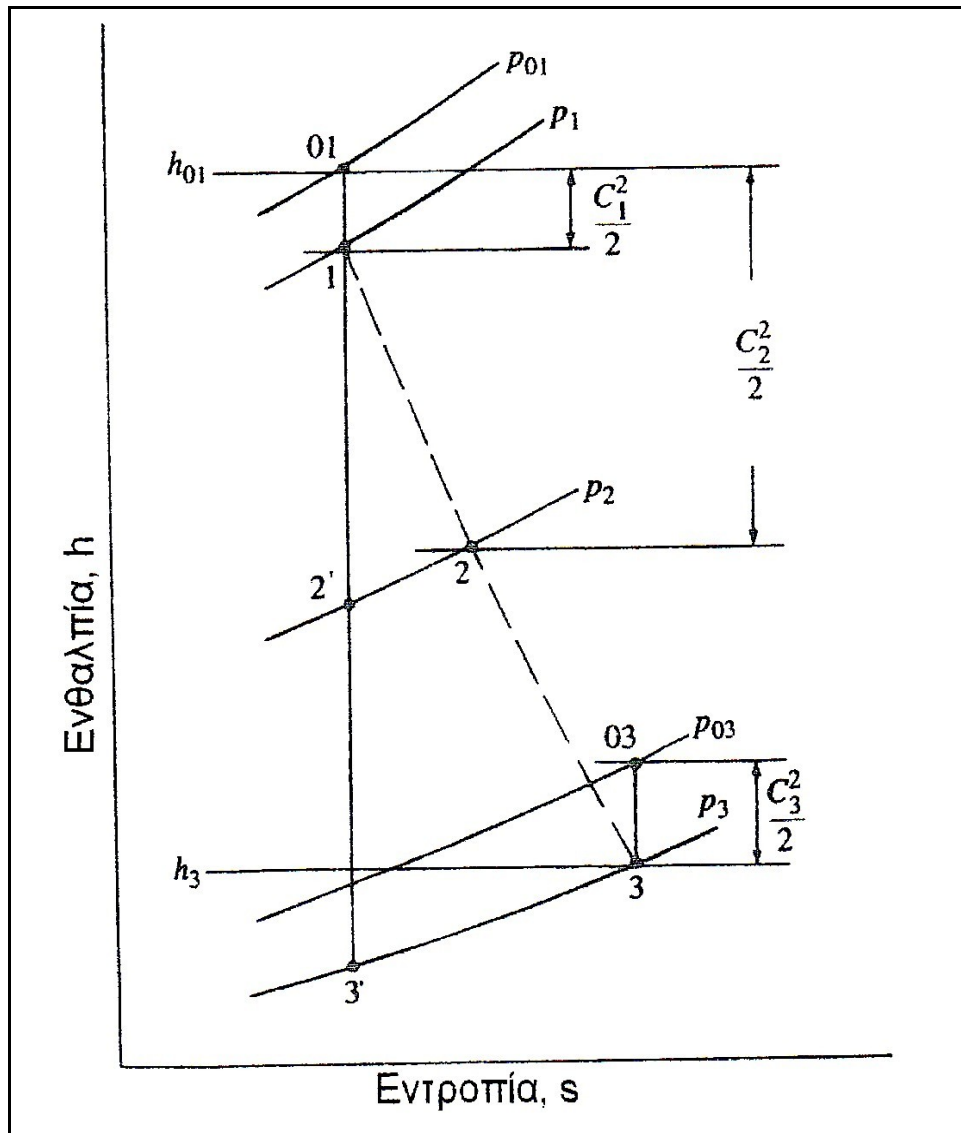
ΜΕΚ. Επιπλέον η κατασκευή του είναι ευκολότερη και οικονομικότερη σε σχέση με τον αξονικό στρόβιλο, έχοντας μικρότερες διαστάσεις.

Κύρια μέρη του ακτινικού στροβίλου είναι το κέλυφος, τα ακροφύσια εισόδου και η πτερωτή (Σχήμα 4.1). Σε ακτινικούς στροβίλους μικρών διαστάσεων παραλείπονται τα ακροφύσια για βελτίωση των συνθηκών ροής. Στην περίπτωση αυτή το κόστος κατασκευής μειώνεται με τίμημα μια μικρή μείωση στο βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 4.1. Τμήματα ακτινικού στροβίλου: 1.κέλυφος, 2.ακροφύσια εισόδου, 3. κινητή πτερύγωση.

Στο διάγραμμα 4.1 παρουσιάζονται οι μεταβολές της ροής των καυσαερίων διαμέσου του στροβίλου σε άξονες h-s. Τα ακροφύσια (μεταβολή 01-2) επιταχύνουν τη ροή με ελάχιστη πτώση ολικής πίεσης. Η μείωση της ολικής ενθαλπίας ανακοπής και η παραγωγή ωφέλιμου έργου συντελείται σχεδόν αποκλειστικά στην κινητή πτερύγωση (μεταβολή 2-3). Συνεπώς η πτερωτή κατασκευάζεται ώστε να έχουμε την ελάχιστη κινητική ενέργεια καυσαερίων στην έξοδό της.

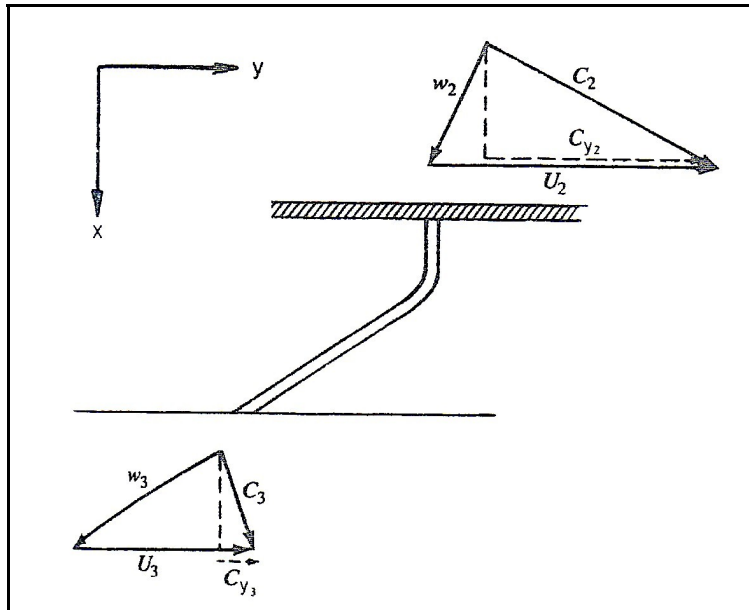


Διάγραμμα 4.1. Μεταβολή ενθαλπίας - εντροπίας ακτινικού στροβίλου.

Από την εξίσωση Euler έχουμε:

$$\dot{W}_T = M\omega_{TC} = \dot{m}\omega_{TC}(r_2 C_{y2} - r_3 C_{y3}) = \dot{m}(U_2 C_{y2} - U_3 C_{y3}) \quad (4.1)$$

όπου είναι M η στρεπτική ροπή του στροβίλου (ίση με την αντίστοιχη του συζευγμένου συμπιεστή σε μόνιμη λειτουργία), ω_{TC} η γωνιακή ταχύτητα της ατράκτου, C η απόλυτη και U η περιφερειακή ταχύτητα καυσαερίων όπως αυτές παριστάνονται στα τρίγωνα ταχυτήτων (Σχήμα 4.2). Το μέγιστο παραγόμενο έργο προκύπτει για αξονική ταχύτητα καυσαερίων στην έξοδο.

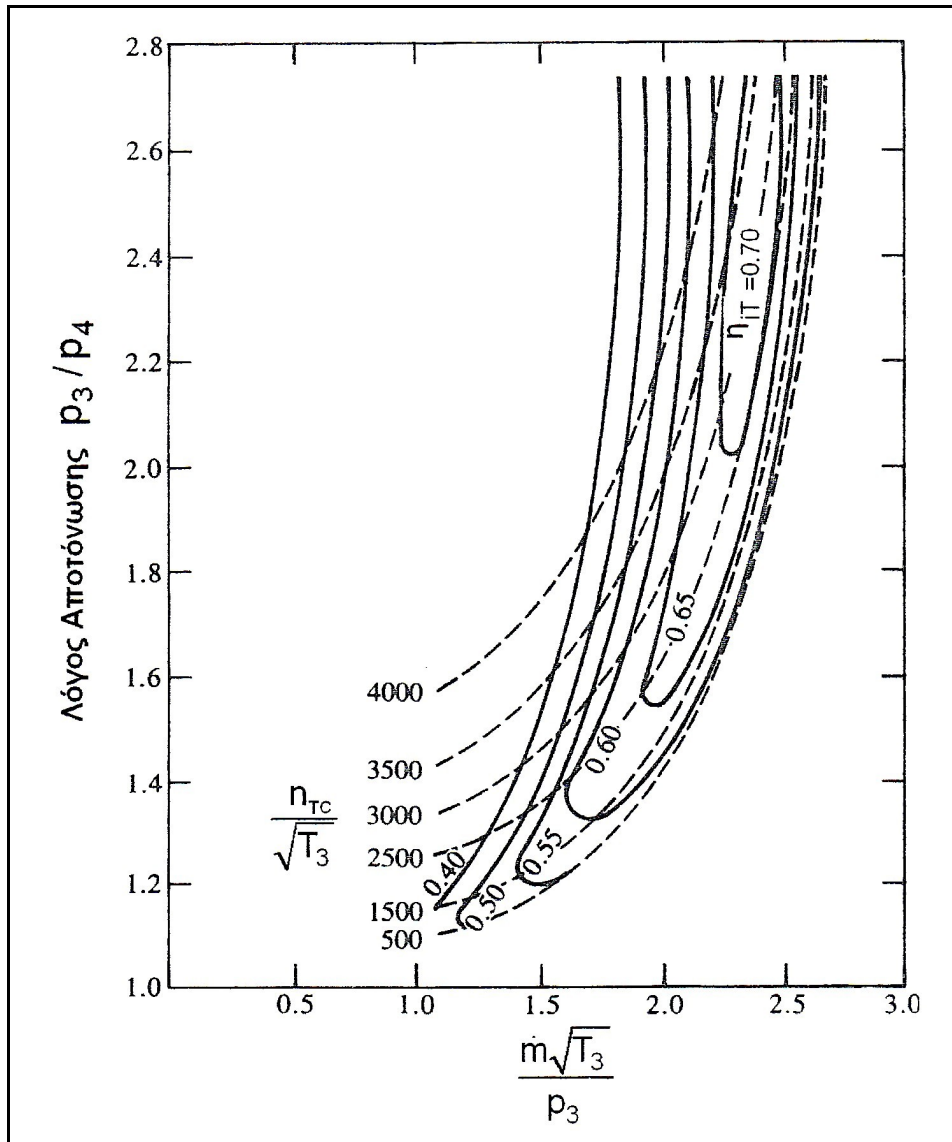


Σχήμα 4.2. Τρίγωνα ταχυτήτων ακτινικού στροβίλου στην είσοδο (2) και στην έξοδο (3) της πτερωτής.

Το παραγόμενο έργο είναι:

$$\dot{W}_T = \dot{m}(h_{02} - h_{03}) = \dot{m}(h_{01} - h_{03}) = \dot{m}c_p \Delta T_T \quad (4.2)$$

Συνήθως χρησιμοποιούμε αδιάστατες παραμέτρους για τα μεγέθη που αναφέρονται στη λειτουργία του στροβίλου (παροχή, λόγος πιέσεων, ταχύτητα περιστροφής, ισεντροπικός βαθμός απόδοσης, διάμετρος πτερωτής). Έτσι το πεδίο λειτουργίας ενός ακτινικού στροβίλου περιγράφεται από καμπύλες ανηγμένης ταχύτητας περιστροφής και ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της ανηγμένης παροχής καυσαερίων και του λόγου αποτόνωσης p_3/p_4 (Διάγραμμα 4.2).

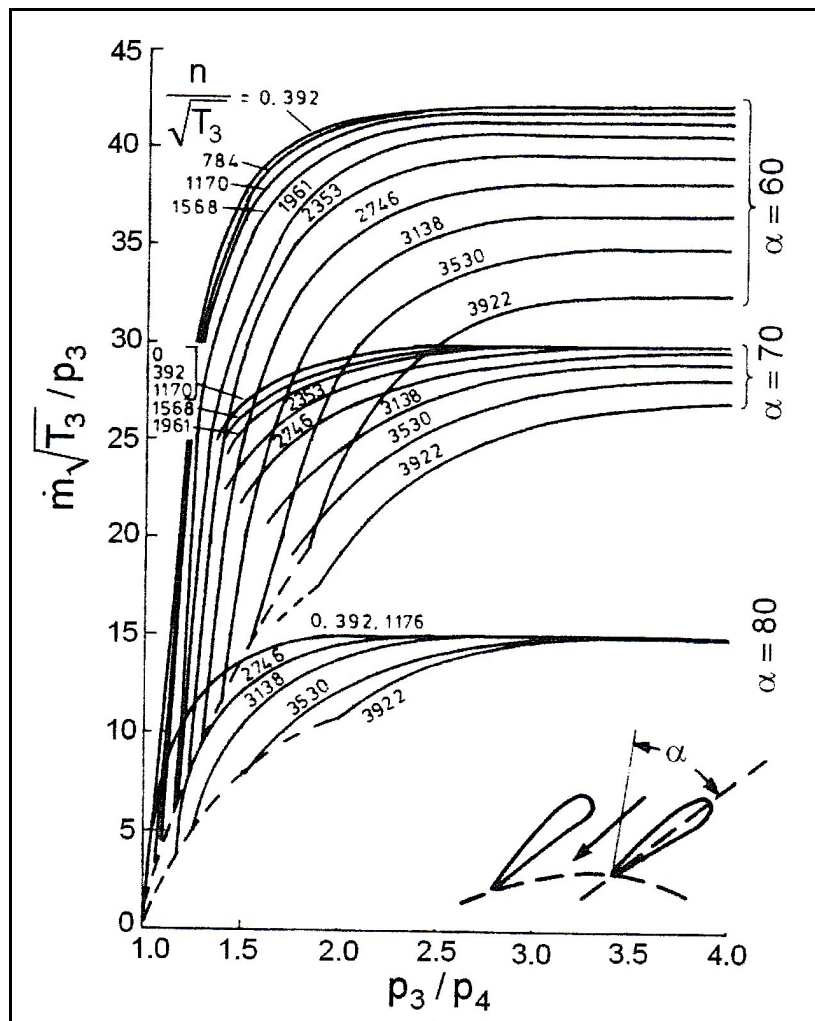


Διάγραμμα 4.2. Χάρτης λειτουργίας ακτινικού στροβίλου.

Αυξανόμενης της παροχής (για σταθερή ταχύτητα περιστροφής) οι καμπύλες τείνουν ασυμπτωτικά σε στραγγαλισμό της ροής είτε στην κινητή πτερύγωση είτε στο ακροφύσιο.

4.2.2. Ρύθμιση ακροφυσίων

Λόγω των μεταβαλλόμενων συνθηκών λειτουργίας των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. επιδιώκουμε να ρυθμίσουμε τη χαρακτηριστική καμπύλη του στροβίλου ώστε να έχουμε σε κάθε περίπτωση βέλτιστο ταίριασμα με τον συμπιεστή και τον κινητήρα. Αυτό μπορεί εκτός των άλλων να επιτευχθεί δια της ρύθμισης της γωνίας των ακροφυσίων, κάτι που μεταβάλλει ολόκληρο το χάρτη λειτουργίας του με αποτέλεσμα ευρύ φάσμα συνδιασμών λόγου πίεσης - ανηγμένης παροχής. (Διάγραμμα 4.3 για γωνίες ακροφυσίου $\alpha=60, 70, 80^\circ$).



Διάγραμμα 4.3. Χάρτης ακτινικού στροβίλου για διάφορες γωνίες ακροφυσίου α .

4.2.3. Βαθμός αντίδρασης

Ένα άλλο μέγεθος που χαρακτηρίζει τη λειτουργία του στροβίλου είναι ο βαθμός αντίδρασης (degree of reaction, Λ). Εκφράζει το λόγο της ενθαλπικής πτώσης στην κινητή περύγωση προς τη συνολική πτώση ενθαλπίας στο στρόβιλο:

$$\Lambda = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} = \frac{h_2 - h_3}{h_{01} - h_{03}} \quad (4.3)$$

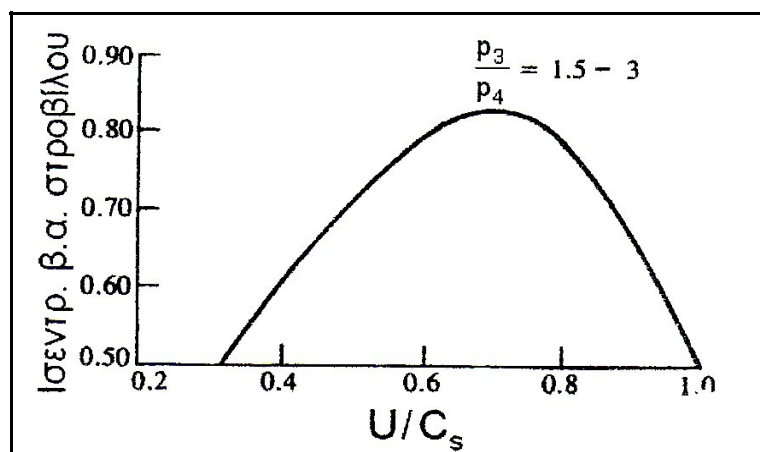
Τυπικές τιμές βαθμού αντίδρασης: περίπου 50% (για στροβίλους αντίδρασης).

4.2.4. Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται από τον τύπο του συμπιεστή. Έτσι, σε μεγάλα μεγέθη έχουμε υψηλούς βαθμούς απόδοσης λόγω αναλογικά μειωμένων απωλειών διακένου μεταξύ πτερυγίων και κελύφους. Σε κάθε περίπτωση, μειωμένου του μεγέθους τους, οι ακτινικοί στροβίλοι εμφανίζουν λιγότερο δραστική πτώση του βαθμού απόδοσής τους και γι αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως σε σχέση με τους αξονικούς. Στο Διάγραμμα 4.2 διακρίνονται οι καμπύλες βαθμού απόδοσης στο χάρτη του στροβίλου.

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης για την αποτόνωση αερίου εντός στροβίλου περιγράφεται από τις αντίστοιχες σχέσεις στο Κεφάλαιο 2.

Στους στροβίλους συνηθίζεται επίσης να παρίσταται γραφικά ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συναρτήσε του λόγου ταχυτήτων πτερυγίου U/C_s (blade speed ratio) και για διάφορους λόγους αποτόνωσης (Διάγραμμα 4.4).



Διάγραμμα 4.4. Καμπύλη ισεντροπικού βαθμού απόδοσης στροβίλου συναρτήσε του λόγου ταχυτήτων πτερυγίου.

Στο ορισμό του λόγου ταχυτήτων παριστάνεται με U η ταχύτητα στο άκρο της πτερωτής για ακτινικό (ή ταχύτητα του αερίου στο μέσο ύψος της πτερωτής για αξονικό) και C_s η ισοδύναμη ταχύτητα της ισεντροπικής μεταβολής (πτώσης) ενθαλπίας κατά μήκος του στροβίλου:

$$C_s = \sqrt{2(h_{03} - h_4)} = \sqrt{2c_p T_{03} \left(1 - \left(\frac{p_4}{p_{03}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)} \quad (4.4)$$

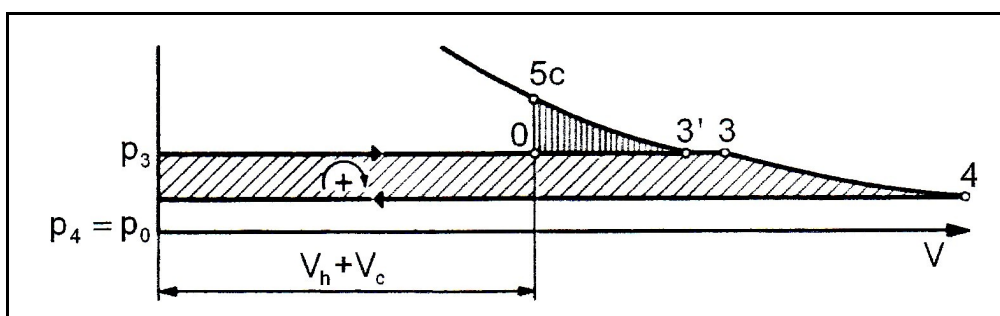
Με γνωστά τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο T_3 και το λόγο αποτόνωσης p_3/p_4 προσδιορίζεται η ταχύτητα C_s και επιλέγεται η διάμετρος της πτερωτής (για γνωστή ταχύτητα περιστροφής n) που δίνει το βέλτιστο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης.

Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για το ταίριασμα συμπιεστή – στροβίλου ώστε ο τελευταίος να λειτουργεί στο βέλτιστο βαθμό απόδοσης.

4.2.5. Ισχύς στροβίλου

Στη στροβιλο-υπερπλήρωση η πίεση εισόδου του στροβίλου p_3 είναι συνήθως μικρότερη της πίεσης εισόδου του συμπιεστή p_2 . Αυτό αποτελεί αναγκαία συνθήκη στους 2-Χ κινητήρες ώστε να έχουμε απόπλυση του κυλίνδρου. Στους 4-Χ κινητήρες η p_3 γίνεται ίση (ή μεγαλύτερη) της p_2 μόνον στα χαμηλά φορτία.

Στο Διάγραμμα 4.5 έχουμε τη μεταβολή p - V του στροβίλου.



Διάγραμμα 4.5. Καμπύλη p - V στροβίλου.

Από την εξαγωγή του κυλίνδρου έως την είσοδο του στροβίλου θεωρούμε ότι ο εκθέτης πολυτροπικής αποτόνωσης του n_T , είναι λίγο μικρότερος από το γ και ισχύει ($1 < n_T < \gamma$). Το έργο που αντιστοιχεί στη κατακόρυφα διαγραμμισμένη περιοχή 5c-3-0 στο Διάγραμμα 11.10 μετατρέπεται σε μη εκμεταλλεύσιμη θερμότητα. Γι αυτό η θερμοκρασία T_3

είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία ισεντροπικής αποτόνωσης μέχρι 3'.

Το έργο της ισεντροπικής αποτόνωσης του καυσαερίου είναι:

$$W_{iT} = mc_p(T_3 - T_4) = mRT_3 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] = mc_p T_3 \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] \quad (4.5)$$

με $W_{iT} > 0$ εφόσον $p_4/p_3 < 0$.

Το έργο αποτόνωσης δίδεται από τη σχέση:

$$W_T = m \eta_{iT} \Delta h_{iT} \quad (4.6)$$

όπου Δh_{iT} η ισεντροπική αποτόνωση εντός του στροβίλου:

$$\Delta h_{iT} = c_p T_3 \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] \quad (4.7)$$

και η_{iT} ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης. Εάν η μάζα m στην παραπάνω εξίσωση αντικατασταθεί με την αντίστοιχη παροχή μάζας, έχουμε την ισχύ του στροβίλου:

$$P_T = W_T \dot{m} \eta_{iT} \Delta h_{iT} \quad (4.8)$$

Κεφάλαιο 5. Ταίριασμα ΜΕΚ - υπερπληρωτή

5.1. Εισαγωγή

Οι εμβολοφόροι κινητήρες λειτουργούν σε ένα ευρύ πεδίο στροφών με το αντίστοιχο πεδίο παροχών αέρα να είναι επίσης μεγάλο, ιδίως σε κινητήρες με στραγγαλισμό στην εισαγωγή (Otto). Από την άλλη πλευρά, η απόδοση των υπερπληρωτών εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης του εργαζόμενου μέσου στα κινούμενα πτερύγια. Συνεπώς μια δεδομένη παροχή αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής, ενώ όσο η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται απομακρυνόμαστε από το βέλτιστο σημείο σχεδιασμού με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών. Αν και οι υπερπληρωτές δεν είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα παροχών, παρόλα αυτά επιτυγχάνουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης.

Το ταίριασμα (matching) μεταξύ ΜΕΚ και υπερπληρωτή είναι υψίστης σημασίας για την αποδοτική λειτουργία της. Αυτό που πρέπει να επιδιώκεται σε κάθε περίπτωση είναι η επίτευξη βέλτιστου βαθμού απόδοσης λειτουργίας σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο φάσμα στροφών – φορτίων, καθώς και καλή μεταβατική λειτουργία. Με τον όρο μεταβατική

λειτουργία εννοούμε την εξαναγκασμένη (και συνήθως απότομη) μεταβολή είτε παροχής καυσίμου στον κύλινδρο (= μεταβολή στροφών) είτε φορτίου με το οποίο είναι συνδεδεμένος ο κινητήρας (ηλεκτροπαραγωγή, έλικα πλοίου, συνθήκες οδοστρώματος για κίνηση οχήματος κλπ).

Συνήθως όμως δεν μπορούμε να πετύχουμε ιδανικό ταίριασμα υπερπληρωτή – ΜΕΚ για όλα τα πιθανά σημεία λειτουργίας του κινητήρα, και συνεπώς δεν είναι δυνατόν να επιτυγχάνεται ο καλύτερος δυνατός βαθμός απόδοσης σε όλες τις περιπτώσεις. Ειδικότερα οι κινητήρες οχημάτων καλούνται να ανταπεξέλθουν σε ευρύ πεδίο λειτουργίας λόγω των συνεχών μεταβαλλόμενων συνθηκών κυκλοφορίας, και έτσι το ταίριασμα εμπεριέχει αρκετές παραδοχές και συμβιβασμούς.

Στον αντίποδα βρίσκονται οι ΜΕΚ που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή δεδομένου ότι λειτουργούν ως επί το πλείστον σε σταθερό φορτίο και με ορισμένη ταχύτητα περιστροφής. Συνεπώς είναι ευκολότερο να έχουμε ταίριασμα με βελτιστοποίηση βαθμού απόδοσης στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Στην ίδια κατηγορία ανήκουν και οι κινητήρες Diesel μεγάλων πλοίων ανοικτής θαλάσσης, οι οποίοι λειτουργούν συνήθως σε περιορισμένο εύρος στροφών – φορτίου.

Η διαδικασία του ταιριάσματος είναι ιδιαίτερα σύνθετη, καθώς δύναται να περιλαμβάνει και φάσεις βελτίωσης – τροποποίησης του ίδιου του κινητήρα, ιδίως των συστημάτων παροχής καιυσίμου / έγχυσης και εναλλαγής αερίων ώστε να προκύπτει η καλύτερη δυνατή συνεργασία με τον υπερπληρωτή.

5.2.Ταίριασμα κινητήρα - στροβιλο-υπερπληρωτή

5.2.1. Εισαγωγή

Για το σωστό ταίριασμα κινητήρα - στρόβιλο-υπερπληρωτή απαιτείται κατά πρώτον ο υπολογισμός της απαιτούμενης παροχής αέρα. Ο λόγος πίεσεων του συμπιεστή υπολογίζεται από την επιθυμητή (μέγιστη) μέση πραγματική πίεση. Ο συμπιεστής επιλέγεται ανάλογα με το εύρος στροφών - φορτίου του κινητήρα. Θα πρέπει κατά τη λειτουργία του συστήματος να επιτυγχάνεται ικανοποιητικός ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή και απράλληλα να έχουμε ασφαλές περιθώριο από τη γραμμή πάλμωσης. Στη συνέχεια, επιλέγεται και ο στρόβιλος, ο οποίος ρυθμίζεται μεταβάλλοντας τη γωνία πρόσπτωσης της ροής στο ακροφύσιο. Η ισχύς του στροβίλου καθορίζεται από την ενεργό επιφάνεια προσβολής του καυσαερίου, και με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζεται άμεσα και πίεση του συμπιεστή.

5.2.2. Ενεργειακό ισοζύγιο ατράκτου στροβίλο-υπερπληρωτή

Ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι συζευγμένοι στην ίδια άτρακτο, ενώ σε μόνιμη κατάσταση βρίσκονται σε ισορροπία ισχύος ($P_{eC}=P_{eT}$), δηλαδή

$$\dot{m}_C \bar{c}_{PC} \frac{T_2-T_1}{\eta_{mC}} = \dot{m}_T \bar{c}_{PT} (T_3-T_4) \eta_{mT} \quad (5.1)$$

όπου

$$\dot{m}_C = \dot{m}_A, \dot{m}_T = \dot{m}_R = \dot{m}_A + \dot{m}_B$$

(παροχή συμπιεστή = παροχή αέρα, παροχή στροβίλου = παροχή καυσαερίων = παροχή αέρα + παροχή εγχυόμενου καυσίμου)

και η_{mC} , η_{mT} οι μηχανικοί βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και στροβίλου αντίστοιχα (τυπικές τιμές γύρω στο 0.95 για μικρών διαστάσεων κινητήρες).

Υποθέτοντας (λόγω των μικρών θερμοκρασιακών διαφορών) ότι σε μία μέση θερμοκρασία συμπιεστή $(T_1+T_2)/2$ ισχύει

$$\bar{c}_{pC} = \bar{c}_{pA} = c_{pA}$$

(οπότε και $\gamma_A = \text{σταθερό}$)

και ότι σε μια μέση θερμοκρασία στροβίλου $(T_3+T_4)/2$ ισχύει

$$\bar{c}_{pT} = \bar{c}_{pR} = c_{pR}$$

(οπότε και $\gamma_R = \text{σταθερό}$)

η εξίσωση 5.2 γίνεται

$$\dot{m}_C c_{pA} \frac{T_2-T_1}{\eta_{iC} \eta_{mC}} = \dot{m}_R c_{pR} (T_3-T_4) \eta_{iT} \eta_{mT} \quad (5.2)$$

όπου τα μεγέθη με δείκτη A, R αναφέρονται στο συμπιεστή (εργαζόμενο μέσο αέρας) και στο στρόβιλο (εργαζόμενο μέσο καυσαέριο) αντίστοιχα.

Λαμβάνοντας υπόψιν και τις εξισώσεις των πραγματικών μεταβολών για το συμπιεστή και το στρόβιλο, έχουμε

$$\frac{\dot{m}_A c_{pA} T_1}{\eta_{iC} \eta_{mC}} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a - 1}} - 1 \right] = \dot{m}_R c_{pR} T_3 \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma_R}{\gamma_R - 1}} \right] \eta_{iT} \eta_{mT} \quad (5.3)$$

και

$$\left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a - 1}} - 1 \right] = \frac{T_3}{T_1} \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma_R - 1}{\gamma_R}} \right] \eta_{TC} \left(\frac{m_A + m_B}{m_A} \right) \frac{c_{pR}}{c_{pA}} \quad (5.4)$$

όπου $p_4 = p_1 = p_a$ και ολικός βαθμός απόδοσης στροβιλο-υπερπληρωτή.

Οι εξισώσεις 5.4, 5.5 ισχύουν για σταθερές p_2, p_3 . Η πίεση εξαγωγής p_3 είναι σταθερή μόνον σε συστήματα σταθερής πίεσης. Αντιθέτως σε συστήματα παλμών (όπου έχουμε αυξομειώσεις πίεσης ιδιαίτερα κατά τη μεταβατική λειτουργία) στις εξισώσεις χρησιμοποιείται η μέση πίεση εξαγωγής p_3 (κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας).

Από την εξίσωση αυτές συμπεραίνουμε επίσης ότι αύξηση του βαθμού απόδοσης του στροβιλο-υπερπληρωτή δίνει αυξημένο λόγο πιέσεων p_2/p_1 . Αντίστοιχα, αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου T_3 του στροβίλου (κατά συνέπεια της T_4) και αύξηση του λόγου αποτόνωσης p_3/p_4 δίδει αυξημένο λόγο πιέσεων p_2/p_1 .

Η εξίσωση 5.5 υπό τις προϋποθέσεις (χάριν ευκολίας)

$$c_{pR} \approx c_{pA}$$

$$\dot{m}_R = \dot{m}_A$$

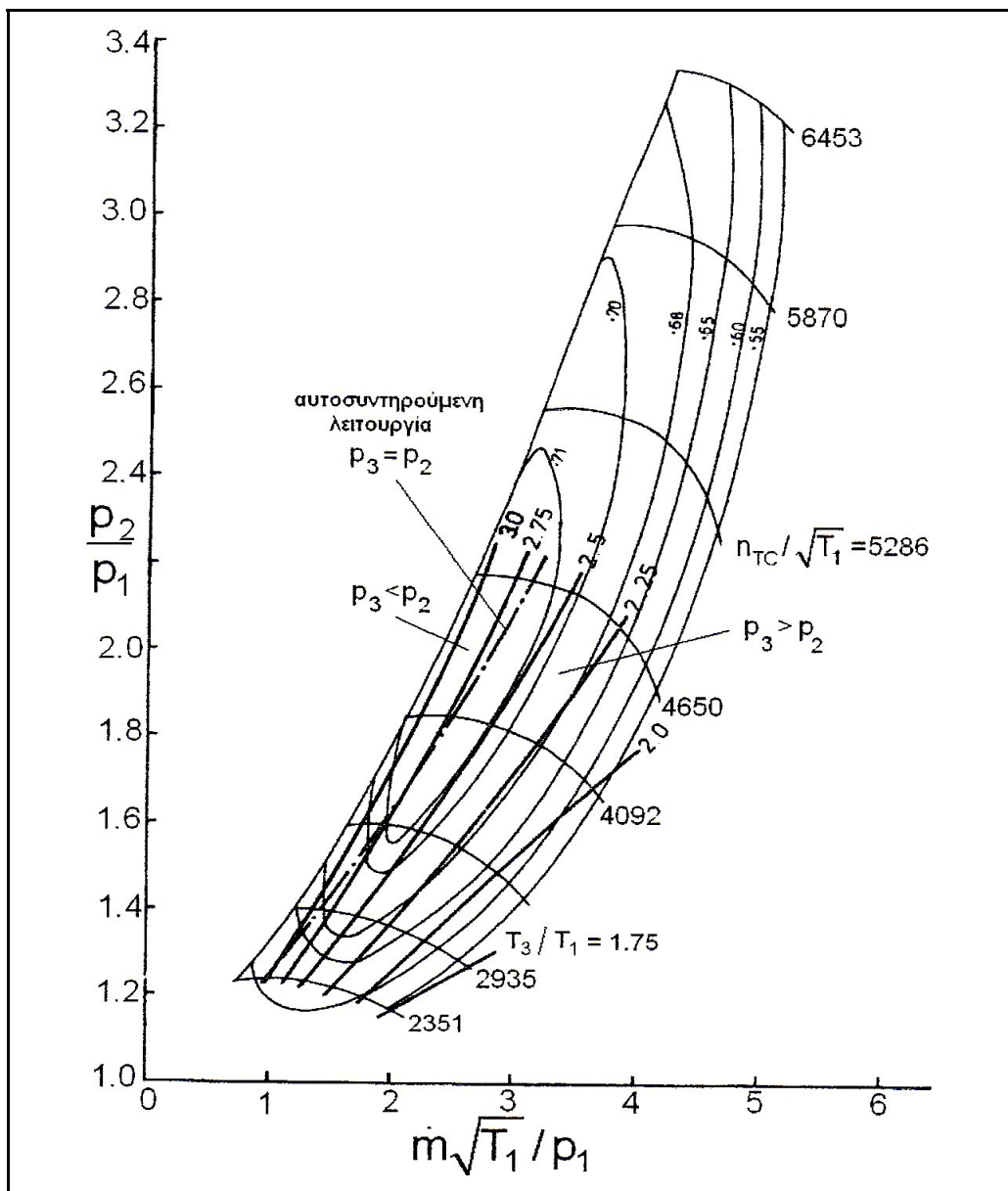
(κατά προσέγγιση)

δίνει ότι

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma_c}{\gamma_c-1}} - 1 = \eta_{iC} \eta_{mC} \eta_{iT} \eta_{mT} \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\gamma_c}{\gamma_c-1}}\right] \frac{T_3}{T_1} \quad (5.5)$$

5.2.3. Χάρτες στροβιλο-υπερπληρωτή

Συνδιάζοντας τους χάρτες αξονικού συμπεστή και αξονικού στροβίλου λαμβάνουμε τον χάρτη επιδόσεων του στροβιλο-υπερπληρωτή (Διάγραμμα 5.1). Επιπλέον, από την εξίσωση υπολογίζουμε τις καμπύλες ισοροπίας για σταθερό λόγο θερμοκρασιών T_3/T_1 και τις σχεδιάζουμε στο χάρτη του ζεύγους.



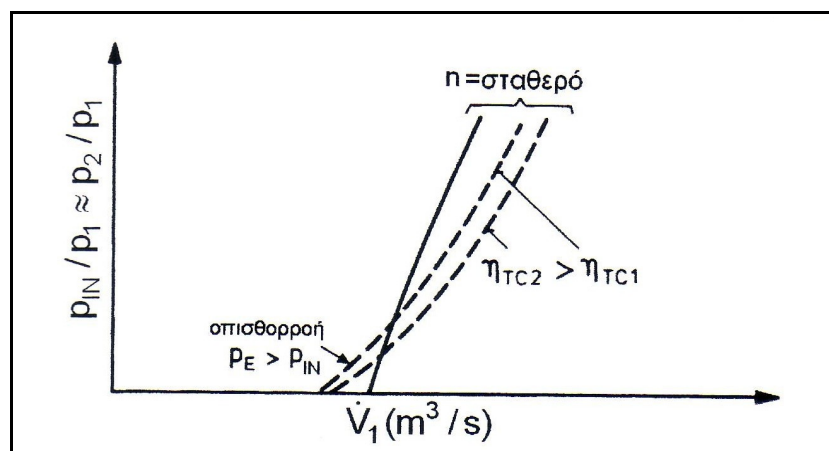
Διάγραμμα 5.1. Χάρτης επιδόσεων και χαρακτηριστικές καμπύλες στροβιλο-υπερπληρωτή.

Η αξονική γραμμή που διακρίνεται αντιστοιχεί στην αυτοσυντηρούμενη λειτουργία του ζεύγους με $p_2=p_3$, κάτι που αντιστοιχεί σε μηδενική πτώση πίεσης στη ΜΕΚ. Η περιοχή αριστερά της αξονικής γραμμής αντιστοιχεί στη λειτουργία με πτώση πίεσης εντός των κυλίνδρων (σύνηθες σε μέσα και υψηλά φορτία), ενώ η περιοχή δεξιά αντιστοιχεί σε λειτουργία με αύξηση της πίεσης του αερίου εντός των κυλίνδρων (περίπτωση χαμηλού φορτίου).

5.3. Στροβιλο-υπερπλήρωση 4- Χ κινητήρα

Η παροχή αέρα 4-Χ στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η πυκνότητα του αέρα στην αρχική φάση συμπίεσης, η ταχύτητα περιστροφής και η διαφορά πίεσης μεταξύ εισαγωγής/εξαγωγής στο διάστημα επικάλυψης των βαλβίδων.

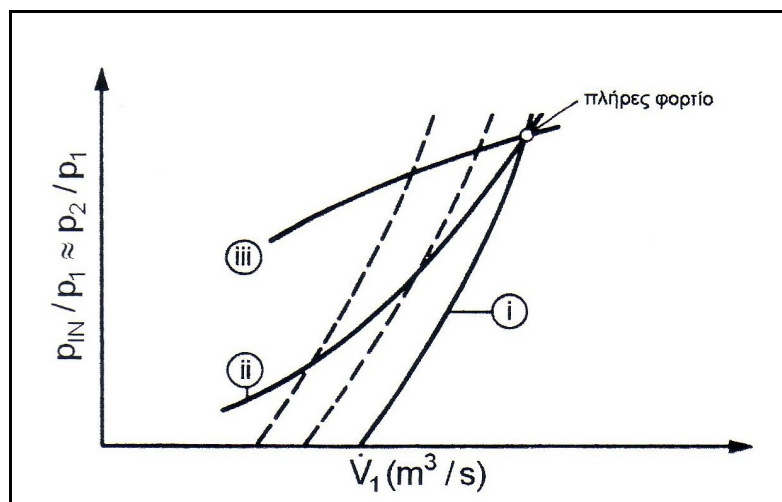
Εδώ η αυξημένη πίεση αντίθλιψης p_E δυσχεραίνει την απόπλυση των κυλίνδρων, ωστόσο με αύξηση του διαστήματος επικάλυψης των βαλβίδων έχουμε μεγαλύτερη παροχή απόπλυσης σε υψηλά φορτία. Σε χαμηλά φορτία ενδέχεται να έχουμε αναστροφή της ροής των καυσαερίων (Διάγραμμα 5.2).



Διάγραμμα 5.2. Ογκομετρική παροχή 4-Χ στροβιλο-υπερπληρωμένου 4-Χ κινητήρα σε συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής (συνεχής γραμμή: χωρίς επικάλυψη βαλβίδων – διακεκομμένη γραμμή: με επικάλυψη βαλβίδων).

Όσον αφορά το ρόλο της παραγόμενης ροπής κινητήρα, διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις (κατ' αντιστοιχίαν με την παράγραφο και το Διάγραμμα 5.3)

- 1) σταθερή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (περίπτωση ηλεκτροπαραγωγής, καμπύλη i)
- 2) νόμος έλικας (καμπύλη ii)
- 3) αμετάβλητη ροπή (καμπύλη iii)



Διάγραμμα 5.3. Καμπύλες λειτουργίας 4-X στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα.

Στην περίπτωση 1 τα σημεία λειτουργίας βρίσκονται επάνω στη χαρακτηριστική του κινητήρα για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής. Με τη μείωση του φορτίου του κινητήρα η παροχή ενέργειας προς το στρόβιλο ελαττώνεται και η ισορροπία του υπερπληρωτή μεταβαίνει σε χαμηλότερες πιέσεις. Το επίπεδο της υπερπλήρωσης στην άφορτη λειτουργία (ρελαντί) είναι μόνον ένα κλάσμα του αντίστοιχου επιπέδου στο πλήρες φορτίο. Παράγοντες που επηρεάζουν την κλίση της καμπύλης αποτελούν τόσο η (ενδεχόμενη) ενδιάμεση ψύξη αέρα όσο και το μέγεθος του στροβίλου (αυξανομένης της διαμέτρου του).

Ειδικότερα για το στρόβιλο, η επιλογή γίνεται έτσι ώστε να βελτιστοποιείται ο βαθμός απόδοσης τόσο του στροβιλο-υπερπληρωτή όσο και ολόκληρου του συστήματος. Αν ο κινητήρας χρησιμοποιείται ως μονάδα βάσης, τότε το ταίριασμα γίνεται στο αντίστοιχο πλήρες φορτίο, ενώ αν αποτελεί εφεδρική μονάδα λαμβάνονται υπόψιν και τα χαμηλότερα φορτία ρυθμίζοντας τα ακροφύσια του στροβίλου.

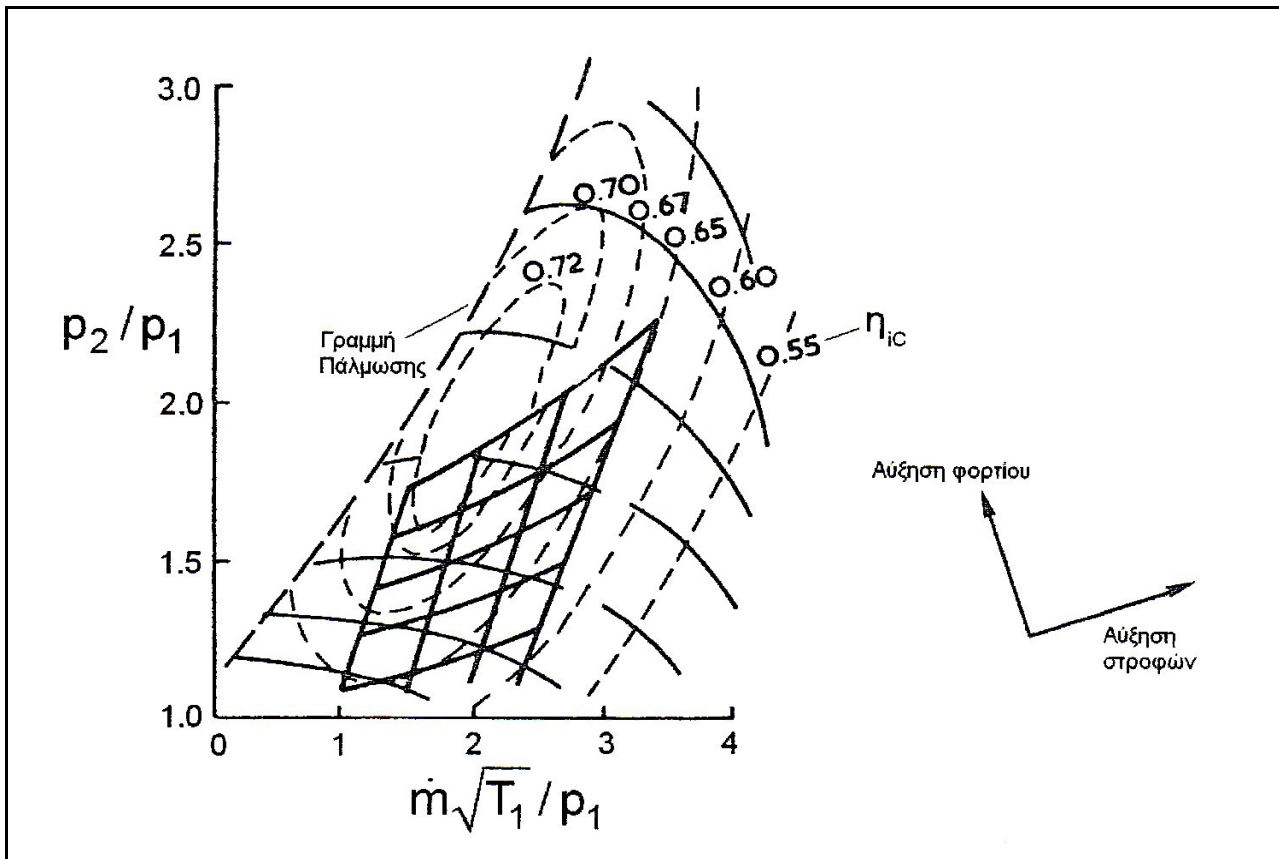
Στην περίπτωση 2 το ταίριασμα κινητήρα – στροβιλο-υπερπληρωτή γίνεται με βέλτιστο τρόπο διότι ο νόμος της έλικας είναι απολύτως συμβατός με τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Η ενέργεια του στροβίλου (συνεπώς και η πίεση υπερπλήρωσης) μειώνονται τόσο με την πτώση του φορτίου όσο και με τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Για έλικα αεροσκάφους μεταβλητού βήματος προκύπτει οικογένεια παράλληλων ευθειών.

Στην περίπτωση 3 έχουμε αύξηση της παροχής αέρα με την αύξηση των στροφών. Για σταθερή επιφάνεια προσβολής στροβίλου έχουμε μεγαλύτερη τιμή πίεσης στην είσοδό του και κατά συνέπεια μεγαλύτερη πίεση στο συμπιεστή. Η αντίστοιχη καμπύλη στο χάρτη του συμπιεστή δεν είναι οριζόντια, αλλά παρουσιάζει ανοδική κλίση για αυξανόμενες στροφές (πιθανή ενδιάμεση ψύξη του αέρα επηρεάζει την κλίση περαιτέρω).

Στο διάγραμμα 5.4 παριστάνεται ένα τυπικό ταίριασμα 4-Χ κινητήρα – στροβιλο-υπερπληρωτή. Οι καμπύλες σταθερών στροφών/σταθερού φορτίου του κινητήρα απεικονίζονται στο χάρτη του συμπιεστή. Ο συμπιεστής επιλέγεται ώστε να λειτουργεί με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης (σε όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία λειτουργίας του κινητήρα), με ασφαλές περιθώριο από τη γραμμή πάλμωσης και μακριά από τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του.

Η επιλογή του χάρτη του συμπιεστή (και όχι του στροβίλου) για τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας γίνεται διότι ο στροβίλος λειτουργεί με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης σε μεγαλύτερο εύρος παροχών, οπότε δεν αποτελεί το “αδύναμο σημείο” του στροβιλο-υπερπληρωτή, σε αντίθεση με το συμπιεστή. Επιπλέον, κατά τη λειτουργία με σύστημα παλμών (μεταβλητής) πίεσης – συνήθης περίπτωση σε οχήματα – δεν είναι σαφές ποια τιμή της πίεσης θα χρησιμοποιήσουμε στον αντίστοιχο χάρτη.

Αν στο διάγραμμα 5.4 αντικαταστήσουμε το γραφικό “πλέγμα” στροφών – φορτίου του κινητήρα με μια μοναδική καμπύλη σταθερών στροφών, μεταπίπτουμε στην περίπτωση χρήσης στην ηλεκτροπαραγωγή.



Διάγραμμα 5.4. Καμπύλες λειτουργίας 4-X κινητήρα σε χάρτη συμπιεστή.

5.4. Διαφορές στροβιλο-υπερπλήρωσης – μηχανικής υπερπλήρωσης

1) Οι ταχύτητες περιστροφής στροβιλο-υπερπληρωτή - κινητήρα δεν σχετίζονται ευθέως μεταξύ τους διότι τα δύο συστήματα δεν έχουν άμεση σύζευξη. Το σημείο λειτουργίας προσδιορίζεται από την ισότητα παραγόμενης ισχύος στροβίλου και απορροφώμενης ισχύος συμπιεστή. Με άλλα λόγια, ο συμπιεστής είναι μηχανικά ανεξάρτητος του κινητήρα και η ισχύς του ρυθμίζεται ανάλογα με το σημείο λειτουργίας του στροβίλου.

2) Αύξηση της παροχής καυσαερίων του κινητήρα οδηγεί σε μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής στροβιλο-υπερπληρωτή. Στο ίδιο αποτέλεσμα οδηγούμαστε και με την αύξηση της θερμοκρασίας εισαγωγής των καυσαερίων στο στρόβιλο (λειτουργία του κινητήρα σε υψηλότερα φορτία).

3) Σε σχέση με τη μηχανική υπερπλήρωση, οι χαρακτηριστικές του στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα είναι μετατοπισμένες λόγω της μεταβλητής πίεσης αντίθλιψης. Εδώ το σύστημα έγχυσης καυσίμου παίζει εξέχοντα ρόλο, καθότι επηρεάζει άμεσα τις συνθήκες λειτουργίας του στροβίλου (μέσω των εξερχόμενων καυσαερίων) και κατά συνέπεια και του συμπιεστή.

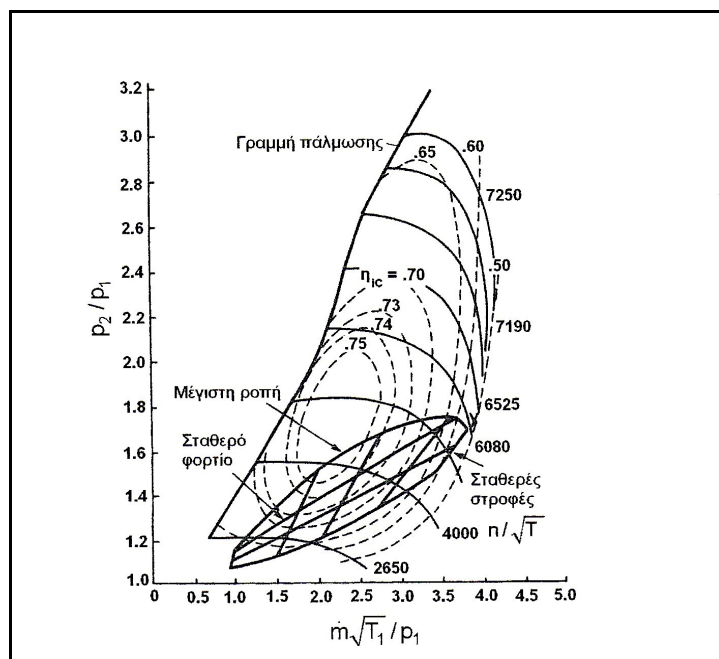
5.5. Παρατηρήσεις

Το ταίριασμα δεν ενδεικνύεται να γίνει (τουλάχιστον στα οχήματα) βάσει σημείου λειτουργίας που αναφέρεται σε μέγιστη ισχύ. Αν συμβεί αυτό, τότε ο βαθμός απόδοσης του συστήματος σε χαμηλά φορτία είναι ιδιαίτερα χαμηλός και η απόκρισή του καθίσταται προβληματική. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται εν μέρει με τη χρήση στροβίλου μεταβλητής διατομής (μειώνοντας την ενεργή επιφάνεια του στροβίλου με την πτώση του φορτίου έχουμε αυξημένες πιέσεις υπερπλήρωσης). Επιπλέον, το ταίριασμα σε σημεία λειτουργίας χαμηλού φορτίου είναι επιθυμητό για κίνηση οχήματος εντός πόλης όπου απαιτούνται αποθέματα ροπής και όσο το δυνατόν λιγότερες αλλαγές σχέσης στο κιβώτιο ταχυτήτων.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί στρόβιλος μεταβλητής επιφάνειας είναι δυνατόν να έχουμε μεγάλες πιέσεις σε υψηλά φορτία και κατά συνέπεια υπέρμετρη αύξηση των στροφών του υπερπληρωτή. Αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίου (waste-gate valve).

Γενικότερα πάντως η επιλογή του κατάλληλου σημείου λειτουργίας σε χαμηλές στροφές αποτελεί περίπλοκο ζήτημα, καθώς στην προσπάθεια να παράγουμε υψηλή ροπή δυσκολευόμαστε να επιτύχουμε κατάλληλο λόγο αέρα – καυσίμου προς αποφυγήν εκπομπών αιθάλης.

Στο διάγραμμα 5.5 απεικονίζεται περίπτωση ατυχούς ταιριάσματος 4-Χ κινητήρα – συμπιεστή. Παρατηρούμε ότι το πεδίο λειτουργίας του κινητήρα αντιστοιχεί ως επί το πλείστον σε χαμηλούς βαθμούς απόδοσης του συμπιεστή.



Διάγραμμα 5.5. Ατυχής εφαρμογή στροβιλο-υπερπλήρωσης σε 4-Χ κινητήρα.

Κεφάλαιο 6. Ανάλυση προγράμματος

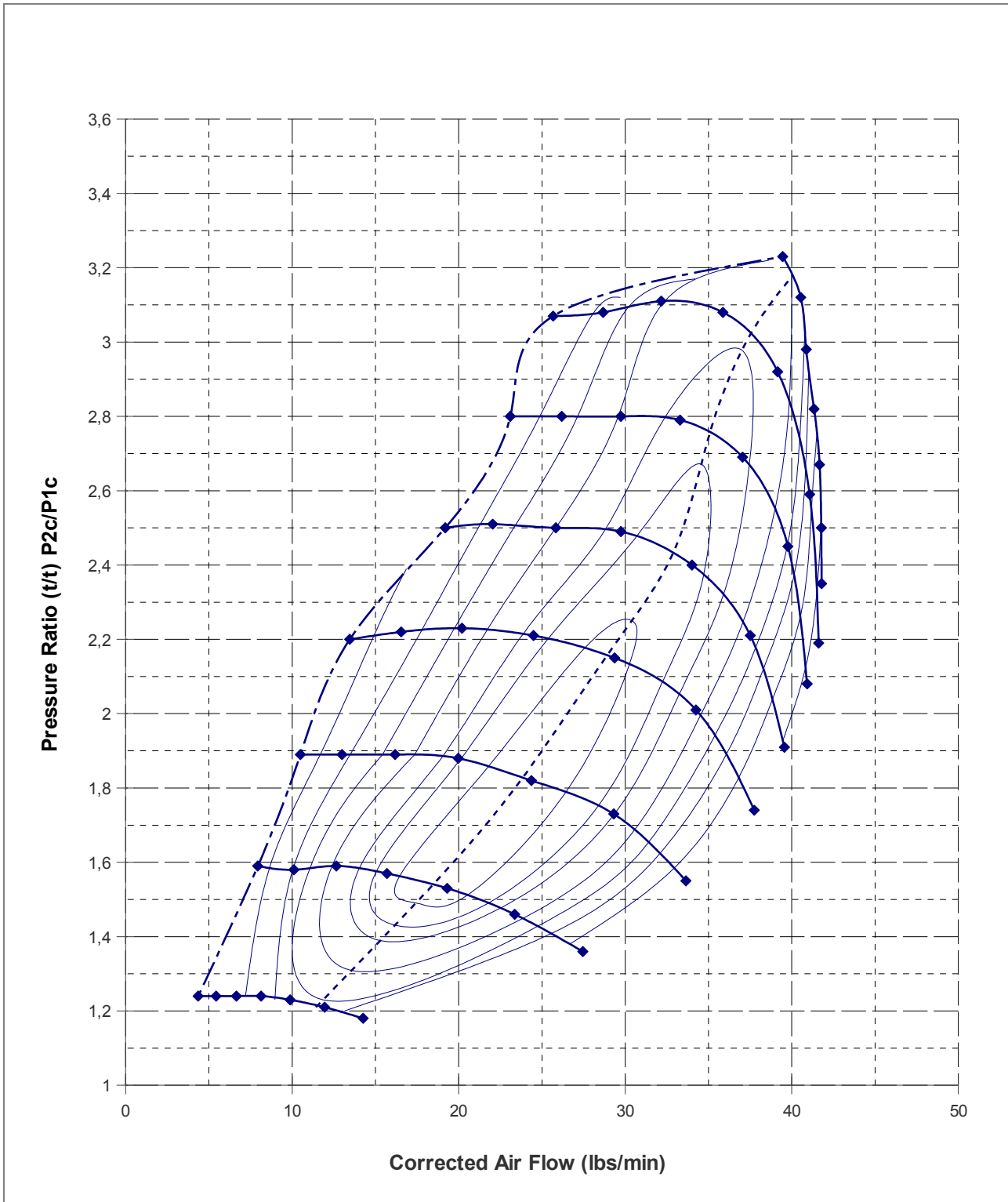
6.1. Εισαγωγή

Κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, δημιουργήθηκαν δύο προγράμματα σε γλώσσα προγραμματισμού fortran για την ψηφιοποίηση των χαρτών του συμπιεστή T04E 44-4 TRIM 0.50 A/R και του στροβίλου αντίστοιχα. Ο κινητήρας που εξετάστηκε είναι δκύλινδρος Diesel μεσαίου μεγέθους με απόδοση 177kW στις 2600 rpm, διαστάσεις $D = 97\text{mm}$, $S = 133\text{mm}$ και συνολικό όγκο εμβολισμού 6 L. Το πρώτο πρόγραμμα που αφορά το συμπιεστή ονομάστηκε `comp`, ενώ το δεύτερο που αφορά το στρόβιλο `map`. Ακολουθεί στη συνέχεια η ανάλυση λειτουργίας του κώδικα των προγραμμάτων αυτών.

6.2. Κώδικας CMAP

6.2.1. Εισαγωγή

Ο κώδικας cmap ψηφιοποιεί το χάρτη του δεδομένου συμπιεστή. Ο χάρτης φαίνεται στο Διάγραμμα 6.1:



Διάγραμμα 6.1. Χάρτης λειτουργίας του δεδομένου συμπιεστή.

Έχουμε τρεις περιπτώσεις:

- α) Με δεδομένα το λόγο πιέσεων και την παροχή μάζας αέρα, το πρόγραμμα εξάγει το βαθμό απόδοσης και την ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή.
- β) Με δεδομένα το λόγο πιέσεων και την ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή, το πρόγραμμα εξάγει το βαθμό απόδοσης του συμπιεστή και την παροχή μάζας αέρα.
- γ) Με δεδομένα την παροχή μάζας αέρα και την ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή, το πρόγραμμα εξάγει το βαθμό απόδοσης του συμπιεστή και το λόγο πιέσεων.

Ο χρήστης καλείται αρχικά να επέμβει στο αρχείο εισόδου για να εισάγει τα δεδομένα με τα οποία θα εκτελεστεί το πρόγραμμα.

6.2.2. Περιγραφή αρχείου εισόδου

Αρχείο εισόδου : CMAPINPUT.in

Στο αρχείο αυτό, εισάγονται τα εξής δεδομένα:

- 5. Ο χρήστης εισάγει τον αριθμό 1, 2, ή 3 ανάλογα με την περίπτωση που επιθυμεί να εξετάσει. Οι περιπτώσεις είναι αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω.
- 6. Το σημείο του χάρτη που επιθυμεί ανάλογα με την περίπτωση που εισήγαγε παραπάνω. Δίνει λοιπόν τα ζεύγη τιμών λόγος πιέσεων – παροχή αέρα, ή λόγο πιέσεων – ταχύτητα περιστροφής, ή παροχή μάζας αέρα – ταχύτητα περιστροφής.
- 7. Τον αριθμό K ισοταχών καμπύλων που αποτελείται ο χάρτης. Στον εν λόγω χάρτη, οι ισοταχείς καμπύλες είναι οχτώ.
- 8. Τα σημεία του χάρτη με την εξής σειρά:

Στροφές - κενό - Αριθμό σημείων N της 1ης ισοταχούς καμπύλης

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το 1ο σημείο)

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το 2ο σημείο)

...

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το Νοστό σημείο)

Στροφές - κενό - Αριθμό σημείων N της 2ης ισοταχούς καμπύλης

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το 1ο σημείο)

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το 2ο σημείο)

...

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το Νοστό σημείο)

...

Στροφές - κενό - Αριθμό σημείων N της K ης ισοταχούς καμπύλης

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το 1ο σημείο)

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το 2ο σημείο)

...

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το N οστό σημείο)

Να σημειωθεί ότι πρέπει τα δεδομένα να εισάγονται σε αύξοντα αριθμό στροφών και σε κάθε ισοταχή καμπύλη κατά αύξουσα τιμή της παροχής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ισχύει $N = 7$ σημεία σε κάθε ισοταχή καμπύλη.

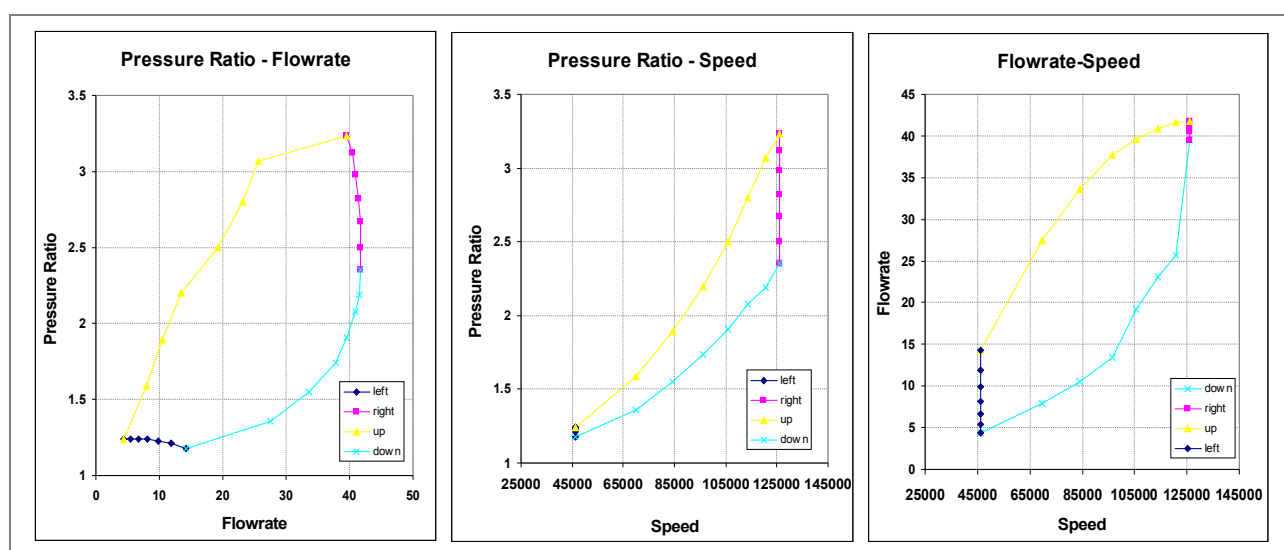
6.2.3. Επεξήγηση Κώδικα CMAP

Εφόσον ο χρήστης επέμβει στο αρχείο εισόδου και έπειτα το αποθηκεύσει, μπορεί να εκτελέσει το πρόγραμμα. Ο κώδικας αρχικά διαβάζει τα δεδομένα από το αρχείο εισόδου και τα αποθηκεύει σε κατάλληλους πίνακες.

Στη συνέχεια, γίνεται ορισμός τιμών για κάποιες παραμέτρους του κώδικα. Οι παράμετροι αυτές είναι : Ο αριθμός των γραμμών β που θα δημιουργηθούν στο χάρτη. Ο αριθμός των επιπλέον σημείων μεταξύ κάθε σημείου κάθε ισοταχούς καμπύλης που θα έχει η C-Spline καμπύλη που θα δημιουργηθεί για κάθε ισοταχή καμπύλη. Ο συντελεστής κλίμακας μεταξύ των αξόνων $x-y$ του χάρτη, ώστε οι άξονες $x-y$ να έχουν τις ίδιες περίπου διαστάσεις, πράγμα το οποίο είναι απαραίτητο σε κάποια από τις διαδικασίες που επιτελεί ο κώδικας. Σημειώνεται ότι εάν τα δεδομένα του χάρτη (λ.πίεσης – παροχή) είναι σε αδιάστατη μορφή (λ.πίεσης/λ.πίεσης σημείου λειτουργίας – παροχή/παροχή σημείου λειτουργίας), ο συντελεστής κλίμακας πρέπει να οριστεί ίσος με το μηδέν. Οι διαδικασίες αυτές λαμβάνουν χώρα ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια κατά την ψηφιοποίηση.

Στη συνέχεια ο κώδικας εκτελεί ένα γρήγορο έλεγχο με σκοπό να εντοπίσει εάν το δεδομένο από το χρήστη σημείο βρίσκεται εντός των ορίων του χάρτη, ή εκτός αυτού. Για να γίνει αυτό, βρίσκονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των δεδομένων (παροχή, λ.πίεσης, στροφές), και συγκρίνονται με το δεδομένο σημείο. Σε περίπτωση που το σημείο βρίσκεται εντός των ορίων, ο κώδικας συνεχίζει την εκτέλεσή του. Σε αντίθετη περίπτωση, το πρόγραμμα εμφανίζει στον χρήστη μήνυμα, ότι το σημείο βρίσκεται εκτός ορίων και η διαδικασία τερματίζεται. Ο γρήγορος αυτός έλεγχος δεν επαρκεί, οπότε ακολουθεί πιο

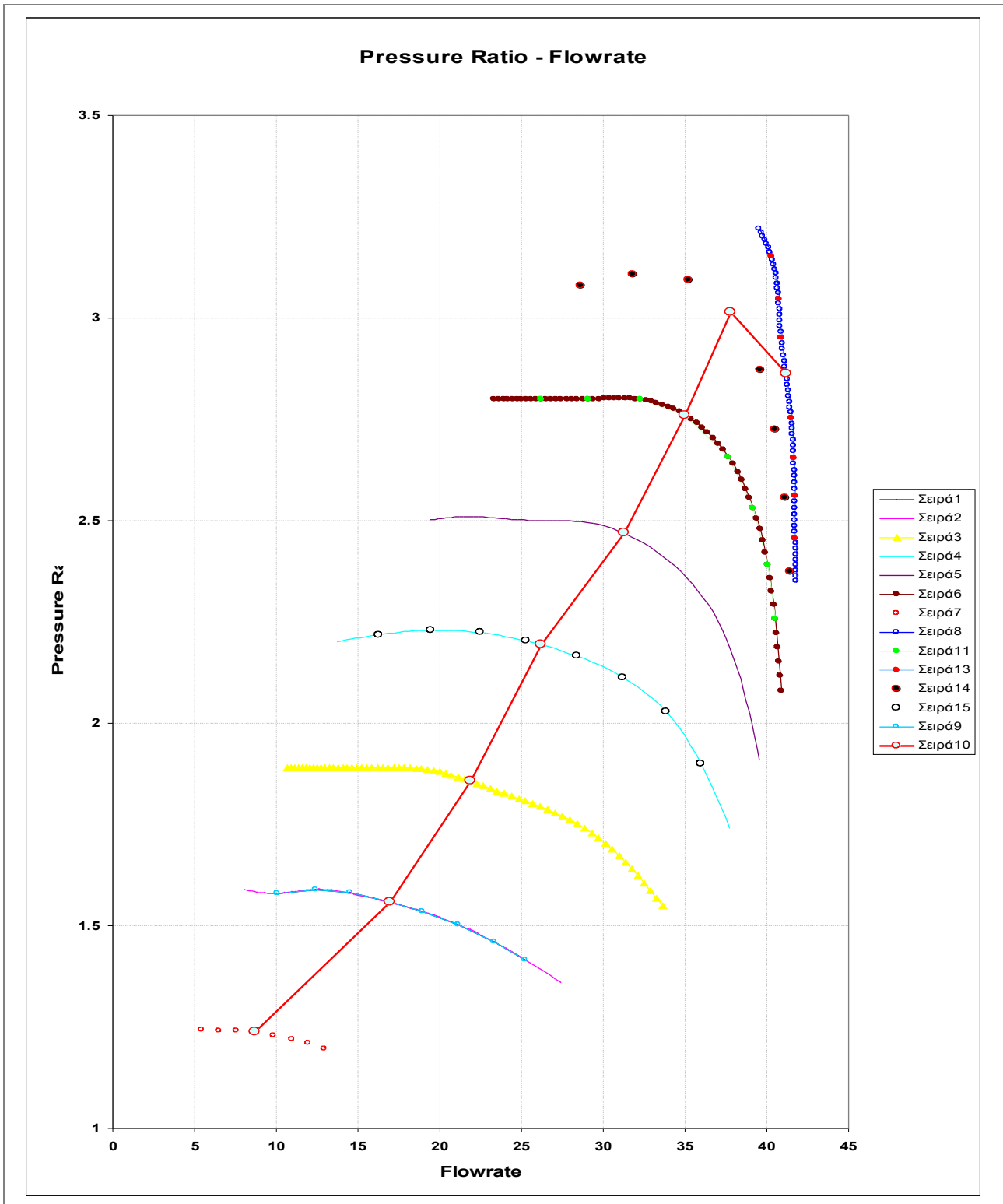
ακριβής. Ανάλογα την περίπτωση που εξετάζεται, δημιουργούνται 4 καμπύλες που αποτελούν τα όρια του χάρτη. Για παράδειγμα, στην περίπτωση με δεδομένα τον λόγο πιέσεων και την παροχή μάζας αέρα, δημιουργούνται 4 καμπύλες στο διάγραμμα λόγου πιέσεων – παροχής μάζας αέρα, οι οποίες είναι τα όρια του χάρτη. Έτσι, γίνεται έλεγχος εάν το δεδομένο σημείο που εξετάζεται, βρίσκεται εκτός ορίων, δηλαδή, πάνω από την πάνω καμπύλη, κάτω από την κάτω, αριστερά από την αριστερή, δεξιά από την δεξιά. Στα Διαγράμματα 6.2 – 6.4 παρακάτω σχήμα φαίνονται εμποπτικά οι καμπύλες αυτές και για τις τρεις περιπτώσεις. Εάν, το σημείο βρίσκεται εντός των ορίων, το πρόγραμμα συνεχίζει την εκτέλεσή του. Εάν το σημείο βρίσκεται εκτός ορίων του χάρτη, το πρόγραμμα εμφανίζει σχετικό μήνυμα στο χρήστη και τερματίζεται.



Διαγράμματα 6.2 – 6.4. Συσχέτιση λόγου πίεσης – παροχής – ταχύτητας περιστροφής και όρια χαρτών.

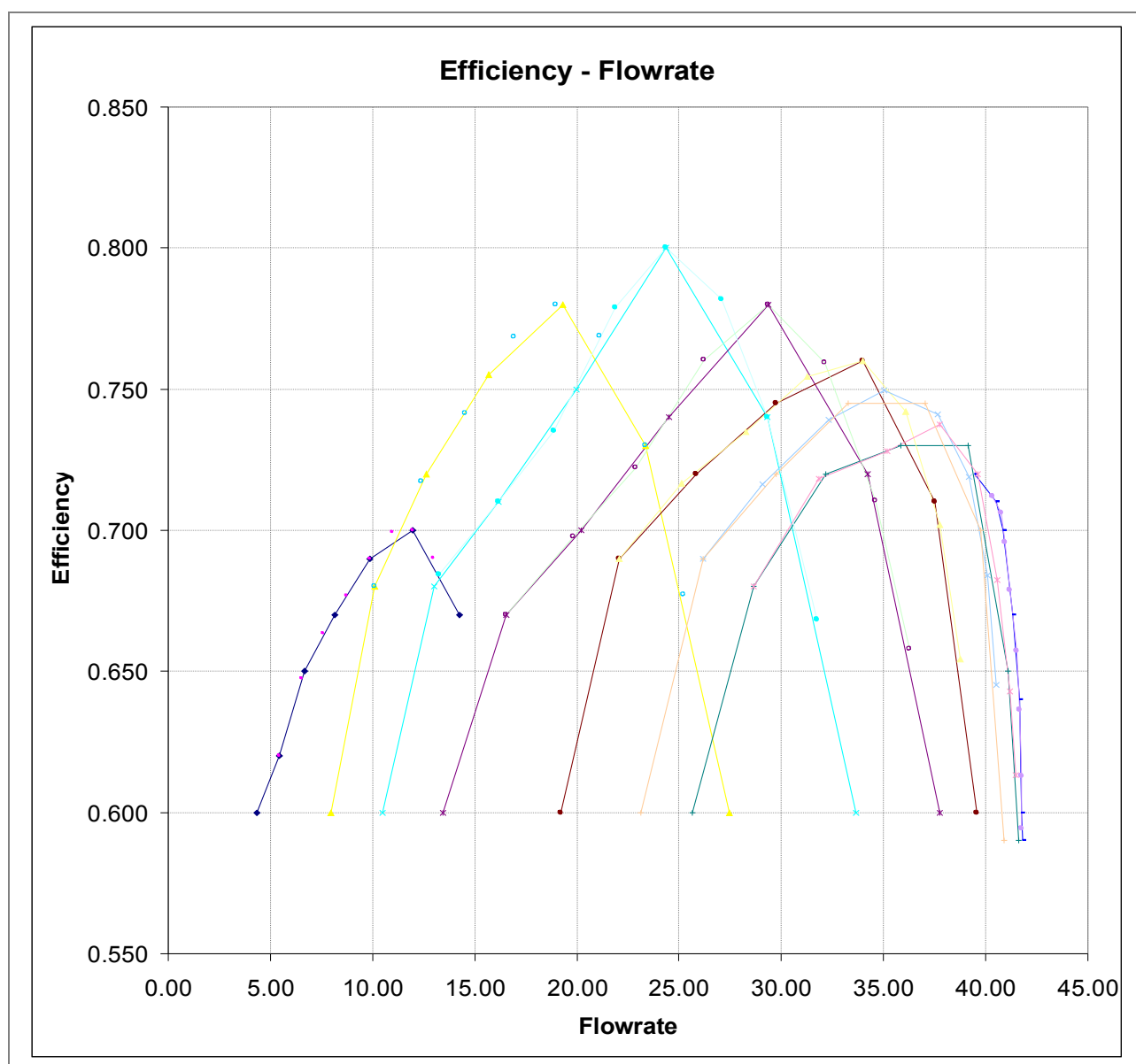
Σε επόμενο στάδιο δημιουργούνται οι παραμετρικές C-Splines των ισοταχών καμπύλων του διαγράμματος λ.πίεση - παροχή, και πυκνώνονται με επιπλέον σημεία. Έπειτα, κάθε ισοταχής καμπύλη διαμερίζεται σε N-1 τμήματα, όπου N είναι ο αριθμός των γραμμών β. Ο διαμερισμός γίνεται έτσι ώστε για κάθε ισοταχή καμπύλη, τα τμήματα της καμπύλης από τα οποία αποτελείται να έχουν ίδιο μήκος. Έτσι, αν για παράδειγμα έχουμε 10 γραμμές β, τότε κάθε ισοταχής χωρίζεται σε 9 διαστήματα με ίδιο μήκος, προφανώς διαφορετικό για κάθε ισοταχή καμπύλη. Στο Διάγραμμα 6.5 απεικονίζεται εμποπτικά η πύκνωση και ο διαμερισμός των ισοταχών, καθώς και μια γραμμή β (κόκκινη γραμμή) που διατρέχει το χάρτη.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί το ότι για να μπορέσουν τα υπολογιστούν τα διαμερίσματα μιας ισοταχούς ώστε να έχουν το ίδιο μήκος, έγινε χρήση του συντελεστή κλίμακας μεταξύ των αξόνων x-y του χάρτη, ώστε οι άξονες x-y να έχουν τις ίδιες περίπου διαστάσεις.



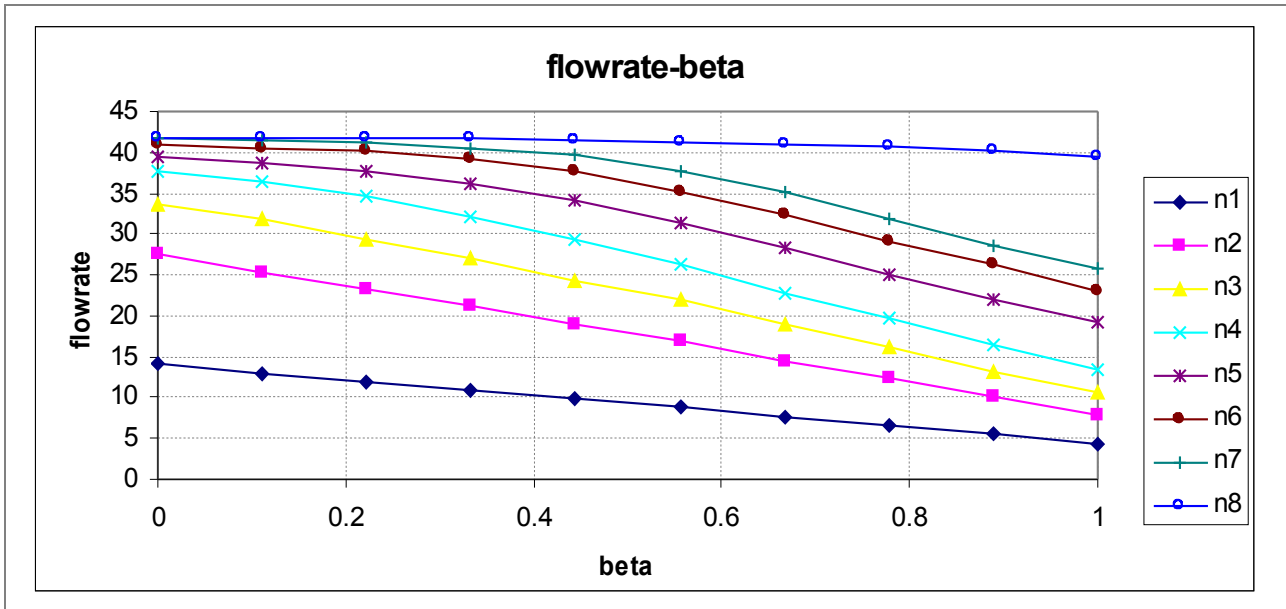
Διάγραμμα 6.5. Ισοταχείς καμπύλες στο χάρτη του συμπιεστή.

Ο κώδικας συνεχίζει την εκτέλεσή του με τη διαδικασία υπολογισμού του βαθμού απόδοσης που αντιστοιχεί στα σημεία των ισοταχών που έγιναν οι διαμερίσεις. Για να γίνει αυτό, δημιουργούνται παραμετρικές C-Splines των καμπύλων λόγου πιέσεων – βαθμού απόδοσης και παροχής μάζας αέρα – βαθμού απόδοσης, ώστε να βρεθεί ο βαθμός απόδοσης που αντιστοιχεί στα σημεία διαμερισμού των ισοταχών. Ο κώδικας χρησιμοποιεί ένα από τα δύο διαγράμματα με τρόπο τέτοιο, ώστε να αποφεύγονται τα κατακόρυφα ή οριζόντια τμήματα της καμπύλης, στα οποία ο υπολογισμός είναι αδύνατος. Η σχέση παροχής - β.α. απεικονίζεται εποπτικά στο Διάγραμμα 6.6, στο οποίο φαίνονται και τα εν λόγω σημεία.

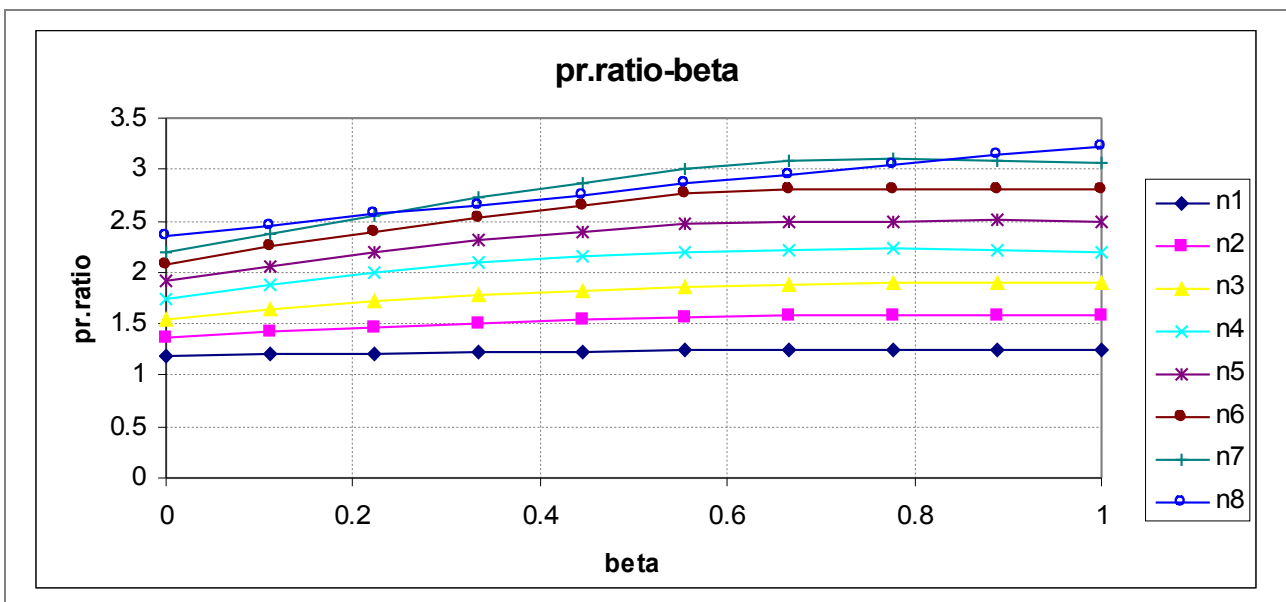


Διάγραμμα 6.6. Απεικόνιση συσχέτισης παροχής – βαθμού απόδοσης για διάφορες ταχύτητες περιστροφής.

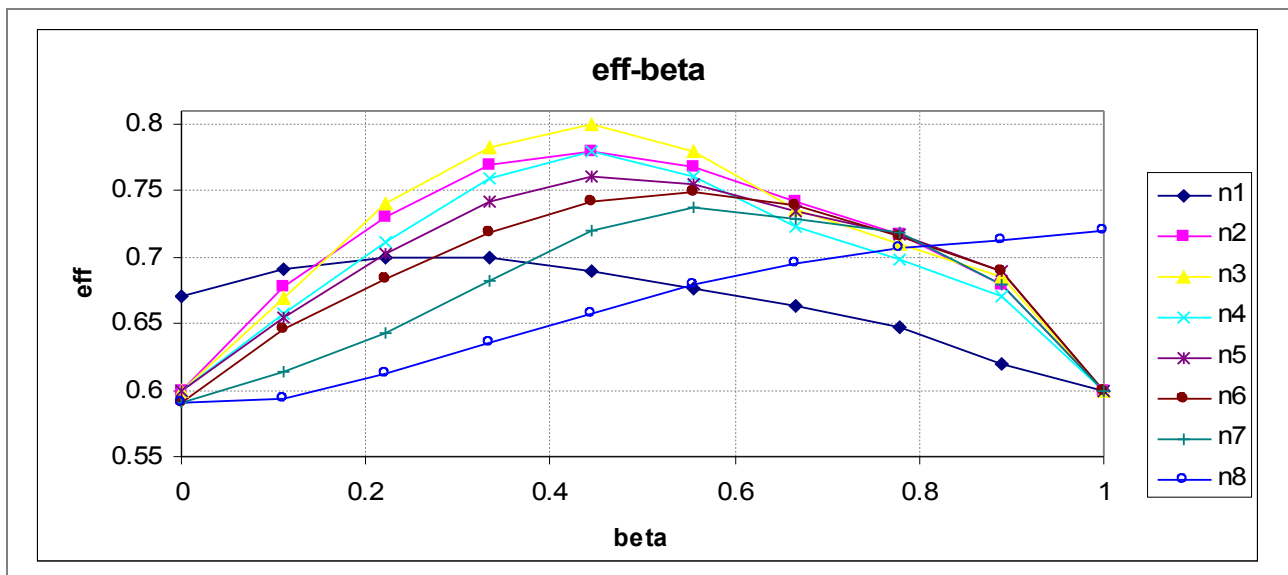
Στη συνέχεια, γνωρίζοντας ο κώδικας τον λόγο πιέσεων, την παροχή μάζας αέρα και το βαθμό απόδοσης που αντιστοιχούν σε κάθε γραμμή β , δημιουργεί τις καμπύλες λόγου πιέσεων, παροχής μάζας αέρα και βαθμού απόδοσης συναρτήσει του β για κάθε ισοταχή καμπύλη. Να σημειωθεί ότι οι καμπύλες αυτές αποτελούν τον πυρήνα της λειτουργίας του κώδικα και βάσει αυτών γίνεται στη συνέχεια ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων. Οι καμπύλες αυτές φαίνονται εποπτικά στα Διάγραμματα 6.7-6.9:



Διάγραμμα 6.7. Γραφική απεικόνιση β – παροχής μάζας για διάφορες ταχύτητες περιστροφής.



Διάγραμμα 6.8. Γραφική απεικόνιση β – λόγου πίεσης για διάφορες ταχύτητες περιστροφής.



Διάγραμμα 6.9. Γραφική απεικόνιση β – βαθμού απόδοσης για διάφορες ταχύτητες περιστροφής.

6.2.4. Υπολογισμός μεγεθών

Στο σημείο αυτό, ξεκινάει ο υπολογισμός των επιθυμητών μεγεθών ανάλογα την περίπτωση που δηλώθηκε στο αρχείο εισόδου. Συγκεκριμένα επιτελούνται οι εξής διαδικασίες :

Περίπτωση 1. Είσοδος : λόγος πιέσεων – παροχή μάζας αέρα , Έξοδος : Ταχύτητα περιστροφής – βαθμός απόδοσης

Η διαδικασία για την περίπτωση αυτή έχει ως εξής:

- 1) Ο κώδικας βρίσκει την ταχύτητα περιστροφής από το διάγραμμα λόγου πιέσεων – παροχή μάζας αέρα
- 2) Υπολογίζει την παράμετρο β από διάγραμμα λόγου πιέσεων – γραμμές β ή παροχή μάζας αέρα – γραμμές β .
- 3) Με γνωστή την παράμετρο β , βρίσκει τον βαθμό απόδοσης από το διάγραμμα βαθμού απόδοσης – γραμμές β .

Αναλυτικότερα η διαδικασία έχει ως εξής :

Αρχικά, ο κώδικας υπολογίζει μεταξύ ποιων ισοταχών καμπύλων στο χάρτη βρίσκεται το σημείο που του έχει δώσει ο χρήστης στο αρχείο εισόδου. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται αρχικά ο συντελεστής κλίμακας ώστε να αποκτήσουν οι άξονες x-y του χάρτη περίπου τις ίδιες διαστάσεις. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ελάχιστη απόσταση του σημείου από κάθε ισοταχή καμπύλη. Είναι προφανές ότι οι δύο μικρότερες αποστάσεις από τις παραπάνω, θα αντιστοιχούν στις γειτονικές ισοταχείς καμπύλες, οπότε είναι και αυτές που χρησιμοποιούνται. Έτσι, ο κώδικας αναγνωρίζει μεταξύ ποιων ισοταχών καμπύλων βρίσκεται. Έχοντας λοιπόν τις δύο αυτές αποστάσεις d_1 , d_2 από τις γειτονικές ισοταχείς με ταχύτητες περιστροφής RPM_1 , RPM_2 , όπου $RPM_1 < RPM_2$, τότε με μια γραμμική παρεμβολή που ακολουθεί τη σχέση $RPM = d_1 / (d_1 + d_2) * (RPM_2 - RPM_1) + RPM_1$, υπολογίζεται η ταχύτητα περιστροφής για το δεδομένο σημείο.

Έπειτα, υπολογίζεται στα διαγράμματα λόγου πιέσεων – γραμμές β και παροχή μάζας αέρα – γραμμές β, η καμπύλη που αντιστοιχεί στην ταχύτητα περιστροφής του δεδομένου σημείου. Αυτό γίνεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ κάθε σημείου των γειτονικών ισοταχών στα διαγράμματα λόγου πιέσεων – γραμμές β και παροχή μάζας αέρα – γραμμές β. Για παράδειγμα, στο διάγραμμα λόγου πιέσεων – γραμμές β, η σχέση που ακολουθείται είναι $(RPM - RPM_1) / (RPM_2 - RPM_1) * (PR_2 - PR_1) + PR_1$ και εφαρμόζεται για κάθε ζευγάρι τιμών $PR - \beta$, όπου PR (pressure ratio) είναι ο λόγος πιέσεων. Έτσι λοιπόν, αφού υπολογιστούν οι καμπύλες αυτές, ο κώδικας επιλέγει ποια από τις δύο θα χρησιμοποιήσει, ώστε να αποφεύγοντα τα οριζόντια η κατακόρυφα τμήματα των ισοταχών που αναφέρθηκαν ενωρίτερα. Αφού επιλέξει τη σωστή καμπύλη, υπολογίζει την παραμετρική C-Spline αυτής και στη συνέχεια για την τιμή του λόγου πιέσεων ή της παροχής μάζας αέρα (ανάλογα την καμπύλη) υπολογίζει την τιμή της παραμέτρου β.

Αφού λοιπόν η τιμή της παραμέτρου β είναι γνωστή, υπολογίζει την καμπύλη βαθμού απόδοση – γραμμές β που αντιστοιχεί στο σημείο, με μεθοδολογία ίδια με παραπάνω. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζει τον βαθμό απόδοσης που αντιστοιχεί στο δεδομένο σημείο.

Τέλος, γράφει στο αρχείο εξόδου το αποτέλεσμα : ταχύτητα περιστροφής και βαθμό απόδοσης.

Περίπτωση 2. Είσοδος : λόγος πιέσεων – ταχύτητα περιστροφής , Έξοδος : Παροχή μάζας αέρα – βαθμός απόδοσης.

Συνοπτικά, η διαδικασία για την περίπτωση αυτή έχει ως εξής:

- 1) Ο κώδικας βρίσκει την παράμετρο β από το διάγραμμα λόγου πιέσεων – γραμμές β .
- 2) Στη συνέχεια βρίσκει την παροχή από το διάγραμμα παροχή μάζας αέρα – γραμμές β .
- 3) Τέλος βρίσκει τον βαθμό απόδοσης από το διάγραμμα βαθμός απόδοσης – γραμμές β .

Αναλυτικότερα η διαδικασία έχει ως εξής:

Υπολογίζεται, αρχικά, στο διάγραμμα λόγου πιέσεων – γραμμές β , η καμπύλη που αντιστοιχεί στις στροφές του σημείου. Αυτό γίνεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ κάθε σημείου των γειτονικών ισοταχών στο διάγραμμα λόγου πιέσεων – γραμμές β . Η σχέση που ακολουθείται είναι $(RPM-RPM1)/(RPM2-RPM1)*(PR2-PR1)+PR1$ και εφαρμόζεται για κάθε ζευγάρι τιμών PR (pressure ratio) – β . Στη συνέχεια, υπολογίζεται η παραμετρική C-Spline της καμπύλης αυτής και έπειτα, για την τιμή του λόγου πιέσεων του δεδομένου σημείου υπολογίζεται η τιμή της παραμέτρου β .

Αφού, λοιπόν, η τιμή της παραμέτρου β είναι γνωστή, υπολογίζονται οι καμπύλες παροχή μάζας αέρα – γραμμές β και βαθμός απόδοσης – γραμμές β , που αντιστοιχούν στο δεδομένο σημείο, με μεθοδολογία ίδια με παραπάνω, και υπολογίζονται έτσι η παροχή μάζας αέρα και ο βαθμός απόδοσης που αντιστοιχούν στο σημείο.

Τέλος, γράφεται στο αρχείο εξόδου το αποτέλεσμα : παροχή μάζας αέρα – βαθμός απόδοσης.

Περίπτωση 3. Είσοδος : Παροχή μάζας αέρα – ταχύτητα περιστροφής , Έξοδος : λόγος πιέσεων – βαθμός απόδοσης.

Συνοπτικά, η διαδικασία για την περίπτωση αυτή έχει ως εξής:

- 1) Ο κώδικας βρίσκει την παράμετρο β από το διάγραμμα παροχή μάζας αέρα – γραμμές β .
- 2) Βρίσκει το λόγο πιέσεων από διάγραμμα λόγου πιέσεων – γραμμές β .
- 3) Υπολογίζει τον βαθμό απόδοσης από διάγραμμα βαθμού απόδοσης – γραμμές β .

Αναλυτικότερα, η διαδικασία έχει ως εξής :

Καταρχάς, υπολογίζεται στο διάγραμμα παροχή μάζας αέρα – γραμμές β, η καμπύλη που αντιστοιχεί στην ταχύτητα περιστροφής του δεδομένου σημείου. Αυτό πραγματοποιείται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ κάθε σημείου των γειτονικών ισοταχών στο διάγραμμα παροχής μάζας αέρα – γραμμές β. Η σχέση που ακολουθείται είναι $(RPM-RPM1)/(RPM2-RPM1)*(FR2-FR1)+FR1$ και εφαρμόζεται για κάθε ζευγάρι τιμών FR–β, όπου FR η παροχή μάζας αέρα. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η παραμετρική C-Spline της καμπύλης αυτής και έπειτα, για την τιμή της παροχής μάζας αέρα του δεδομένου σημείου υπολογίζεται η τιμή της παραμέτρου β.

Αφού λοιπόν η τιμή της παραμέτρου β είναι γνωστή, υπολογίζονται οι καμπύλες λόγου πιέσεων – γραμμές β και βαθμού απόδοσης – γραμμές β, που αντιστοιχούν στο δεδομένο σημείο, με μεθοδολογία ίδια με παραπάνω, και υπολογίζονται έτσι ο λόγος πιέσεων και ο βαθμός απόδοσης που αντιστοιχούν στο σημείο.

Τέλος, γράφεται στο αρχείο εξόδου το αποτέλεσμα: λόγος πιέσεων και βαθμός απόδοσης.

Αρχείο εξόδου : COUT.dat

Το αρχείο εξόδου που δημιουργείται μετά το τέλος της εκτέλεσης του προγράμματος, εμφανίζει τα αποτελέσματα του κώδικα, τα οποία ανάλογα την περίπτωση είναι:

1) Ταχύτητα περιστροφής (rpm) – βαθμός απόδοσης

2) Παροχή μάζας αέρα – βαθμός απόδοσης

3) Λόγος πιέσεων – βαθμός απόδοσης

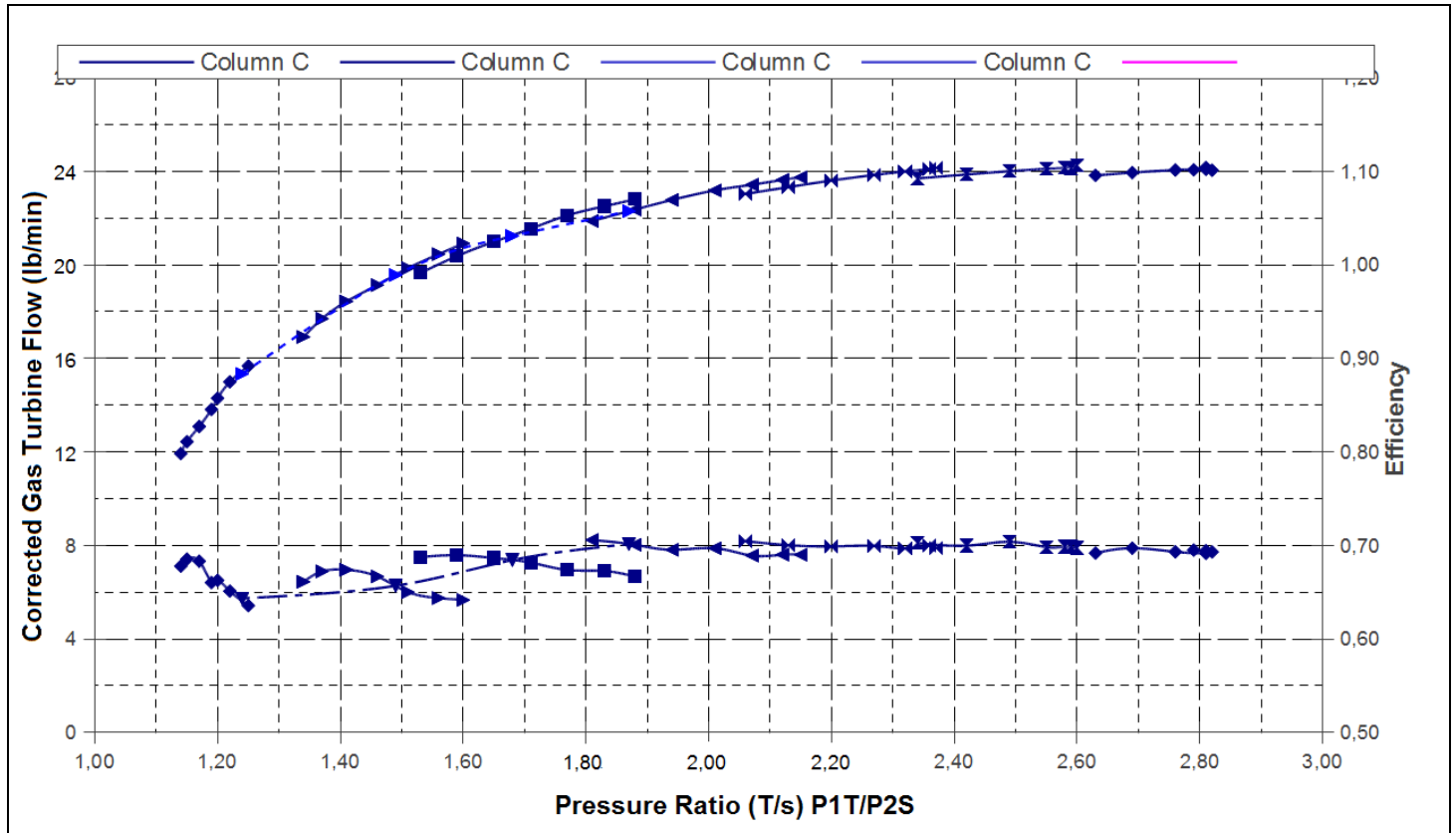
Αξίζει να σημειωθεί δε ότι στην περίπτωση της παροχής μάζας αέρα, το αποτέλεσμα εξάγεται τόσο σε αγγλοσαξωνικές μονάδες (lib/min) όσο και σε μονάδες του συστήματος S.I. (kg/sec).

Στην συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση λειτουργίας του κώδικα TMAP για το στρόβιλο του κινητήρα.

6.3. Κώδικας TMAP

6.3.1. Εισαγωγή

Ο κώδικας tmap ψηφιοποιεί το χάρτη του δεδομένου στροβίλου. Ο χάρτης φαίνεται στο Διάγραμμα 6.10:



Διάγραμμα 6.10. Χάρτης λειτουργίας δεδομένου στροβίλου.

Δημιουργήθηκαν δύο περιπτώσεις:

- 1) Με δεδομένα τον λόγο πιέσεων και την ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου, το πρόγραμμα εξάγει το βαθμό απόδοσης και την παροχή μάζας αέρα του στροβίλου.
 - 2) Με δεδομένα την παροχή μάζας αέρα και την ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή, το πρόγραμμα εξάγει το βαθμό απόδοσης του στροβίλου και το λόγο πιέσεων αέρα.
- Αρχικά ο χρήστης καλείται να επέμβει στο αρχείο εισόδου του κώδικα.

6.3.2. Περιγραφή αρχείου εισόδου

Αρχείο εισόδου : TMAPINPUT.in

Στο αρχείο αυτό, εισάγονται τα εξής δεδομένα :

1. Ο βαθμός του πολυωνύμου που θα προσεγγιστεί η καμπύλη παροχής μάζας αέρα – λόγου πιέσεων του χάρτη του στροβίλου. Μια καμπύλη 5^{ου} βαθμού δίνει ικανοποιητική προσέγγιση, οπότε είναι αυτή που χρησιμοποιείται στην εν λόγω διπλωματική εργασία.
2. Ο βαθμός του πολυωνύμου που θα προσεγγιστεί η καμπύλη βαθμού απόδοσης – λόγου πιέσεων για το σημείο που αναζητάει ο χρήστης. Μια καμπύλη 2^{ου} βαθμού δίνει ικανοποιητική προσέγγιση, ενώ ταυτόχρονα συμβαδίζει με τη φυσική απεικόνιση της καμπύλης αυτής, οπότε είναι αυτή που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία
3. Την περίπτωση που επιθυμεί να εκτελέσει ο χρήστης με τον αριθμό 1 ή 2. Οι περιπτώσεις είναι δύο και αναφέρθηκαν πιο πάνω.
4. Το σημείο του χάρτη που επιθυμεί ο χρήστης ανάλογα με την περίπτωση που εισήγαγε παραπάνω. Δίνει δηλαδή τα ζεύγη τιμών λόγος πιέσεων – ταχύτητα περιστροφής, ή παροχή μάζας αέρα – ταχύτητα περιστροφής.
5. Τον αριθμό K ισοταχών καμπύλων που αποτελείται ο χάρτης. Στην εν λόγω εργασία, ο χάρτης αποτελείται από 7 ισοταχείς καμπύλες.
6. Τα σημεία του χάρτη με την εξής σειρά :

Στροφές - κενό - Αριθμό σημείων N της 1ης ισοταχούς καμπύλης

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το 1ο σημείο)

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το 2ο σημείο)

...

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το Νοστό σημείο)

Στροφές - κενό - Αριθμό σημείων N της 2ης ισοταχούς καμπύλης

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το 1ο σημείο)

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το 2ο σημείο)

...

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το Νοστό σημείο)

...

Στροφές - κενό - Αριθμό σημείων N της Κης ισοταχούς καμπύλης

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το 1ο σημείο)

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το 2ο σημείο)

...

Παροχή - κενό - Λόγος πίεσης - κενό - β.α. (Για το Νοστό σημείο)

Να σημειωθεί ότι πρέπει τα δεδομένα να εισάγονται σε αύξοντα αριθμό στροφών και σε κάθε ισοταχή καμπύλη κατά αύξουσα τιμή της παροχής και ότι $N = 7$.

Στη συνέχεια ακολουθεί η επεξήγηση του κώδικα TMAP.

6.3.3. Επεξήγηση Κώδικα TMAP

Ο κώδικας αρχικά διαβάζει τα δεδομένα από το αρχείο εισόδου και τα αποθηκεύει σε κατάλληλους πίνακες.

Στη συνέχεια επιτελείται ένας έλεγχος εάν το δεδομένο από τον χρήστη σημείο βρίσκεται μέσα στα όρια του χάρτη. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, βρίσκονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των δεδομένων (παροχή μάζας αέρα, λόγου πιέσεων), και συγκρίνονται με το δεδομένο σημείο. Εάν η παροχή μάζας αέρα ή ο λόγος πιέσεων που έδωσε ο χρήστης είναι μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής παροχής μάζας αέρα, λόγου πιέσεων του χάρτη, ο κώδικας συνεχίζει, αλλιώς αναφέρει στο χρήστη ότι το δεδομένο σημείο βρίσκεται εκτός και το πρόγραμμα τερματίζεται.

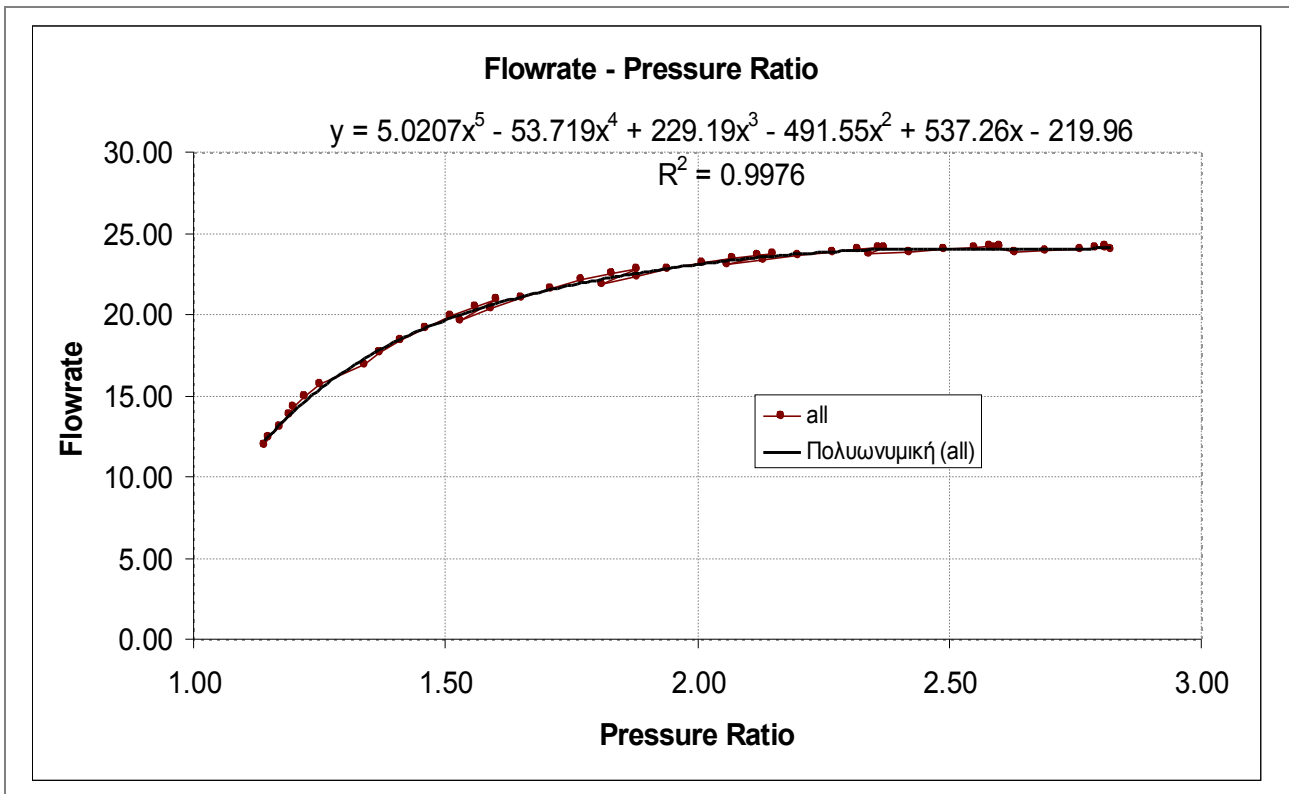
Στο σημείο αυτό γίνεται ο υπολογισμός του πολυωνύμου προσέγγισης του χάρτη. Σαν δεδομένα χρησιμοποιούνται όλα τα σημεία του χάρτη λόγου πιέσεων – παροχής μάζας αέρα, ανεξαρτήτως ταχύτητας περιστροφής. Έτσι, υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

1) Εάν η είσοδος είναι ο λόγος πιέσεων και η ταχύτητα περιστροφής και ζητάται η παροχή μάζας αέρα και ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου (περίπτωση 1), τότε ο κώδικας υπολογίζει με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων τους συντελεστές του πολυωνύμου παροχή μάζας αέρα – λόγου πιέσεων.

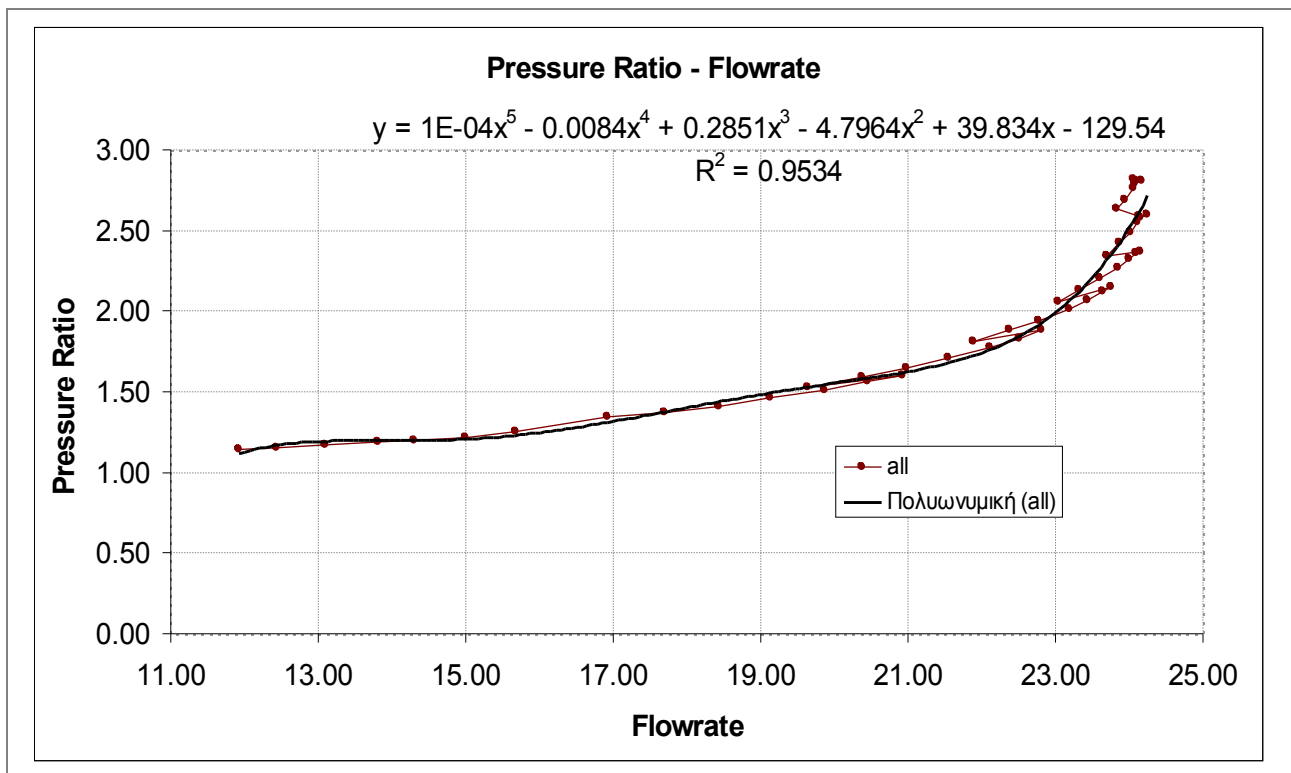
2) Εάν η είσοδος είναι η παροχή μάζας αέρα και η ταχύτητα περιστροφής και ζητάται ο λόγος πιέσεων και ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου (περίπτωση 2), τότε ο κώδικας υπολογίζει με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων τους συντελεστές του πολυωνύμου λόγου πιέσεων – παροχής μάζας αέρα.

Ανάλογα την περίπτωση και με υπολογισμένους τους συντελεστές του πολυωνύμου, υπολογίζεται η παροχή μάζας αέρα για την περίπτωση 1 και ο λόγος πιέσεων για την περίπτωση 2.

Στα Διαγράμματα 6.11 και 6.12 φαίνεται εποπτικά η προσέγγιση με πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού των καμπύλων παροχής μάζας αέρα – λόγου πιέσεων και λόγου πιέσεων - παροχής μάζας αέρα.



Διάγραμμα 6.11. Καμπύλη παροχής - λόγου πίεσης του στροβίλου.



Διάγραμμα 6.12. Καμπύλη λόγου πίεσης – παροχής του στροβίλου.

Στο σημείο αυτό υπολογίζεται η νέα ισοταχής καμπύλη βαθμού απόδοσης – λόγου πιέσεων μέσω γραμμικής παρεμβολής.

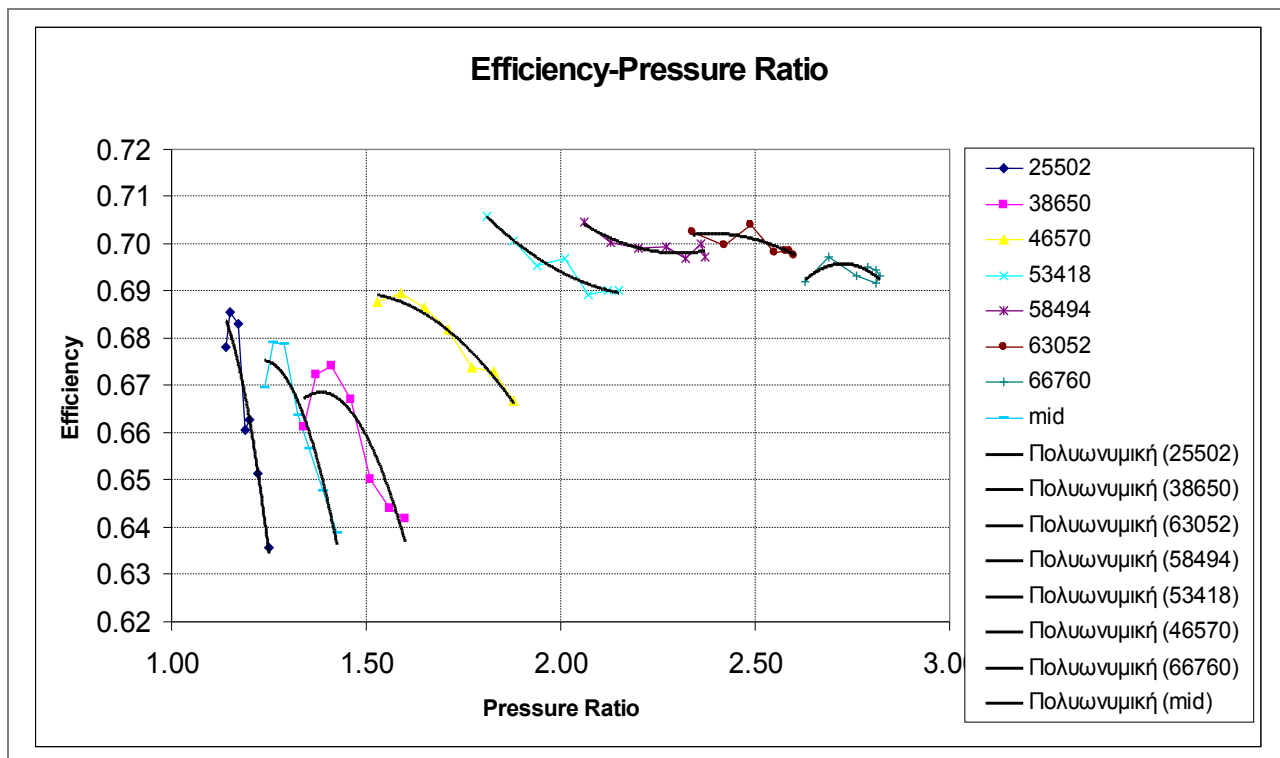
Η διαδικασία υπολογισμού έχει ως εξής :

Αρχικά, εφ' όσον είναι δεδομένη η ταχύτητα περιστροφής, ο κώδικας εντοπίζει μεταξύ ποιων ισοταχών βρίσκεται η νέα ισοταχής καμπύλη. Έπειτα, για τον υπολογισμό της νέας ισοταχούς βαθμού απόδοσης – λόγου πιέσεων, επιτελείται γραμμική παρεμβολή μεταξύ των αντίστοιχων σημείων των γειτονικών ισοταχών βαθμού απόδοσης – λόγου πιέσεων. Ως αντίστοιχα σημεία εννοούμε το πρώτο σημείο της μιας ισοταχούς με το πρώτο σημείο της άλλης ισοταχούς κ.ο.κ..

Αφού λοιπόν υπολογιστούν τα σημεία της νέας ισοταχούς, ο κώδικας υπολογίζει με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων τους συντελεστές του πολυωνύμου της νέας ισοταχούς.

Τέλος, αφού βρεθεί το πολυώνυμο αυτό και με υπολογισμένο (ή δεδομένο) το λόγο πιέσεων σε προηγούμενο σημείο του κώδικα, υπολογίζεται από το πολυώνυμο αυτό η τιμή του βαθμού απόδοσης του δεδομένου σημείου.

Στο Διάγραμμα 6.13 φαίνεται εποπτικά το διάγραμμα βαθμού απόδοσης – λόγου πιέσεων του στροβίλου στο οποίο έχουν γίνει προσεγγίσεις των ισοταχών με πολυώνυμα 2^{ου} βαθμού. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται και μια νέα ισοταχής (32076rpm με όνομα 'mid') που υπολόγισε ο κώδικας και η οποία προέκυψε από γραμμική παρεμβολή μεταξύ των ισοταχών 25502rpm και 38650rpm.



Διάγραμμα 6.13. Καμπύλη βαθμού απόδοσης – λόγου πιέσεων του στροβίλου.

Στη συνέχεια το πρόγραμμα δημιουργεί το αρχείο εξόδου.

Αρχείο εξόδου : TOUT.dat

Το αρχείο εξόδου εμφανίζει τα αποτελέσματα του κώδικα, τα οποία ανάλογα την περίπτωση είναι :

- 1) Παροχή μάζας αέρα – βαθμός απόδοσης
- 2) Λόγος πιέσεων – βαθμός απόδοσης

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παροχή μάζας αέρα υπολογίζεται και σε αυτή την περίπτωση τόσο σε αγγλοσαξωνικά μεγέθη (lib/mim), όσο και σε μεγέθη του συστήματος τιμών S.I. (kg/sec).

6.4. Πίνακες αποτελεσμάτων

Στους πίνακες 6.1 – 6.7 παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραματικών δεδομένων και των προγραμμάτων fortran που δημιουργήθηκαν. Από τη σύγκριση των τιμών προκύπτει ότι η ακρίβεια που επιτεύχθηκε κατά την ψηφιοποίηση, είναι ικανοποιητική.

Βιβλιογραφία

Έντυπη

- 1) Κ. Δ. Ρακόπουλος (1988), «Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή–Λειτουργία–Θερμοδυναμική», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 2) Κ. Δ. Ρακόπουλος (2000), «Εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης II. Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 3) Κ. Δ. Ρακόπουλος (1994), «Εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 4) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Δ.Θ. Χουντάλας (1998), «Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης», Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- 5) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής (2006), «Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ», Εκδόσεις ΕΜΠ.
- 6) C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis (2009), «Diesel engine transient operation», Springer, London.
- 7) Κ.Μ. Μαθιουδάκης, “Λειτουργία Αεροπορικών Κινητήρων – Επιδόσεις, Εκπομπές Καυσαερίων και Ήχου”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2007.
- 8) Χ. Αμπάτης, 2010 “Σχεδιασμός και κατασκευή συνιστωσών, θέση σε λειτουργία και μετρήσεις σε διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών”, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π.
- 9) P.P Walsh, P. Fletcher, “Gas Turbine Performance”, Blackwell Science, Second edition 2004, ISBN: 0-632-06434-X.
- 10) William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery, “Numerical Recipes in Fortran 90”, Cambridge University Press, Second edition 1997, ISBN: 0 521 57439 0.

Ηλεκτρονική

1)<http://www.abb.com/>

2)<http://www.mandieselturbo.com/0000002/Home.html>

3)<file:///C:/Users/Fotis/Desktop/MTU%20Diesel%20Engine%20For%20Sale.%20item%20number%202920%20-%20diesel%20engine%20motor.com.htm>

4)http://www.geenergy.com/products_and_services/products/gas_engines_power_generation/ge_jenbacher_j624_2_stage_turbocharged_gas_engine.jsp

5)<http://www.mercedes-amg.com/v1260lbiturbo.html#/157v8>

6)<http://www.autoblog.gr/2009/12/16/mercedes-amg-dropping-6-2-liter-v8-for-bi-turbo-5-5-liter-v8/>

7)http://jean-pierre.moreau.pagesperso-orange.fr/f_lstsqr.html

8)http://www.nag.co.uk/numeric/FL/nagdoc_fl23/html/FRONTMATTER/manconts.html