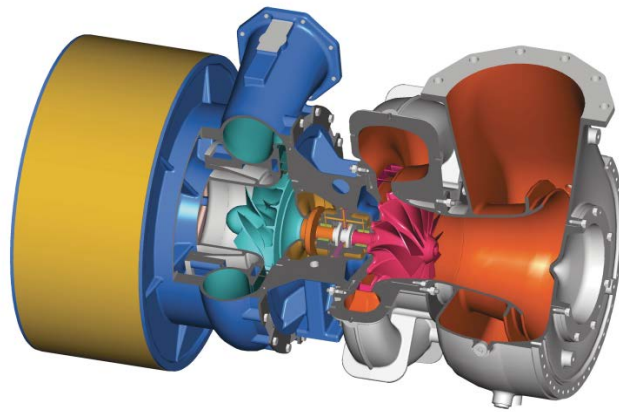




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία Γεωργίου Κόλλια-Πιτυρίγκα



«Ανάπτυξη και Αξιολόγηση Μεθόδων
Προσομοίωσης Ακτινικού Συμπιεστή με τη
Μέθοδο της Λειτουργικής Ομοιότητας για Χρήση
σε Εφαρμογές Προσομοίωσης και Διάγνωσης
Υπερπληρωμένων Κινητήρων Ντήζελ»

Επιβλέπων

Καθηγητής Δημήτριος Θ. Χουντάλας

Οκτώβριος 2014

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το επιστέγασμα των σπουδών μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Φτάνοντας στο τέλος των σπουδών μου, κοιτάζοντας πίσω, συνειδητοποιώ πως η πορεία μου μέσα στο ίδρυμα, μου προσέφερε ιδιαίτερες και εξαιρετικά σημαντικές εμπειρίες, τόσο ως μέλλοντα μηχανικό όσο και ως άνθρωπο. Η εκπόνηση της εργασίας αυτής δεν θα μπορούσε παρά να είναι το αποκορύφωμα της πορείας αυτής.

Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω πρωτίστως τον Καθηγητή μου κ. Δημήτριο Θ. Χουντάλα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και για τις γνώσεις, την εμπειρία και την διορατικότητά του, που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Νικόλαο Σακελλαρίδη για την αμέριστη και συνεχή υποστήριξη και καθοδήγηση τόσο σε πρακτικά όσο και θεωρητικά ζητήματα-προβλήματα που ανέκυψαν στη προσπάθεια περάτωσης της εργασίας.

Θεωρώ επίσης σημαντικό να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Κ.Ρακόπουλο για τη διδασκαλία του και το συγγραφικό του έργο που αποτέλεσαν την πρώτη μου επαφή με το αντικείμενο των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης καθώς και τον Επίκουρο Καθηγητή Ε.Γιακουμή για την γνώση που μου μετέδωσε μέσα από το μάθημά του όσον αφορά στην Υπερπλήρωση των κινητήρων Ντήζελ.

Κλείνοντας θα ήθελα να αναφερθώ και να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για το κίνητρο και την ώθηση που μου έδωσαν όλα αυτά τα χρόνια ώστε να πετύχω τους στόχους μου καθώς επίσης, τους συμφοιτητές μου Η.Κονίνη και Μ. Κορρέ για την ψυχολογική και όχι μόνο βοήθεια που μου προσέφεραν.

Κόλλιας-Πιτυρίγκας Γεώργιος

Αύγουστος 2014

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	7
1.1	Σκοπός διπλωματικής.....	7
1.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση-Δομή της διπλωματικής εργασίας	7
1.3	Εισαγωγή στις εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ.	8
1.3.1	Κατηγοριοποίηση εμβολοφόρων Μηχανών Εσωτερικής Καύσης.....	8
1.3.2	Πλεονεκτήματα κινητήρων Diesel έναντι κινητήρων Otto	9
1.3.3	Τα Υπολογιστικά μοντέλα στην εξέλιξη των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.....	10
2	Υπερπλήρωση.....	11
2.1	Επισκόπηση των μεθόδων υπερπλήρωσης	12
2.2	Τρόπος κίνησης του συμπιεστή υπερπλήρωσης.	13
2.3	Σχεδιασμός του συμπιεστή	16
2.4	Σύνδεση υπερπληρωτή και κινητήρα, μεταφορά ισχύος	18
2.5	Είδος του κινητήρα.....	18
2.6	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης.....	19
2.7	Βασικές αρχές της στρόβιλο-υπερπλήρωσης	19
2.8	Βασικές σχέσεις θερμοδυναμικής.....	22
2.9	Συμπιεστής δυναμικής ροής	25
2.9.1	Περιγραφή της ροής.....	27
3	Χάρτης λειτουργίας αξονικού συμπιεστή	29
3.1	Ανάλυση χάρτη τυπικού αξονικού συμπιεστή.....	29
3.1.1	Το πρόβλημα της μεταβατικής λειτουργίας	32
3.2	Μέθοδοι εκτίμησης χαρτών συμπιεστή.....	33
3.2.1	Μέθοδος Ομοιότητας.....	33
3.2.2	Μέθοδος "σπονδυλικής στήλης" (Backbone Method).....	34
3.2.3	Μέθοδος υπολογισμού της ροής στο Μεσημβρινό Επίπεδο	35
3.2.4	Μέθοδος Συσσώρευσης Βαθμίδων (Stage Stacking Method)	35
4	Κυρίως Μέρος Α'	38
4.1	Παρουσίαση της υπάρχουσας μεθόδου προσομοίωσης	38
4.2	Μεθοδολογία - Σχέσεις	40
4.3	Χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν	45
4.3.1	MTU - 396	45
4.3.2	Mitsubishi MET -66MA	45
4.3.3	ABB A-100L	47

4.3.4	Garrett GT15-44.....	48
4.3.5	Χάρτης βιβλιοθήκης του λογισμικού GT - Power.....	49
4.4	Παρουσίαση αποτελεσμάτων για ολόκληρο τον χάρτη	49
4.5	Μεθοδολογία Β' μέρος: Βαθμονόμηση μοντέλου με είσοδο λίγων σημείων από τον χάρτη του συμπιεστή.....	58
4.6	Παρουσίαση αποτελεσμάτων με βαθμονόμηση μοντέλου χρησιμοποιώντας λίγα σημεία.....	59
5	Κυρίως μέρος Β'	60
5.1	Παρουσίαση της νέα μεθόδου.....	60
5.2	Παρουσίαση μοντέλου απωλειών	62
5.2.1	Η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων	67
5.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	69
5.4	Συμπεράσματα	78
6	Πρακτική Εφαρμογή.....	79
7	Συμπεράσματα/ Επίλογος.....	86
8	Βιβλιογραφία.....	88

Ευρετήριο Σχημάτων - Διαγραμμάτων - Πινάκων

Σχήμα 2.1	Σύστημα υπερπλήρωσης με συμπιεστή κινούμενο από εξωτερικό κινητήρα	13
Σχήμα 2.2	Διάφορες διατάξεις υπερπλήρωσης.....	14
Σχήμα 2.3	Σύστημα υπερπλήρωσης με τη μέθοδο Comprex	15
Σχήμα 2.4	Συμπιεστής δυναμικής ροής, φυγοκεντρικός (ακτινικής ροής).....	16
Σχήμα 2.5	Διάφοροι τύποι συμπιεστών θετικής εκτόπισης.....	17
Σχήμα 2.6	Στρόβιλος με αεριογόνο καυσαερίων περιλαμβάνουσα Μ.Ε.Κ. και συμπιεστή... ..	18
Σχήμα 2.7	Τυπική διάταξη στροβιλο-υπερπλήρωσης με ενδιάμεσο ψυγείο αέρα.....	20
Σχήμα 2.8	Τομή ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης.....	21
Σχήμα 2.9	Διάγραμμα T-s ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης.....	22
Σχήμα 2.10	Εξιδανικευμένο δυναμοδεικτικό διάγραμμα υπερπληρωμένου κινητήρα.....	24
Σχήμα 2.11	Καμπύλη p-V συμπιεστή	25
Σχήμα 2.12	Τμήματα ακτινικού συμπιεστή.....	26
Σχήμα 2.13	Καμπύλες ενθαλπίας- εντροπίας φυγοκεντρικού συμπιεστή	27
Σχήμα 2.14	Τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο (1) και έξοδο (2) πτερωτής συμπιεστή	28
Σχήμα 3.1	Χάρτης λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή	29
Σχήμα 3.2	Χάρτης λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή	29

Σχήμα 3.3 Ρύθμιση της παροχής του συμπιεστή με μεταβολή της γεωμετρίας	30
Σχήμα 3.4 Επίδραση της γωνίας των πτερυγίων του διαχύτη στο χάρτη του συμπιεστή.....	31
Σχήμα 3.5 Χάρτες λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή με διαχύτη, με ή χωρίς πτερύγια	31
Σχήμα 3.6 Οικογένεια ακτινικών συμπιεστών	32
Σχήμα 3.7 Διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου συσώρευσης βαθμίδων	37
Σχήμα 4.1 Κινητήρας που χρησιμοποιεί υπερπληρωτή MTU -396.....	45
Σχήμα 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπληρωτή Mitsubishi MET -MA.	46
Σχήμα 4.3 Τομές πτερυγίων και ημιτομή υπερπληρωτή τύπου MET -MA.	46
Σχήμα 4.4 Ο υπερπληρωτής A-100 L της ABB.	47
Σχήμα 4.5 Ημιτομή του υπερπληρωτή A-100 L	47
Σχήμα 4.6 Διαστάσεις και σκαρίφημα του υπερπληρωτή GT15-44 της Garrett.	48
Σχήμα 5.1 Θέσεις υπολογισμού στον συμπιεστή	61
Σχήμα 5.2 Απαιτούμενες γεωμετρικές διαστάσεις στη νέα μέθοδο	62
Σχήμα 5.3 Πτερωτή χωρίς πτερύγια.....	64

Σχήμα 1 $Kis = Kis\Phi_{avg}$ για τυπικό χάρτη συμπιεστή	43
Σχήμα 2 $\eta is = \eta is\Phi_{avg}$ για τυπικό χάρτη συμπιεστή	43
Σχήμα 3 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($m - PC$)	49
Σχήμα 4 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($m - \eta isC$).....	50
Σχήμα 5 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($m - PC$) -30000rpm.....	51
Σχήμα 6 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($m - \eta isC$) -30000rpm.....	51
Σχήμα 7 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($m - PC$) -45000rpm.....	52
Σχήμα 8 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($m - \eta isC$) -45000rpm.....	52
Σχήμα 9 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($m - PC$) -55000rpm.....	53
Σχήμα 10 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($m - \eta isC$) -55000rpm.....	53
Σχήμα 11 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή Abb ($m - PC$)	54
Σχήμα 12 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή Abb ($m - \eta isC$)	54
Σχήμα 13 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή MET 66 MA ($m - PC$).....	55
Σχήμα 14 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή MET 66 MA ($m - \eta isC$).....	55
Σχήμα 15 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή Garrett ($m - PC$).....	56
Σχήμα 16 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή Garrett ($m - \eta isC$)	56
Σχήμα 17 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή GT-Power ($m - PC$)	57
Σχήμα 18 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή GT-Power ($m - \eta isC$).....	57
Σχήμα 19 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($m - PC$) -7 σημεία.....	59
Σχήμα 20 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($m - \eta isC$) - 7 σημεία	59
Σχήμα 21 Προσέγγιση καμπύλης Ψ - Φ (fit) με βάση τη νέα μέθοδο	65
Σχήμα 22 Συσχέτιση απωλειών με αδιαστατούς παράγοντες Ψ , Φ	66
Σχήμα 23 Αναπαράσταση Χάρτη Λειτουργίας συμπιεστή MTU 396 με την υπάρχουσα μέθοδο ($m - PC$)	69
Σχήμα 24 Αναπαράσταση Χάρτη Λειτουργίας συμπιεστή MTU 396 με την νέα μέθοδο ($m - PC$)	69

Σχήμα 25 Αναπαράσταση Χάρτη Λειτουργίας συμπιεστή MTU396 με την υπάρχουσα μέθοδο (<i>m – ηisC</i>).....	70
Σχήμα 26 Αναπαράσταση Χάρτη Λειτουργίας συμπιεστή MTU396 με την νέα μέθοδο (<i>m – ηisC</i>).....	70
Σχήμα 27 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ΠC</i>) -30000rpm.....	71
Σχήμα 28 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ηisC</i>) -30000rpm.....	71
Σχήμα 29 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ΠC</i>) -35000rpm.....	72
Σχήμα 30 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ηisC</i>) -35000rpm.....	72
Σχήμα 31 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ηisC</i>) -40000rpm.....	73
Σχήμα 32 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ΠC</i>) -40000rpm.....	73
Σχήμα 33 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ηisC</i>) -45000rpm.....	74
Σχήμα 34 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ΠC</i>) -45000rpm.....	74
Σχήμα 35 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ηisC</i>) -50000rpm.....	75
Σχήμα 36 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ΠC</i>) -50000rpm.....	75
Σχήμα 37 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ηisC</i>) -55000rpm.....	76
Σχήμα 38 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ΠC</i>) -55000rpm.....	76
Σχήμα 39 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ηisC</i>) -58000rpm.....	77
Σχήμα 40 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 (<i>m – ΠC</i>) -58000rpm.....	77
Σχήμα 41 Παρέκταση για το σημείο που αντιστοιχεί σε λειτουργία χαμηλού φορτίου (φουσητήρας σε λειτουργία).....	83
Σχήμα 42 Διόρθωση σημείου χαμηλού φορτίου (λειτουργία φουσητήρα).....	83
Σχήμα 43 Σχετικό σφάλμα στην εκτίμηση της ταχύτητας περιστροφής του υπερπληρωτή ..	84
Σχήμα 44 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή - αποτέλεσμα πρακτικής εφαρμογής.....	85
Σχήμα 45 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή - αποτέλεσμα πρακτικής εφαρμογής.....	85
Πίνακας 1 Δεδομένα που ελήφθησαν από τα Shop Tests και το EDS-VI.....	80

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και η αξιολόγηση μεθόδων προσομοίωσης λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή με τη μέθοδο λειτουργικής ομοιότητας για χρήση σε εφαρμογές προσομοίωσης και διάγνωσης.

Η ανάπτυξη τέτοιων μεθόδων είναι ιδιαίτερης σημασίας, διότι σε πρακτικό επίπεδο η μελέτη και η διάγνωση προβλημάτων σε έναν κινητήρα που βρίσκεται εν ' λειτουργία είναι εξαιρετικά δύσκολη τεχνο-οικονομικά. Ο χρήστης του κινητήρα δεν έχει την δυνατότητα να διαγνώσει βλάβες σταματώντας την λειτουργία του. Προτιμώνται λοιπόν μέθοδοι διάγνωσης που δεν επιβάλλουν την παύση λειτουργίας της μηχανής. Αυτές βασίζονται σε υπολογιστικά προγράμματα που προσομοιώνουν την λειτουργία του κινητήρα. Στο πλαίσιο λοιπόν αυτό, στην εργασία, έγινε προσπάθεια για μια αρχική αξιολόγηση της μεθόδου της αναπαράστασης χαρτών συμπιεστή με βάση παραμέτρους λειτουργικής ομοιότητας που χρησιμοποιείται ευρύτατα σε βιομηχανικές και ερευνητικές εφαρμογές προσομοίωσης και διάγνωσης.

Με γνώμονα τα αποτελέσματα της αξιολόγησης αυτής, αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται λεπτομερώς μια νέα μεθοδολογία, μεγαλύτερης ακρίβειας και με ενισχυμένη φυσική βάση σε σχέση με την υπάρχουσα μέθοδο με σκοπό την ακριβέστερη και καθολικότερη προσομοίωση της λειτουργίας του συμπιεστή σε υπερπληρωμένους κινητήρες.

Τέλος στην εργασία παρουσιάζεται μια πρακτική εφαρμογή προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Μ.Ε.Κ η οποία συνδυάζει στοιχεία από την νέα όσο και την υπάρχουσα μέθοδο δίνοντας εξαιρετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση-Δομή της διπλωματικής εργασίας

Αρχικά κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια γενική αναφορά στις μηχανές εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ) καθώς και στους κινητήρες Diesel που αποτελούν και το κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής. Τα στοιχεία αυτά παρέχονται κυρίως από τους Κ.Δ Ρακόπουλο [7] και J.B.Heywood[2]. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται και στη σημασία των υπολογιστικών μοντέλων στη μελέτη και την εξέλιξη των μηχανών.

Στη συνέχεια γίνεται μια προσπάθεια συνοπτικής παρουσίασης της υπερπλήρωσης μηχανών εσωτερικής καύσης με έμφαση, στο σκοπό, τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματά της. Περιγράφεται με λεπτομέρεια η λειτουργία του συμπιεστή καθώς και η μορφή των χαρακτηριστικών του, στους χάρτες λειτουργίας της μηχανής,(Κ.Δ Ρακόπουλος, Ε.Γ Γιακουμής)[8].

Η εισαγωγή κλείνει με την παρουσίαση των κύριων μεθόδων αναπαράστασης των χαρτών λειτουργίας συμπιεστή, (Κ. Μαθιουδάκης)[5].

Στο κυρίως μέρος της διπλωματικής γίνεται αρχικά ανάλυση της υπολογιστικής μεθόδου που χρησιμοποιείται στη παρούσα φάση για την προσομοίωση συμπιεστών υπερπληρωτών

σε κινητήρες Ντήζελ (Β.Πλυττάς)[10] και μετέπειτα γίνεται αξιολόγησή της με βάση εφαρμογές σε διαφορετικούς χάρτες.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση μιας νέας, βελτιωμένης μεθόδου προσομοίωσης που στηρίζεται στις ίδιες θεωρητικές βάσεις με την προαναφερθείσα αλλά επιδιώκει να εξαλείψει τα μειονεκτήματά της, παρέχοντας παράλληλα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την ακρίβεια της αναπαράστασης.

Στη συνέχεια αξιολογείται η νέα μέθοδος, με ενσωμάτωση της σε εφαρμογή προσομοίωσης -διάγνωσης που αναπτύχθηκε.

1.3 Εισαγωγή στις εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ.

Οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσης καταλαμβάνουν ένα πολύ σημαντικό ποσοστό στην παγκόσμια αγορά θερμικών μηχανών. Χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στις επίγειες μεταφορές, στην ναυσιπλοΐα, ενώ παρατηρείται η χρήση τους ακόμα και σε αεροσκάφη, καθώς και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όταν η εγκατάσταση μεγάλων ατμοηλεκτρικών μονάδων αντενδείκνυται για λόγους οικονομίας (όπως συμβαίνει σε απομονωμένα από το ηλεκτρικό δίκτυο νησιά). Οι λόγοι που έχουν οδηγήσει σε αυτήν την ευρεία εφαρμογή είναι ποικίλοι, όπως για παράδειγμα ο καλός βαθμός απόδοσης, η ικανοποιητική λειτουργία στα μερικά φορτία, και στην περίπτωση της ναυσιπλοΐας και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η δυνατότητα χρήσης καυσίμου χαμηλής ποιότητας και κόστους (λόγω του διαθέσιμου χρόνου για την καύση του καυσίμου diesel, που υπάρχει στις αργόστροφες μηχανές). Είναι προφανές ότι οποιαδήποτε βελτίωση στην τεχνολογία και την κατασκευή των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης, λόγω της εκτεταμένης χρήσης τους, οδηγεί σε τεράστια πλεονεκτήματα σε παγκόσμια κλίμακα, είτε αυτά έχουν να κάνουν με την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων, είτε με την εκπομπή αισθητά λιγότερων ρύπων.

1.3.1 Κατηγοριοποίηση εμβολοφόρων Μηχανών Εσωτερικής Καύσης

Η εκτεταμένη χρήση και παραγωγή τους από ποικίλες βιομηχανικές μονάδες διαφορετικής 'κατασκευαστικής νοοτροπίας' έχει οδηγήσει στην δημιουργία πολλών παραλλαγών των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. Ως εκ τούτου οι εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ. μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τα εξής:

α) Εφαρμογή: Αυτή μπορεί να είναι σε αυτοκίνητα, φορτηγά, τρέινα, αεροσκάφη, πλοία και μονάδες παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

β) Γεωμετρία: Εδώ παρατηρούνται οι παλινδρομικές εμβολοφόρες μηχανές (που με την σειρά τους μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με την διάταξη των κυλίνδρων τους, π.χ. κινητήρες εν σειρά, V κινητήρες, boxer κινητήρες, W κινητήρες, αστεροειδείς), καθώς και περιστροφικές μηχανές, όπως είναι ο κινητήρας Wankel

γ) Κύκλος λειτουργίας: Ο κύκλος λειτουργίας των Μ.Ε.Κ. μπορεί να είναι 4-Χ φυσικής αναπνοής ή υπερπληρωμένος ή 2-Χ (με κάποια αναγκαία υπερπλήρωση για την απόπλυση των καυσαερίων από τον κύλινδρο)

δ) Καύσιμο-Καύση-Ρύθμιση Ισχύος: Το χρησιμοποιούμενο καύσιμο είναι βενζίνη για τους κινητήρες Otto, ντήζελ για τους κινητήρες Diesel, βαρύ πετρέλαιο για τους ναυτικούς κινητήρες Diesel. Η προετοιμασία του μείγματος αέρα-καυσίμου μπορεί να γίνει με χρήση απλού εξαεριωτή (κάτι τέτοιο συνέβαινε στους παλαιότερους κινητήρες Otto), με έγχυση του καυσίμου στο ρεύμα αέρα μέσα στον αγωγό εισαγωγής (Otto), ή με έγχυση του καυσίμου απευθείας στον θάλαμο καύσης (κυρίως θάλαμος καύσης ή προθάλαμος). Στην απευθείας έγχυση καυσίμου στον κύλινδρο συναντούμε τον GDI Otto κινητήρα, ενώ στους Diesel έχουμε είτε άμεση έγχυση στον κυρίως θάλαμο (DI), ή έμμεση έγχυση, όταν χρησιμοποιείται προθάλαμος (IDI). Η έναυση του αναφλέξιμου μείγματος μπορεί να γίνει με εξωτερική βοήθεια από ηλεκτρικό σπινθηριστή (Otto) ή να σημειωθεί αυτανάφλεξη του καυσίμου λόγω των συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης που επικρατούν στον κύλινδρο (Diesel). Η ρύθμιση ισχύος στους κινητήρες Otto (ποσοτική ρύθμιση ισχύος) γίνεται με στραγγαλισμό της ροής μείγματος εισόδου (με αμετάβλητο τον λόγο αέρα-καυσίμου), ενώ στους Diesel (ποιοτική ρύθμιση ισχύος) με έλεγχο της παροχής καυσίμου στον κύλινδρο.

1.3.2 Πλεονεκτήματα κινητήρων Diesel έναντι κινητήρων Otto

Από τα παραπάνω είναι εμφανής η παρουσία πολλών διαφορετικών τύπων σχεδίασης ενός κινητήρα, καθώς και τα κύρια σημεία στα οποία διαφοροποιείται η λειτουργία των κινητήρων Diesel (αυτανάφλεξη) από την αντίστοιχη των κινητήρων Otto (ανάφλεξη με σπινθηριστή). Δεν φαίνονται όμως και οι λόγοι που καθιστούν τον κινητήρα Diesel πιο ελκυστικό σε σχέση με τον αντίστοιχο Otto και που έχουν οδηγήσει στην σχεδόν ολοκληρωτική επικράτηση τους (με εξαίρεση την περίπτωση των βενζινοκινητήρων στα αυτοκίνητα). Αυτοί είναι:

α) Ο μεγαλύτερος λόγος συμπίεσης που επιτυγχάνεται στον κινητήρα Diesel (που είναι εξάλλου απαραίτητος για την αυτανάφλεξη του μείγματος αέρα-καυσίμου) και ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί λόγω της απουσίας του φόβου κρουστικής καύσης (σε αντίθεση με τον κινητήρα Otto), οδηγεί σε καλύτερο βαθμό απόδοσης. Από τον ιδανικό πρότυπο κύκλο Diesel, έχουμε ότι:

$$\eta_D = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\gamma-1}} \left[\frac{\alpha^{\gamma-1}}{\gamma(\alpha-1)} \right] \quad (1.1)$$

, όπου ϵ ο λόγος συμπίεσης και α ο λόγος θερμοκρασιών T_3/T_2 και άρα όσο πιο μεγάλος είναι ο βαθμός συμπίεσης, τόσο καλύτερη είναι η απόδοση του κινητήρα και χαμηλότερη η ειδική κατανάλωση καυσίμου.

β) Διάρκεια ζωής-Αξιοπιστία: Η στιβαρότερη κατασκευή των κινητήρων Diesel, και μεν συνεπάγεται υψηλότερο κόστος κτήσης, αλλά συνάμα προσφέρει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, η οποία στην περίπτωση της αυτοκίνησης είναι σχεδόν διπλάσια. Ακόμα και το ίδιο το χρησιμοποιούμενο καύσιμο συνεισφέρει στην διάρκεια ζωής του κινητήρα, αφού το καύσιμο ντήζελ έχει καλύτερες λιπαντικές ιδιότητες, σε σχέση με την βενζίνη. Βέβαια, αυτό αφορά μόνο τα δομικά μέρη όπου η ιδιότητα αυτή παίζει ρόλο, όπως είναι για παράδειγμα ο εγχυτήρας.

γ) Ρύπανση: Ο κινητήρας Diesel παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τον αντίστοιχο Otto, στην εκπομπή ρύπων. Οι εκπομπές CO, στους κινητήρες Diesel είναι αισθητά χαμηλότερες από τις εκπομπές στον Otto, και αυτό οφείλεται στην μεγάλη περίσσεια αέρα (ακόμα και στα μεγάλα φορτία) στην οποία εργάζονται.

Αντίθετα, οι κινητήρες Otto, λόγω και της παρουσίας του τριοδικού καταλύτη στις περισσότερες περιπτώσεις, οφείλουν να λειτουργούν σε περιοχές πλησίον της στοιχειομετρικής αναλογίας. Η σημαντικότητα του CO, είναι ότι είναι εξαιρετικά τοξικός ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις και γι'αυτό σε περιπτώσεις ελλιπούς εξαερισμού, η χρήση κινητήρων Diesel είναι επιτακτική (χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα ορυχεία), αξίζει όμως να σημειωθεί ότι οι κινητήρες Otto παρουσιάζουν σωματιδιακές εκπομπές μόνο σε αντίξοες συνθήκες, υπερβολικά πλούσια μείγματα ή κακή ρύθμιση, κάτι που όμως δεν συμβαίνει στους κινητήρες Diesel, καθώς οι εκπομπές αιθάλης σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Η παρουσία αιθάλης μάλιστα, οριοθετεί και την λειτουργία τους, αφού η λειτουργία σε πολύ μεγάλα φορτία για μεγάλο χρονικό διάστημα, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα λειτουργίας, όπως είναι η απόφραξη των οπών του εγχυτήρα.

δ) Ο βαθμός απόδοσης των κινητήρων Diesel εξαρτάται ελαφρά από το φορτίο στο οποίο λειτουργεί, σε αντίθεση με τους κινητήρες Otto, οι οποίοι είναι πιο ευαίσθητοι στις μεταβολές του φορτίου.

1.3.3 Τα Υπολογιστικά μοντέλα στην εξέλιξη των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ

Από τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι ο κινητήρας Diesel, είναι λογικό να προτιμάται σε σχέση με τον κινητήρα Otto, για τις διάφορες εφαρμογές. Ως εκ τούτου, η έρευνα παγκοσμίως επικεντρώνεται ιδιαίτερα στην βελτίωση και εξέλιξη των κινητήρων Diesel. Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη αυτή, διαδραματίζουν τα υπολογιστικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί, και τα οποία προσομοιάζουν την λειτουργία των κινητήρων Diesel (συμπίεση, καύση, εκτόνωση, εναλλαγή αερίων) με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Το μειωμένο κόστος, τόσο σε χρόνο όσο και σε χρήμα, που απαιτείται για την εκτέλεση ενός 'πειράματος' σε ένα υπολογιστικό μοντέλο και την εξαγωγή των επακόλουθων συμπερασμάτων (σε αντιπαράθεση με την εκτέλεση πειράματος και συλλογή μετρήσεων στο εργαστήριο), το καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικό για τον ερευνητή. Ακόμα και στην περίπτωση όπου ο εργαστηριακός έλεγχος και το πείραμα κρίνονται απαραίτητα, ο Η/Υ μπορεί να δώσει μια πρώτη εκτίμηση για τις μεταβολές των παραμέτρων που πρέπει να γίνουν στα δεδομένα του πειράματος, προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές τιμές των αποτελεσμάτων. Σφάλματα στην περίπτωση του Η/Υ προκύπτουν μόνο όταν ο ερευνητής δεν δώσει σωστά δεδομένα εισόδου ή δεν έχει βαθμονομήσει σωστά τον χρησιμοποιούμενο κώδικα, αλλά και πάλι το κόστος της επανάληψης της διαδικασίας είναι αμελητέο. Το πιο σημαντικό όμως πλεονέκτημα που προσφέρει η χρήση ενός προσομοιωτικού μοντέλου, είναι η δυνατότητα της μεμονωμένης μελέτης μιας και μόνο μεταβλητής, χωρίς ενδεχόμενη μεταβολή άλλης παραμέτρου. Αντίθετα κατά τον εργαστηριακό έλεγχο, η μεταβολή μιας παραμέτρου μπορεί να επηρεάσει και άλλες με αποτέλεσμα να μην μπορεί να καθορισθεί η ακριβής επίδραση της στις παραμέτρους λειτουργίας και την εκπομπή ρύπων του κινητήρα. Εξάλλου, με την χρήση υπολογιστικών μοντέλων, μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τους μηχανισμούς με τους οποίους μια παράμετρος επηρεάζει την λειτουργία του κινητήρα.

Η χρησιμότητα και η ευκολία χρήσης που παρέχουν τα υπολογιστικά μοντέλα στην εξέλιξη των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. έχουν οδηγήσει στην δημιουργία-'συγγραφή' πολλών τέτοιων κωδικών. Οι κωδικές αυτοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την προσέγγιση του ερευνητή στα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την λειτουργία του κινητήρα. Αν η προσέγγιση δίνει βάση στα θερμοδυναμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα, τότε

αναφερόμαστε σε φαινομενολογικά μοντέλα. Αν απ'την άλλη, η έμφαση δίνεται στην επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, τότε αναφερόμαστε σε ρευστομηχανικά μοντέλα.

2 Υπερπλήρωση

Στο διάστημα των τελευταίων 70 χρόνων παρατηρήθηκε ένας τετραπλασιασμός της ισχύος των κινητήρων Diesel, χωρίς ουσιαστική μεταβολή του όγκου εμβολισμού τους. Συνεπώς, έχουμε και τετραπλασιασμό της χωρικής ισχύος τους ή τελικά της μέσης πραγματικής πίεσης αυτών, b_{mp} (με δεδομένο ότι η αντίστοιχη ταχύτητα περιστροφής N αυξήθηκε, το ίδιο χρονικό διάστημα, σε αρκετά μικρότερο βαθμό. Εκτός από τη βελτίωση των διαφόρων διεργασιών που συντελούν στην πιο αποδοτική καύση εντός των κινητήρων, π.χ. αύξηση της πίεσης του εγχυόμενου καυσίμου σε κινητήρες Diesel (οι οποίες δεν μπορούν να οδηγήσουν σε τόσο θεαματικές μεταβολές της ισχύος ή της ροπής), η βασικότερη αιτία για τον τετραπλασιασμό αυτό της ισχύος είναι η υπερπλήρωση (supercharging) σε συνδυασμό με την ενδιάμεση ψύξη του αέρα υπερπλήρωσης.

Σκοπός της υπερπλήρωσης είναι η αύξηση της γόμωσης (της πλήρωσης) του κυλίνδρου και άρα της ισχύος του κινητήρα σε επίπεδα μεγαλύτερα από αυτά του αντιστοίχων διαστάσεων 4-X κινητήρα φυσικής αναπνοής.

Με δεδομένο ότι στον υπερπληρωμένο κινητήρα, τόσο η πίεση εισαγωγής όσο και αυτή της εξαγωγής είναι επάνω από το επίπεδο της ατμοσφαιρικής πίεσης, και άρα μπορεί να καεί περισσότερο καύσιμο, το επίπεδο των πιέσεων κατά τη διάρκεια όλου του κύκλου λειτουργίας και, κυρίως, της καύσης είναι σημαντικά υψηλότερο. Μπορούμε να πούμε ότι:

Ως υπερπλήρωση ορίζεται η προ-συμπίεση μέρους ή όλης της γόμωσης εξωτερικά του κυλίνδρου (συνήθως σε κάποιον συμπιεστή). Συνεπώς, η γόμωση συμπιέζεται τελικά και εκτός και εντός του κυλίνδρου.

Η ισχύς ενός κινητήρα είναι, γενικά, ανάλογη με την ποσότητα του καυσίμου που μπορεί να καεί σε αυτόν, άρα και με την παροχή του αναρροφώμενου αέρα. Σε κάθε περίπτωση, σκοπός της υπερπλήρωσης είναι η αύξηση της ισχύος ενός δεδομένου κινητήρα, χωρίς αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του. Και οι 2 αυτοί παράγοντες (η υπερπλήρωση και η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής) αυξάνουν την παροχή του αναρροφώμενου από τον κινητήρα αέρα, και συνεπώς την ποσότητα καυσίμου που μπορεί να καεί, συνεπώς και την ισχύ του.

Και στις δύο περιπτώσεις, όμως, υπάρχουν τεχνολογικά όρια όσον αφορά την περαιτέρω αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος, η οποία δίνεται από την σχέση

$$P_e = zV_h \frac{n}{30K} = zA_e s \bar{p}_e \frac{n}{30K} = zA_e \bar{p}_e \frac{\bar{c}_e}{K} \quad (2.1)$$

όπου $K=4$ για 4-X κινητήρα και $K=2$ για 2-X, z ο αριθμός των κυλίνδρων και A_e η επιφάνεια του εμβόλου.

Για δεδομένο κινητήρα, η εξαγόμενη ισχύς μπορεί να αυξηθεί είτε με αύξηση της ταχύτητας περιστροφής (ή ισοδύναμα της μέσης ταχύτητας του εμβόλου), είτε με αύξηση της μέσης πραγματικής πίεσης. Θα ήταν χρήσιμο να συγκρίνουμε τις πιθανές παρενέργειες των δύο αυτών μεθόδων αύξησης της ισχύος.

Με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής αυξάνονται οι δυναμικές φορτίσεις του κινητήρα, και μάλιστα με πιο γρήγορο ρυθμό, δηλαδή ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής, καθώς επίσης και οι μηχανικές απώλειες.

Αντιθέτως, με αύξηση της υπερπλήρωσης, (μέσης πραγματικής πίεσης), αυξάνουν σχεδόν γραμμικά οι δυνάμεις εξ' αερίων και σε αρκετά μικρότερο βαθμό οι μηχανικές απώλειες συνήθως, αυξημένες δυνάμεις εξ' αερίων μπορούν να αντιμετωπιστούν ευκολότερα από ότι αυξημένες δυναμικές φορτίσεις.

Από την άλλη πλευρά, το θερμικό φορτίο, σε σχέση με την παραγόμενη ισχύ, αυξάνει περίπου ισοδύναμα, είτε με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής είτε με την υπερπλήρωση.

Στην περίπτωση αύξησης της ταχύτητας περιστροφής N , άρα και της μέσης ταχύτητας του εμβόλου, απαιτούνται κινούμενα μέρη μικρού βάρους για λόγους αδράνειας, γεγονός που μπορεί να επιτευχθεί με ακριβή σχεδιασμό και με χρήση υλικών υψηλής αντοχής. Στην περίπτωση της υπερπλήρωσης, απαιτείται στιβαρή κατασκευή για να μπορεί ο κινητήρας να αντέξει τις καταπονήσεις λόγω αυξημένων δυνάμεων εξ' αερίων. Και πάλι όμως η υπερπλήρωση, κατά κανόνα, οδηγεί σε χαμηλότερο ειδικό βάρος ανά μονάδα εξαγόμενης ισχύος του κινητήρα (δηλαδή η εξαγόμενη ισχύς αυξάνει ταχύτερα απ' ότι το βάρος του κινητήρα).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η υπερπλήρωση αποτελεί μια πιο αποτελεσματική μέθοδο αύξησης της ισχύος από την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, γι' αυτό και έχει τύχει σχεδόν καθολικής εφαρμογής όσον αφορά στους κινητήρες Diesel.

Επιπλέον, λόγοι εμπορικοί έχουν επιταχύνει τη χρήση της, αφού ένας υπερπληρωμένος κινητήρας μπορεί να εγκατασταθεί ευκολότερα σε μια ήδη υπάρχουσα σειρά, π.χ. αυτοκινήτων, χωρίς να χρειάζεται να εξελιχθούν νέα, μεγαλύτερων διαστάσεων, μοντέλα.

2.1 Επισκόπηση των μεθόδων υπερπλήρωσης

Ο αέρας (κινητήρες Diesel ή Otto άμεσης έγχυσης) ή το μίγμα αέρα-καυσίμου (κινητήρες Otto) προ-συμπιέζεται στο συμπιεστή υπερπλήρωσης του κυλίνδρου. Τα συστήματα υπερπλήρωσης μπορούν συνεπώς να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με:

- 1) Τον τρόπο κίνησης του συμπιεστή υπερπλήρωσης,
- 2) Το σχεδιασμό του συμπιεστή,
- 3) Τη σύνδεση της μονάδας υπερπλήρωσης με τον κινητήρα ή του τρόπου μεταφοράς της ισχύος, αλλά και
- 4) Το είδος του κινητήρα.

2.2 Τρόπος κίνησης του συμπιεστή υπερπλήρωσης.

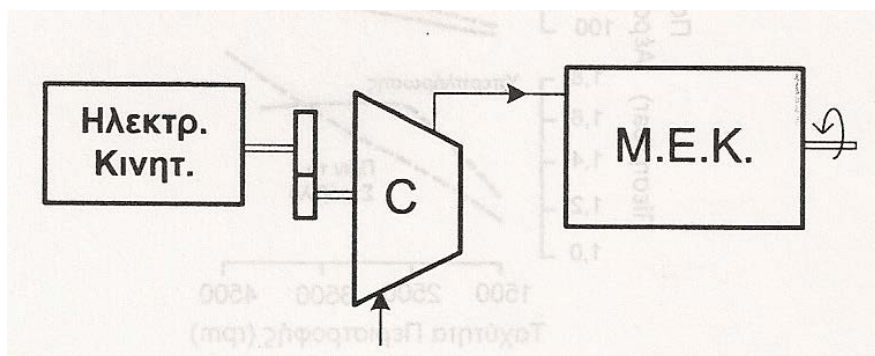
1) Εξωτερικά κινούμενος (από βοηθητικό κινητήρα ή ηλεκτροκινητήρα) → εξωτερική υπερπλήρωση. Χρησιμοποιείται κυρίως σε συστήματα υπερπλήρωσης αεροπορικών κινητήρων, ορισμένων κινητήρων Diesel, καθώς και για τη σάρωση 2-Χ κινητήρων φυσικής αναπνοής. (Σχήμα 2.1)

2) Κινούμενος από τη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα (απορρόφηση μηχανικού έργου) → μηχανική υπερπλήρωση. Χρησιμοποιείται σε κινητήρες Otto αυτοκινήτων με ή χωρίς ενδιάμεσο ψυγείο αέρα, με σταθερή (συνήθως) ή μεταβλητή σχέση μετάδοσης κίνησης. (Σχήμα 2.2.α)

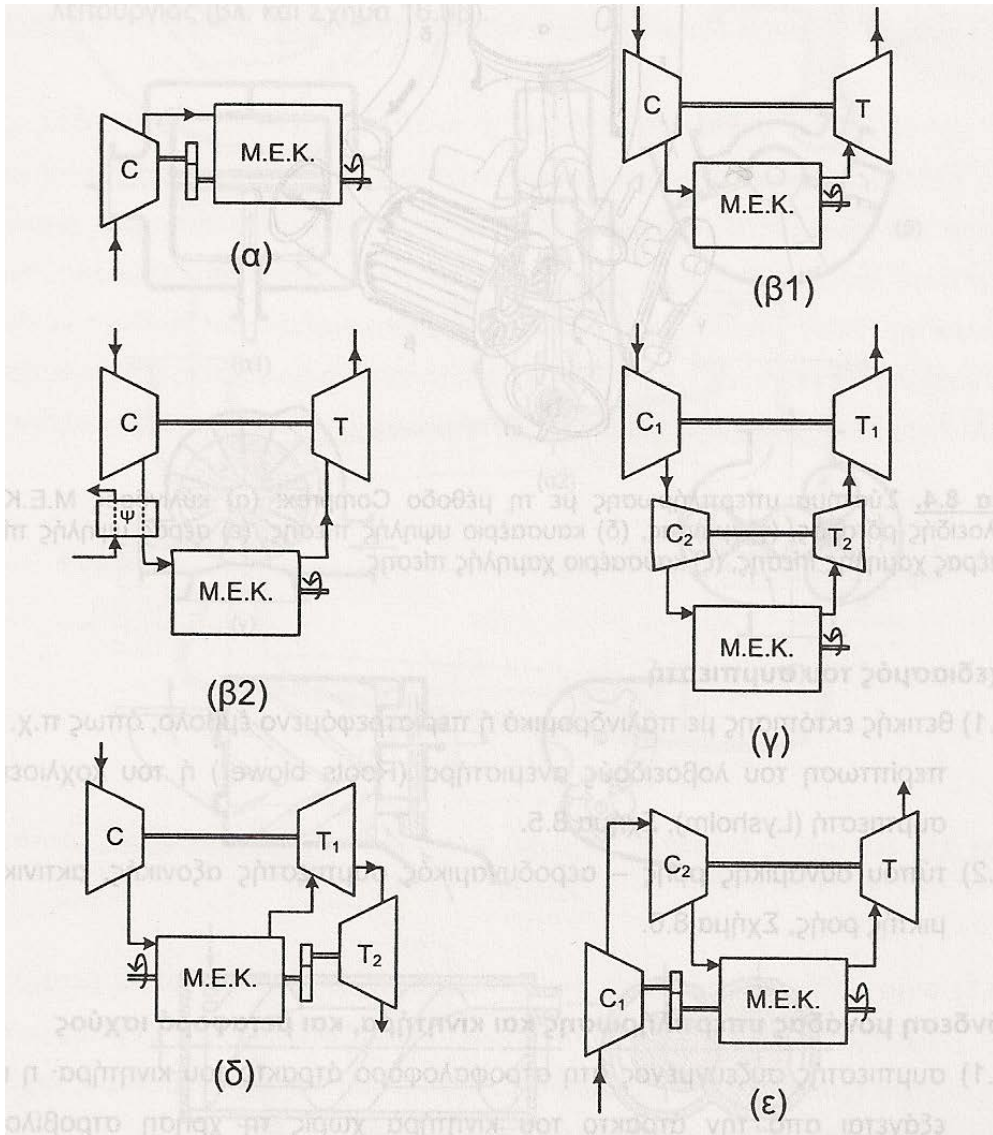
3) Κινούμενος από στρόβιλο καυσαερίου → στρόβιλο-υπερπλήρωση μονοβάθμια χωρίς ή με ενδιάμεσο ψυγείο αέρα ή διβάθμια. Είναι ο πλέον διαδεδομένος τύπος υπερπλήρωσης με σχεδόν καθολική χρήση σε κινητήρες οχημάτων, βιομηχανικούς και ναυτικούς.

(Σχήματα 2.2.β1, 2.2.β2 και 2.2.γ)

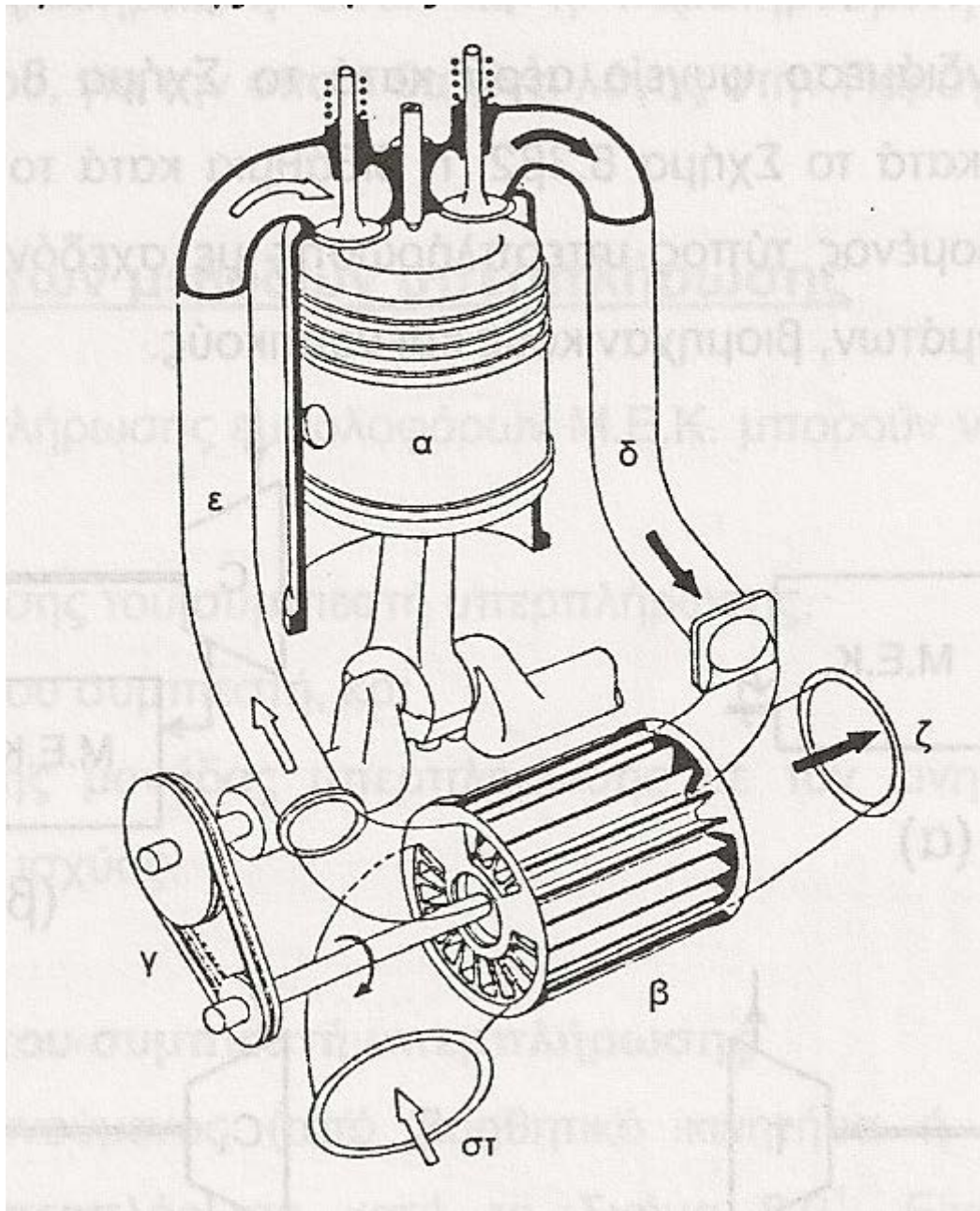
4) Χωρίς τη χρήση συμπιεστή, αλλά με συμπίεση μέσω κύματος πίεσης που προέρχεται από την αποτόνωση του καυσαερίου σε δρομέα με πτερύγια, π.χ. σύστημα Comprex της εταιρίας Brown Boveri & Co. Ltd. (Σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.1 Σύστημα υπερπλήρωσης με συμπιεστή κινούμενο από εξωτερικό (ηλεκτρο)κινητήρα



Σχήμα 2.2 Διάφορες διατάξεις υπερπλήρωσης: (α) μηχανική υπερπλήρωση, (β1) σρόβιλο-υπερπλήρωση, (β2) στροβιλο-υπερπλήρωση με ενδιάμεσο ψυγείο αέρα, (γ) διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση, (δ) σύνθετη στροβιλο-υπερπλήρωση (turbo-compound) με σρόβιλο ισχύος, (ε) συνδυασμένη υπερπλήρωση, με δύο συμπιεστές σε σειρά, ο ένας θετικής εκτόπισης συζευγμένος στη στροφαλοφόρο άτρακτο και ο άλλος σε ζεύγος σρόβιλο-υπερπλήρωσης

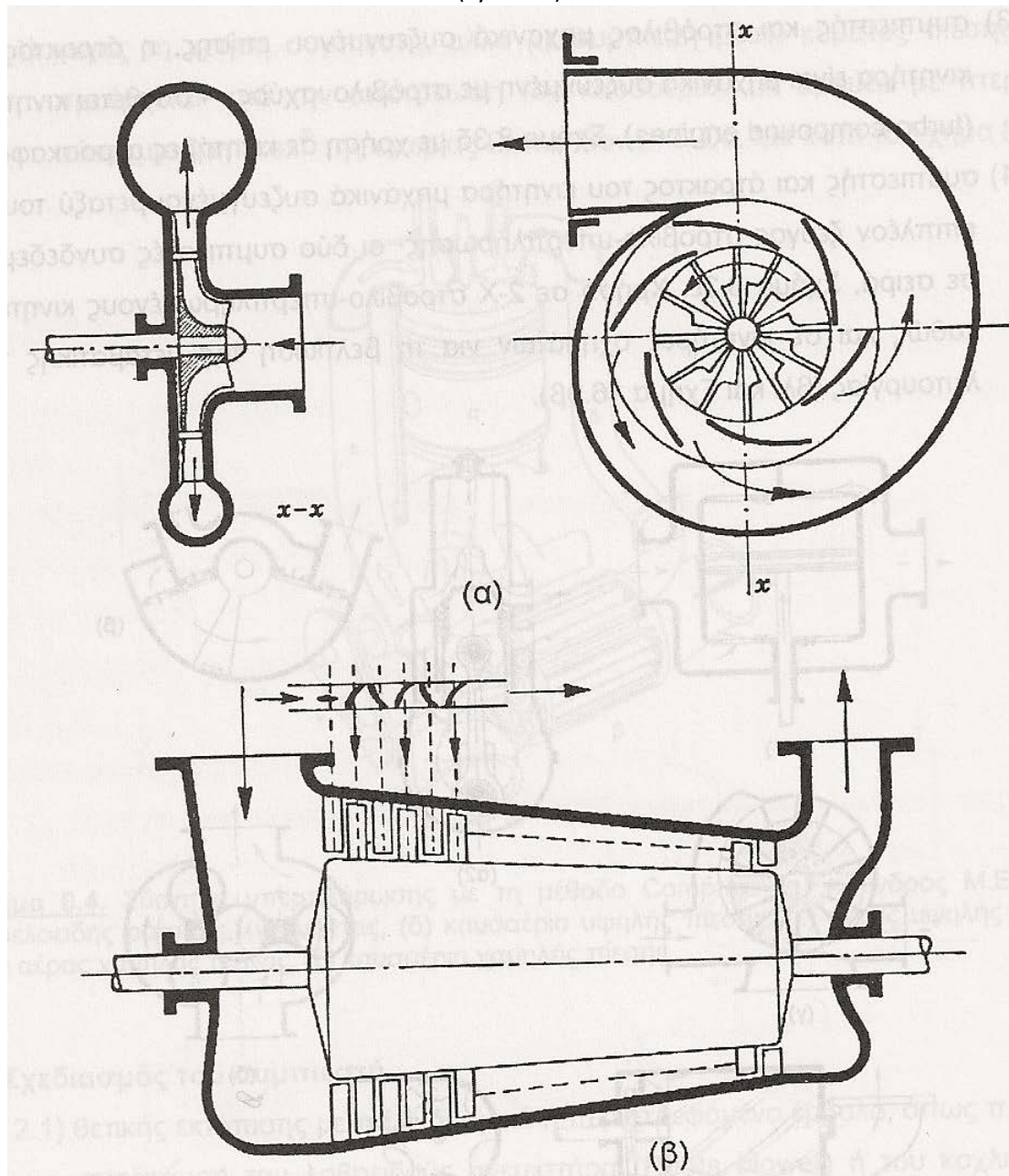


Σχήμα 2.3 Σύστημα υπερπλήρωσης με τη μέθοδο Compress: (α) κύλινδρος Μ.Ε.Κ., (β) κυψελοειδής ρότορας, (γ) μάντας, (δ) καυσάεριο υψηλής πίεσης, (ε) αέρας υψηλής πίεσης, (στ) αέρας χαμηλής πίεσης, (ζ) καυσάεριο χαμηλής πίεσης

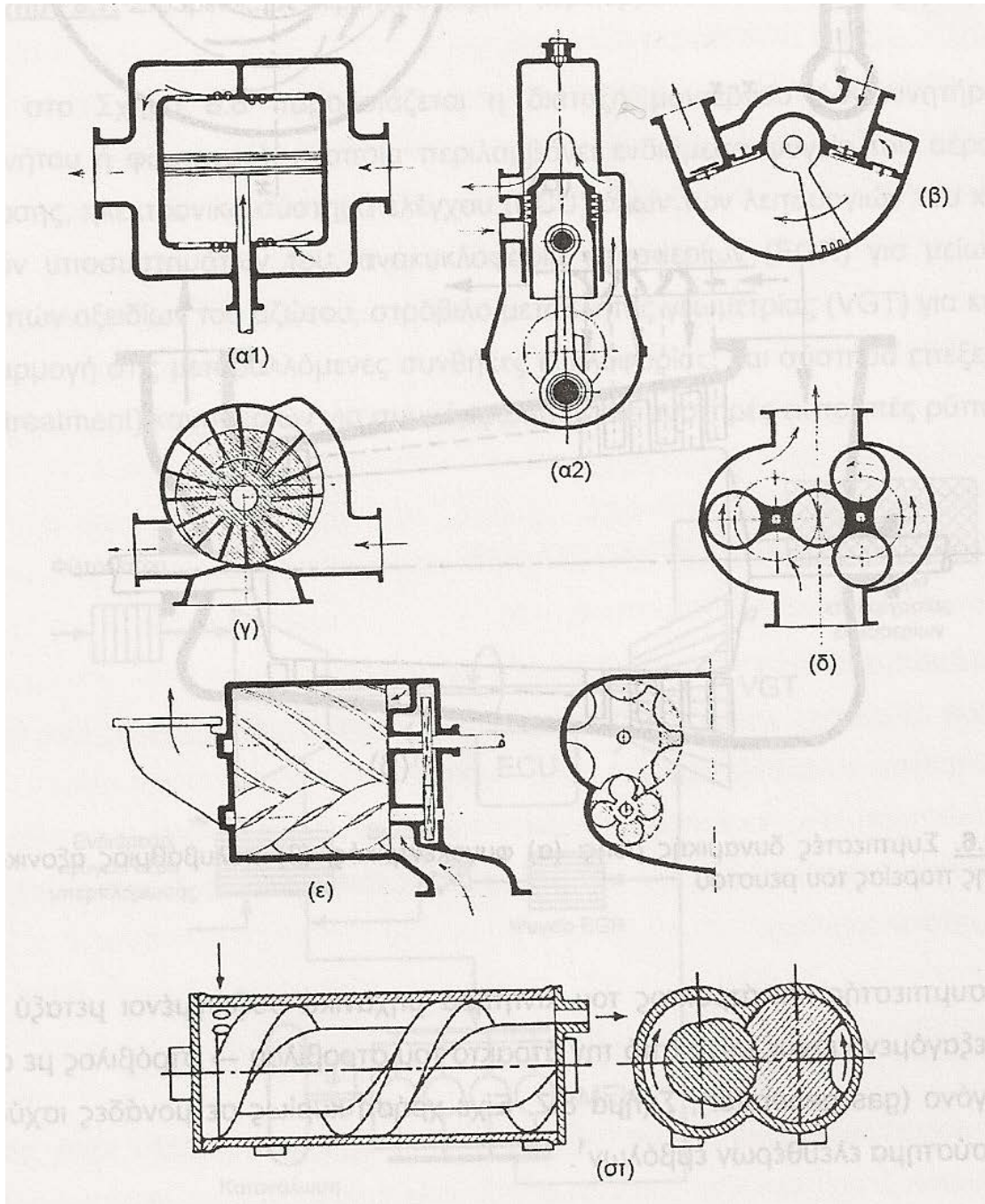
2.3 Σχεδιασμός του συμπιεστή

2.1) Τύπου δυναμικής ροής – αεροδυναμικός συμπιεστής αξονικής, ακτινικής ή μεικτής ροής (Σχήμα 2.5).

2.2) Θετικής εκτόπισης (Σχήμα 2.4) με παλινδρομικό ή περιστρεφόμενο έμβολο, όπως π.χ. στην περίπτωση του λοβοειδούς ανεμιστήρα (Roots blower) ή του κοχλιοειδούς συμπιεστή (Lysholm).



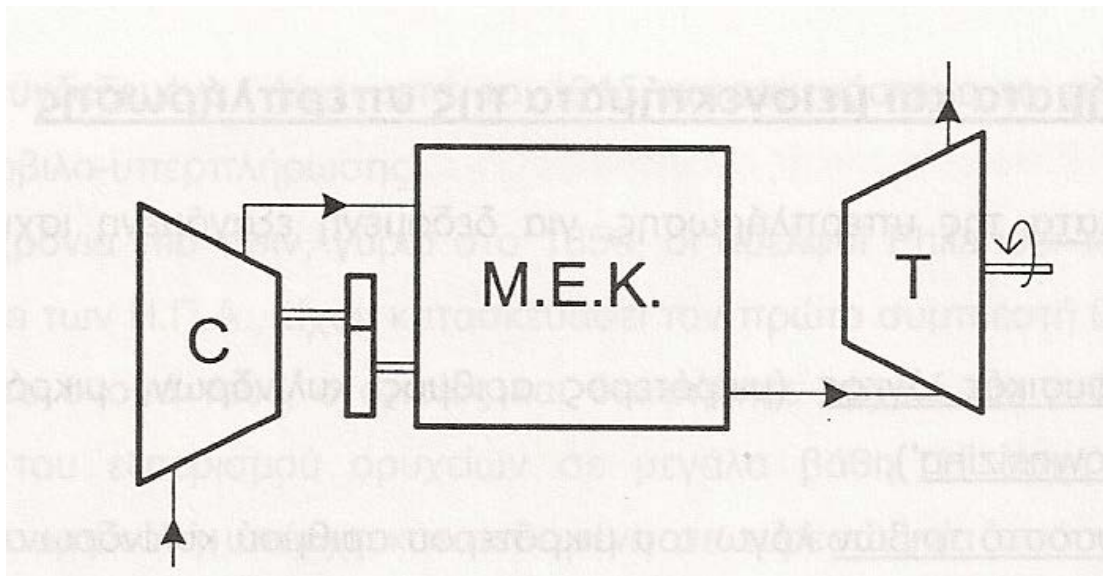
Σχήμα 2.4 Συμπιεστής δυναμικής ροής, φυγοκεντρικός (ακτινικής ροής), με ένδειξη της πορείας του ρευστού



Σχήμα 2.5 Διάφοροι τύποι συμπιεστών θετικής εκτόπισης. Παλινδρομικοί: (α1) τυπικός εμβολοφόρος, (α2) τύπου στροφαλοθαλάμου, (β) τύπου ταλαντούμενων πτερυγίων. Περιστρεφόμενοι: (γ) με ολισθαίνοντα πτερύγια (sliding vane), (δ) λοβοειδούς τύπου Roots, (ε) κοχλιοειδούς τύπου Lysholm, ή (στ) κοχλιωτού τύπου (screw)

2.4 Σύνδεση υπερπληρωτή και κινητήρα, μεταφορά ισχύος

- 1) Συμπιεστής συζευγμένος στη στροφαλοφόρο άτρακτο του κινητήρα η ισχύς εξάγεται από την άτρακτο του κινητήρα χωρίς τη χρήση στροβίλου → μηχανική υπερπλήρωση.
- 2) Συμπιεστής συζευγμένος με τον ελεύθερα περιστρεφόμενο στρόβιλο αποτόνωσης καυσαερίου η εξαγόμενη ισχύς παράγεται μόνο από την άτρακτο του κινητήρα → στρόβιλο-υπερπλήρωση.
- 3) Συμπιεστής και στρόβιλος μηχανικά συζευγμένοι επίσης, η άτρακτος του κινητήρα είναι συζευγμένη στο στρόβιλο ισχύος → σύνθετοι κινητήρες (turbo-compound engines). Χρήση σε κινητήρες αεροσκαφών.
- 4) Συμπιεστής και άτρακτος του κινητήρα μηχανικά συζευγμένοι μεταξύ τους με επιπλέον ζεύγος στρόβιλο-υπερπλήρωσης οι δύο συμπιεστές συνδεδεμένοι σε σειρά. Χρήση σε 2-X στρόβιλο-υπερπληρωμένους κινητήρες καθώς και σε κινητήρες οχημάτων για τη βελτίωση της μεταβατικής τους λειτουργίας.
- 5) Συμπιεστής και άτρακτος του κινητήρα μηχανικά συζευγμένοι μεταξύ τους εξαγόμενη ισχύς μόνο από την άτρακτο του στροβίλου → στρόβιλος με αεριογόνο (gas generator). Είχε χρήση, κυρίως, σε μονάδες ισχύος με σύστημα ελευθέρων εμβόλων.



Σχήμα 2.6 Στρόβιλος με αεριογόνο καυσαερίων περιλαμβάνουσα Μ.Ε.Κ. και συμπιεστή

2.5 Είδος του κινητήρα

4-X ή 2-X κινητήρας.

Κινητήρας Otto ή Diesel.

2.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης

Τα πλεονεκτήματα της υπερπλήρωσης για δεδομένη εξαγόμενη ισχύ από έναν κινητήρα είναι:

- Μικρότερος φυσικός όγκος (μικρότερος αριθμός κυλίνδρων, μικρότερο μήκος κινητήρα – ‘downsizing’),
- Μικρότερο ποσοστό τριβών λόγω του μικρότερου αριθμού κυλίνδρων άρα και του μικρότερου αριθμού εδράνων,
- Μικρότερο βάρος,
- Χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος, ειδικά για μεγαλύτερων διαστάσεων κινητήρες,
- Μειωμένος θόρυβος στην εξαγωγή λόγω του στροβίλου των καυσαερίων,
- Μικρότερη επίδραση της μείωσης της πυκνότητας του αέρα περιβάλλοντος,
- Χαμηλότερες εκπομπές καυσαερίων σε μόνιμη κατάσταση (υπό συγκεκριμένες συνθήκες), και
- Ειδικά για κινητήρες Diesel, μείωση της καθυστέρησης ανάφλεξης λόγω των αυξημένων θερμοκρασιών εντός του κυλίνδρου.

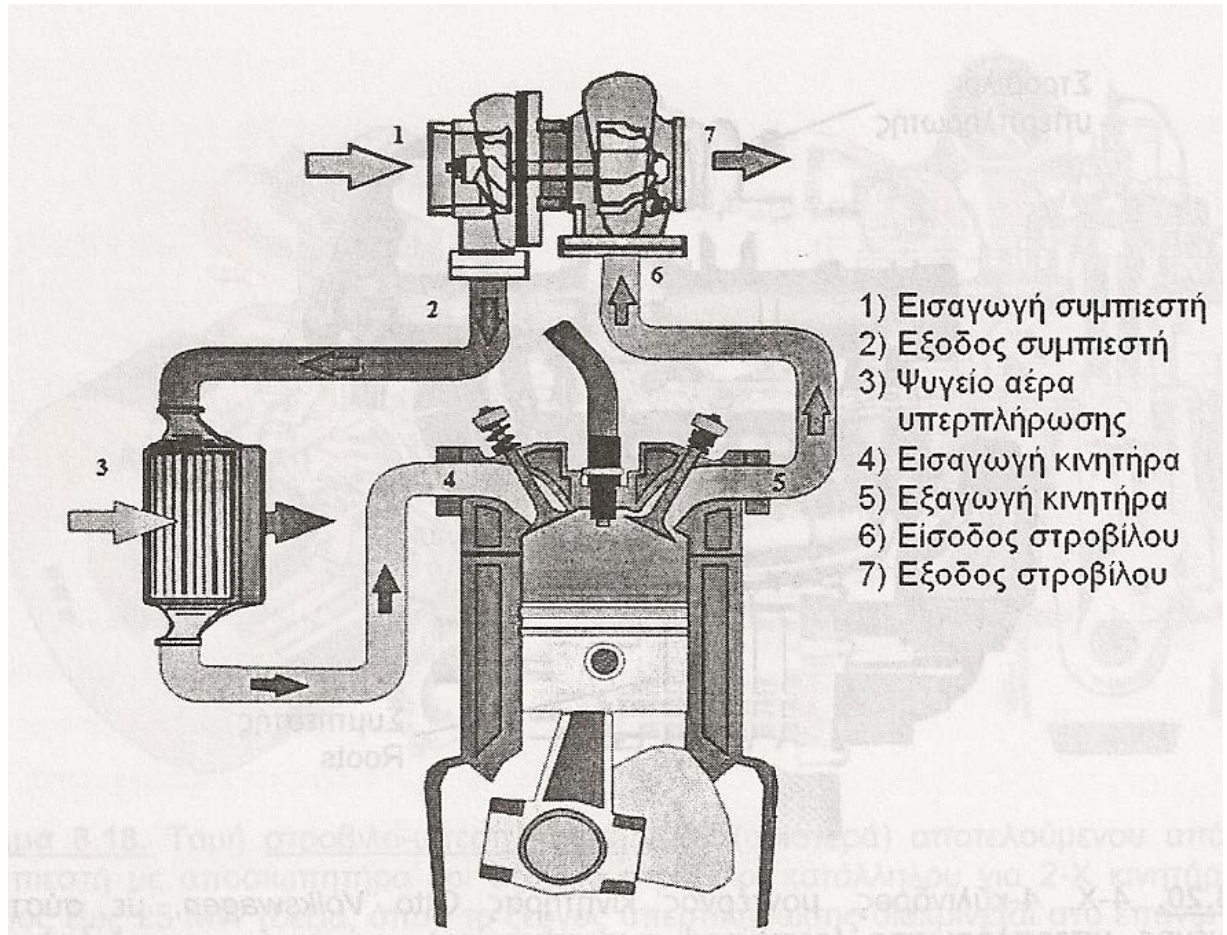
Τα μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης είναι:

- Υψηλότερη μηχανική και θερμική φόρτιση,
- Αργή επιτάχυνση,
- Ιδιαίτερα αυξημένες εκπομπές ρύπων κατά τη μεταβατική λειτουργία,
- Ελαφρώς αυξημένες εκπομπές ρύπων κατά την εκκίνηση κινητήρων οχημάτων λόγω καθυστερημένης προθέρμανσης του καταλύτη,
- Πιθανόν αυξημένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου NOx λόγω υψηλότερων θερμοκρασιών κύκλου

2.7 Βασικές αρχές της στρόβιλο-υπερπλήρωσης

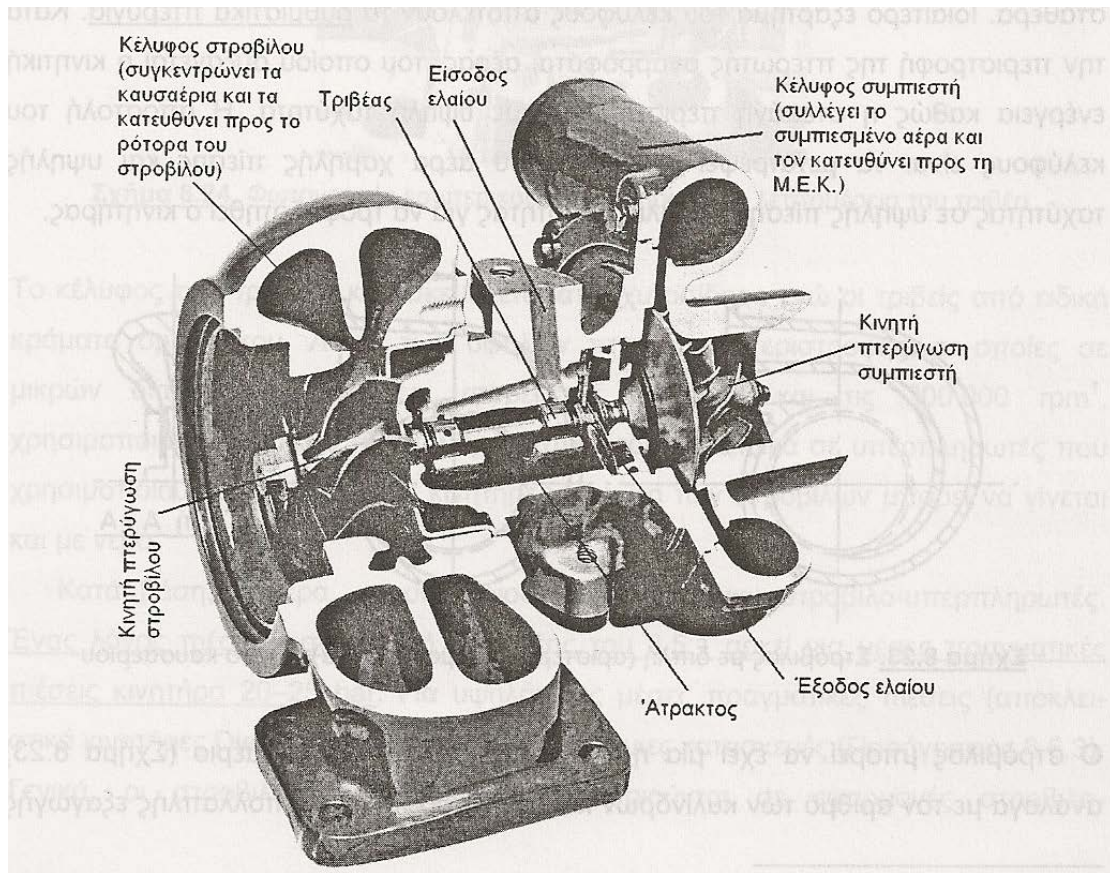
Από όλους τους παραπάνω συνδυασμούς συστημάτων υπερπλήρωσης, πολλοί έχουν εξεταστεί, λίγοι όμως τελικά παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έτσι ώστε να υλοποιηθούν και να βγουν σε μαζική παραγωγή. Ευρέως αποδεκτός θεωρείται σήμερα ο συνδυασμός εμβολοφόρου κινητήρα Otto ή Diesel με ζεύγος στρόβιλο-υπερπληρωτή (turbocharging), συνήθως με ενδιάμεσο ψυγείο του αέρα υπερπλήρωσης (aftercooler).

Αυτός ο συνδυασμός κινητήρα-υπερπληρωτή αποτελείται, συνήθως, από φυγοκεντρικό (ακτινικό) συμπιεστή και αποτόνωση του καυσαερίου σε ακτινικό (για μικρούς όγκους εμβολισμού, π.χ. εφαρμογές αυτοκινήτων) ή αξονικό (για μεγαλύτερους όγκους εμβολισμού, π.χ. φορτηγά, βιομηχανικούς, ναυτικούς κινητήρες) στρόβιλο.



Σχήμα 2.7 Τυπική διάταξη στρόβιλο-υπερπλήρωσης κινητήρα Otto με ενδιάμεσο ψυγείο αέρα

Συμπιεστής και στρόβιλος είναι μηχανικά συνδεδεμένοι στην ίδια άτρακτο, το οποίο σημαίνει ότι το έργο για την κίνηση του συμπιεστή παρέχεται από το στρόβιλο χωρίς να αφαιρέσει πολύτιμο μηχανικό έργο από τον κινητήρα. Το σύστημα αυτό συνδυάζει σχετικά απλή κατασκευή και δυνατότητα επίτευξης ιδιαίτερα υψηλής συγκέντρωσης ισχύος της συνδεδεμένης εμβολοφόρου Μ.Ε.Κ. Επιπλέον βελτιώνεται και η ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα.



Σχήμα 2.8 Τομή ζεύγους στρόβιλο-υπερπλήρωσης

Ο συμπιεστής αποτελείται από την περωτή ή κινητή πτερύγωση/στεφάνη, η οποία είναι συζευγμένη μηχανικά με το-στρόβιλο, και το κέλυφος ή διαχύτη ή δακτυλιοειδή επιβραδυντή (σε ακτινικούς συμπιεστές που ενδιαφέρουν κατ' αποκλειστικότητα εφαρμογές με Μ.Ε.Κ.) ή σταθερή πτερύγωση (σε αξονικούς συμπιεστές), που είναι σταθερά. Ιδιαίτερο εξάρτημα του κελύφους αποτελούν τα ρυθμιστικά πτερύγια. Κατά την περιστροφή της περωτής αναρροφάται αέρας, του οποίου αυξάνεται η κινητική ενέργεια καθώς η στεφάνη περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα. Η αποστολή του κελύφους είναι να μετατρέψει το ρεύμα του αέρα χαμηλής πίεσης και υψηλής ταχύτητας σε υψηλής πίεσης-χαμηλής ταχύτητας για να τροφοδοτηθεί ο κινητήρας.

Ο στρόβιλος μπορεί να έχει μία ή δύο εισόδους για το καυσαέριο ανάλογα με τον αριθμό των κυλίνδρων και τη διαμόρφωση της πολλαπλής εξαγωγής και αποτελείται επίσης από δύο τμήματα, την κινητή πτερύγωση (περωτή) και το κέλυφος. Τα καυσαέρια αποτονώνονται στην κινητή πτερύγωση, όπου και έχουν οδηγηθεί μέσω του σταθερού κελύφους, μετατρέποντας την κινητική ενέργειά τους σε μηχανική στην άτρακτο. Στο κέλυφος, ή σταθερή πτερύγωση (διαχύτης), έχει πραγματοποιηθεί η κύρια μετατροπή της στατικής πίεσης εισόδου σε κινητική ενέργεια.

Η λίπανση του υπερπληρωτή επιτυγχάνεται με χρήση ελαίου, συνήθως από το σύστημα λίπανσης του κινητήρα. Το λάδι παρέχεται υπό πίεση στους τριβείς, ενώ δρα και ως ψυκτικό μέσο, απορροφώντας την παραγόμενη στο στρόβιλο θερμότητα.

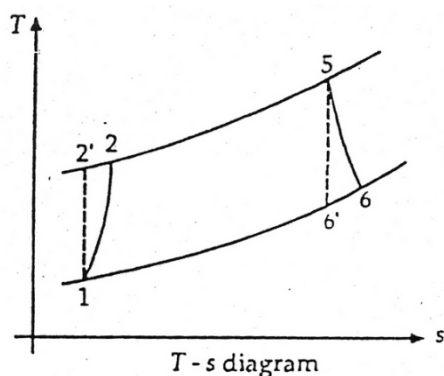
Το κέλυφος των τριβών κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο ενώ οι τριβείς από ειδικά κράματα ορείχαλκου. Λόγω των υψηλών ταχυτήτων περιστροφής, οι οποίες σε μικρών διαστάσεων μονάδες μπορεί να φθάσουν και τις 200.000 rpm χρησιμοποιούνται ειδικού τύπου υδροστατικοί τριβείς. Ειδικά σε υπερπληρωτές που χρησιμοποιούνται σε ναυτικούς κινητήρες, η ψύξη των στροβίλων μπορεί να γίνεται και με νερό.

Κατά βάση, σήμερα, χρησιμοποιούνται μονοβάθμιοι στρόβιλο-υπερπληρωτές. Ένας λόγος πιέσεων συμπίεσής της τάξης του 3,5:1 αρκεί για μέσες πραγματικές πιέσεις κινητήρα 20-25 bar. Για υψηλότερες μέσες πραγματικές πιέσεις (αποκλειστικά κινητήρες Diesel) χρησιμοποιούνται διβάθμιες κατασκευές.

Γενικά, οι στροβιλομηχανές που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στρόβιλο-υπερπλήρωσης είναι ιδανικές για υψηλή παροχή αέρα υπό, σχετικά, χαμηλή πίεση, κάτι που για να επιτευχθεί απαιτεί πολύ υψηλές ταχύτητες περιστροφής.

2.8 Βασικές σχέσεις θερμοδυναμικής

Στο Σχήμα που ακολουθεί δίνεται το διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας για ζεύγος στρόβιλο-υπερπλήρωσης, με απεικόνιση και των αντίστοιχων ισεντροπικών σημείων (').



Σχήμα 2.9 Διάγραμμα T-s ζεύγους στρόβιλο-υπερπλήρωσης

Εφαρμόζοντας τον 1ο Θερμοδυναμικό Νόμο, έχουμε για το συμπίεστή

$$\dot{Q}_c - \dot{W}_c = \dot{m} \left[\left(h_2 + \frac{C_2^2}{2} + \Delta E_2 \right) - \left(h_1 + \frac{C_1^2}{2} + \Delta E_1 \right) \right] \quad (2.2)$$

με \dot{Q}_c , τη ροή θερμότητας προς το σύστημα, \dot{W}_c την απαγόμενη ισχύ, \dot{m} παροχή μάζας, C την ταχύτητα του ρευστού και ΔE τη δυναμική του ενέργεια.

Ορίζοντας την ενθαλπία ανακοπής h_o

$$h_o = h + \frac{C^2}{2} \quad (2.3)$$

και αγνοώντας τη μεταβολή στη δυναμική ενέργεια, η οποία είναι ούτως ή άλλως αμελητέα σε σχέση με τους υπόλοιπους όρους, καθώς και τις απώλειες θερμότητας \dot{Q}_c καταλήγουμε στη σχέση:

$$-\dot{W}_C = \dot{m}(h_{02} - h_{01}) \quad (2.4)$$

$$\eta_{ic} = \frac{\text{ισεντροπικό έργο}}{\text{πραγματικό έργο}} = \frac{h_{02'} - h_{01}}{h_{02} - h_{01}} = \frac{T_{02'} - T_{01}}{T_{02} - T_{01}} \quad (2.5)$$

όπου έχουμε επιπλέον θεωρήσει στην τρίτη ισότητα (θερμοκρασιών) σταθερό C_p .

Για ισεντροπική συμπίεση, η πίεση και η θερμοκρασία συνδέονται με την παρακάτω εξίσωση,

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \left(\frac{T_{02'}}{T_{01}}\right)^{\frac{\gamma_\alpha}{\gamma_\alpha - 1}} \quad (2.6)$$

Οπότε προκύπτει

$$\eta_{ic} = \frac{T_{01} \left[\left(\frac{T_{02'}}{T_{01}}\right) - 1 \right]}{T_{02} - T_{01}} = \frac{T_{01} \left[\left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^{\frac{\gamma_\alpha - 1}{\gamma_\alpha}} - 1 \right]}{T_{02} - T_{01}} = \frac{\left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^{\frac{\gamma_\alpha - 1}{\gamma_\alpha}} - 1}{\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1} \quad (2.7)$$

Ο παραπάνω ισεντροπικός βαθμός απόδοσης είναι γνωστός ως βαθμός απόδοσης μεταξύ συνθηκών ανακοπής στην είσοδο και την έξοδο (total-to-total). Με δεδομένο ότι η κινητική ενέργεια εξόδου από το συμπιεστή προσφέρει ελάχιστα στην ολική ενέργεια του αερίου, ορίζεται ο παρακάτω βαθμός απόδοσης ο οποίος αναφέρεται σε συνθήκες ανακοπής στην είσοδο και στατικές στην έξοδο.

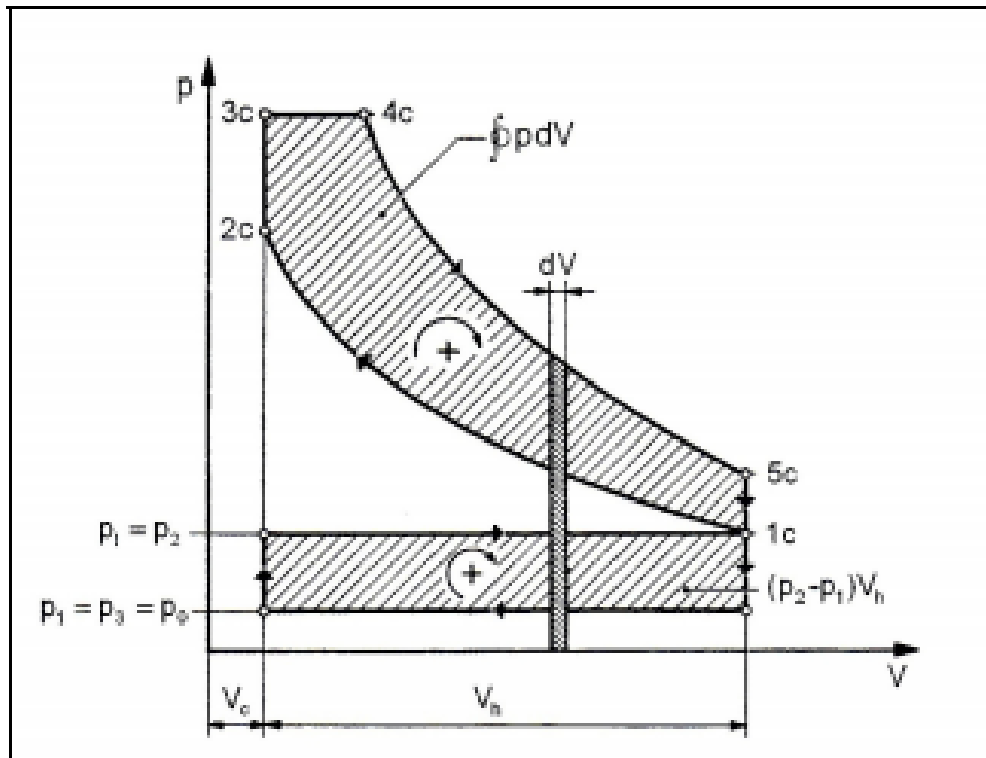
$$\eta_{ic} = \frac{h_{2'} - h_{01}}{h_2 - h_{01}} = \frac{T_{2'} - T_{01}}{T_2 - T_{01}} = \frac{\left(\frac{p_2}{p_{01}}\right)^{\frac{\gamma_\alpha - 1}{\gamma_\alpha}} - 1}{\frac{T_2}{T_{01}} - 1} \quad (2.8)$$

Όπως είδαμε και παραπάνω, στις συνήθεις εφαρμογές υπερπλήρωσης η προσμπίση 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 κατάντι και ανάντι του συμπιεστή αντίστοιχα.

Υπολογισμός της ισχύος συμπιεστή

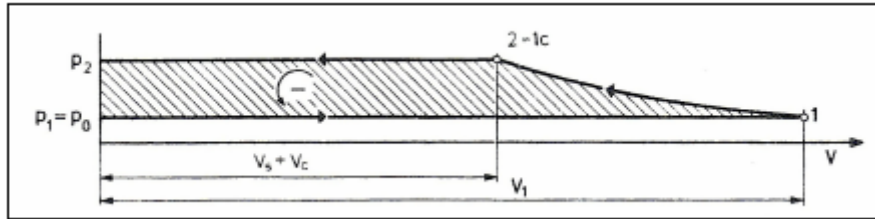
Στο σχήμα 2.10 παριστάνεται το εξιδανικευμένο δυναμοδεικτικό διάγραμμα 4-Χ μηχανικά υπερπληρωμένου κινητήρα. Το ενδεικνυμένο έργο W_{id} του ιδανικού κινητήρα περιέχει τον όρο πίεσης $p dV$ και τον όρο του βρόγχου αναρρόφησης $(p_2 - p_1)V_h$:

$$W_{id} = \oint p dV + (p_2 - p_1)V_h \quad (2.9)$$



Σχήμα 2.10 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 (Σχήμα 2.10) πρέπει να επεκταθεί μέχρι τον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 2.11 Καμπύλη p-V συμπίεστή

Το έργο της ισεντροπικής συμπίεσης είναι: $W_{id} = p_1 V_1 \frac{\gamma_\alpha}{\gamma_\alpha - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_\alpha - 1}{\gamma_\alpha}} \right]$ (2.10)

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

$$\Delta h_{ic} = C_p (T_2 - T_1) = C_p T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_\alpha - 1}{\gamma_\alpha}} - 1 \right]$$
 (2.11)

και το ισεντροπικό έργο συμπίεσης είναι

$$W_{ic} = m R T_1 \frac{\gamma_\alpha}{\gamma_\alpha - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma_\alpha - 1}{\gamma_\alpha}} \right] = -m \Delta h_{ic}$$
 (2.12)

Συνήθως το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω εξίσωση παραλείπεται.

Το έργο πραγματικής συμπίεσης είναι:

$$W_{ic} = \frac{m \Delta h_{ic}}{\eta_{ic}}$$
 (2.13)

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

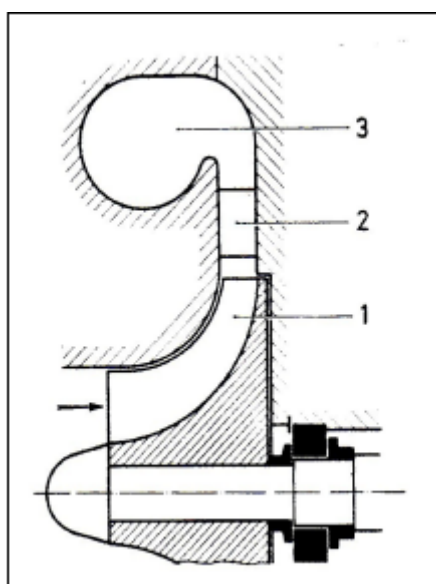
$$P_c = W_{ic} = \frac{m \Delta h_{ic}}{\eta_{ic}}$$
 (2.14)

2.9 Συμπίεστής δυναμικής ροής

Ο σημαντικότερος εκπρόσωπος της κατηγορίας αυτής είναι ο ακτινικός (φυγοκεντρικός) συμπίεστής, και ονομάζεται έτσι λόγω της ακτινικής εξόδου του αέρα κατάντι. Η κατεύθυνση της εισερχόμενης ροής είναι συνήθως αξονική. Οι ακτινικοί συμπίεστες χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά σε εφαρμογές στρόβιλο-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 επιβάλλεται χρήση μειωτήρα ώστε να συνδεθούν μηχανικά με τη στροφαλοφόρο άτρακτο.

Στο Σχήμα 2.11 διακρίνουμε τα κύρια μέρη ενός ακτινικού συμπιεστή. Διαμέσου της πτερωτής (1) η ταχύτητα του ρευστού αυξάνει λόγω μεταφοράς ορμής από τα πτερύγια της και στη συνέχεια η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε στατική πίεση στο διαχύτη (2) και στο σπειροειδές κέλυφος (3).

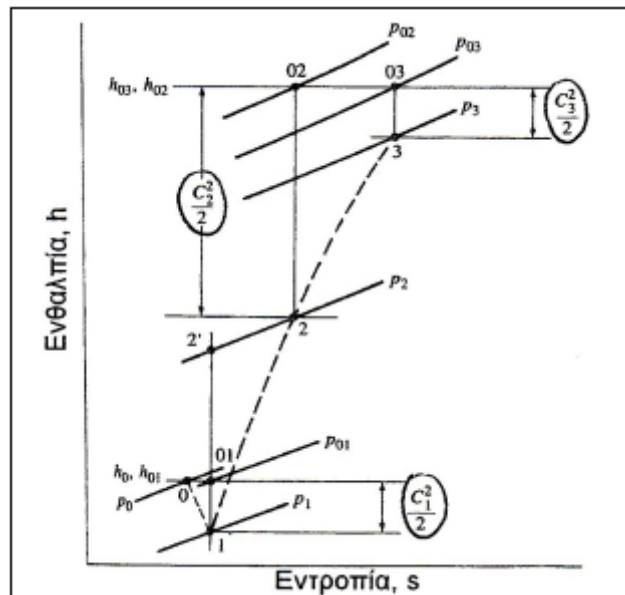


Σχήμα 2.12 Τμήματα ακτινικού συμπιεστή: 1.πτερωτή, 2.διαχύτης, 3.σπειροειδές κέλυφος

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

2.9.1 Περιγραφή της ροής

Στο σχήμα 2.13 παριστάνεται η καμπύλη h-s τυπικού φυγοκεντρικού συμπιεστή.



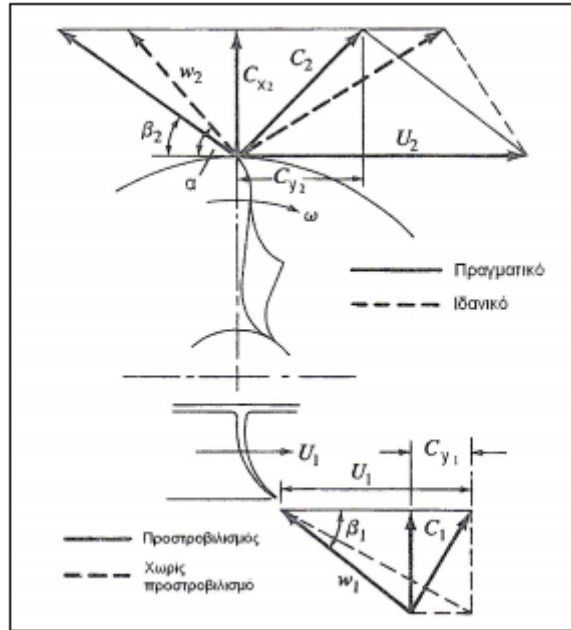
Σχήμα 2.13 Καμπύλες ενθαλπίας- εντροπίας φυγοκεντρικού συμπιεστή

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 ισοεντροπική συμπίεση έχει κατάσταση εξόδου τη 2'. Με 2' συμβολίζεται η αντίστοιχη ισοεντροπική 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 2.14):

$$-W_c = M\omega_{TC} = m\omega_{TC}(r_2 C_{\gamma 2} \pm r_1 C_{\gamma 1}) = m(U_2 C_{\gamma 2} \pm U_1 C_{\gamma 1}) \quad (2.15)$$

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 2.14 Τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο (1) και έξοδο (2) περρωτής φυγοκεντρικού συμπιεστή

Από την εξίσωση Euler βρίσκουμε την αντίστοιχη θερμοκρασιακή άνοδο ΔT_c εντός της περρωτής συναρτήσεων των ταχυτήτων:

$$-W_c = m(h_{03} - h_{01}) = mC_p(T_{03} - T_{01}) = m(U_2 C_{y2} \pm U_1 C_{y1}) \quad (2.16)$$

Άρα

$$\Delta T_c = (T_{03} - T_{01}) = \frac{(U_2 C_{y2} \pm U_1 C_{y1})}{C_p} \quad (2.17)$$

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

$$-W_c = mU_2 \left(1 \pm \frac{C_{y2}}{U_2} \cot \beta_2\right) \quad (2.18)$$

Στην ιδανική περίπτωση (Σχήμα 2.13 - διακεκομμένη γραμμή) η γωνία β_2 ταυτίζεται με την γωνία α του περρωγίου. Στην πραγματικότητα όμως εμφανίζεται ολίσθηση οπότε η β_2 είναι μικρότερη.

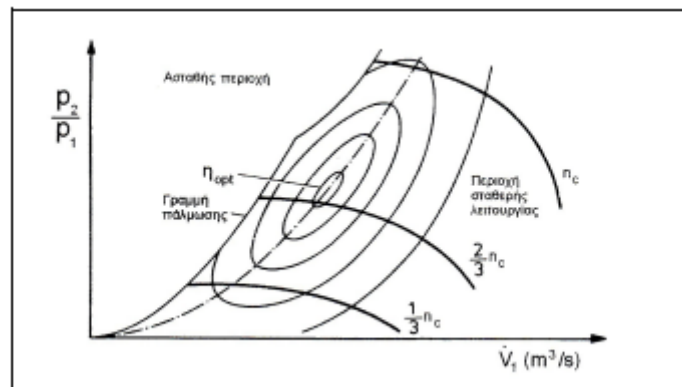
Στις παραπάνω εξισώσεις το αρνητικό πρόσημο αντιστοιχεί σε θετική συστροφή (στροβιλισμός του ρευστού πριν την εισαγωγή στην περρωτή), ενώ το θετικό πρόσημο σε αρνητική συστροφή.

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

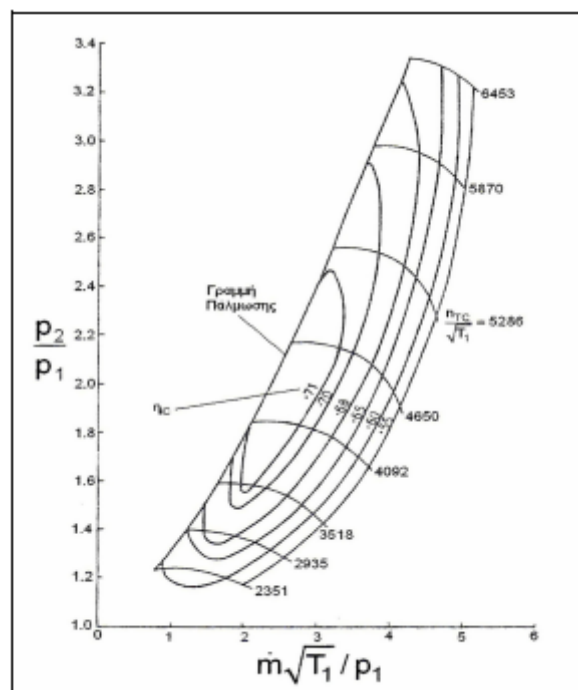
3 Χάρτης λειτουργίας αξονικού συμπιεστή

3.1 Ανάλυση χάρτη τυπικού αξονικού συμπιεστή

Στα Σχήματα 3.1 και 3.2 δίνονται χάρτες λειτουργίας τυπικού ακτινικού συμπιεστή συναρτήσει της παροχής όγκου αέρα (είτε καθαρή είτε σε μορφή αδιαστατοποιημένης μάζας).



Σχήμα 3.1 Χάρτης λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή



Σχήμα 3.2 Χάρτης λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή

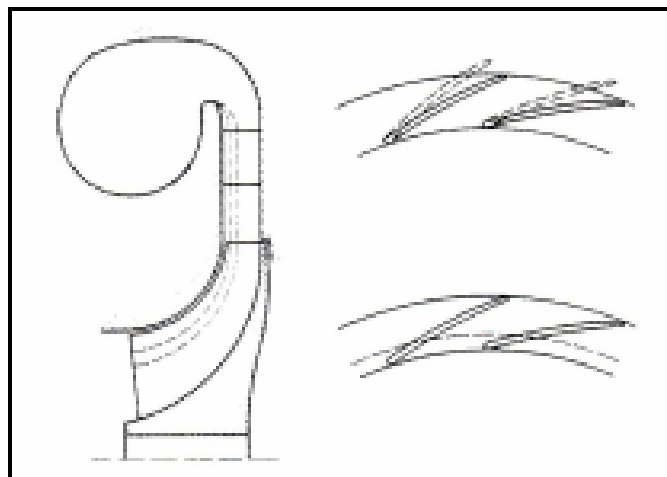
Στους χάρτες αυτούς διακρίνονται δυο περιοχές, μια ευσταθούς και μια ασταθούς λειτουργίας. Οι δύο περιοχές διαχωρίζονται από τη γραμμή πάλμωσης. Όταν το σημείο λειτουργίας του συμπιεστή βρεθεί αριστερά της γραμμής αυτής, εμφανίζονται ανεπιθύμητα φαινόμενα τα οποία διαταράσσουν σημαντικά τη λειτουργία 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.

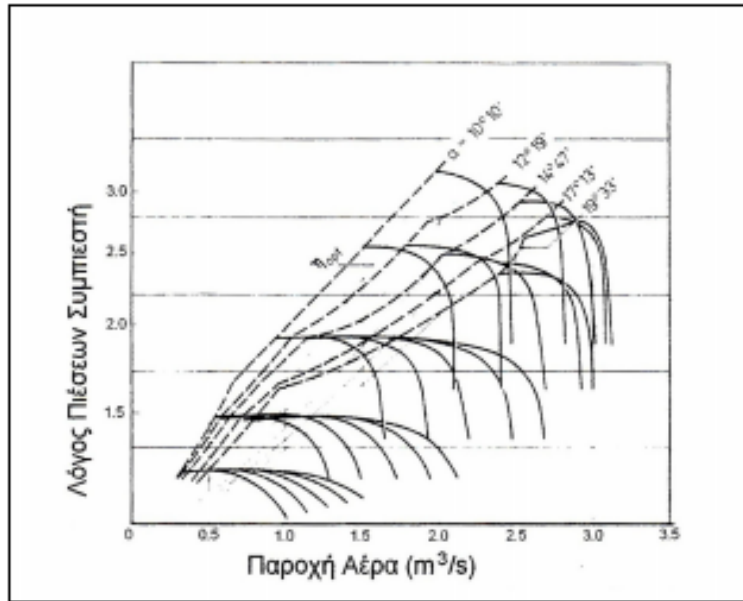
Αντίθετα, για ανηγμένη παροχή κοντά στη γραμμή πάλμωσης οι καμπύλες σταθερής ταχύτητας είναι σχεδόν οριζόντιες (κάποιες φορές ανεβαίνουν ελαφρώς), ενώ πέφτουν απότομα καθώς απομακρύνονται από αυτήν.

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 3.3,3.4).

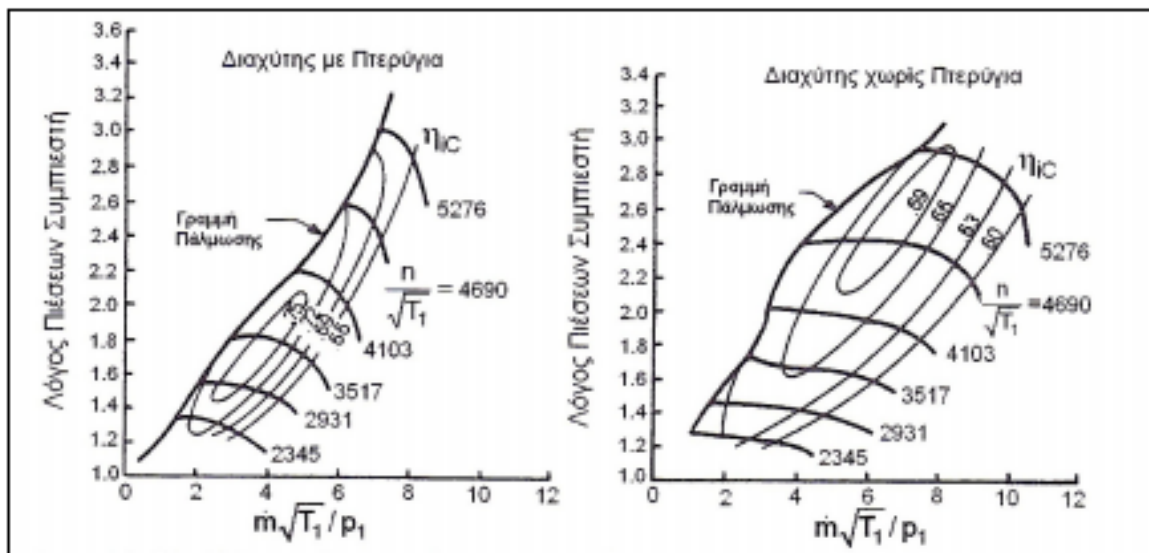


Σχήμα 3.3 Ρύθμιση της παροχής του συμπιεστή με μεταβολή της γεωμετρίας πτερωτής – διαχύτη



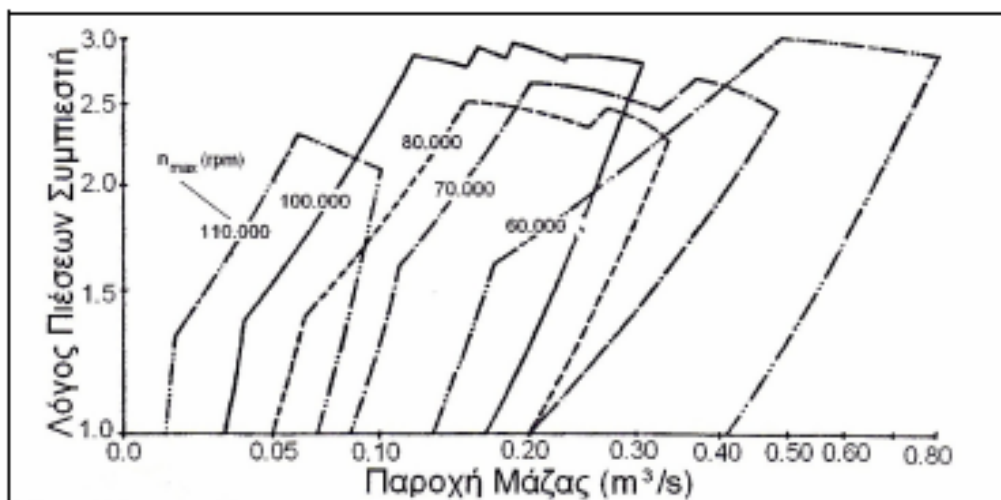
Σχήμα 3.4 Επίδραση της γωνίας των πτερυγίων του διαχύτη στο χάρτη του συμπιεστή (όπου η_{opt} ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης)

Στο σχήμα 3.5 συγκρίνονται οι χάρτες λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή με διαχύτη χωρίς και με πτερόγυια. Ο διαχύτης χωρίς πτερόγυια 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.



Σχήμα 3.5 Χάρτες λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή με διαχύτη, με ή χωρίς πτερόγυια

Τέλος, στο σχήμα 3.6 απεικονίζεται οικογένεια ακτινικών συμπιεστών και σκιαγραφείται το φάσμα λειτουργίας της κάθε μονάδας.



Σχήμα 3.6 Οικογένεια ακτινικών συμπιεστών

3.1.1 Το πρόβλημα της μεταβατικής λειτουργίας

Παρά τα σαφή πλεονεκτήματα της στρόβιλο-υπερπλήρωσης όσον αφορά τη μόνιμη λειτουργία (κυρίως των κινητήρων Diesel), αυτή χαρακτηρίζεται και από ένα βασικό μειονέκτημα: τη μεταβατική λειτουργία.

Με τον όρο μεταβατική λειτουργία εννοούμε την εξαναγκασμένη και συνήθως απότομη μεταβολή είτε στην παροχή του εγχυόμενου καυσίμου στον κύλινδρο (μεταβολή στροφών) είτε στο φορτίο με το οποίο είναι συνδεδεμένος ο κινητήρας.

Γενικά, η μελέτη της μεταβατικής λειτουργίας των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. είναι μεγάλης σημασίας για τους παρακάτω λόγους:

- Η συντριπτική πλειοψηφία των οδηγικών συνθηκών στους δρόμους χαρακτηρίζονται από αλλεπάλληλες μεταβολές στροφών και φορτίου,
- Ο κινητήρας και τα διάφορα υποσυστήματα του (σύστημα υπερπλήρωσης, αντλία καυσίμου, ρυθμιστής στροφών) βιώνουν μη-γραμμικές και μακριά από τις αντίστοιχες της μόνιμης λειτουργίας καταστάσεις,
- Απαιτείται πολύ καλό ταίριασμα ανάμεσα στον κινητήρα και τα υποσυστήματα του για να υπάρχει καλή οδική συμπεριφορά και, γενικά, μεταβατική απόκριση,
- Παρατηρούνται έντονα αυξημένες εκπομπές καπνού και NOx από κινητήρες Diesel κατά τη φάση της μεταβατικής απόκρισης,
- Μειωμένη ικανότητα επιτάχυνσης, εάν ξεκινάμε από χαμηλό φορτίο.

3.2 Μέθοδοι εκτίμησης χαρτών συμπιεστή

Για την εκτίμηση των χαρτών του συμπιεστή, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, είτε πειραματικές είτε υπολογιστικές, αναλόγως των δυνατοτήτων του κάθε ερευνητή.

Σε πειραματικό επίπεδο ο συμπιεστής, τοποθετείται σε κατάλληλα διαμορφωμένο δοκιμαστήριο με δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής του και της αναρροφώμενης παροχής μάζας αέρα. Ο ερευνητής επιλέγοντας την ταχύτητα περιστροφής και την αναρροφώμενη παροχή καταγράφει τις επιδόσεις του συμπιεστή δηλαδή το λόγο πίεσης και τον βαθμό απόδοσης του. Με επανάληψη της διαδικασίας για διάφορες ταχύτητες περιστροφής, καθορίζεται πειραματικά μέσω μετρήσεων το πεδίο χαρακτηριστικών του συμπιεστή. Μια τέτοια διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και προϋποθέτει την ύπαρξη διαθέσιμου εξοπλισμού και χώρου. Γι αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικές μέθοδοι.

Οι υπολογιστικές μέθοδοι, προσδιορίζουν αναλυτικά μέσω σχέσεων τις επιδόσεις της συνιστώσας. Με παραμετρικές αναλύσεις μπορεί να καθοριστεί το πεδίο χαρακτηριστικών. Διάφορες μέθοδοι υψηλής πιστότητας έχουν αναπτυχθεί για μοντέλα μίας διάστασης (1-D), δύο ή τριών διαστάσεων (2-D, 3-D).

Μερικές από τις πιο σημαντικές μεθόδους υπολογισμού επιδόσεων και προσδιορισμού του πεδίου χαρακτηριστικών του συμπιεστή, είναι:

- Η μέθοδος ομοιότητας
- Η μέθοδος σπονδυλικής στήλης
- Η μέθοδος υπολογισμού στο μεσημβρινό επίπεδο
- Η μέθοδος συσσώρευσης βαθμίδων

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν οι υπολογιστικές μέθοδοι που αναφέρθηκαν, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών, αναφέρονται συνοπτικά:

3.2.1 Μέθοδος Ομοιότητας

Η μέθοδος της ομοιότητας είναι ίσως η πιο διαδεδομένη και εύχρηστη καθώς απαιτεί ως δεδομένα τα λιγότερα στοιχεία. Για να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος δεν είναι απαραίτητη η γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συμπιεστή πρέπει όμως να είναι πλήρως καθορισμένο το σημείο σχεδίασης στο οποίο λειτουργεί (ταχύτητα περιστροφής, παροχή μάζας, λόγος πίεσης και ισεντροπικός βαθμός απόδοσης).

Το σημείο αυτό (σημείο αναφοράς), τοποθετείται επάνω σε ένα δεδομένο χάρτη, ενός διαφορετικού πλην όμως όμοιου συμπιεστή με αυτόν που μελετάται. Ο χάρτης του διαφορετικού όμοιου συμπιεστή έχει προκύψει από αδιαστατοποίηση γνωστών χαρακτηριστικών καμπυλών. Με αυτό τον τρόπο ο χάρτης μετατρέπεται σε έναν που αντιπροσωπεύει το συμπιεστή που μελετάμε.

Είναι κατανοητό πως η μέθοδος αυτή είναι μεν αξιόπιστη, αλλά επιφέρει μία αβεβαιότητα στον ερευνητή καθώς ο χάρτης που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς, δεν έχει προκύψει από τον συμπιεστή που μελετάται αλλά από διαφορετικό.

Η μετατροπή του αρχικού γενικού χάρτη (generic map) σε χάρτη ικανό να περιγράψει τη λειτουργία του συμπιεστή που μελετάται, απαιτεί τροποποίηση στα μεγέθη της διορθωμένης ταχύτητας περιστροφής N , της διορθωμένης παροχή μάζας q , του λόγου πίεσης π και του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης η , σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\frac{N}{\sqrt{\theta}} = \frac{(N/\theta)_d}{(N/\theta)_{r,d}} (N/\theta)_r \quad (3.1)$$

$$q = \frac{q_d}{q_{r,d}} q_r \quad (3.2)$$

$$\pi = \frac{\pi_d - 1}{\pi_{r,d} - 1} (\pi_r - 1) + 1 \quad (3.3)$$

$$\eta = \frac{\eta_d}{\eta_{r,d}} \eta_r \quad (3.4)$$

Το μέγεθος θ ισούται με το λόγο $\frac{T}{T_{ref}}$, όπου $T_{ref} = 288,15$ K, θερμοκρασία τυπικής ημέρας. Ο δείκτης r αναφέρεται σε ένα σημείο λειτουργίας του γενικού αρχικού χάρτη (generic map) ενώ ο δείκτης d στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας (design point) του συμπιεστή που μελετάμε.

3.2.2 Μέθοδος “σπονδυλικής στήλης” (Backbone Method)

Η μέθοδος της σπονδυλικής στήλης είναι παρεμφερής με τη μέθοδο της ομοιότητας. Κατά τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται οι επιδόσεις του συμπιεστή που μελετάται από δεδομένα χαρακτηριστικά λειτουργίας άλλων όμοιων συμπιεστών. Πιο συγκεκριμένα για να καθορισθεί το πεδίο χαρακτηριστικών είναι απαραίτητη η γνώση των δεδομένων που αντιστοιχούν στη γραμμή λειτουργίας (“σπονδυλική στήλη”) του κινητήρα από τον οποίο προέρχονται.

Μία ισοταχής χαρακτηρίζεται από τρία σημεία: το σημείο λειτουργίας, το σημείο στη γραμμή πάλμωσης και το σημείο στραγγαλισμού. Αυτά τα τρία σημεία απαιτείται να είναι πλήρως καθορισμένα ως προς τη ταχύτητα περιστροφής, παροχή μάζας, λόγο πίεσης και ισεντροπικό βαθμό απόδοσης. Τα μεγέθη αυτά αδιαστατοποιούνται ως προς ένα σημείο λειτουργίας, στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη απόδοση. Το σημείο αυτό ονομάζεται “σημείο αναφοράς” και οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αδιαστατοποίηση είναι οι εξής: N/N_{ref} , PR/PR_{ref} , $(\Delta T/T)/(\Delta T/T)_{ref}$, Q/Q_{ref} .

Γίνεται η υπόθεση ότι το σημείο αναφοράς βρίσκεται επάνω στη γραμμή λειτουργίας. Έχοντας υπολογίσει τα μεγέθη PR , Q και $\Delta T/T$ στο σημείο αυτό, με τις δεδομένες

αδιαστατοποιημένες παραμέτρους, προσδιορίζονται τα σημεία πάλμωσης, λειτουργίας και στραγγαλισμού για κάθε ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή που μελετάμε. Τα υπόλοιπα σημεία κάθε ισοταχούς υπολογίζονται με τη μέθοδο της παρεμβολής.

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά εύχρηστη και απλοποιημένη, φέρει όμως περιορισμούς κατά την εφαρμογή της. Αρχικά για να είναι ικανοποιητικά τα αποτελέσματα και το πεδίο που θα προκύψει να είναι αντιπροσωπευτικό του συμπιεστή που μελετάται, πρέπει οι συμπιεστές που εξετάζονται να είναι όμοιοι μεταξύ τους. Μία επιπλέον αβεβαιότητα που δημιουργείται με τη χρήση της μεθόδου, προκύπτει από την υπόθεση ότι το σημείο αναφοράς βρίσκεται επάνω στη γραμμή λειτουργίας. Σε κάθε περίπτωση οι αποκλίσεις στο νέο πεδίο χαρακτηριστικών θα είναι μικρές και οι χάρτες θα παρουσιάζουν σχετική ομοιότητα.

3.2.3 Μέθοδος υπολογισμού της ροής στο Μεσημβρινό Επίπεδο

Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής από την είσοδο στην έξοδο εφαρμόζοντας τις εξισώσεις της ακτινικής ισορροπίας, με χρήση εμπειρικών σχέσεων. Αυτές έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα και συνδέουν την αεροδυναμική συμπεριφορά της πτερύγωσης, ρότορα ή στάτορα, με τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά.

Η μέθοδος αυτή δεν είναι εύχρηστη και η εφαρμογή της αποφεύγεται καθώς απαιτεί λεπτομερή γνώση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των πτερυγώσεων. Κάτι τέτοιο είναι δύσκολο καθώς ο κατασκευαστής δεν παρέχει τέτοιου είδους πληροφορίες, ούτε δημοσιεύονται στη βιβλιογραφία. Η μέθοδος θα μπορούσε να φανεί χρήσιμη σε αρχικό στάδιο σχεδιασμού του συμπιεστή και αρχική εκτίμηση των επιδόσεων και του πεδίου χαρακτηριστικών του.

3.2.4 Μέθοδος Συσώρευσης Βαθμίδων (Stage Stacking Method)

Κατά τη μέθοδο αυτή, οι επιδόσεις ολόκληρου του συμπιεστή εξαρτώνται από τις επιδόσεις των επιμέρους βαθμίδων. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι η μοντελοποίηση κάθε βαθμίδας είναι απαραίτητη. Η λειτουργία κάθε βαθμίδας μοντελοποιείται από ένα ζεύγος καμπυλών, τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας, που συνδέουν τη παράμετρο φόρτισης Ψ και τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης η με την παράμετρο παροχής Φ . Η παράμετρος φόρτισης αντιστοιχεί στο λόγο πίεσης που επιτυγχάνει η βαθμίδα ενώ η παράμετρος παροχής Φ αντιστοιχεί στην παροχή μάζας. Τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης μέσω του συντελεστή μεταβολής θερμοκρασίας ζ .

Οι παράμετροι αυτές δίνονται από τις σχέσεις:

$$\Phi = \frac{V_\alpha}{U} \quad (3.5)$$

$$\Psi = \frac{c_p T \left(PR^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)}{U^2} \quad (3.6)$$

$$\zeta = \frac{c_p \Delta T}{U^2} \quad (3.7)$$

$$\eta = \frac{\Psi}{\zeta} \quad (3.8)$$

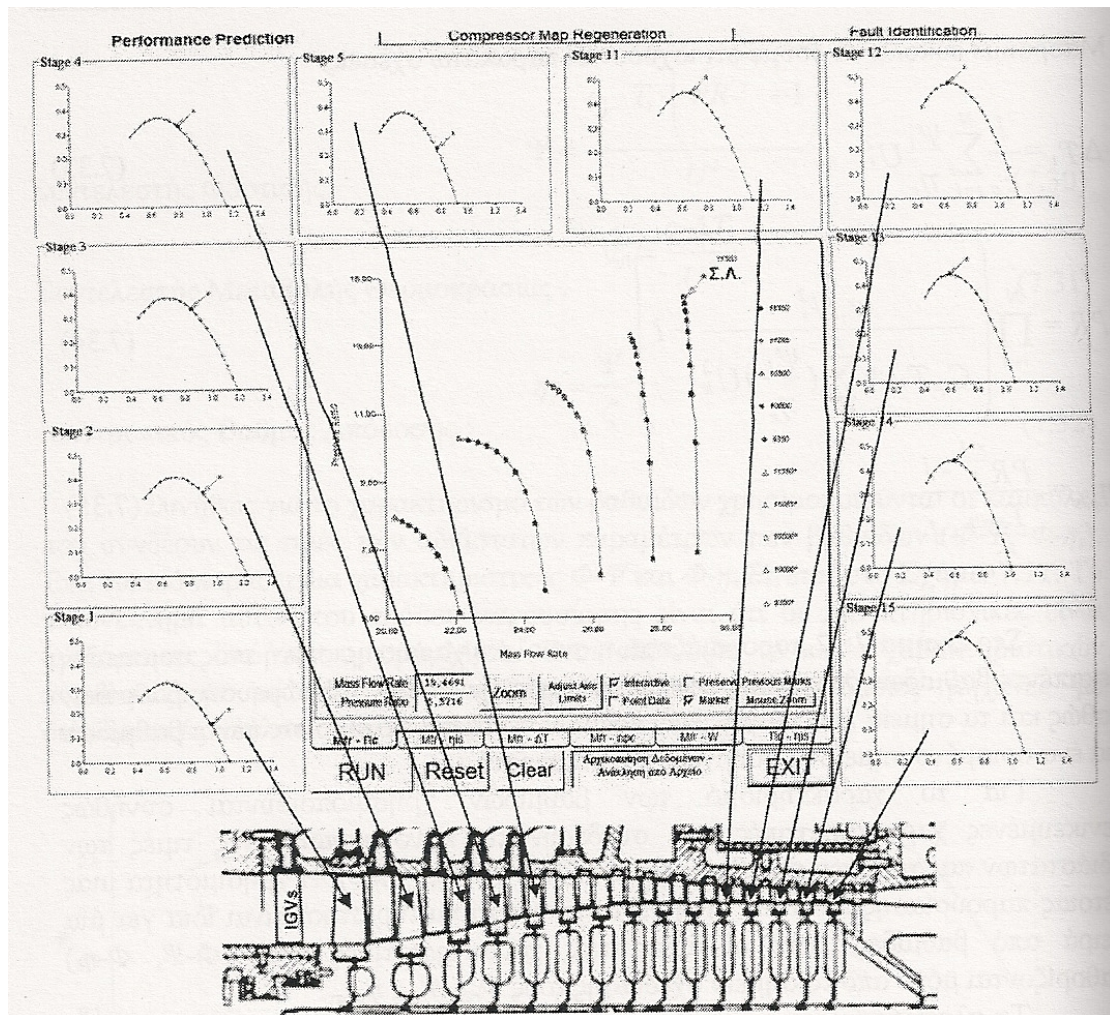
Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ξεκινώντας από τις συνθήκες εισόδου της βαθμίδας με δεδομένη τη γεωμετρία του καναλιού (εμβαδόν εισόδου A και μέση ακτίνα R_m) και την απόλυτη γωνία ροής του εργαζόμενου μέσου, υπολογίζεται η παράμετρος παροχής. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της βαθμίδας, υπολογίζεται ο λόγος πίεσης που επιτυγχάνει και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης αυτής.

Τελικά υπολογίζονται οι συνθήκες εξόδου της βαθμίδας. Οι ολικές συνθήκες στην είσοδο της επόμενης βαθμίδας είναι ίδιες με αυτές της εξόδου της προηγούμενης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις βαθμίδες του συμπιεστή, χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας κάθε βαθμίδας. Συνεπώς προσδιορίζονται οι επιδόσεις ολόκληρου του συμπιεστή.

Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία για διάφορες τιμές της παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου και της ταχύτητας περιστροφής του συμπιεστή είναι δυνατό να προσδιοριστεί ολόκληρο το πεδίο χαρακτηριστικών αυτού.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών καμπυλών των βαθμίδων, στοιχείο απαραίτητο για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, απαιτεί τον προσδιορισμό των αδιάστατων χαρακτηριστικών καμπυλών, ο οποίος είναι δύσκολος. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιούνται οι γενικευμένες χαρακτηριστικές που συνδέουν τις ποσότητες Ψ/Ψ_{ref} και η/η_{ref} με τη ποσότητα Φ/Φ_{ref} , όπου Ψ_{ref} , η_{ref} και Φ_{ref} οι επιδόσεις της βαθμίδας στο σημείο σχεδιασμού της, δηλαδή στο σημείο όπου ο βαθμός απόδοσης παίρνει τη μέγιστη τιμή του.

Με τον τρόπο αυτό, η χαρακτηριστική κάθε βαθμίδας εξαρτάται από τις τιμές που παίρνουν αυτά τα μεγέθη στο σημείο σχεδιασμού της, καθώς οι γενικευμένες χαρακτηριστικές είναι ίδιες για όλες τις βαθμίδες του συμπιεστή. Η διαδικασία με την οποία εφαρμόζεται η μέθοδος συσσώρευσης βαθμίδων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7



Σχήμα 3.7 Διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου συσσώρευσης βαθμίδων

Ο υπολογισμός των επιδόσεων αυτών καθώς και της απόλυτης γωνίας εισόδου της ροής κάθε βαθμίδας γίνεται μέσω διαδικασίας, η οποία καλείται Προσαρμοσμένη Μέθοδος Συσσώρευσης Βαθμίδων (Adaptive Stage Stacking Method). Κατά τη μέθοδο αυτή, λαμβάνονται από πειραματικά δεδομένα οι ολικές επιδόσεις και η γεωμετρία του συμπιεστή. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται καταλλήλως τροποποιημένες γενικευμένες χαρακτηριστικές ώστε να περιγράψουν ικανοποιητικά το συμπιεστή που μελετάται. Τέλος εκτιμάται η απόλυτη γωνία εισόδου της ροής για κάθε βαθμίδα. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζονται τα μεγέθη ψ_{ref} , η_{ref} και Φ_{ref} και επιβεβαιώνονται οι εκτιμήσεις για τις απόλυτες γωνίες εισόδου των βαθμίδων.

Η δυσκολία στις προκαταρκτικές μελέτες για τον προσδιορισμό των απαραίτητων στοιχείων για την εφαρμογή της μεθόδου, αντισταθμίζεται από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει. Το γεγονός της χρήσης των χαρακτηριστικών καμπυλών κάθε μεμονωμένης βαθμίδας, επιτρέπει την εκτίμηση των μεταβολών στις συνολικές επιδόσεις του συμπιεστή και κατ' επέκταση της μηχανής, όταν συμβεί μεταβολή σε μία ή περισσότερες βαθμίδες. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε αναλύσεις ευαισθησίας αναλύσεις βελτιστοποίησης, μελέτη αποδεσμεύσεων παροχής μάζας καθώς και για διαγνωστικούς σκοπούς.

4 Κυρίως Μέρος Α'

4.1 Παρουσίαση της υπάρχουσας μεθόδου προσομοίωσης

Παραπάνω έγινε μια προσπάθεια να αναφερθούν συνοπτικά οι πιο σημαντικές μέθοδοι αναπαράστασης των χαρτών λειτουργίας ενός συμπιεστή. Η πιο διαδεδομένη και πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι εκείνη που βασίζεται στη ομοιότητα. Αυτή η μέθοδος θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.

Τα δύο βασικά στοιχεία επιδόσεων μιας βαθμίδας ενός συμπιεστή, είναι η παροχή μάζας και η αύξηση της ολικής ενθαλπίας που προκαλεί στο εργαζόμενο μέσο. Το μέγεθος της παροχής μάζας που αναρροφά μία βαθμίδα χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή παροχής Φ_i (flow coefficient) ενώ η επιτυχανόμενη ενθαλπική διαφορά εκφράζεται από τον συντελεστή φόρτισης Ψ (loading coefficient). Πρόκειται για δύο αδιάστατα μεγέθη που ορίζονται με τον ακόλουθο τρόπο:

Συντελεστής παροχής:

$$\Phi_{avg} = \frac{V_1 + V_3}{2A_2 U_2} \quad (4.1)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται ένας μέσος συντελεστής παροχής Φ_{avg} διότι με αυτόν τρόπο εκτιμούμε καλύτερα την παροχή όγκου διαμέσου της βαθμίδας.

Συντελεστής φόρτισης :

$$\Psi = \frac{\Delta h_0}{U_2^2} = \frac{h_{03} - h_{01}}{U_2^2} \quad (4.2)$$

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι οι παράμετροι Φ_{avg} και Ψ δίνουν μια εικόνα λειτουργίας της βαθμίδας, αλλά δεν παρέχουν κανένα στοιχείο για την εσωτερική δομή της, με την έννοια της γεωμετρίας των πτερυγώσεων ή του διαχύτη.

Αντίστοιχα με τον συντελεστή φόρτισης, μπορεί να ορισθεί και ο λεγόμενος ισεντροπικός συντελεστής φόρτισης Ψ_{is} :

$$\Psi_{is} = \frac{\Delta h_{0is}}{U_2^2} = \frac{h_{03s} - h_{01s}}{U_2^2} \quad (4.3)$$

Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών συντελεστών είναι προφανής αφού εύκολα διαπιστώνουμε, ότι ο μεν αναφέρεται σε πραγματική μεταβολή ο δε στην εξιδανικευμένη ισεντροπική μεταβολή.

Οι δύο αυτοί συντελεστές συνδέονται μεταξύ τους, μέσω του ισεντροπικού βαθμού αποδόσεως:

$$\eta_{isc} = \Psi_{is} / \Psi \quad (4.4)$$

Εναλλακτικά όταν αναφερόμαστε σε όλο το συμπιεστή αντί για το Ψ χρησιμοποιείται το σύμβολο K_{is} .

Οι συντελεστές παροχής και φόρτισης που ορίστηκαν παραπάνω, είναι εξαιρετικά χρήσιμοι, διότι μας βοηθούν να περιγράψουμε το πεδίο λειτουργίας ενός συμπιεστή, υπό τη μορφή δύο μοναδικών καμπύλων.

Πιο συγκεκριμένα, οι καμπύλες $K_{is} = K_{is}(\Phi_{avg})$ και $\eta_{is} = \eta_{is}(\Phi_{avg})$ δίνουν ενιαία πειραματική καμπύλη με πολύ μικρή διασπορά σημείων. Αυτή η διαπίστωση είναι εξαιρετικά σημαντική διότι ουσιαστικά μας επιτρέπει να απεικονίσουμε τον χάρτη λειτουργίας ενός συμπιεστή με την βοήθεια μόνο των δύο αυτών καμπυλών.

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει ένας τυπικός χάρτης επιδόσεων λειτουργίας ενός συμπιεστή συντίθεται από καμπύλες σταθερής ταχύτητας περιστροφής, στις οποίες υπερτίθενται ισούψείς ισεντροπικού βαθμού απόδοσης. Το σύνολο λοιπόν των καμπυλών αυτών αντικαθίσταται από τις δύο μοναδικές καμπύλες $K_{is} = K_{is}(\Phi_{avg})$ και $\eta_{is} = \eta_{is}(\Phi_{avg})$.

Αυτό που ενδιαφέρει αρχικά, είναι να εξετάσουμε κατά πόσο οι συγκεκριμένες καμπύλες αποδίδουν αξιόπιστα τον χάρτη του συμπιεστή.

Βέβαια, για να αξιολογήσουμε την καταλληλότητα των καμπυλών αυτών, είναι απαραίτητο να θεωρήσουμε ως δεδομένο ολόκληρο τον χάρτη ενός συμπιεστή.

Έτσι, μπορούμε επιλέγοντας κάποια σημεία λειτουργίας του συμπιεστή, και υπολογίζοντας εν συνεχεία τους αδιάστατους συντελεστές K_{is} και Φ_{avg} , να ελέγξουμε αν τα εν λόγω σημεία προσαρμόζονται ικανοποιητικά στις δύο καμπύλες.

Συνοπτικά για την αξιολόγηση της υπάρχουσας μεθόδου ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Είσοδος δεδομένων από πραγματικό χάρτη λειτουργίας συμπιεστή
- Υπολογισμός αδιάστατων παραγόντων K_{is} και Φ_{avg}
- Αριθμητική προσέγγιση καμπύλων με πολυώνυμα $2^{ου}$ βαθμού $K_{is} = K_{is}(\Phi_{avg})$ και $\eta_{is} = \eta_{is}(\Phi_{avg})$
- Με βάση τις υπολογισμένες προσεγγιστικές καμπύλες, μέσω ανάστροφης διαδικασίας, αναπαράσταση των χαρτών λειτουργίας.

Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η μεθοδολογία αναλύεται λεπτομερώς παρακάτω.

4.2 Μεθοδολογία - Σχέσεις

Ο κώδικας και η μέθοδος όπως προείπαμε χρησιμοποιεί σαν είσοδο σημεία του χάρτη που προσπαθούμε να αναπαράγουμε. Γνωστά λοιπόν μεγέθη αποτελούν η ταχύτητα περιστροφής N , η παροχή μάζας \dot{m} , ο λόγος πίεσης Π_C , καθώς και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης η_{isc} .

Αρχικά υπολογίζονται οι λόγοι θερμοκρασιών άρα και οι θερμοκρασίες στην έξοδο του συμπιεστή- της ισεντροπικής αλλά και της πραγματικής μεταβολής, δεδομένα απαραίτητα για την μετέπειτα εύρεση των αδιάστατων παραγόντων.

Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι γνωστές από την θεωρία των στροβιλομηχανών, για την θερμοκρασία στην ισεντροπική μεταβολή ισχύει :

$$T_{03s} = \Pi_C^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} T_{01} \quad (4.5)$$

,όπου T_{01} η θερμοκρασία που επικρατεί στην είσοδο του συμπιεστή και γ ο λόγος των ειδικών γραμμομοριακών θερμοχωρητικότητων του αέρα που δίνεται από τη σχέση $\gamma = C_p/C_v$. Ενώ για την πραγματική μεταβολή έχουμε:

$$T_{03} = \left(1 + \frac{Cp_{01}^{03s} \left[\left(\frac{T_{03s}}{T_{01}} \right) - 1 \right]}{Cp_{01}^{03} \eta_{isc}} \right) T_{01} \quad (4.6)$$

,όπου Cp_{01}^{03s} ενώ Cp_{01}^{03} οι τιμές της μέσης μοριακής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση για την ισεντροπική και την πραγματική μεταβολή αντίστοιχα.

Το εργαζόμενο μέσο θεωρείται τέλειο αέριο, ενώ οι θερμοδυναμικές ιδιότητές του σταθερές. Για αυτό το λόγο ισχύει $Cp_{01}^{03s} = Cp_{01}^{03}$.

Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, πως παρόλο που το σφάλμα στην περίπτωση της παραδοχής για σταθερές θερμοδυναμικές ιδιότητες για το εργαζόμενο μέσο, δεν είναι στατιστικά σημαντικό, ο υπολογισμός των ιδιοτήτων (C_p, R, C_v, γ) έγινε με χρήση των θερμοδυναμικών σχέσεων στη μέση θερμοκρασία μεταξύ της πραγματικής και της ισεντροπικής για κάθε σημείο ξεχωριστά. Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα μείωση του ήδη μη σημαντικού στατιστικά σφάλματος.

Στη συνέχεια και πριν γίνει ο υπολογισμός των αδιάστατων παραγόντων, η παροχή μάζας και οι στροφές «διορθώθηκαν» ως εξής:

$$\dot{m}_{COR} = \dot{m} \sqrt{\frac{T_{01} p_{REF}}{T_{REF} p_{01}}} \quad (4.7)$$

$$N_{COR} = N \sqrt{\frac{T_{REF}}{T_{01}}} \quad (4.8)$$

,έτσι ώστε να αποτελούν μεγέθη ανηγμένα σε συνθήκες αναφοράς p_{REF} και T_{REF} .

Πλέον είναι πολύ εύκολη η εύρεση των αδιάστατων παραγόντων K_{is} και Φ_{avg} από τις σχέσεις που ακολουθούν:

$$\begin{aligned}\Phi_{avg} &= \frac{\dot{V}_1 + \dot{V}_3}{2A_2 U_2} = \frac{1}{2A_2 \frac{\pi N}{30} R_2} \dot{m} \left\{ \frac{1}{\rho_{01}} + \frac{1}{\rho_{03}} \right\} = \frac{1}{A_2 R_2} \frac{15 \dot{m}}{\pi N} R_{atm} \left\{ \frac{T_{01}}{p_{01}} + \frac{T_{03}}{p_{03}} \right\} \\ &= \frac{1}{A_2 R_2} \frac{15 \dot{m}}{\pi N} R_{atm} \frac{T_{01}}{p_{01}} \left\{ 1 + \frac{T_{03}/p_{03}}{T_{01}/p_{01}} \right\} = \frac{1}{A_2 R_2} \frac{15 \dot{m} \sqrt{T_{01}}}{\pi p_{01}} \frac{1}{N/\sqrt{T_{01}}} R_{atm} \left\{ 1 + \frac{T_{03}/T_{01}}{\Pi_C} \right\}\end{aligned}\quad (4.9)$$

,όπου $U_2 = \frac{\pi N}{30} R_2$, η περιφερειακή ταχύτητα με N την ταχύτητα περοστροφής

$\Pi_C = p_{03}/p_{01}$, ο λόγος ολικών πιέσεων του συμπιεστή.

Σημειώνεται πως έγινε χρήση της καταστατικής εξίσωσης των τέλειων αερίων $p = \rho RT$.

$$\begin{aligned}K_{is} &= \frac{\Delta h_{0is}}{U_2^2} = \frac{h_{03s} - h_{01s}}{U_2^2} = \frac{Cp_{01}^{03s} (T_{03s} - T_{01})}{\left(\frac{\pi N}{30} R_2\right)^2} = \frac{1}{R_2^2} \frac{900}{\pi^2} \frac{1}{N^2} Cp_{01}^{03s} T_{01} \left[\left(\frac{T_{03s}}{T_{01}} \right) - 1 \right] \\ K_{is} &= \frac{1}{R_2^2} \frac{900}{\pi^2} \frac{1}{(N/\sqrt{T_{01}})^2} Cp_{01}^{03s} \left[\left(\frac{T_{03s}}{T_{01}} \right) - 1 \right]\end{aligned}\quad (4.10)$$

Ο λόγος που εκφράσαμε όλα τα σχετικά μεγέθη με τον παραπάνω τρόπο, είναι διότι οι ποσότητες $\frac{\dot{m} \sqrt{T_{01}}}{p_{01}}$ και $N/\sqrt{T_{01}}$ διαβάζονται άμεσα από τον χάρτη λειτουργίας που

διαθέτουμε.

Βέβαια όπως προαναφέραμε, η παροχή μάζας καθώς και οι ταχύτητα περιστροφής έχουν «διορθωθεί» άρα οι παραπάνω σχέσεις διαμορφώνονται ως εξής:

$$\Phi_{avg} = \frac{1}{A_2 R_2} \frac{15}{\pi} \frac{T_{REF}}{p_{REF}} \dot{m}_{COR} \frac{1}{N_{COR}} R_{atm} \left\{ 1 + \frac{T_{03}/T_{01}}{\Pi_C} \right\}\quad (4.11)$$

$$K_{is} = \frac{1}{R_2^2} \frac{900}{\pi^2} T_{REF} \frac{1}{N_{COR}^2} Cp_{01}^{03s} \left[\left(\frac{T_{03s}}{T_{01}} \right) - 1 \right]\quad (4.12)$$

Παρατηρώντας τις παραπάνω σχέσεις μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι σε γενική μορφή οι συντελεστές παροχής και φόρτισης εκφράζονται ως εξής:

$$\Phi_{avg} = \text{σταθερά} \cdot \text{παροχή} \cdot \frac{1}{\text{ταχύτητα}} \cdot \left\{ 1 + \frac{T_{03}/T_{01}}{\Pi_C} \right\}\quad (4.13)$$

$$K_{is} = \text{σταθερά} \cdot \frac{1}{\text{ταχύτητα}^2} \cdot Cp_{01}^{03s} \left[\left(\frac{T_{03s}}{T_{01}} \right) - 1 \right]\quad (4.14)$$

Ο σταθερός όρος περιλαμβάνει όλα τα μεγέθη τα οποία είτε είναι αριθμητικές σταθερές, είτε γεωμετρικά στοιχεία που επίσης αποτελούν σταθερούς όρους, για έναν δεδομένο συμπίεστη κάθε φορά (όχι μεταβλητής γεωμετρίας).

Θυμίζουμε, ότι οι συντελεστές K_{is} και Φ_{avg} αποτελούν αδιάστατες ποσότητες και επομένως όλα τα εμπλεκόμενα μεγέθη θα πρέπει να εκφράζονται στο ίδιο σύστημα μονάδων SI.

Παρατηρούμε επίσης ότι στις σχέσεις υπολογισμού των μεγεθών K_{is} και Φ_{avg} υπεισέρχονται όροι που σχετίζονται άμεσα με τη γεωμετρία του συμπίεστη. Πιο συγκεκριμένα η ακτίνα στη έξοδο της πτερωτής R_2 καθώς και η αντίστοιχη επιφάνεια A_2 .

Βέβαια δεν έχουμε στη διάθεση μας κανένα από αυτά τα γεωμετρικά στοιχεία. Αυτό όμως δεν συνιστά πρόβλημα. Αυτό συμβαίνει επειδή, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τις σχέσεις, οι όροι που περιέχουν τα άγνωστα σε εμάς δεδομένα του συμπίεστη, αποτελούν ουσιαστικά πολλαπλασιαστικό παράγοντα, που επιπλέον είναι και κοινοί για όλα τα σημεία λειτουργίας, εφόσον βέβαια αναφερόμαστε στην ίδια μηχανή.

Πολύ εύκολα λοιπόν, μπορούμε να παραλείψουμε τους εν λόγω όρους, με μόνη επίδραση στη διαμόρφωση της τελικής τιμής των K_{is} και Φ_{avg} , ως απόλυτων μεγεθών, χωρίς όμως να αλλοιώνεται η σχετική θέση των σημείων, που όμως είναι και αυτό που μας ενδιαφέρει.

Το παραπάνω πόρισμα διευρύνεται και ισχύει προφανώς και για τις υπόλοιπες αριθμητικές σταθερές και όχι μόνο αυτές που αφορούν στη γεωμετρία για την οποία έγινε λόγος. Εφίσταται η προσοχή όμως στο ότι, σε όποιες μονάδες και εάν αποφασίσουμε τελικά να εκφράζουμε τα διάφορα μεγέθη, δεσμευόμαστε να τις εφαρμόσουμε για όλα τα σημεία, αλλιώς θα οδηγηθούμε σε λανθασμένα αποτελέσματα.

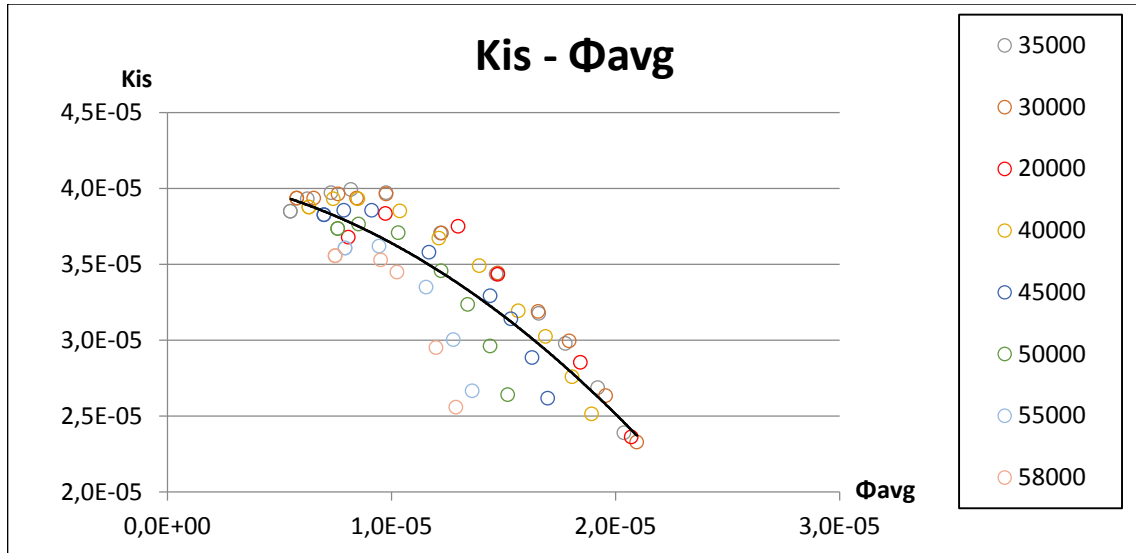
Η ίδια απαίτηση τίθεται και για την περίπτωση της αντίστροφης διαδικασίας που θα ακολουθήσει. Όταν δηλαδή θα προσπαθήσουμε έχοντας ήδη εκτιμήσει τις συναρτήσεις $K_{is} = K_{is}(\Phi_{avg})$ και $\eta_{is} = \eta_{is}(\Phi_{avg})$ να φτάσουμε στο χάρτη λειτουργίας εκ νέου, είμαστε υποχρεωμένοι να διατηρήσουμε τον ίδιο τρόπο υπολογισμού και τις ίδιες μονάδες.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τις σχέσεις υπολογίζονται τα ζεύγη K_{is} και Φ_{avg} για κάθε σημείο λειτουργίας που έχει δοθεί ως είσοδος .

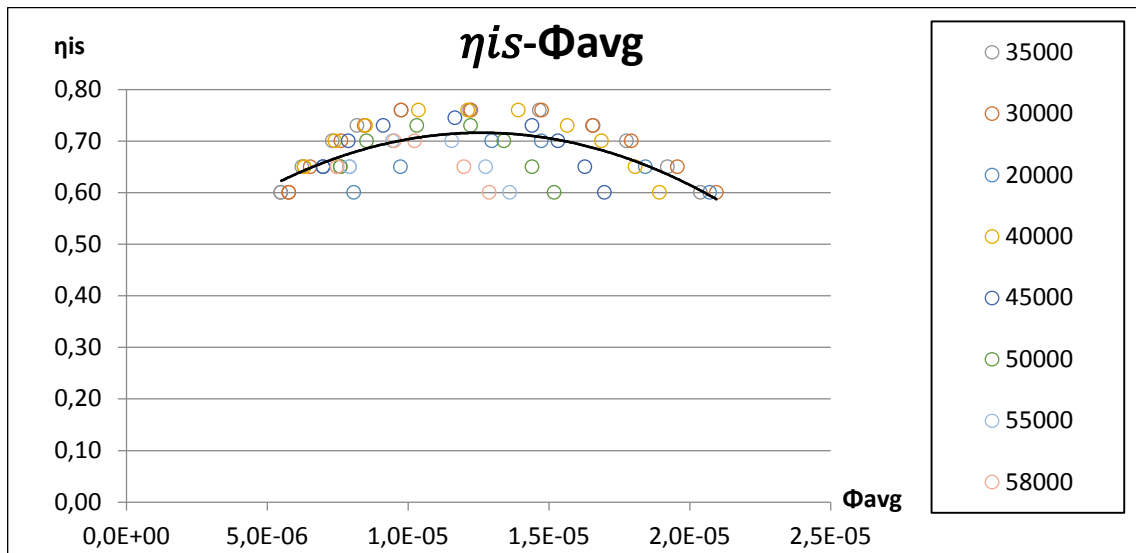
Στη συνέχεια με τη βοήθεια της πολυωνυμικής παλινδρόμησης προσεγγίζουμε τις καμπύλες των συναρτήσεων $K_{is} = K_{is}(\Phi_{avg})$ και $\eta_{is} = \eta_{is}(\Phi_{avg})$.

Το αποτέλεσμα και στις δύο περιπτώσεις είναι ένα πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού με αρνητική κλίση, δηλαδή της μορφής $ax^2 + bx + c = 0$, με $a < 0$. Η προσαρμογή είναι ικανοποιητική για τον ισεντροπικό συντελεστή φόρτισης και λιγότερο για τον βαθμό απόδοσης, όπου παρατηρείται εξάρτηση και από την ταχύτητα περιστροφής

Παρακάτω παραθέτουμε ένα παράδειγμα καμπύλων όπως προέκυψαν από την μέθοδο για έναν από τους χάρτες συμπίεστη που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της μεθόδου.



Σχήμα 1 $K_{is} = K_{is}(\Phi_{avg})$ για τυπικό χάρτη συμπίεστί



Σχήμα 2 $\eta_{is} = \eta_{is}(\Phi_{avg})$ για τυπικό χάρτη συμπίεστί

Σε αυτό το σημείο έχοντας υπολογίσει τα πολυώνυμα ξεκινά η αντίστροφη διαδικασία, η αναπαράγωγή του χάρτη έχοντας ως δεδομένα μόνο τα πολυώνυμα και τις συνθήκες αναφοράς.

Η διαδικασία ξεκινά για κάθε σημείο που προσπαθούμε να αναπαράγουμε. Αρχικά επιλέγεται μια τιμή αναφοράς για το Φ'_{avg} , κοντά σε εκείνη που υπολογίστηκε για το εκάστοτε σημείο που εξετάζεται. Με βάση αυτή τη τιμή υπολογίζουμε από τα πολυώνυμα τα μεγέθη K'_{is} και η'_{is} . Λύνοντας την γνωστή σχέση για τον συντελεστή φόρτισης ως προς την ισοτροπική θερμοκρασία έχουμε:

$$T'_{03s} = T_{01} \left[1 + \frac{N_{COR}^2 K'_{is}}{T_{REF} p_{01}^{0,35}} \right] \quad (4.15)$$

, όλα τα εμφανιζόμενα μεγέθη είναι γνωστά άρα υπολογίζουμε την T'_{03s} .

Από τον ορισμό του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης, λύνοντας ως προς την θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή έχουμε:

$$T'_{03} = \left(1 + \frac{c_{p_{01}^{03s}} \left[\left(\frac{T'_{03s}}{T_{01}} \right)^{\gamma} - 1 \right]}{c_{p_{01}^{03}} \eta_{is}} \right) T_{01} \quad (4.16)$$

, όλα τα εμφανιζόμενα μεγέθη είναι γνωστά άρα υπολογίζουμε την T'_{03} .

Πλέον υπολογίζεται πολύ εύκολα και ο λόγος πιέσεων Π_C , χρησιμοποιώντας γνωστή σχέση :

$$\Pi_C = \left(\frac{T'_{03s}}{T_{01}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4.17)$$

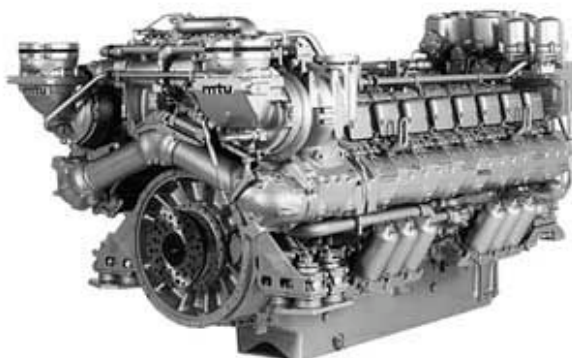
Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για κάθε σημείο του δοσμένου κάθε φορά ως εισόδου χάρτη και ο νέος χάρτης λαμβάνει μορφή υπό τη μορφή σημείων $(N, \dot{m}, \Pi_C, \eta_{is})$.

4.3 Χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν

Για την μελέτη και αξιολόγηση της μεθόδου επιλέχθηκε ένα εύρος χαρτών από σχετικά διαφορετικές εφαρμογές έτσι ώστε τα συμπεράσματα να είναι όσον το δυνατόν καθολικότερα. Οι χάρτες καθώς και πληροφορίες για τους συμπιεστές - κινητήρες δίνονται παρακάτω.

4.3.1 MTU - 396

Ο πρώτος χάρτης που έχουμε στη διάθεσή μας, είναι ενός συμπιεστή που προέρχεται από κινητήρα Ντήζελ της σειράς 396 της εταιρίας MTU. Οι κινητήρες αυτοί έχουν ιδιαίτερη εφαρμογή τόσο σε ναυτικές εφαρμογές για την πρόωση πλοίων - ιπτάμενων δελφινιών όσο και σε γενικού τύπου εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Οι κινητήρες έχουν διάταξη κυλίνδρων V, με το συνολικό αριθμό τους να είναι 8,12,16 ανάλογα με την έκδοση. Η μέγιστη ισχύς που αποδίδεται 1129kW, 1680kW και 2150kW αντίστοιχα.



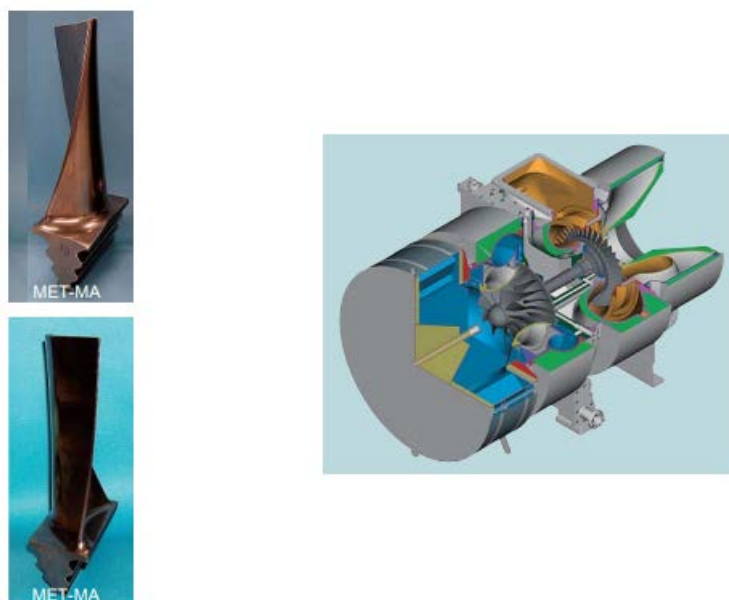
Σχήμα 4.1 Κινητήρας που χρησιμοποιεί υπερπληρωτή MTU -396.

4.3.2 Mitsubishi MET -66MA

Ο δεύτερος χάρτης προέρχεται από υπερπληρωτή της εταιρίας Mitsubishi. Ανήκει στη τελευταία γενιά υπερπληρωτών της εταιρίας που συνδυάζει σύγχρονη σχεδίαση και επιδόσεις. Η χρήση του αφορά σχεδόν αποκλειστικά ναυτικές εφαρμογές. Η ισχύς που αποδίδεται από τους κινητήρες στους οποίους γίνεται χρήση των εν λόγω υπερπληρωτών της σειράς κυμαίνεται από τα 1MW έως τα 25MW ανάλογα την εφαρμογή. Ο χάρτης μας προέρχεται από ναυτικό κινητήρα μεσαίου μεγέθους (frame size 66) και αποδίδει μέγιστη ισχύ της τάξεως των 13MW. Η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα περιστροφής είναι οι 15.150 στροφές/λεπτό. Περαιτέρω τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως δίνονται επίσημα παρατίθενται παρακάτω, όπως επίσης και τομή των πτερυγίων και του υπερπληρωτή.

Type		MET 66MA		MET 71MA	MET 83MA		MET 90MA
Particulars	Impeller Type	2	3	3	2	3	3
Maximum permissible speed	rpm (min ⁻¹)	15,150	14,300	13,210	11,960	11,300	10,240
Continuous allowable max. gas temperature before turbine	°C	580					
Momentary allowable max. gas temperature before turbine	°C	610					
Air flow (at pressure ratio 3.5)	m ³ /s	12.0 to 27.0		16.0 to 31.7	18.8 to 42.2		35.0 to 52.8
Lubricant inlet pressure	MPa	0.06 to 0.15					
Lubricant inlet temperature	°C	35 to 50					
Lubricant outlet temperature	°C	90 or less					

Σχήμα 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπληρωτή Mitsubishi MET -MA.



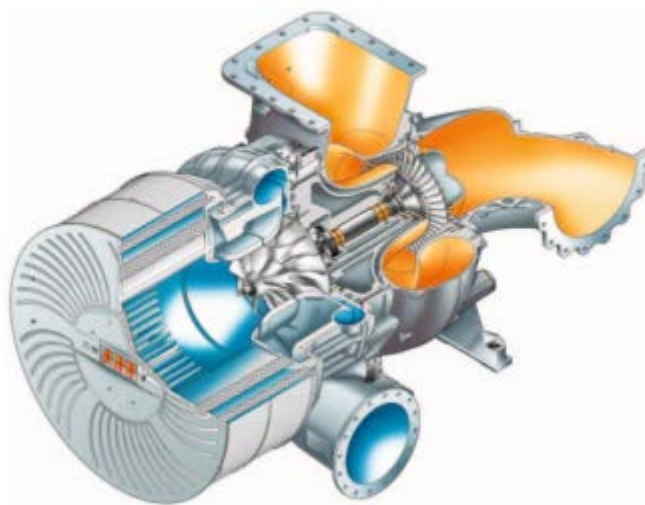
Σχήμα 4.3 Τομές πτερυγίων και ημιτομή υπερπληρωτή τύπου MET -MA.

4.3.3 ABB A-100L

Ο τρίτος χάρτης που έχουμε στη διάθεσή μας αφορά έναν υπερπληρωτή της εταιρίας ABB. Η χρήση του αφορά κυρίως σε μικρούς ναυτικούς κινητήρες, σχετικά μικρής παροχής, αποκλειστικά δίχρονους και βραδύστροφους. Επιτυγχάνει λόγους πίεσης έως και 4,2 ενώ ο συντελεστής απόδοσης του υπερπληρωτή είναι κοντά στο 75%. Παρακάτω φαίνεται χαρακτηριστικά το μέγεθος του υπερπληρωτή.



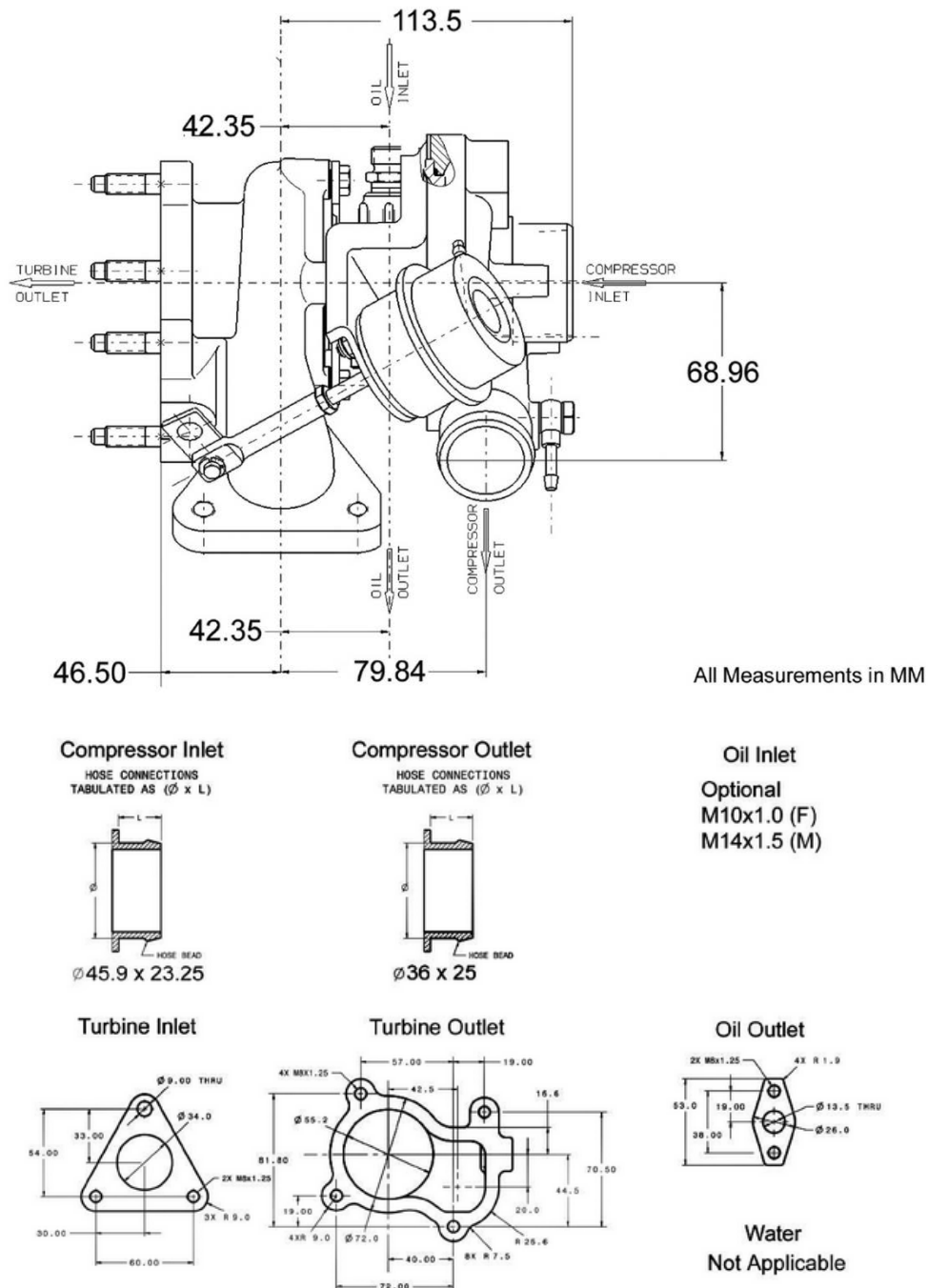
Σχήμα 4.4 Ο υπερπληρωτής A-100 L της ABB.



Σχήμα 4.5 Ημιτομή του υπερπληρωτή A-100 L .

4.3.4 Garrett GT15-44

Ο επόμενος χάρτης σε αντίθεση με τους προηγούμενους αφορά εφαρμογή σε αυτοκίνηση. Προέρχεται από υπερπληρωτή της εταιρίας Garrett και πιο συγκεκριμένα από τη σειρά GT-15. Η σειρά έχει 3 διαφορετικούς υπερπληρωτές με τις διαφορές να αφορούν στην κατασκευή και κυρίως στη φλάντζα. Είναι κατάλληλοι για κινητήρες 100-160 ίππων και 1000-1600 κυβικών εκατοστών. Παρακάτω παραθέτουμε στοιχεία που αφορούν τις διαστάσεις του υπερπληρωτή .



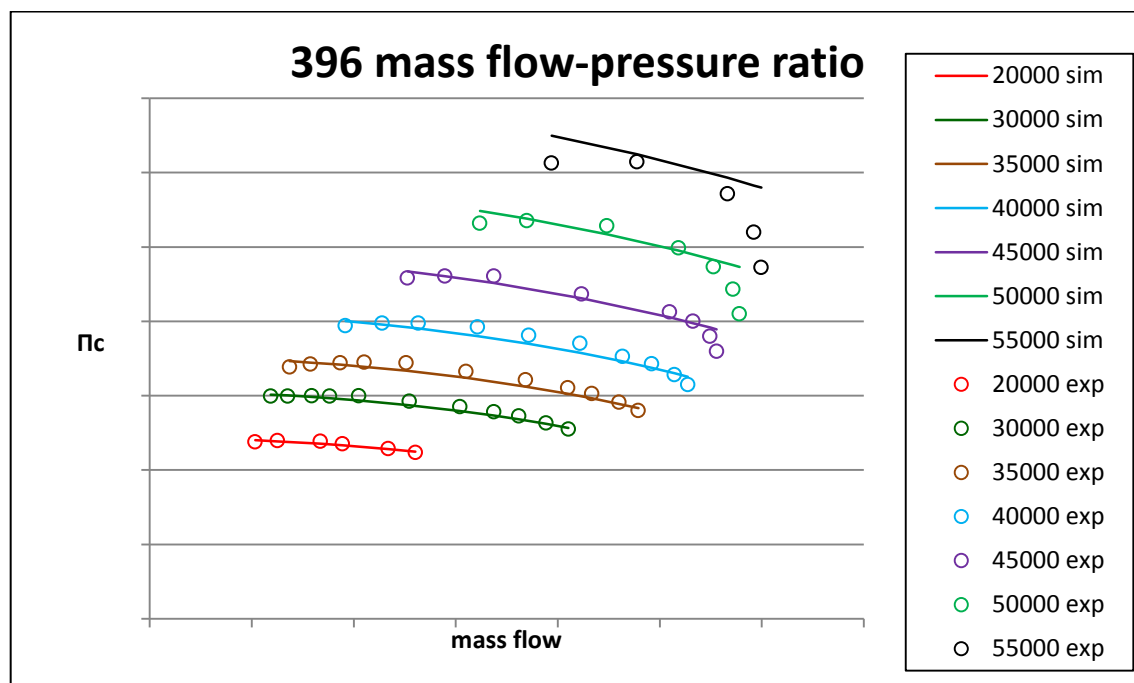
Σχήμα 4.6 Διαστάσεις και σκαρίφημα του υπερπληρωτή GT15-44 της Garrett.

4.3.5 Χάρτης βιβλιοθήκης του λογισμικού GT - Power

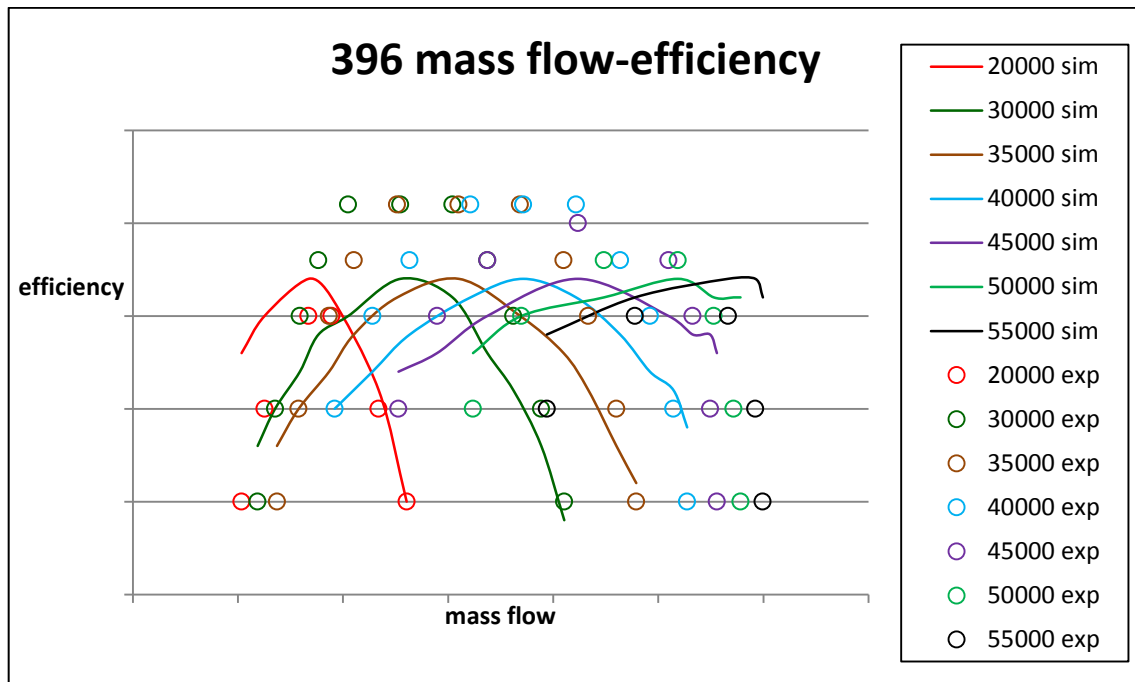
Ο τελευταίος χάρτης προήλθε από τη βιβλιοθήκη του λογισμικού GT-Power και αφορά υπερπληρωτή που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές κίνησης οχημάτων βαρέου τύπου. Επιλέχθηκε ώστε να καλύπτονται πλήρως όλες οι μορφές υπερπληρωτών, από κινητήρες αυτοκινήτου μέχρι ναυτικών εφαρμογών.

4.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για ολόκληρο τον χάρτη

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων, όταν σαν δεδομένο εισόδου το πρόγραμμα λαμβάνει ολόκληρο τον χάρτη. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον Microsoft Excel. Παρουσιάζονται διαγράμματα παροχής μάζας - λόγου πίεσης, καθώς και παροχής μάζας - ισεντροπικού βαθμού απόδοσης ($\dot{m} - \Pi_c, \dot{m} - \eta_{isc}$). Με *sim* συμβολίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (simulated), ενώ με *exp* τα πειραματικά δεδομένα που έχουν προέλθει από την ψηφιοποίηση των χαρτών (experimental). Για όλες τις περιπτώσεις στους χάρτες δεν παρουσιάζονται απόλυτα μεγέθη στους άξονες, δεδομένου ότι πρόκειται για εμπιστευτικά δεδομένα. Εξάιρεση αποτελεί ο χάρτης της παραγράφου 4.3.4, για τον οποίο δεδομένα βρέθηκαν στον ιστότοπο της κατασκευάστριας εταιρίας.



Σχήμα 3 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \Pi_c$)



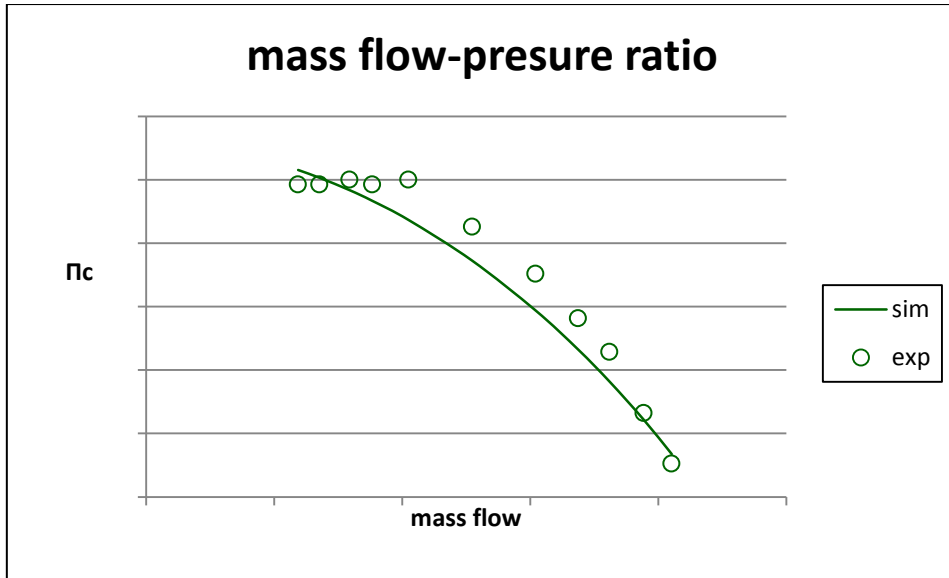
Σχήμα 4 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \eta_{isc}$)

Παρατηρούμε πως στις χαμηλές στροφές, για χαμηλές ταχύτητες περιστροφής η σύμπτωση των αποτελεσμάτων είναι πολύ καλή. Αυτό οφείλεται στο ότι τα φαινόμενα συμπίεσής της ροής είναι ελάχιστα, δεδομένο ότι τόσο ο λόγος πίεσης όσο και ο αριθμός Mach είναι σε χαμηλά επίπεδα. Όσο η ταχύτητα αυξάνεται παρουσιάζονται κάποιες «αστοχίες», κυρίως στα σημεία με τη μεγαλύτερη παροχή σε κάθε ισοταχή καμπύλη. Ιδιαίτερα στην ισοταχή με τη μεγαλύτερη ταχύτητα τα σημεία που υπολογίστηκαν απέχουν σημαντικά από τα σημεία του αρχικού χάρτη.

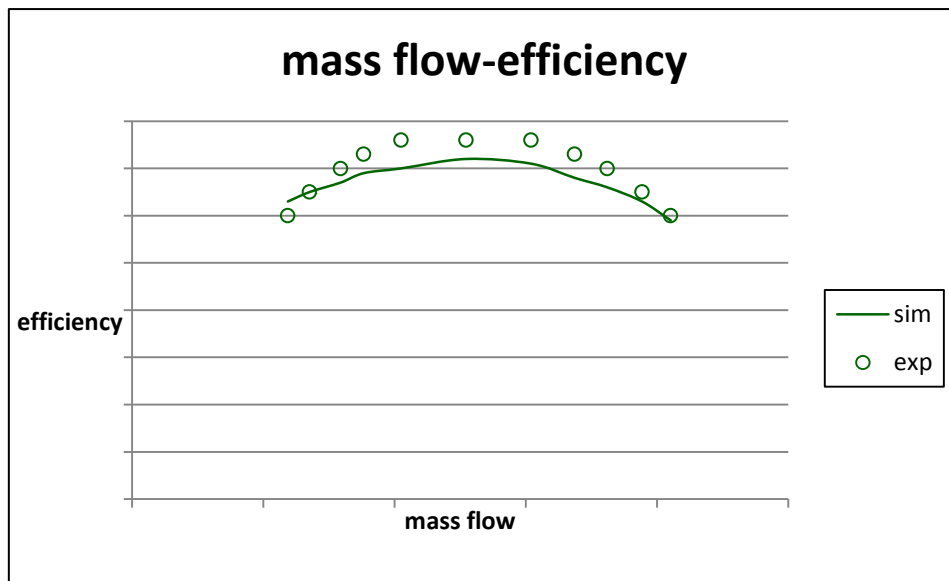
Όσον αφορά τις καμπύλες $\dot{m} - \eta_{isc}$, παρόλο που υπάρχει μια σχετική σύμπτωση, παρατηρούμε πως σε αρκετές περιπτώσεις ο υπολογισμός απέχει από την πραγματική τιμή πλέον του 5%, ιδιαίτερα στην περιοχή των υψηλών στροφών.

Όλα αυτά, φαίνονται καλύτερα στα διαγράμματα που ακολουθούν και αφορούν κάθε ισοταχή ξεχωριστά.

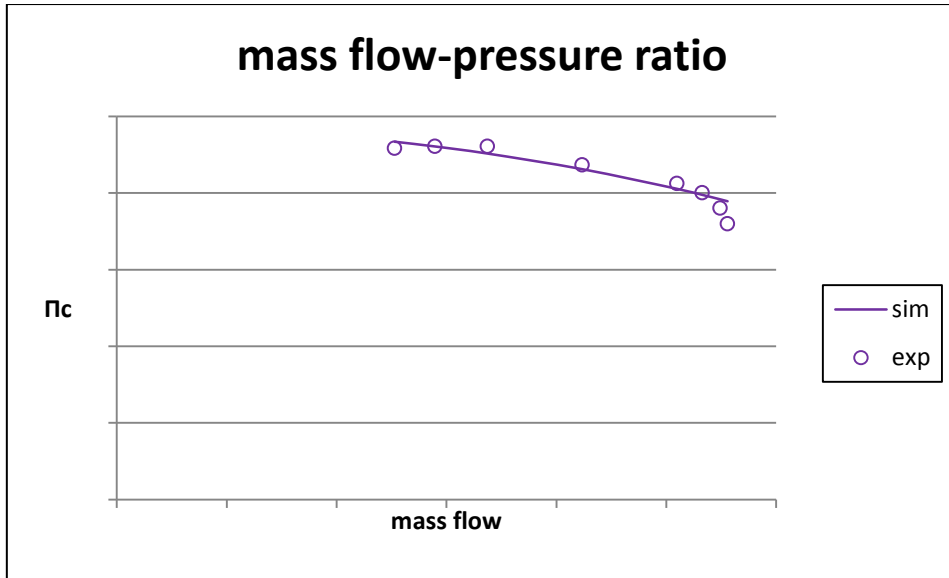
Ενδεικτικά θα παραθέσουμε διαγράμματα που αφορούν τις χαμηλές, τις μεσαίες και τις υψηλές στροφές.



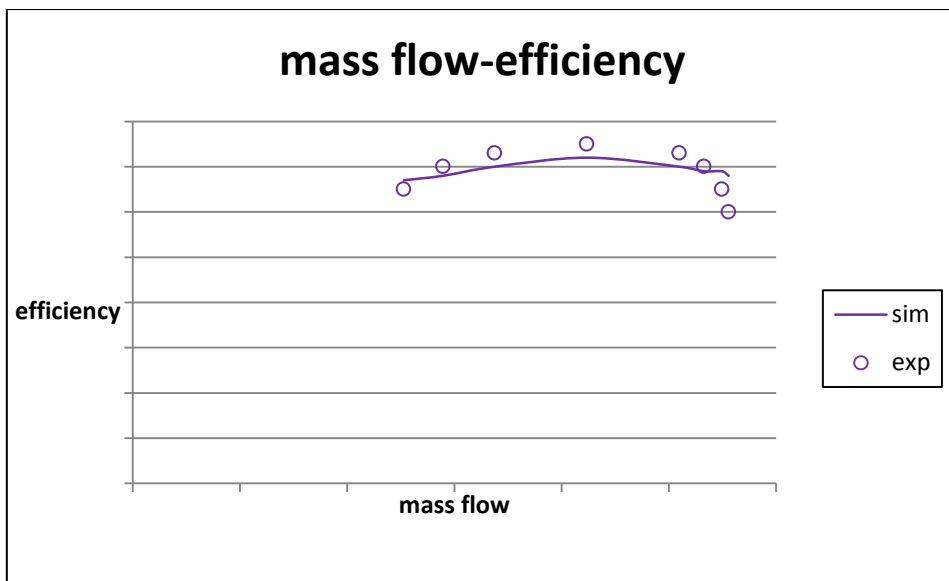
Σχήμα 5 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - P_c$) -30000rpm



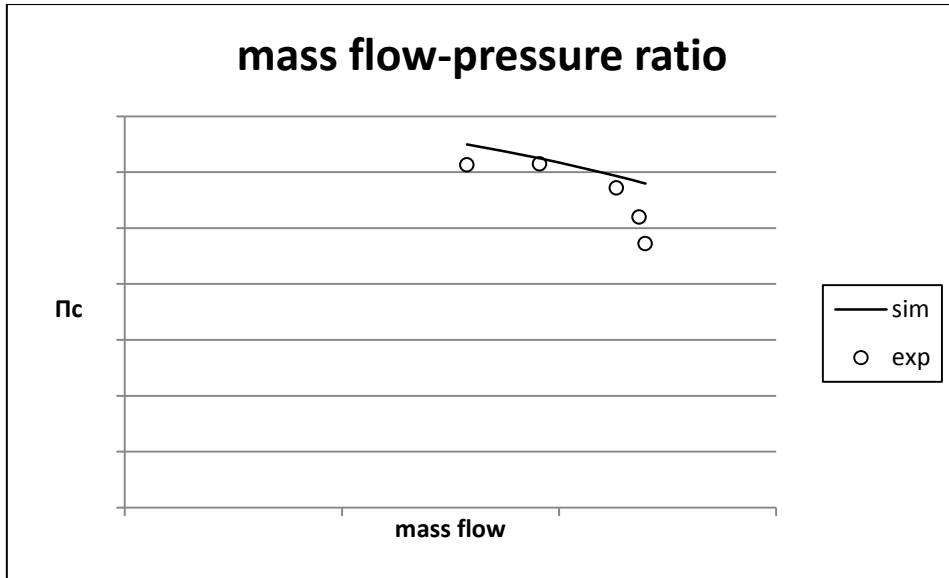
Σχήμα 6 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \eta_{isc}$) -30000rpm



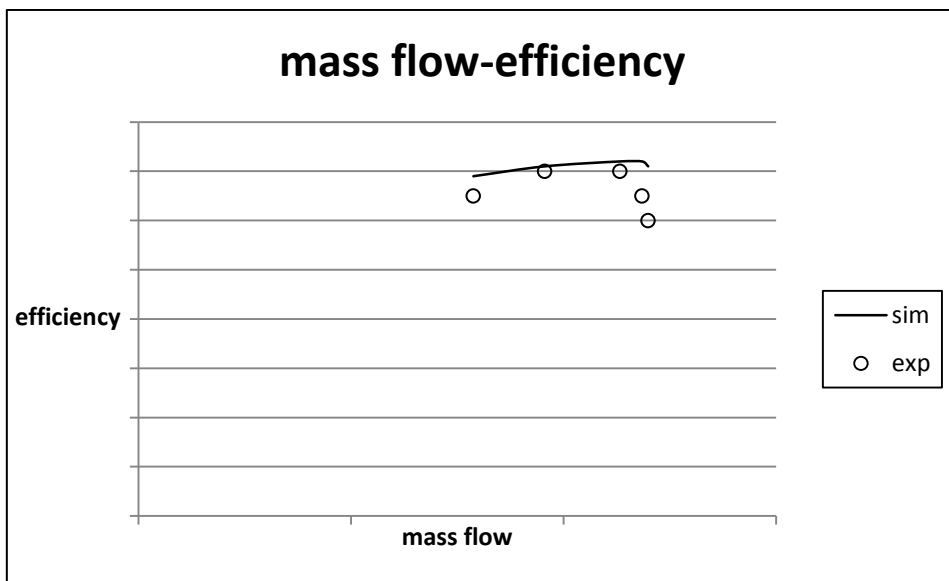
Σχήμα 7 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - P_c$)-45000rpm



Σχήμα 8 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \eta_{isc}$)-45000rpm

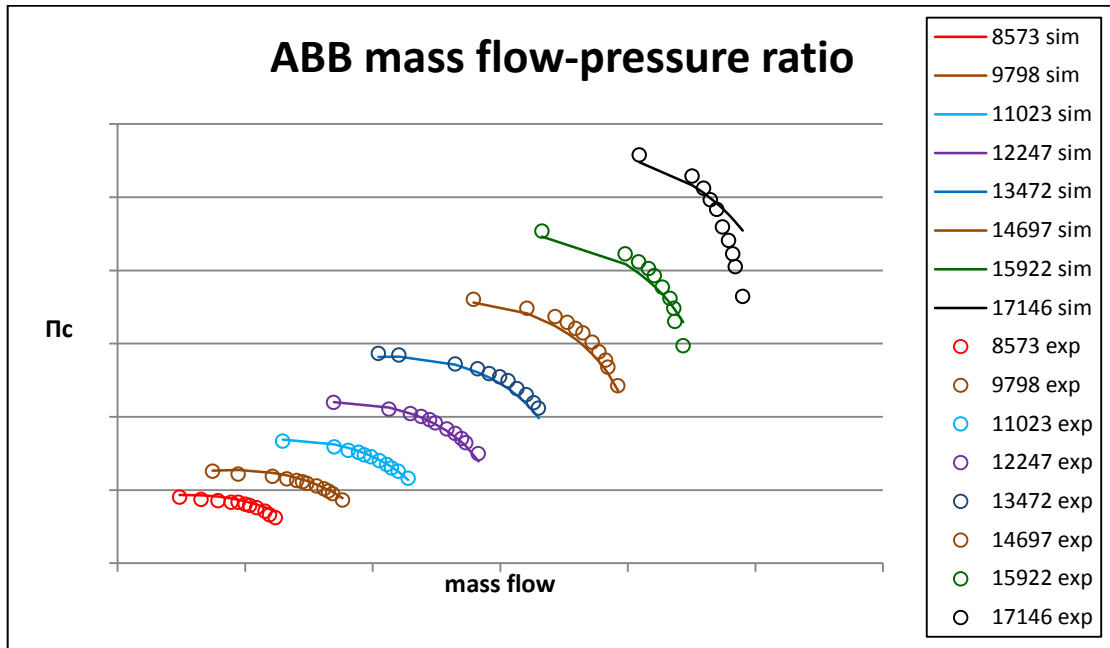


Σχήμα 9 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - P_c$) -55000rpm

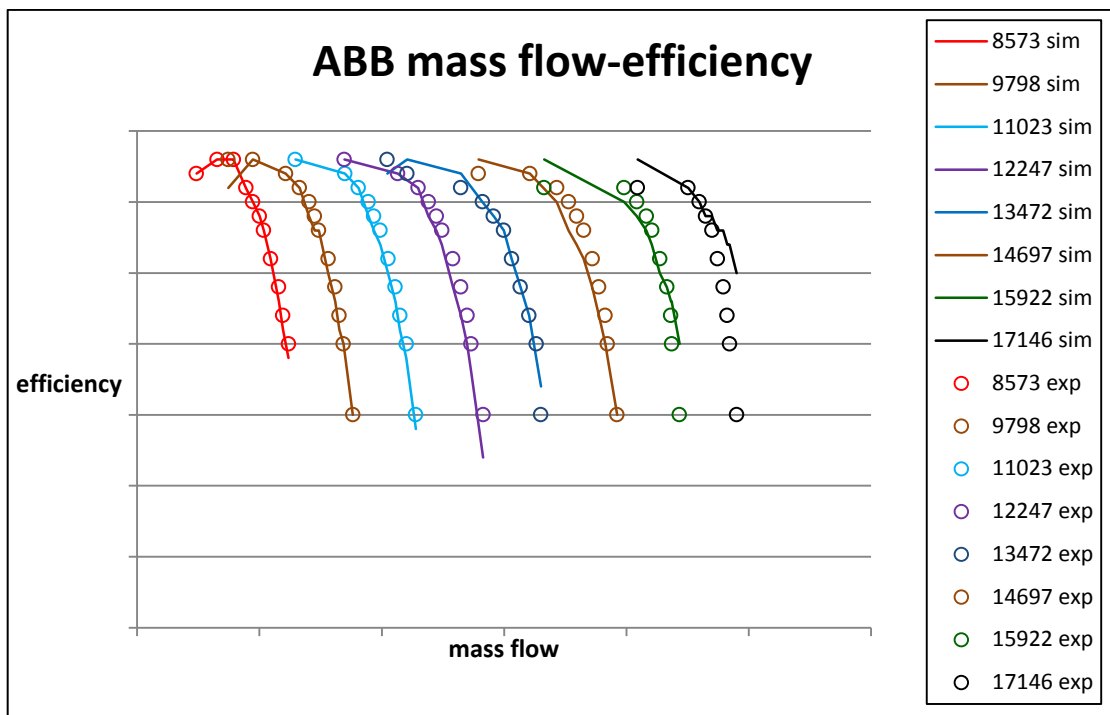


Σχήμα 10 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \eta_{isc}$) -55000rpm

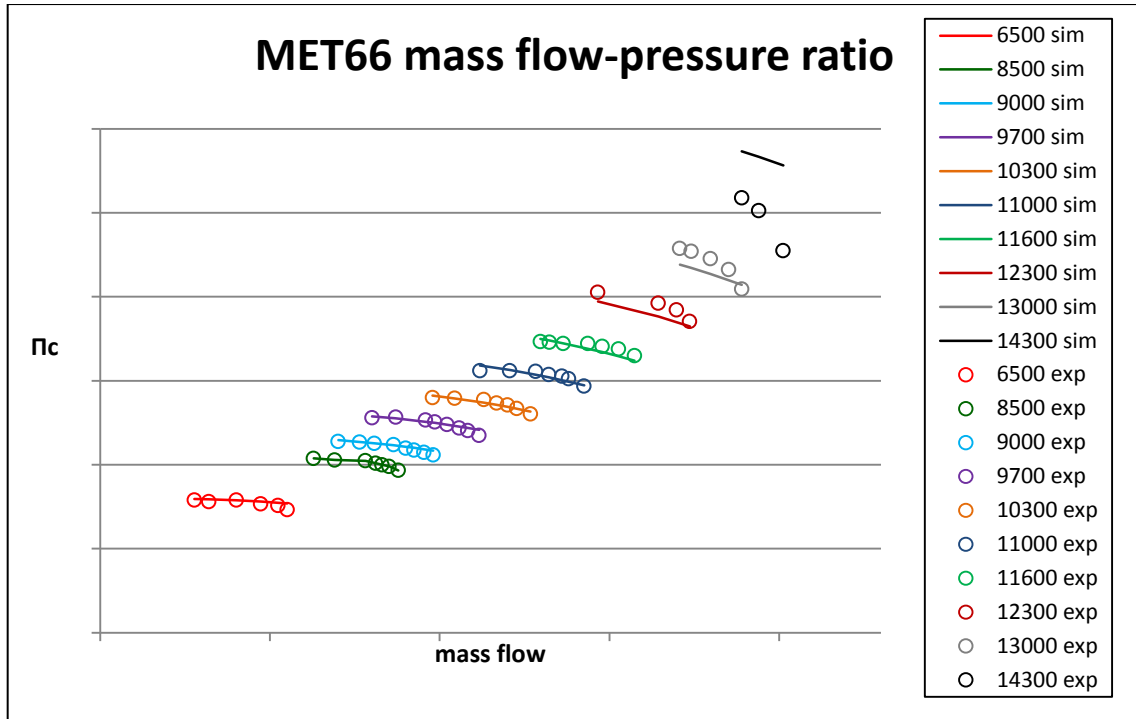
Παρόμοια διαγράμματα κατασκευάστηκαν και για τους υπόλοιπους χάρτες που είχαμε στη διάθεση μας. Τα συμπεράσματα δεν διαφέρουν σημαντικά από αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Βέβαια, υπάρχουν διαφορές ανάλογα με την εφαρμογή, κυρίως όσον αφορά τη μορφή του χάρτη αλλά και την ακρίβεια της προσομοίωσης. Παρόλα αυτά σε γενικές γραμμές η συμπεριφορά της μεθόδου αξιολογείται κατά τον ίδιο τρόπο όπως ανωτέρω.



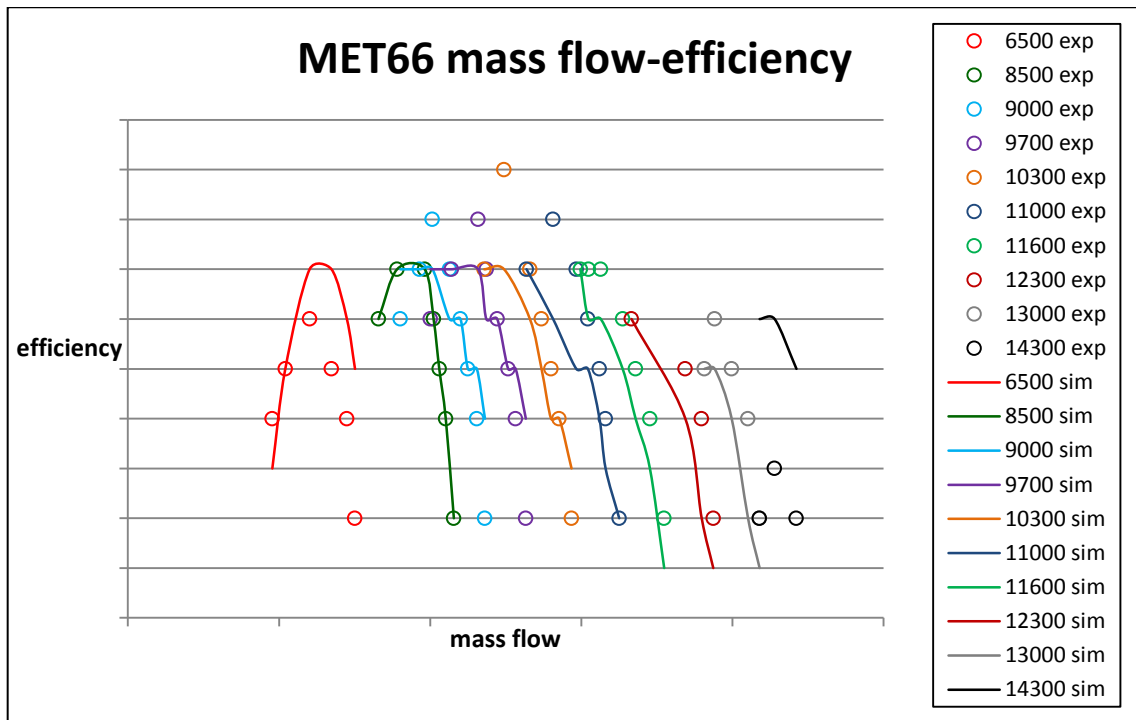
Σχήμα 11 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή Abb ($\dot{m} - \Pi_c$)



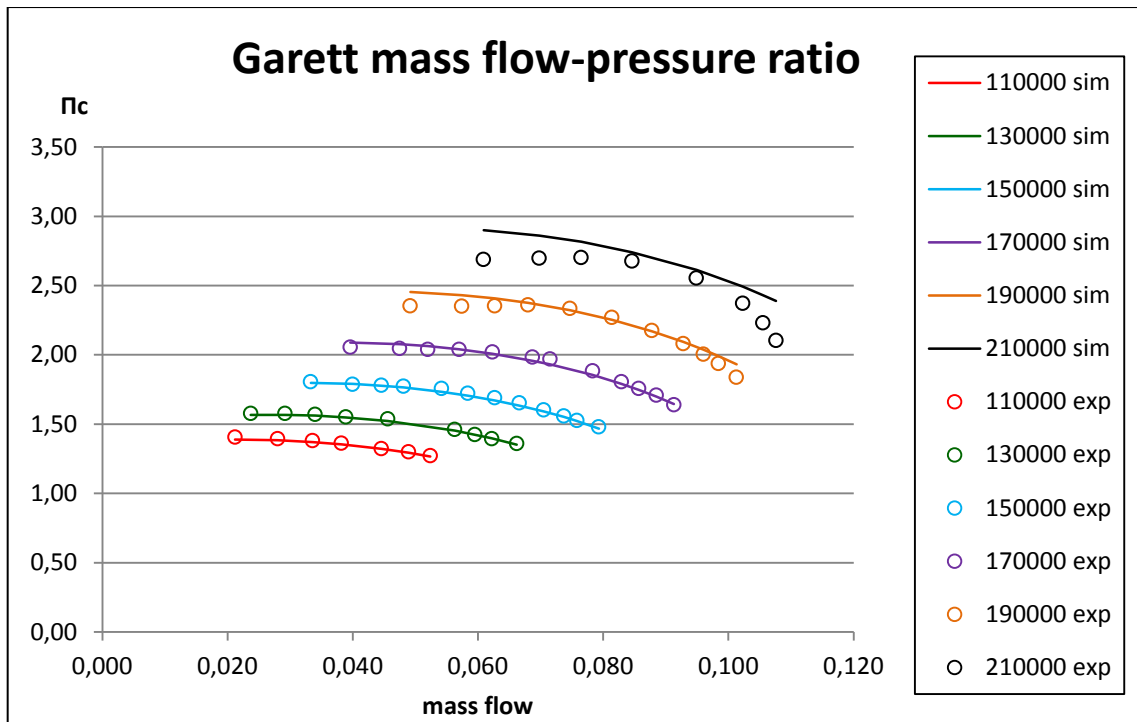
Σχήμα 12 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή Abb ($\dot{m} - \eta_{isc}$)



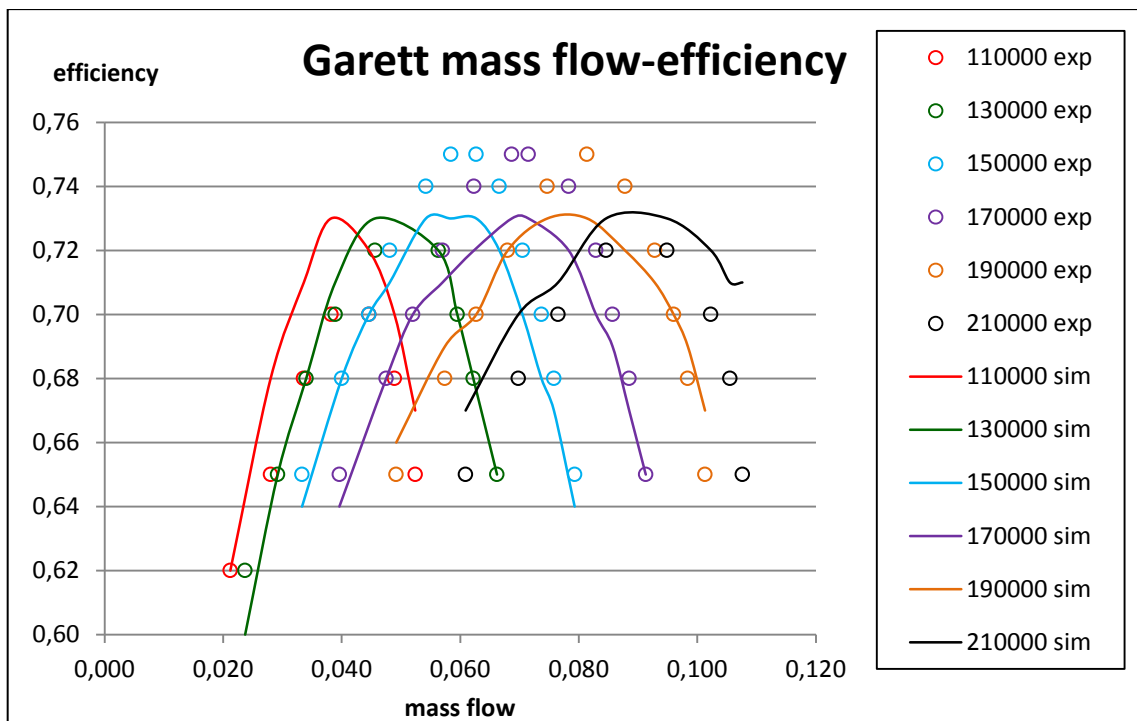
Σχήμα 13 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή MET 66 MA ($\dot{m} - \Pi_c$)



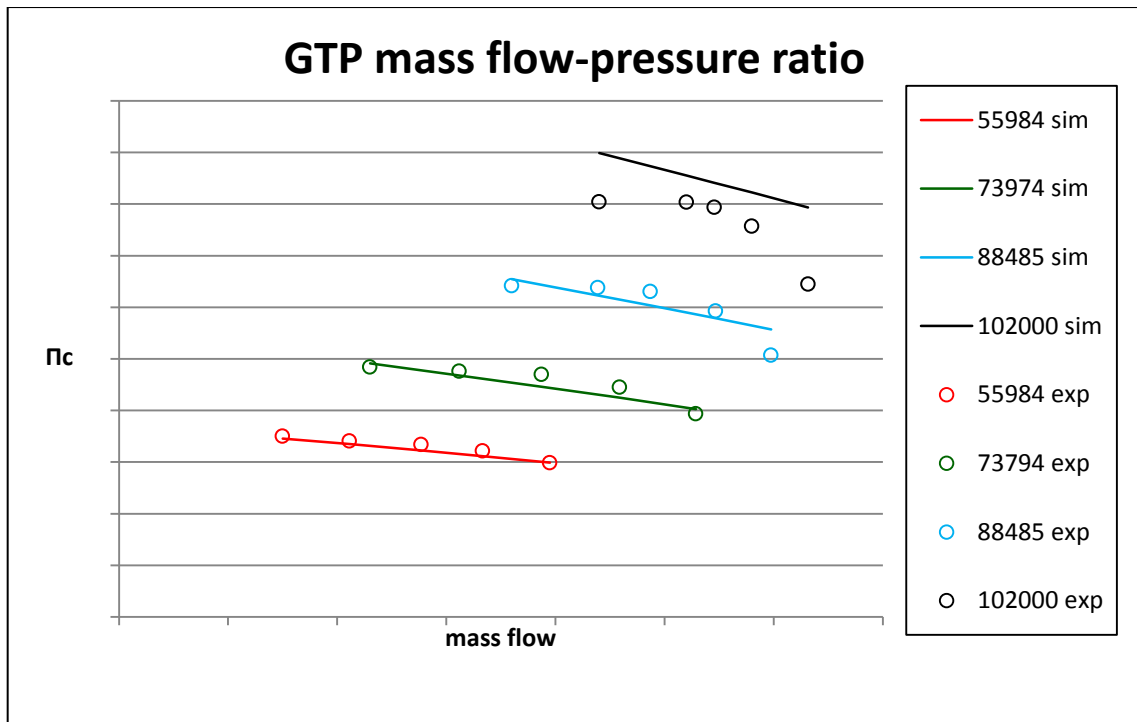
Σχήμα 14 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή MET 66 MA ($\dot{m} - \eta_{isc}$)



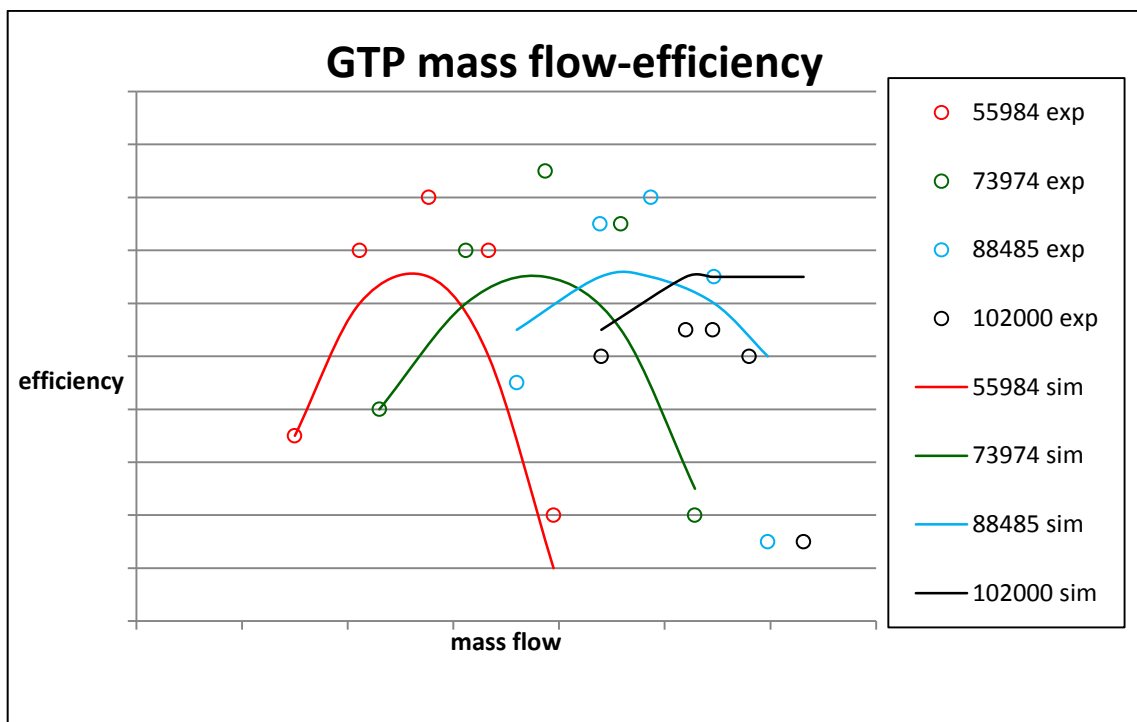
Σχήμα 15 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή Garrett ($\dot{m} - \Pi_c$)



Σχήμα 16 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή Garrett ($\dot{m} - \eta_{isc}$)



Σχήμα 17 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή GT-Power ($\dot{m} - \Pi_c$)



Σχήμα 18 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή GT-Power ($\dot{m} - \eta_{isc}$)

4.5 Μεθοδολογία Β' μέρος: Βαθμονόμηση μοντέλου με είσοδο λίγων σημείων από τον χάρτη του συμπιεστή.

Όλα όσα παρουσιάστηκαν με λεπτομέρεια παραπάνω αφορούσαν την αξιολόγηση της μεθόδου ξεκινώντας από έναν ήδη υπάρχοντα χάρτη. Στις πρακτικές εφαρμογές όμως τα δεδομένα διαφέρουν. Οι χάρτες συνήθως δεν είναι διαθέσιμοι γιατί οι εταιρίες και οι κατασκευαστές δεν τους δημοσιεύουν ή ακόμα και όταν το κάνουν, δεν είναι πάντα στη διάθεση του εκάστοτε πελάτη-χρήστη του κινητήρα. Έγινε λοιπόν μια προσπάθεια αξιολόγησης της μεθόδου λαμβάνοντας ως είσοδο ελάχιστα σημεία λειτουργίας. Αυτά μπορούν να βρίσκονται στη διάθεση μας από πειραματικές μετρήσεις στον κινητήρα, π.χ. από τα λεγόμενα shop tests που γίνονται κατά την αρχική εγκατάσταση του κινητήρα στην τοποθεσία της μετέπειτα λειτουργίας και αφορούν στον έλεγχο του κινητήρα πριν την παράδοση στον πελάτη. Συνοπτικά λοιπόν ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Είσοδος βασικών δεδομένων για τα λίγα σημεία που είναι διαθέσιμα από τα shops tests
- Υπολογισμός αδιάστατων παραγόντων K_{is} και Φ_{avg} για τα σημεία αυτά
- Προσέγγιση καμπύλων $K_{is} = K_{is}(\Phi_{avg})$ και $\eta_{is} = \eta_{is}(\Phi_{avg})$
- Αναπαράσταση χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή.

Το πρόγραμμά μας στην περίπτωση που δέχεται ως είσοδο μόνο ορισμένα σημεία και όχι ολόκληρο τον χάρτη διαφοροποιεί τον τρόπο υπολογισμού των σημείων του χάρτη.

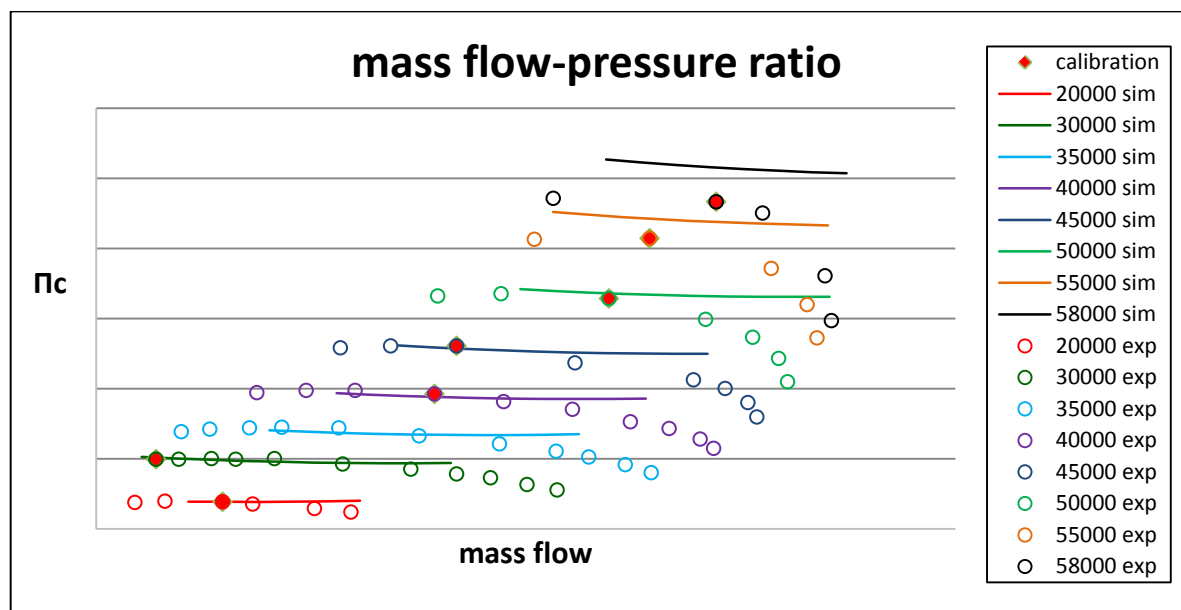
Αυτό είναι βέβαια λογικό, διότι αρχικά για κάθε σημείο που δίνεται ως είσοδος παράγεται ένα σημείο ως έξοδος. Εάν αυτό συνέβαινε και στην περίπτωση των λίγων σημείων το αποτέλεσμα δεν θα ήταν παρά κάποια λίγα σημεία.

Οι αλλαγές επικεντρώνονται κυρίως στο τελευταίο βήμα των υπολογισμών. Στην περίπτωση των λίγων σημείων, το πρόγραμμα, αφού έχει υπολογίσει τους αδιάστατους παράγοντες K_{is} και Φ_{avg} και τα πολυώνυμα των συναρτήσεων $K_{is} = K_{is}(\Phi_{avg})$ και $\eta_{is} = \eta_{is}(\Phi_{avg})$, ξεκινά μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία παίρνοντας μια αρχική τιμή αναφοράς για το συντελεστή παροχής Φ_{avg} και την παροχή μάζας \dot{m} υπολογίζει το αντίστοιχο σημείο του νέου χάρτη εφαρμόζοντας ότι και στη περίπτωση του ολόκληρου χάρτη. Για τον υπολογισμό των υπόλοιπων σημείων της ισοταχούς, το πρόγραμμα επιλέγει ένα εύρος παροχών αριστερά και δεξιά του σημείου και επαναλαμβάνει τους υπολογισμούς. Με αυτόν το τρόπο αναπαράγουμε κάθε ισοταχή που υπάρχει στο χάρτη.

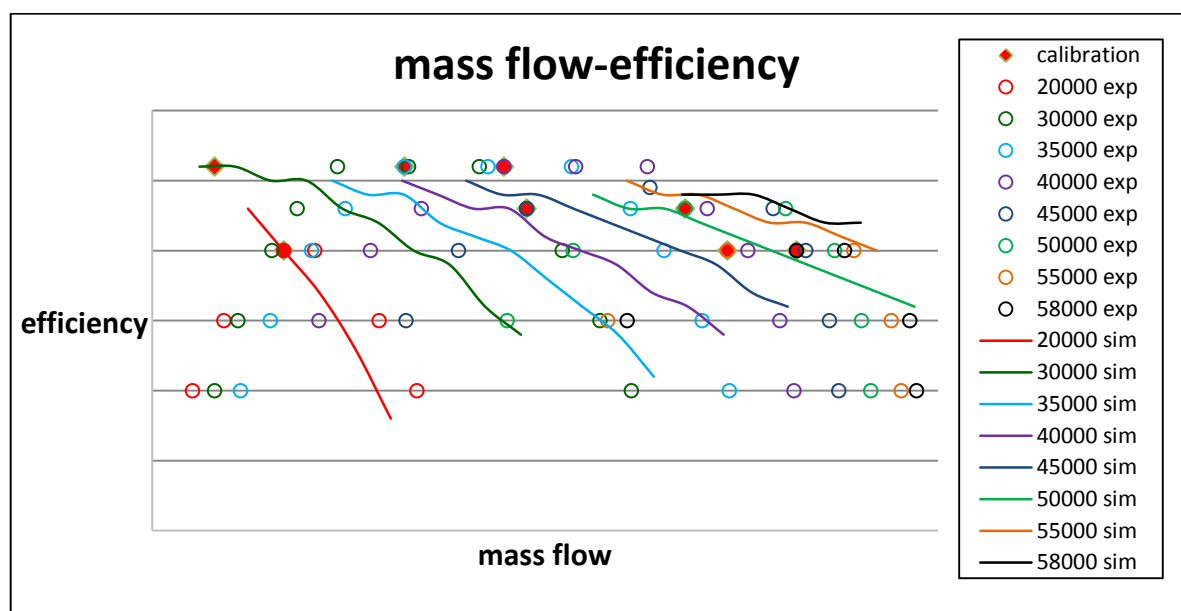
4.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων με βαθμονόμηση μοντέλου χρησιμοποιώντας λίγα σημεία.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρέχοντας ως είσοδο συγκεκριμένα σημεία (7) και όχι ολόκληρο τον χάρτη όπως παραπάνω.

Παρατίθενται τα διαγράμματα παροχής μάζας - λόγου πίεσης, καθώς και παροχής μάζας - ισεντροπικού βαθμού απόδοσης ($\dot{m} - \Pi_C, \dot{m} - \eta_{isc}$). Με *sim* συμβολίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (simulated), ενώ με *exp* τα πειραματικά δεδομένα που έχουν προέλθει από την ψηφιοποίηση των χαρτών (experimental). Με πιο έντονη σήμανση είναι τα σημεία τα οποία αποτελούν την είσοδο για το πρόγραμμά μας (calibration).



Σχήμα 19 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \Pi_C$) - 7 σημεία



Σχήμα 20 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \eta_{isc}$) - 7 σημεία

Παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα είναι χειρότερα συγκριτικά με εκείνα που προήλθαν από την ίδια μέθοδο χρησιμοποιώντας όμως ως είσοδο ολόκληρο χάρτη. Ουσιαστικά υπάρχει αδυναμία της μεθόδου να αναπαραστήσει τη συμπεριφορά στις μεγάλες παροχές.

Αυτό συμβαίνει διότι η αναπαράσταση γίνεται χρησιμοποιώντας το σημείο βαθμονόμησης ως βάση, σημείο το οποίο «ποιοτικά» διαφέρει διότι βρίσκεται κοντά στη περιοχή λειτουργίας της μηχανής. Παρόλα αυτά αξίζει να σημειώσουμε πως η μέθοδος είναι ιδιαίτερα ακριβής στις περιοχές κοντά στα σημεία βαθμονόμησης με αποκλίσεις μόνο στις υψηλές στροφές.

Από την άλλη όσον αφορά την προσέγγιση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης σίγουρα το αποτέλεσμα δεν κρίνεται ικανοποιητικό. Οι καμπύλες που δημιουργούνται δείχνουν να μην ακολουθούν σε αυτή τη περίπτωση τη μορφή του χάρτη, παρά μόνο εξαιρετικά κοντά στα σημεία βαθμονόμησης. Ουσιαστικά η μέθοδος αδυνατεί, όταν δέχεται σαν είσοδο λίγα σημεία, να αναπαραστήσει τις καμπύλες ισεντροπικού βαθμού απόδοσης μιας και έχουν μορφή ισχυρά μεταβαλλόμενη όσο η παροχή παίρνει διαφορετικές τιμές. Ανάλογα αποτελέσματα είχε η εφαρμογή της μεθόδου και στους υπόλοιπους χάρτες, παρόλα αυτά δεν θα τους παραθέσουμε, μιας και τα συμπεράσματα είναι κοινά.

Ιδιαίτερη δυσκολία παρουσιάζει και η προσέγγιση των καμπύλων $K_{is} = K_{is}(\Phi_{avg})$ και $\eta_{is} = \eta_{is}(\Phi_{avg})$, αυτό διότι όταν τα σημεία είναι λίγα, η προσέγγιση με καμπύλες δεύτερου βαθμού δεν δίνει πάντα σωστή κλίση καμπύλης. Για παράδειγμα, μπορεί το πολυώνυμο που συσχετίζει βαθμό απόδοσης με συντελεστή παροχής να έχει τα κοίλα προς τα πάνω (εν αντιθέσει με τις παρατηρήσεις στο σχήμα 2).

Η επιλογή των σημείων βαθμονόμησης επιδρά στη μορφή του χάρτη ο οποίος προβλέπεται, αλλά αξίζει να τονιστεί ότι κοντά στα σημεία βαθμονόμησης το μοντέλο δίνει καλές προβλέψεις.

5 Κυρίως μέρος Β'

5.1 Παρουσίαση της νέα μεθόδου

Από την αξιολόγηση της μεθόδου που έγινε παραπάνω είναι εμφανές πως η αναπαράσταση ενός χάρτη συμπιεστή δύσκολα μπορεί να γίνει με ικανοποιητική ακρίβεια. Ιδιαίτερη αδυναμία εμφανίζει η μέθοδος στην αναπαραγωγή της μορφής των καμπύλων ισεντροπικού βαθμού απόδοσης λόγω, κυρίως, της μορφής τους αλλά και διότι η μέθοδος δεν στηρίζεται τόσο σε φυσικές αρχές αλλά περισσότερο σε συνθήκες ομοιότητας.

Έγινε λοιπόν, προσπάθεια βελτίωσης της μεθόδου, με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνεται πιο ισχυρή η φυσική βάση της μεθόδου και παράλληλα να επιτυγχάνεται καλύτερη αναπαράσταση των χαρτών. Η μεθοδολογία αναπτύχθηκε στο εργαστήριο MEK του ΕΜΠ,

με σκοπό να αξιολογηθούν παράμετροι που αφορούν την αναπαράσταση του χάρτη. Παρακάτω αναλύεται η νέα μέθοδος διεξοδικά.

Αρχικά στόχος είναι ο υπολογισμός των αδιάστατων παραμέτρων Ψ και Φ . Όπως αναφέρεται και παραπάνω σκοπός είναι ο υπολογισμός των μεγεθών αυτών με σχέσεις που θα ισχυροποιούν τη φυσική βάση της μεθόδου.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή φόρτισης Ψ ισχύει :

$$\Psi = \frac{dh_{1-3}}{U^2} \quad (5.1)$$

Ενώ για το συντελεστή παροχής:

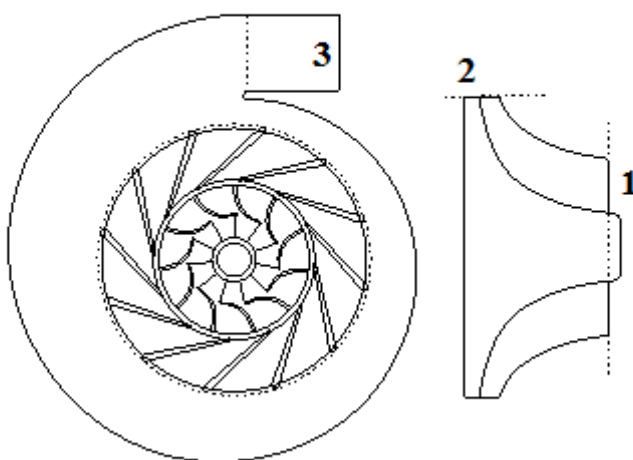
$$\Phi_2 = \frac{Vr_2}{U_2} \quad (5.2)$$

Όπως γίνεται φανερό από τις παραπάνω σχέσεις, εδώ προτιμούμε τους κλασικούς ορισμούς για τους συντελεστές φόρτισης και μάζας και όχι τα μέσα μεγέθη όπως έγινε στην αξιολόγηση της υπάρχουσας μεθόδου.

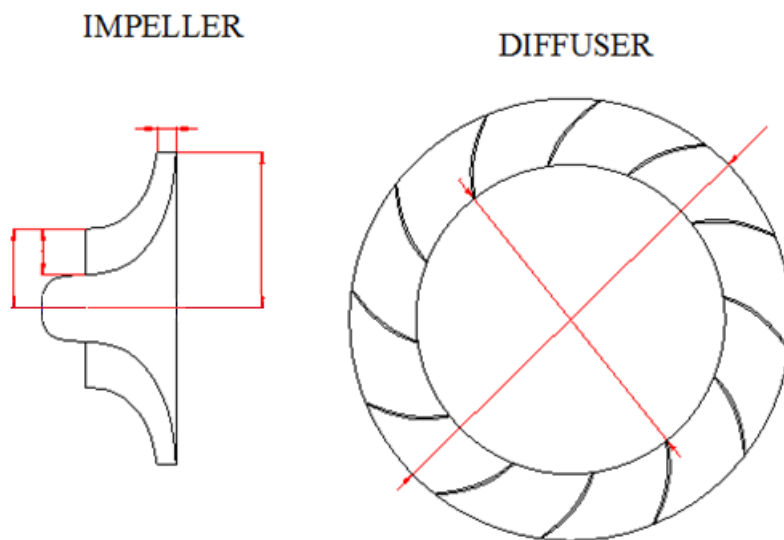
Από τη μονοδιάστατη ανάλυση των στροβιλομηχανών είναι επίσης γνωστή η σχέση που συνδέει τους δύο αυτούς παράγοντες με χρήση του συντελεστή ολίσθησης σ .

$$\Psi = \sigma(1 - \Phi \cdot \tan \beta_2) \quad (5.3)$$

Ο συντελεστής ολίσθησης ως γνωστόν παίρνει τιμές από 0 έως 1. Εάν έχει σταθερή τιμή η παραπάνω σχέση εκφράζει μια ευθεία. Ενώ αν είναι μονοσήμαντα συνάρτηση των αδιάστατων παραγόντων τότε παριστάνει μια μοναδική καμπύλη. Για να υπολογίσουμε λοιπόν τα ζητούμενα Ψ και Φ αρκούν κάποιες γεωμετρικές διαστάσεις καθώς και οι απώλειες τόσο στο διαχύτη όσο και στην πτερωτή.



Σχήμα 5.1 Θέσεις υπολογισμού στον συμπιεστή



Σχήμα 5.2 Απαιτούμενες γεωμετρικές διαστάσεις στη νέα μέθοδο

Για τον υπολογισμό των απωλειών στο συμπιεστή αναπτύχθηκε ένα μοντέλο. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε με χρήση ενός συνδυασμού εξισώσεων της θερμοδυναμικής και ρευστομηχανικής που προϋποθέτουν όμως και τη γνώση κάποιων βασικών γεωμετρικών διαστάσεων του συμπιεστή.

Έγινε με τέτοιον τρόπο, ώστε η αναπαράσταση του χάρτη να είναι πιο ακριβής και ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται πως το σύνολο των γεωμετρικών δεδομένων απαραίτητων για την αναπαράσταση του χάρτη θα είναι εύκολα διαθέσιμο στον απλό χρήστη της μηχανής.

Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι η ανάλυση των απωλειών που έγινε και παρουσιάζεται παρακάτω αφορά ακτινικούς συμπιεστές, χωρίς πτερύγια στο διαχύτη.

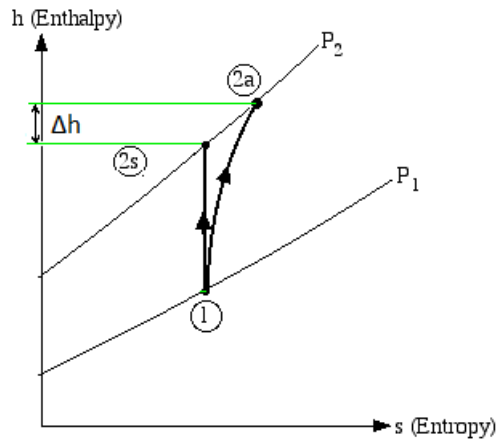
5.2 Παρουσίαση μοντέλου απωλειών

Κατά καιρούς έχει γίνει προσπάθεια από διάφορους ερευνητές να κατηγοριοποιηθούν οι απώλειες στον ακτινικό συμπιεστή. Ο υπολογισμός των απωλειών γίνεται κυρίως με εκφράσεις ενθαλπικής πτώσης ή ισοδύναμα ως αύξηση εντροπίας, για την πτερωτή και ως πτώση ολικής πίεσης στο διαχύτη.

Ουσιαστικά οι (αδιαστατοποιημένες) συνολικές απώλειες στο συμπιεστή ορίζονται ως εξής:

$$\left(\frac{\Delta h}{U^2}\right)_{\text{ολικό}} = \left(\frac{\Delta h}{U^2}\right)_{\text{Πτερωτή}} + \left(\frac{\Delta h}{U^2}\right)_{\text{Διαχύτης}} \quad (5.4)$$

Όπου $\Delta h = h_2 - h_{2s}$



Σχήμα 5.3 Απώλειες μεταξύ πραγματικής και ισηντροπικής μεταβολής

Αναλύονται λοιπόν, σε απώλειες που δημιουργούνται στην πτερωτή καθώς και σε απώλειες στη ροή διαμέσου του διαχύτη. Θα ασχοληθούμε αρχικά με τις απώλειες στην πτερωτή.

Χρησιμοποιώντας τις γνωστές σχέσεις για τις στροβιλομηχανές, τον ορισμό της σχετικής ολικής ενθαλπίας, η μεταβολή της ενθαλπίας από την είσοδο στην έξοδο της πτερωτής προκύπτει ως εξής:

$$h_1 - h_2 = \frac{1}{2}(U_2^2 - U_1^2) - \frac{1}{2}(W_2^2 - W_1^2) \quad (5.5)$$

Στη συνέχεια χρησιμοποιούμε το μοντέλο της NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), στο οποίο οι απώλειες κατηγοριοποιούνται σε απώλειες πρόσπτωσης στη πτερωτή, απώλειες διακένου, απώλειες τριβών και λοιπές απώλειες. Με βάση τη βιβλιογραφία ο βαθμός απόδοσης της πτερωτής και άρα και οι σχετικές απώλειες είναι κυρίως συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης. Οι λοιπές απώλειες αμελούνται.

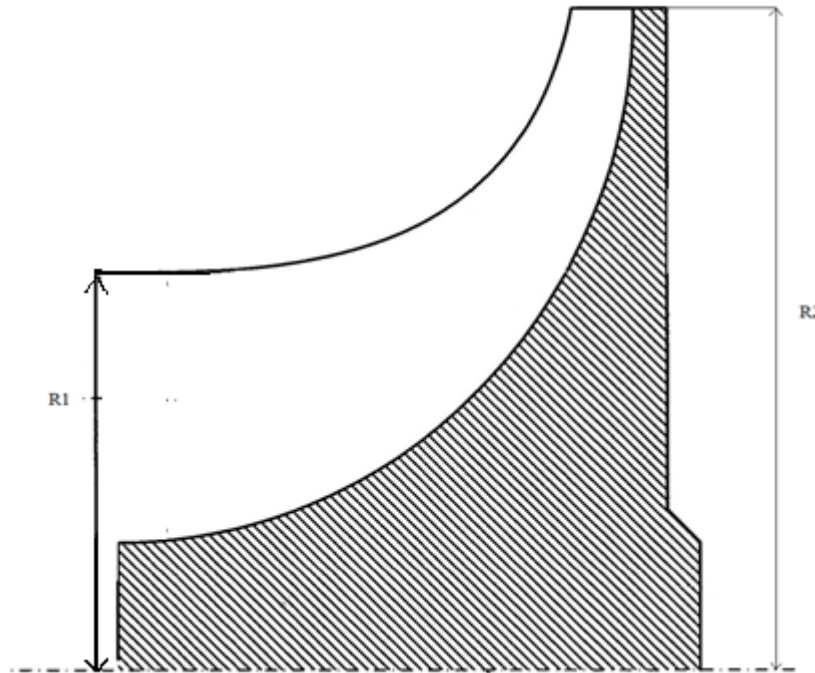
Οι απώλειες αυτές αντιπροσωπεύουν τη μερική διάχυση της σχετικής κινητικής ενέργειας της ροής, όσο η ροή εκτρέπεται από την κατεύθυνση της σε μια βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης. Έχουμε λοιπόν μια εξίσωση της μορφής:

$$\left(\frac{\Delta h}{U^2}\right)_{\text{Πτερωτή}} = \left(\frac{W_1}{U}\right)^2 \cdot A \cdot M_{w_1} \cdot \sin^2|\beta_1 - \beta_{opt}| \quad (5.6)$$

Όπου $\beta_1 = \arctan\left(\frac{R_{AT}}{\phi_1}\right)$, με $R_{AT} = \frac{R_1}{R_2}$, όπως φαίνονται στο σχήμα

Ο παράγοντας M_{w_1} που εμφανίζεται στη σχέση, εισάγεται έτσι ώστε το μοντέλο μας να ακολουθεί την μορφή των καμπύλων ισεντροπικού βαθμού - παροχής μάζας. Όπως φαίνεται και από τον συμβολισμό που χρησιμοποιήθηκε, είναι ο αριθμός Mach της σχετικής ταχύτητας στην μέση ακτίνα.

Τα μεγέθη A , β_{opt} αποτελούν παράγοντες βαθμονόμησης - βελτιστοποίησης και υπολογίζονται με μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης που θα αναλυθεί συνοπτικά παρακάτω.



Σχήμα 5.4 Πτερωτή χωρίς πτερύγια

Ενώ οι απώλειες στο διαχύτη προκύπτουν ως εξής:

$$\left(\frac{\Delta h}{U^2}\right)_{\text{Διαχύτης}} = C \cdot \left(\frac{\Psi_2^2 + \Phi_2^2}{\Phi_2^2}\right)^D = C \cdot \left(\frac{\left(\frac{V_2}{U_2}\right)^2}{\left(\frac{V_{r2}}{U_2}\right)^2}\right)^D = C \cdot \left(\frac{V_2}{V_{r2}}\right)^D = C \cdot \left(\frac{1}{\cos \alpha_2}\right)^D \quad (5.7)$$

Όπου C, D έτεροι παράγοντες βαθμονόμησης - βελτιστοποίησης.

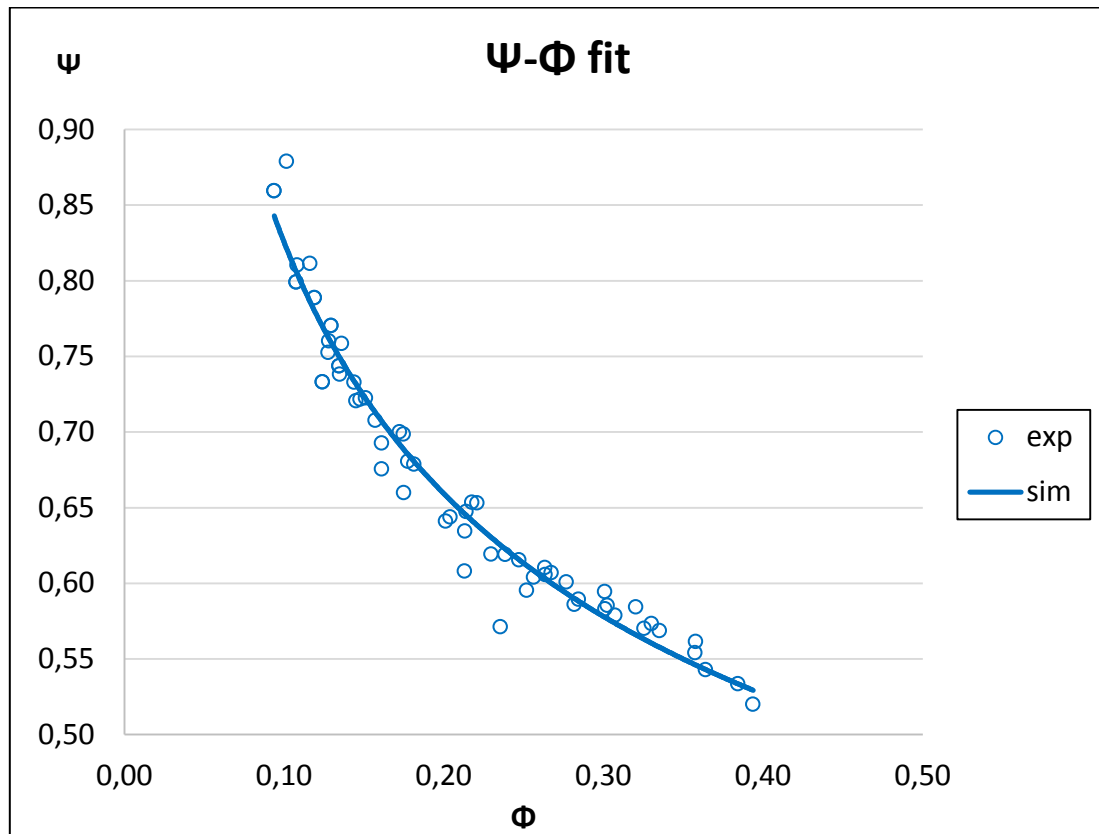
Η σχέση αυτή που προκύπτει είναι εκείνη που αποδίδει πιο αποτελεσματικά τις απώλειες στο διαχύτη. Πήρε τη συγκεκριμένη μορφή μετά από προσπάθεια κατασκευής μιας σχέσης η οποία θα περιλαμβάνει την απόλυτη γωνία ροής εισόδου στο διαχύτη. Έχει αποδειχθεί ότι είναι ανάλογη των απωλειών, διότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία τόσο αυξάνεται το flow path (σπειροειδής τροχιά) ενός ρευστοστοιχείου το οποίο διέρχεται από το διαχύτη. Εκείνη εμφανίζεται στη σχέση μετά από απλοποίηση στον αριθμητή όπως φαίνεται παραπάνω. Τονίζεται ότι η σχέση αυτή αναμένεται να ισχύει μόνο για διαχύτη χωρίς πτερύγια, ενώ σε διαχύτη με πτερύγια πρέπει να συμπεριληφθούν και απώλειες πρόσπτωσης στο πτερύγιο.

Έχουμε λοιπόν πλέον κατασκευάσει ένα μοντέλο απωλειών το οποίο έχει ισχυρότερη φυσική βάση και περιέχει τους αδιάστατους παράγοντες με τους οποίους εργαστήκαμε και στην προηγούμενη μέθοδο.

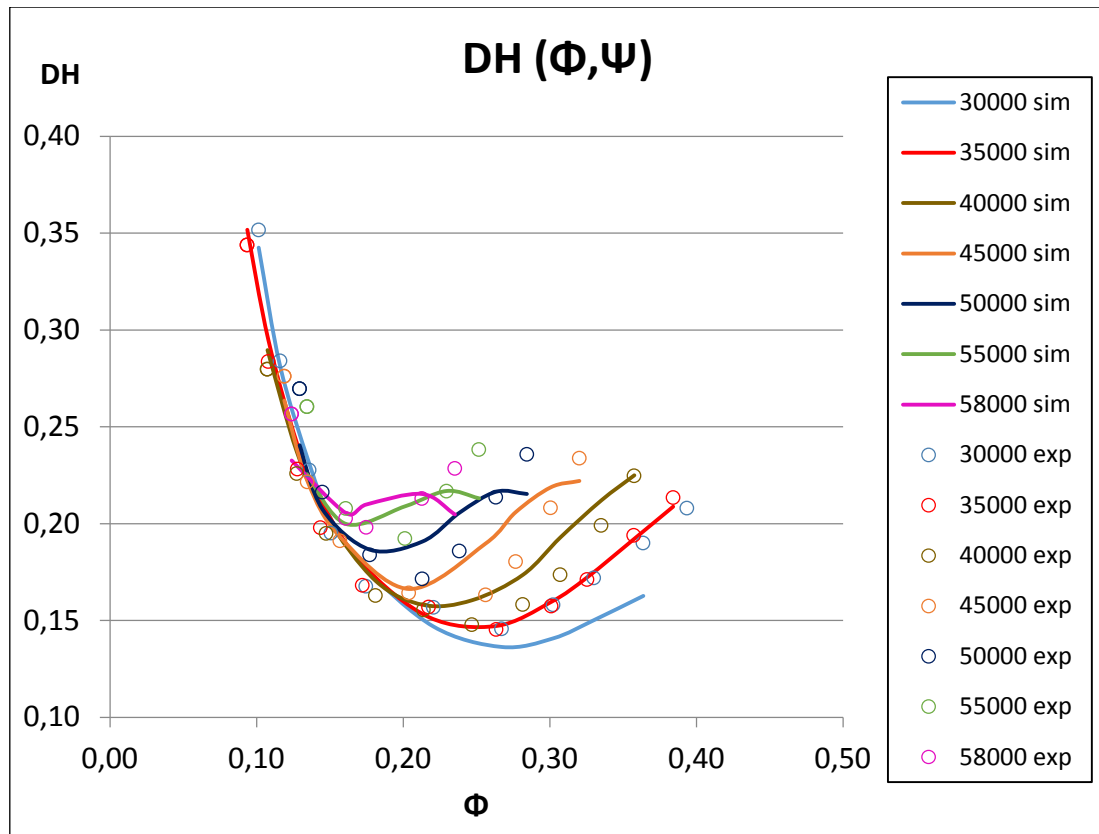
Η σχέση που προέκυψε για την σχέση μεταξύ των αδιάστατων Φ και Ψ παραγόντων έχει την εξής μορφή, η οποία επελέγη καθώς συσχετίζει πολύ καλά τον συντελεστή παροχής και φόρτισης όπως αυτός υπολογίζεται από πειραματικά δεδομένα:

$$\Psi = \frac{1}{\alpha\Phi^\beta} + \gamma \quad (5.8)$$

Παρακάτω παρουσιάζουμε τα διαγράμματα από τα πειραματικά στοιχεία που προκύπτουν από δεδομένο χάρτη καθώς και τις καμπύλες που προέκυψαν από τις σχέσεις και το μοντέλο απωλειών, και χρησιμοποιήθηκαν για την μετέπειτα αναπαράσταση του χάρτη.



Σχήμα 21 Προσέγγιση καμπύλης Ψ-Φ (fit) με βάση τη νέα μέθοδο



Σχήμα 22 Συσχέτιση απωλειών με αδιαστατους παράγοντες Ψ , Φ

Από το σχήμα 21 παρατηρείται ότι πράγματι υπάρχει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ συντελεστή φόρτισης και παροχής.

Αρχικά γίνεται επίλυση των τριγώνων ταχυτήτων στην είσοδο και στην έξοδο του συμπιεστή ώστε να υπολογιστούν οι αδιάστατες παράμετροι Φ και Ψ . Η επίλυση γίνεται με εφαρμογή των παρακάτω σχέσεων και επιβολή της πειραματικά μετρηθείσας τιμής της παροχής μάζας στην είσοδο και έξοδο της πτερωτής καθώς και στην έξοδο του διαχύτη.

Εξίσωση συνέχειας $\dot{m} = \rho A V_{norm}$ (5.9)

Όπου V_{norm} η συνιστώσα του διανύσματος της ταχύτητας κάθετο στην επιφάνεια ροής A .

Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας $C_p T + \frac{1}{2} W^2 - \frac{1}{2} U^2 = \text{σταθερό}$

$$C_p T + \frac{1}{2} V_3^2 = \text{σταθερό} \quad (5.10)$$

Οι εξισώσεις εκφράζουν τη διατήρηση της ενέργειας σε συνθήκες αδιαβατικής ροής. Η πρώτη εφαρμόζεται σε περιστρεφόμενα (πτερωτή) ενώ η δεύτερη σε στατικά πτερύγια (διαχύτης).

Καταστατική εξίσωση των αερίων $\frac{p}{\rho} = RT$ (5.11)

Σχέση ισεντροπικής μεταβολής στις στροβιλομηχανές $p \sim T^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ (5.12)

Έχοντας πλέον τις τιμές για το συντελεστή φόρτισης, παροχής καθώς και τις απώλειες ενθαλπίας από την ανωτέρω ανάλυση, πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων 5.6, 5.7 και 5.6 οι οποίοι δίνουν βέλτιστη προσαρμογή των προβλέψεων με τα πειραματικά δεδομένα. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται μια στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης, η μέθοδος σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization)

Η μέθοδος αυτή προτιμάται έναντι άλλων πιο απλών διότι οι σχέσεις που δημιουργήθηκαν στο μοντέλο των απωλειών δεν είναι γραμμικές και ταυτόχρονα δεν είναι καθαρά πολυωνυμικές για να προσεγγιστούν από κάποιου είδους πολυωνυμική παρεμβολή.

Επίσης σημειώνεται σε αυτό το σημείο πως η μέθοδος είναι στοχαστική με αποτέλεσμα σε κάθε εφαρμογή της να δίνει ελάχιστα διαφοροποιημένο αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά η σύγκλιση στο αποτέλεσμα κρίνεται ικανοποιητική και η διαφορά στον κάθε διαφορετικό υπολογισμό-τρέξιμο του κώδικα θεωρείται αμελητέα.

Παρακάτω παρουσιάζεται περιληπτικά η μέθοδος και γίνεται μια αναφορά στο πως χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος στη δικιά μας περίπτωση. Για την επίλυση χρησιμοποιήθηκε κώδικας Fortran ο οποίος υλοποιεί τον αλγόριθμο και έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο MEK.

5.2.1 Η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων

Ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (PSO) είναι ένας πληθυσμιακός αλγόριθμος αναζήτησης, που βασίζεται στην προσομοίωση της κοινωνικής συμπεριφοράς των πουλιών μέσα σε ένα σμήνος.

Ο αρχικός στόχος της ιδέας του πλήθους σωματιδίων ήταν η γραφική προσομοίωση της απρόβλεπτης χορογραφίας ενός σμήνους πουλιών.

Η ιδέα αυτή εξελίχθηκε σε έναν απλό και αποτελεσματικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Στον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, τα άτομα, τα οποία αναφέρονται ως σωματίδια, κινούνται μέσα σε ένα χώρο αναζήτησης πολλών διαστάσεων.

Οι μεταβολές των θέσεων των σωματιδίων μέσα στο χώρο αναζήτησης βασίζονται στην κοινωνικό-ψυχολογική τάση των ατόμων να μιμούνται την επιτυχία των άλλων ατόμων. Έτσι, η κίνηση ενός σωματιδίου μέσα στο σμήνος επηρεάζεται από την εμπειρία ή τη γνώση των γειτονικών του σωματιδίων.

Από την εισαγωγή του το 1995, ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων έχει υποστεί πολλές βελτιώσεις και έχει βρει διάφορα πεδία εφαρμογής. Στη συνέχεια παραθέτουμε το βασικό αλγόριθμο PSO και μερικές από τις κυριότερες παραλλαγές του.

Βασικός Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

Ένας αλγόριθμος PSO διατηρεί ένα σμήνος από σωματίδια καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση.

Έστω $x_i(t)$ η θέση ενός σωματιδίου i στο χώρο αναζήτησης τη διακριτή χρονική στιγμή t .

Η θέση του σωματιδίου μεταβάλλεται με την πρόσθεση μιας ταχύτητας $v_i(t)$ στην τρέχουσα θέση:

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (5.13)$$

Με $x_i(0) \sim U(x_{max}, x_{min})$

Το διάνυσμα της ταχύτητας οδηγεί τη διαδικασία βελτιστοποίησης και αντικατοπτρίζει τόσο την εμπειρική γνώση του σωματιδίου όσο και την κοινωνικά ανταλλασσόμενη πληροφορία από τη γειτονιά του σωματιδίου.

Η εμπειρική γνώση του σωματιδίου αναφέρεται ως η γνωσιακή συνιστώσα (cognitive component), η οποία είναι ανάλογη ως προς την απόσταση του σωματιδίου από τη δική του βέλτιστη θέση (personal best position). Η κοινωνικά ανταλλασσόμενη πληροφορία αναφέρεται ως η κοινωνική συνιστώσα (social component) της εξίσωσης ταχύτητας.

Δεν θα αναφερθούμε παραπάνω στη μέθοδο. Στη δική μας περίπτωση χρησιμοποιούμε ως είσοδο τις γνωστές σχέσεις για τις απώλειες και το μοντέλο μας, με τους άγνωστους παράγοντες. Με τον αλγόριθμο, επιδιώκεται βελτιστοποίηση του μοντέλου με οδηγό τις γνωστές σχέσεις. Ως αποτελέσματα λαμβάνουμε τους σταθερούς συντελεστές A, B, C, D για τους οποίους το μοντέλο μας είναι πιο ορθό και πιο κοντά στη φυσική βάση των σχέσεων της θερμοδυναμικής.

Ουσιαστικά γίνονται επαναλαμβανόμενα δοκιμές με διανύσματα των τεσσάρων αγνώστων παραγόντων με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των τετραγώνων της διαφοράς της πραγματικής από την υπολογιζόμενη τιμή των απωλειών, μέχρις ότου βρεθεί μια ικανοποιητική τετράδα παραγόντων με την οποία το μοντέλο θα προσεγγίζει τις θεωρητικές σχέσεις.

$$\text{αντικειμενική συνάρτηση} = (\sum (\Delta h_{pred} - \Delta h_{actual})^2) \quad (5.14)$$

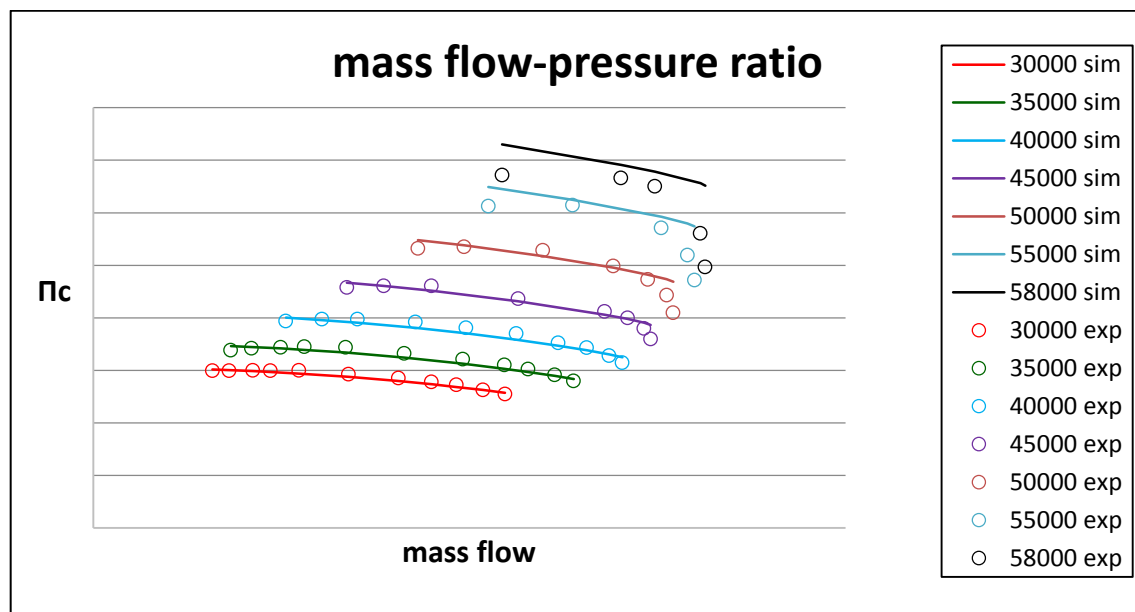
Έχοντας πλέον το μοντέλο ολοκληρωμένο υπολογίζουμε με χρήση των θερμοδυναμικών σχέσεων τις τιμές των μεγεθών που υπάρχουν στον χάρτη λειτουργίας και είναι απαραίτητα για την αναπαράσταση του χάρτη, κοινώς των \dot{m}, P_c, η_{is} . Πλέον το μόνο που απομένει είναι η σύγκριση με τα πειραματικά στοιχεία και τους χάρτες των κατασκευαστών.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου καθώς και η σύγκριση με την υπάρχουσα μέθοδο παρουσιάζονται μέσα από διαγράμματα και σχολιάζονται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

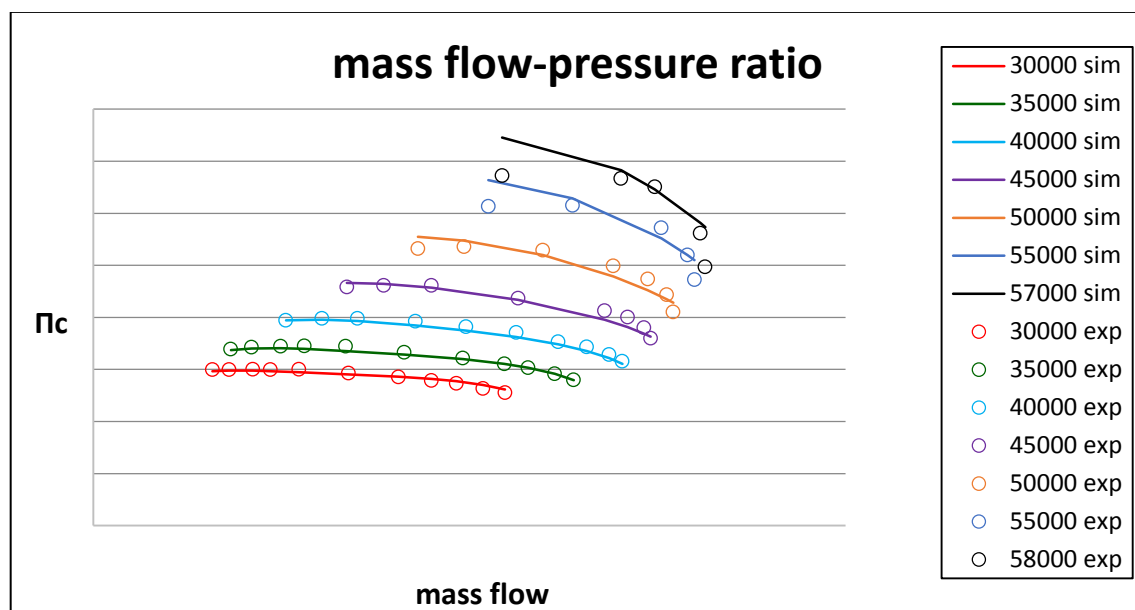
5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε και θα αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της βελτιωμένης μεθόδου στον συμπιεστή της MTU 396.

Θα γίνει παράθεση τόσο του χάρτη που προήλθε από την υπάρχουσα όσο και από τη βελτιωμένη μέθοδο καθώς και διαγράμματα άμεσης σύγκρισης.

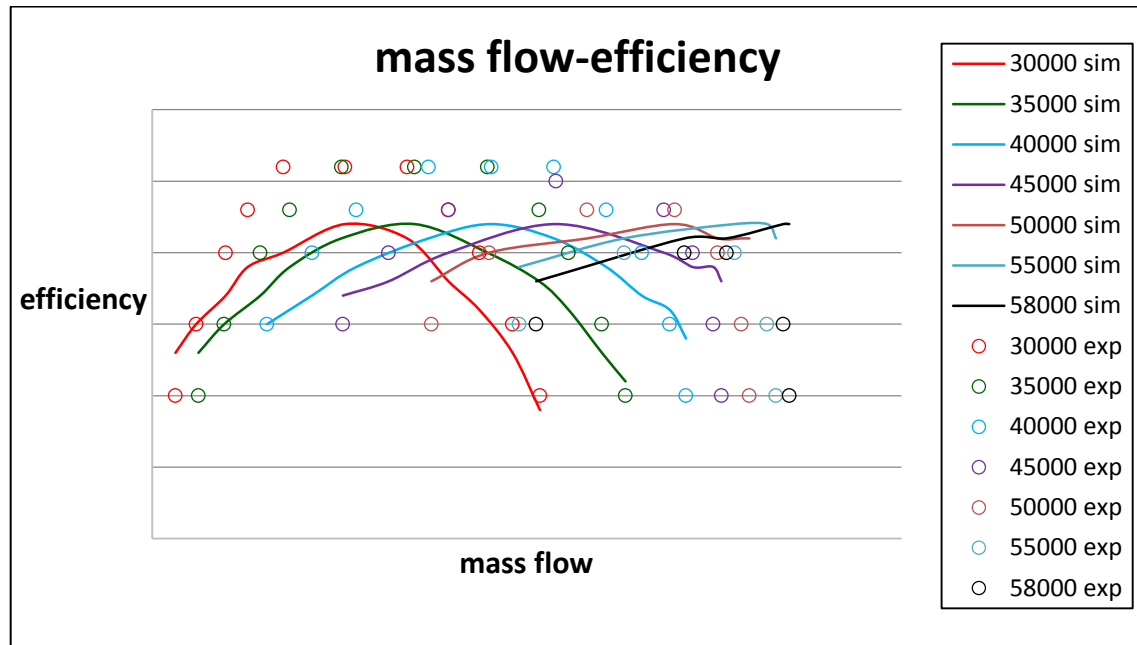


Σχήμα 23 Αναπαράσταση Χάρτη Λειτουργίας συμπιεστή MTU 396 με την υπάρχουσα μέθοδο ($\dot{m} - \Pi_c$)

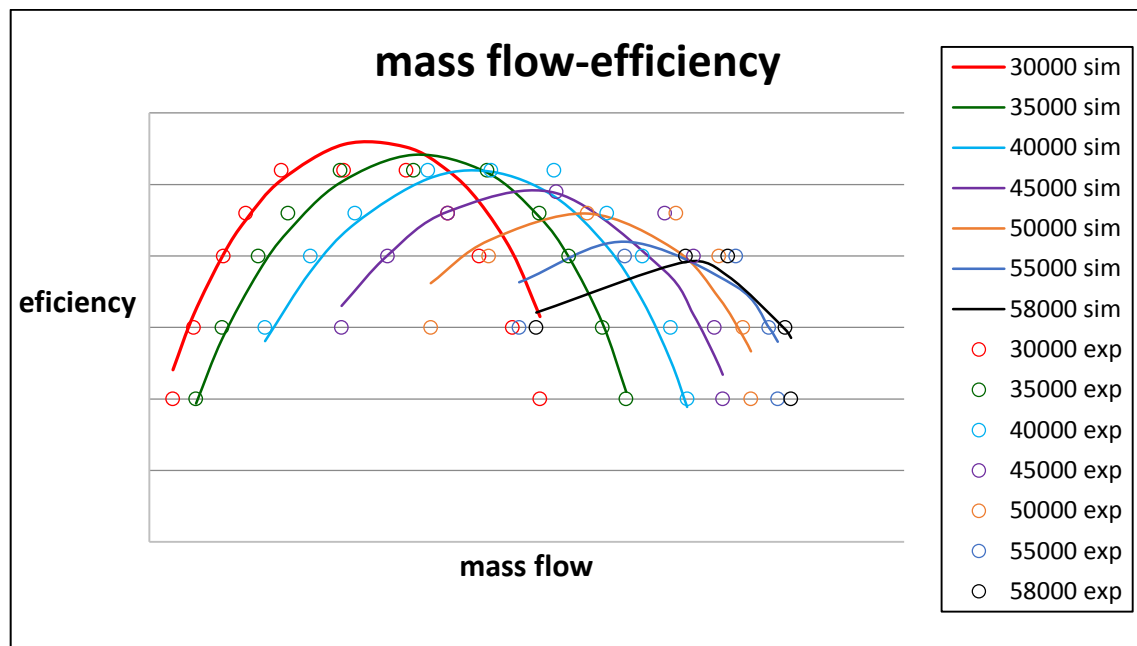


Σχήμα 24 Αναπαράσταση Χάρτη Λειτουργίας συμπιεστή MTU 396 με την νέα μέθοδο ($\dot{m} - \Pi_c$)

Φαίνεται καθαρά πως η βελτιωμένη μέθοδος τείνει να καλύψει τις αδυναμίες της υπάρχουσας. Ενώ στις χαμηλές και μεσαίες στροφές δεν φαίνεται να υπάρχουν παρά ελάχιστες διαφορές, στις υψηλές στροφές και σε μεγάλες παροχές στις οποίες η υπάρχουσα μέθοδος υστερεί, η αναπαράσταση είναι καλύτερη και πιο ακριβής.



Σχήμα 25 Αναπαράσταση Χάρτη Λειτουργίας συμπιεστή MTU396 με την υπάρχουσα μέθοδο ($\dot{m} - \eta_{isc}$)

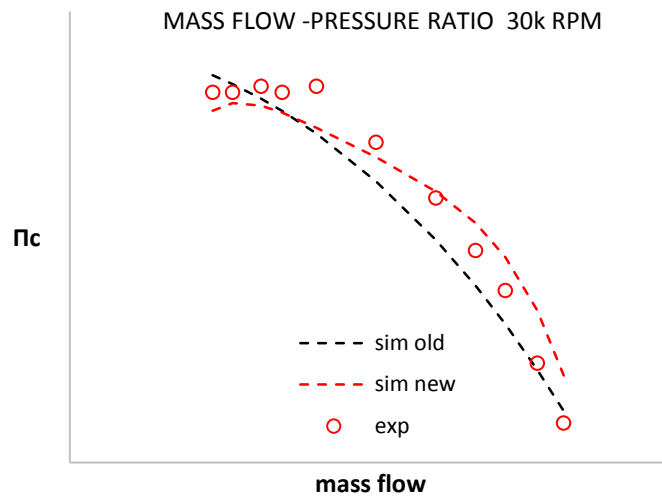


Σχήμα 26 Αναπαράσταση Χάρτη Λειτουργίας συμπιεστή MTU396 με την νέα μέθοδο ($\dot{m} - \eta_{isc}$)

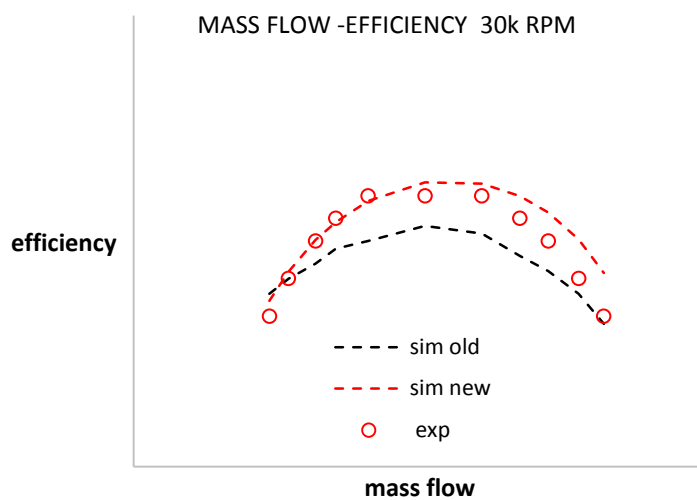
Ακόμα πιο εμφανής είναι οι διαφορές όσον αφορά την αναπαράσταση των καμπύλων παροχής μάζας - ισεντροπικού βαθμού απόδοσης ($\dot{m} - \eta_{isc}$). Ενώ με την υπάρχουσα μέθοδο οι καμπύλες δείχνουν να μην ακολουθούν την πορεία των πειραματικών σημείων,

με την βελτιωμένη μέθοδο έχουμε μια πιο ορθή αναπαράσταση που ακολουθεί την μορφή των καμπύλων και αποκλίνει από τα πειραματικά ελάχιστα.

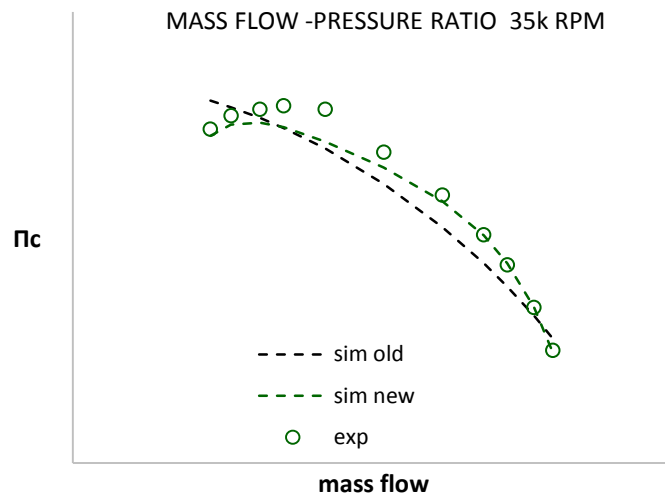
Αυτό οφείλεται στην ενισχυμένη φυσική βάση του συστήματος απωλειών το οποίο επελέγη. Παρακάτω παραθέτουμε ξεχωριστά συγκριτικά διαγράμματα για κάθε ταχύτητα περιστροφής για την οποία υπάρχει πειραματική καμπύλη στον αρχικό χάρτη, τόσο για τις καμπύλες παροχής μάζας - σχέσης συμπίεσης ($\dot{m} - \Pi_c$) όσο και για τις καμπύλες παροχής μάζας - ισηντροπικού βαθμού απόδοσης ($\dot{m} - \eta_{isc}$).



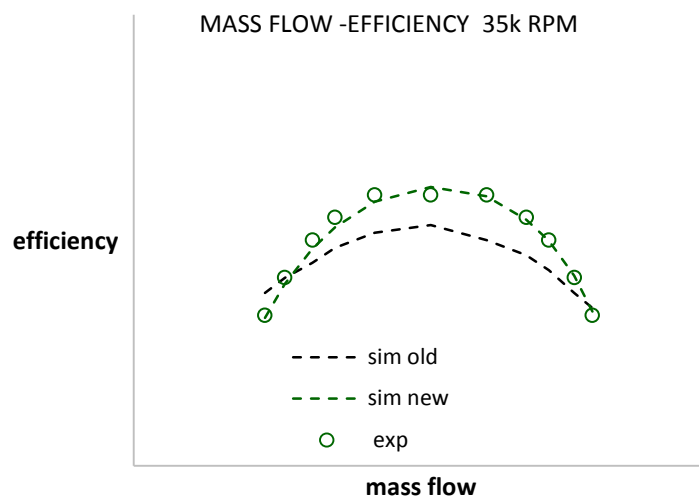
Σχήμα 27 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \Pi_c$) -30000rpm



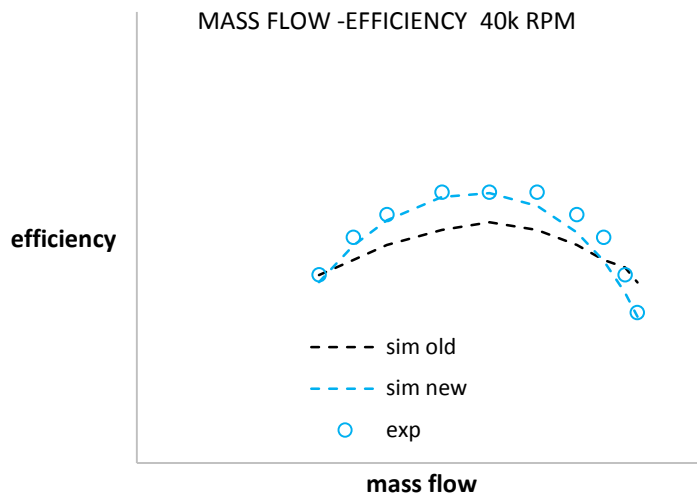
Σχήμα 28 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \eta_{isc}$) -30000rpm



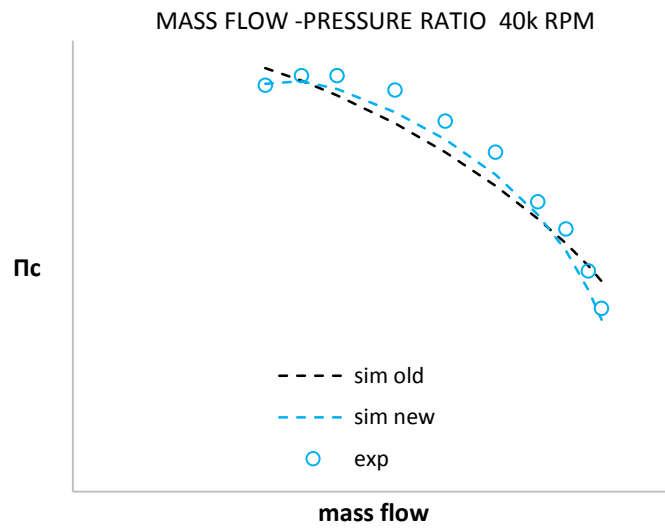
Σχήμα 29 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \Pi_c$) -35000rpm



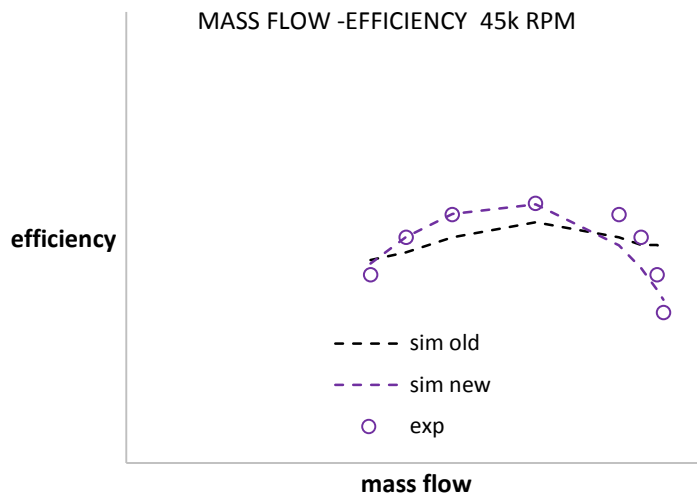
Σχήμα 30 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \eta_{isc}$) -35000rpm



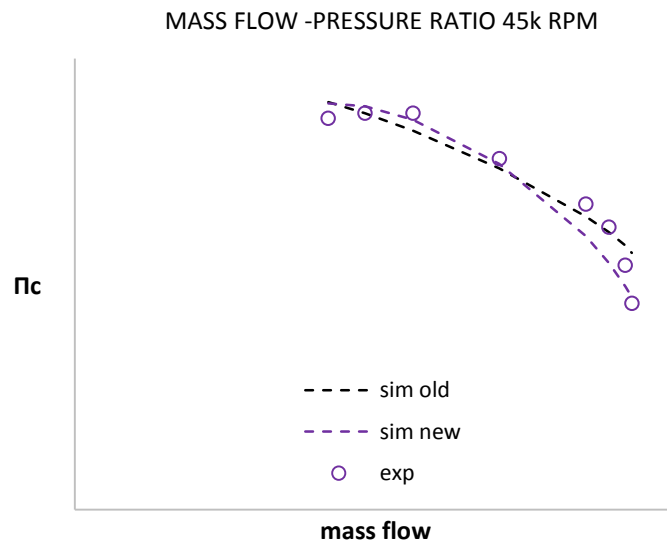
Σχήμα 31 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \eta_{isc}$) -40000rpm



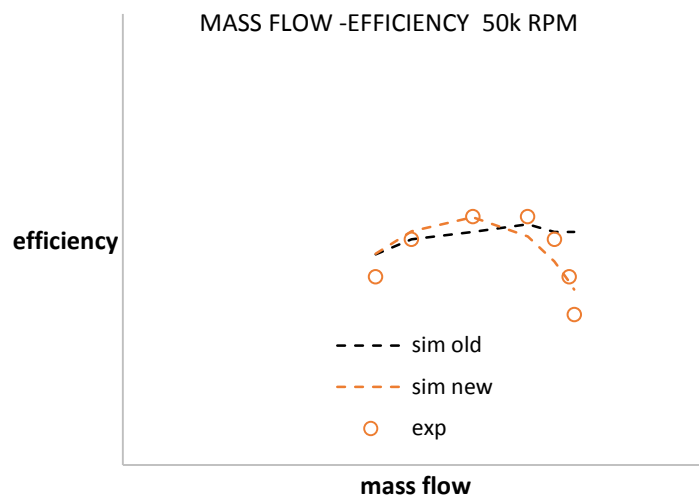
Σχήμα 32 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - P_c$) -40000rpm



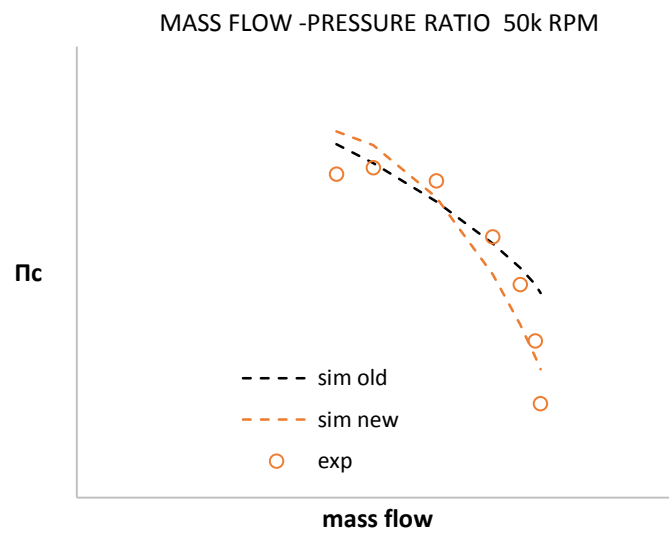
Σχήμα 33 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \eta_{isc}$) -45000rpm



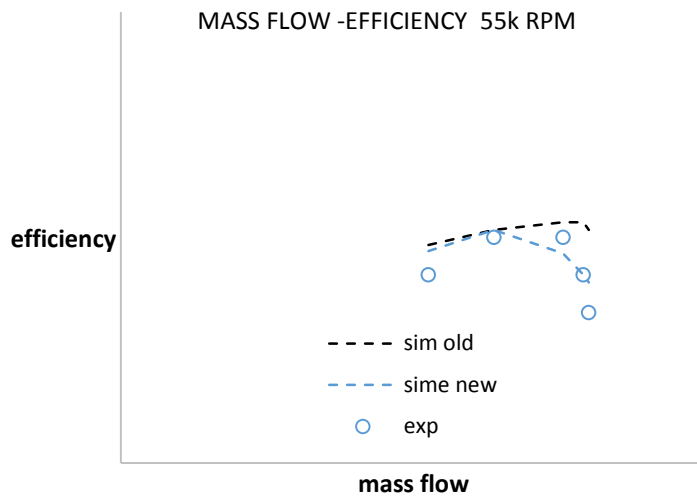
Σχήμα 34 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \Pi_c$) -45000rpm



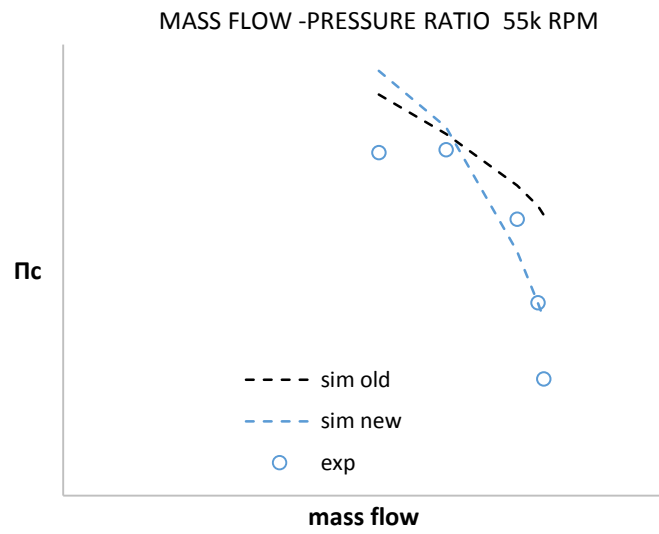
Σχήμα 35 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \eta_{isc}$) -50000rpm



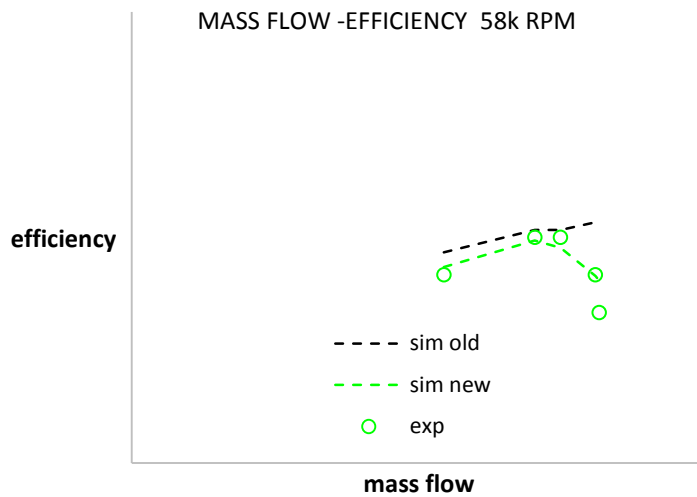
Σχήμα 36 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \Pi_c$) -50000rpm



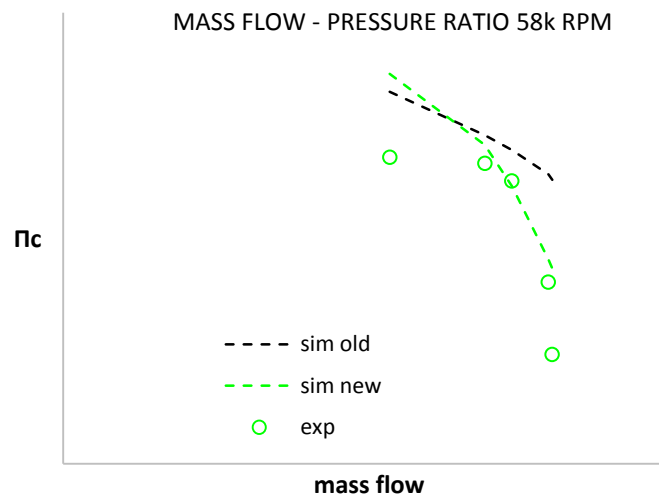
Σχήμα 37 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \eta_{isc}$) -55000rpm



Σχήμα 38 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \Pi_c$) -55000rpm



Σχήμα 39 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \eta_{isc}$) -58000rpm



Σχήμα 40 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή 396 ($\dot{m} - \Pi_c$) -58000rpm

Παρατηρείται επίσης βελτίωση των προβλέψεων του χάρτη παροχής- λόγου πίεσης της νέας μεθόδου σε σχέση με την υπάρχουσα. Αυτό είναι πιο εμφανές στις υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής του συμπιεστή για τις οποίες οι προβλέψεις της υπάρχουσας μεθόδου απέκλιναν σημαντικά από τις πειραματικές. Παρόλα αυτά η συμπεριφορά της καμπύλης παροχής μάζας κοντά στο όριο ασταθειας (γραμμή πάλμωσης), παρουσιάζει τάση των ισοταχών να γίνουν επίπεδες (ο λόγος πίεσης γίνεται ανεξάρτητος της παροχής μάζας.) φαινόμενο το οποίο ούτε η νέα μέθοδος δεν αναπαριστά επαρκώς.

5.4 Συμπεράσματα

Σε αυτή τη παράγραφο θα προσπαθήσουμε να συνοψίσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δύο μεθόδων που αξιολογήσαμε.

Η υπάρχουσα μέθοδος έχει ως βασικό πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί γεωμετρικές διαστάσεις. Όπως προαναφέραμε πολλές φορές είναι εξαιρετικά δύσκολο να βρεθούν και σπάνια είναι άμεσα διαθέσιμες στον χρήστη-λειτουργό του κινητήρα. Ένα επιπλέον σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι οι προσεγγίσεις των καμπυλών (fits) είναι απλές, και κατ' επέκταση πως οι αδιάστατοι παράγοντες υπολογίζονται πολύ εύκολα.

Ως μειονεκτήματα σημειώνουμε κυρίως την αδυναμία της μεθόδου να αναπαραστήσει τις καμπύλες ισεντροπικού βαθμού απόδοσης ικανοποιητικά. Αυτό είναι σημαντικό στην περίπτωση που το μοντέλο βαθμονομείται με βάση λίγα σημεία του χάρτη, όπου παρατηρείται μείωση της προβλεπτικής ικανότητας όσο απομακρυνόμαστε από τα σημεία βαθμονόμησης. Επίσης η αναπαράσταση των χαρακτηριστικών παροχής με την υπάρχουσα μέθοδο στις υψηλές στροφές είναι ελλιπής.

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε είχε ως σκοπό την άμβλυνση των προβλημάτων και των αστοχιών της υπάρχουσας μεθόδου. Επετεύχθη λοιπόν πολύ καλύτερη αναπαράσταση των καμπυλών του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης με ανάπτυξη μοντέλου που βασίζεται σε σχέσεις θερμοδυναμικής.

Αυτά βέβαια έγιναν με κόστος. Κόστος που μεταφράζεται σε πολύ πιο περίπλοκες σχέσεις για τις καμπύλες των αδιάστατων παραγόντων καθώς και σε ανάγκη γνώσης συγκεκριμένων γεωμετρικών διαστάσεων.

Θα πρέπει λοιπόν μελλοντικά να γίνει μια προσπάθεια συγκερασμού των πλεονεκτημάτων των δύο για την δημιουργία μιας ιδανικής μεθόδου αναπαράστασης.

Για να γίνουν πιο σαφή και συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων θα παρουσιάσουμε στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής αυτής, μια πρακτική εφαρμογή που χρησιμοποιεί γνώσεις από την διερεύνηση που προηγήθηκε.

6 Πρακτική Εφαρμογή

Όπως προαναφέραμε σκοπός της πρακτικής αυτής εφαρμογής είναι η ενσωμάτωση ορισμένων στοιχείων και γνώσεων που αποκομίσαμε από την αξιολόγηση και την μελέτη της νέα μεθόδου ώστε να πετύχουμε καλύτερη αναπαράσταση των χαρτών λειτουργίας ενός συμπιεστή.

Συνοπτικά αναφερόμαστε παρακάτω στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προέκυψαν από τις αξιολογήσεις καθώς και πως συνδυάζονται στη πρακτική εφαρμογή που αναπτύχθηκε.

Υπάρχουσα μέθοδος

- Πλεονεκτήματα
 - Δεν απαιτεί γνώση γεωμετρικών διαστάσεων
 - Απλές προσεγγίσεις καμπύλων
- Μειονεκτήματα
 - Μειωμένη φυσική βάση
 - Ελλιπής αναπαράσταση καμπύλων βαθμού απόδοσης, ιδιαίτερα μακριά από τα σημεία βαθμονόμησης

Νέα μέθοδος

- Πλεονεκτήματα
 - Σχετική ακρίβεια στην αναπαράσταση καμπύλων βαθμού απόδοσης
 - Ενισχυμένη φυσική βάση
- Μειονεκτήματα
 - Πολύπλοκο μοντέλο αναπαράστασης απωλειών
 - Απαιτήση για γνώση γεωμετρικών δεδομένων

Στην εφαρμογή μας λοιπόν γίνεται προσπάθεια για εισαγωγή κάποιων στοιχείων της νέας μεθόδου στην βάση της υπάρχουσας με σκοπό την ελαχιστοποίηση των μειονεκτημάτων και την όσο το δυνατόν καλύτερη αναπαράσταση των χαρτών. Πιο συγκεκριμένα:

- Χρησιμοποιήθηκαν ο πραγματικός συντελεστής φόρτισης Ψ και όχι ο ισηντροπικός, με αποτέλεσμα την ισχυροποίηση της φυσικής βάσης της μεθόδου σύμφωνα με την εξίσωση 5.3.
- Για τον συντελεστή παροχής χρησιμοποιείται ο Φ_{avg} σύμφωνα με τη σχέση 2.1, και ορίζεται συσχέτιση με τον συντελεστή φόρτισης σύμφωνα με την εξίσωση 5.8.
- Έγινε χρήση πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού για την προσέγγιση της καμπύλης $\eta_{is} - \Phi_{avg}$ ώστε να μην είναι απαραίτητα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συμπιεστή

Τα βήματα για την εφαρμογή είναι τα ακόλουθα

- Με βάση τα πειραματικά δεδομένα υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή, καθώς και ο συντελεστής φόρτισης και παροχής
- Εφαρμόζεται μεθοδολογία εκτίμησης της αύξησης πίεσης του βοηθητικού φυσητήρα στα χαμηλά φορτία του κινητήρα, και διορθώνεται ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή σε χαμηλό φορτίο.
- Ορίζονται οι συσχετίσεις συντελεστή παροχής με συντελεστή φόρτισης και ισεντροπικό βαθμό απόδοσης.
- Με βάση τις ανωτέρω συσχετίσεις, για τα δεδομένα πειραματικά σημεία εκτιμάται η ακρίβεια στον υπολογισμό της ταχύτητας υπερπληρωτή σε σχέση με τα πειραματικά, με δεδομένα εισόδου το λόγο πίεσης και την παροχή μάζας διαμεσου του συμπιεστή. Σύγκριση γίνεται με τα αποτελέσματα της μεθόδου χωρίς διόρθωση χαμηλού φορτίου, καθώς και με προβλέψεις βασισμένες στην υπάρχουσα μεθοδολογία

Ως είσοδο στη πρακτική εφαρμογή χρησιμοποιήσαμε δεδομένα που προέρχονται από τα λεγόμενα Shop Tests, που είναι μετρήσεις που γίνονται κατά την εγκατάσταση του κινητήρα και αφορούν σε διαφορετικά φορτία λειτουργίας. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται φαίνονται στο πίνακα παρακάτω. Σημειώνουμε σε αυτό το σημείο πως χρησιμοποιούμε τα δεδομένα αυτά διότι είναι άμεσα διαθέσιμα και βρίσκονται στη κατοχή του εκάστοτε χρηστή-λειτουργού του κινητήρα.

Συμπληρωματικά από το λογισμικό EDS -VI έγινε προσομοίωση του κινητήρα στις συνθήκες του shop test και υπολογίστηκε η παροχή μάζας, που δεν περιλαμβάνεται στα shop tests. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται για διάγνωση καθώς και για έλεγχο λειτουργίας μηχανών εσωτερικής καύσης και έχει αναπτυχθεί από τον καθηγητή κ Δ. Χουντάλα. Η διερεύνηση αφορά κινητήρα MAN 6S70 MC-C8 ο οποίος διαθέτει 2 υπερπληρωτές MET53MA της εταιρίας Mitsubishi.

PAMB	DPFILT	TCIN	TCOUT	PSCAV	DPAC	TRPM	BLOWER	PTIN	DPBACK	TTIN	TTOUT	MASS
<i>mbar</i>	<i>mmH2O</i>	<i>°C</i>	<i>°C</i>	<i>bar</i>	<i>mmH2O</i>	<i>rpm</i>		<i>bar</i>	<i>mmH2O</i>	<i>°C</i>	<i>°C</i>	<i>kg/sec</i>
1007	10	26,8	53,0	0,36	90	6907	ON	0,26	28	335,0	265,0	6,84
1007	13	28,4	94,0	0,80	135	10178	OFF	0,66	70	378,0	278,0	10,77
1007	25	28,0	120,0	1,18	168	11546	OFF	1,00	125	378,0	255,0	13,03
1007	40	29,7	170,0	2,08	198	13982	OFF	1,82	210	385,0	235,0	17,98
1007	48	31,3	181,0	2,36	199	14654	OFF	2,10	250	408,0	240,0	19,55
1007	44	32,4	209,0	2,86	211	15797	OFF	2,60	320	422,0	258,0	22,43
1007	61	32,3	225,0	3,20	210	16660	OFF	2,98	385	475,0	292,0	24,77

Πίνακας 1 Δεδομένα που ελήφθησαν από τα Shop Tests και το EDS-VI

Έχοντας λοιπόν τα απαραίτητα δεδομένα αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα που αναπαριστά τον χάρτη λειτουργίας καθώς επίσης κάνει και μια εκτίμηση της ταχύτητας περιστροφής. Αυτό έγινε ώστε να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε πιο εύκολα την χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Visual Fortran στο εργαστήριο MEK.

Τα βήματα που ακολουθούνται έχουν ως εξής:

Αρχικά υπολογίζονται τα p_{Cin} , p_{Cout} , p_{Tin} , p_{Tout} , από τις γνωστές σχέσεις .

Στη συνέχεια υπολογίζονται ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή από τη σχέση

$$\eta_c = \frac{T_{Cout-is} - T_{Cin}}{T_{Cout} - T_{Cin}}, \quad (6.1)$$

σημειώνεται πως οι θερμοδυναμικές ιδιότητες ελήφθησαν για τη μέση θερμοκρασία.

Ισχύουν οι σχέσεις για το γινόμενο του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου με τον μηχανικό βαθμό απόδοσης της ατράκτου, από ισοζύγιο ισχύος στο ζεύγος συμπιεστή και στροβίλου

$$\eta_{TM} = \frac{W_c}{W_{Tis}} \quad (6.2)$$

$$\eta_{TM} = \eta_T \cdot \eta_{mech} \quad (6.3)$$

Επίσης ισχύουν οι σχέσεις

$$W_c = Cp \cdot (T_{Cout} - T_{Cin}) \quad (6.4)$$

$$W_{Tis} = Cp \cdot (T_{Tin} - T_{Tout-is}) \cdot \left(1 + \frac{1}{\lambda \cdot AF_{St}}\right) \quad (6.5)$$

Υποθέτουμε μια τυπική τιμή για το $\lambda = 3$ που αποτελεί το λόγο ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου με στοιχειομετρική αναλογία $AF_{St}=14.5$.

Από την επεξεργασία των πειραματικών στοιχείων με βάση τις ανωτέρω σχέσεις τελικά προκύπτουν οι βαθμοί απόδοσης του συμπιεστή και το γινόμενο του βαθμού απόδοσης του στροβίλου με το μηχανικό βαθμό απόδοσης της ατράκτου του ζεύγους. Δεν χρησιμοποιείται η θερμοκρασιακή πτώση για τον υπολογισμό του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου διότι η εμπειρία έχει δείξει ότι σε βιομηχανικές εφαρμογές τα σφάλματα στη μέτρηση θερμοκρασίας καθώς και τυχόν μη αδιαβατική εκτόνωση στο στρόβιλο (εκτόνωση με ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας προς τα τοιχώματα) πολύ συχνά δίνουν αφύσικες τιμές πάνω από τη μονάδα. Μετά τη πρώτη εφαρμογή και υπολογισμό παρατηρήθηκε μια αφύσικα υψηλή τιμή για τον βαθμό απόδοσης του συμπιεστή στα χαμηλά φορτία. Αυτό όπως διαπιστώθηκε οφείλεται στη λειτουργία του φυσητήρα στις χαμηλές στροφές. Αυτό συμβαίνει γιατί η θερμοκρασία εξόδου του συμπιεστή μετράται στην κατάθλιψη αυτού, όμως η πίεση σάρωσης που μετράται μετά το ψυγείο αέρα συμπεριλαμβάνει και την αύξηση πίεσης που προκαλεί ο φυσητήρας . Επίσης εν γένει η μέτρηση θερμοκρασίας αερίου, ειδικά σε πρακτικές εφαρμογές ενέχει ανακρίβειες, οι οποίες γίνονται ιδιαίτερα σημαντικές ως σχετικό σφάλμα στην περίπτωση μέτρησης μικρών θερμοκρασιακών διαφορών (όπως πχ η θερμοκρασιακή ανύψωση στην κατάθλιψη του συμπιεστή σε χαμηλούς λόγους πίεσης)Ως εκ τούτου ενσωματώθηκε στη πρακτική εφαρμογή μια διαδικασία διόρθωσης ώστε να λαμβάνεται υπόψη και αυτός ο παράγοντας. Αυτό είναι

ιδιαίτερα σημαντικό διότι χωρίς αυτή τη προσθήκη το πολυώνυμο που προσεγγίζει την καμπύλη συντελεστή παροχής - βαθμού απόδοσης λαμβάνει λανθασμένη μορφή, με τα κοίλα προς τα άνω, που είναι αφύσικο και δεν αντικατοπτρίζει την πραγματική φυσική σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών. Πριν περάσουμε όμως στη διαδικασία αναφέρουμε λίγα λόγια για τη λειτουργία του φυσητήρα και τότε ακριβώς τίθεται σε λειτουργία.

Ο φυσητήρας υπάρχει και λειτουργεί για να εξασφαλίζει τη ροή του αέρα δια μέσου της μηχανής. Ενεργοποιείται από την μονάδα ελέγχου του κινητήρα για χαμηλές παροχές και απενεργοποιείται μόλις η παροχή υπερβεί μια οριακή τιμή.

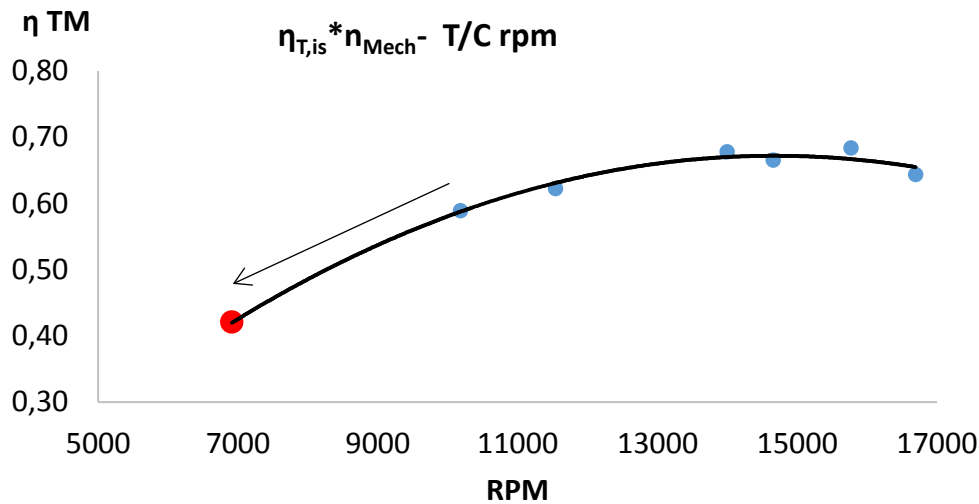
Κατασκευαστικά η λειτουργία του επιτυγχάνεται στην ύπαρξη δύο διαφορετικών οχητών ικανών να διακινήσουν το εργαζόμενο μέσο. Όταν η παροχή είναι χαμηλή η μονάδα ελέγχου κλείνει κάποιες βαλβίδες (flaps) και το αέριο οδηγείται μέσω του ενός οχητού στον φυσητήρα που αυξάνει περαιτέρω την πίεση του για να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ροή. Μόλις η παροχή φτάσει πάνω από μια οριακή τιμή η μονάδα ελέγχου περιστρέφει τα flaps και πλέον ο φυσητήρας παρακάμπτεται και παύει να λειτουργεί. Το εργαζόμενο μέσο προφανώς περνά μέσα από τον δεύτερο οχητό.

Επιστρέφουμε λοιπόν στη διαδικασία που αναπτύχθηκε για την λειτουργία του φυσητήρα η οποία αναλύεται ως εξής:

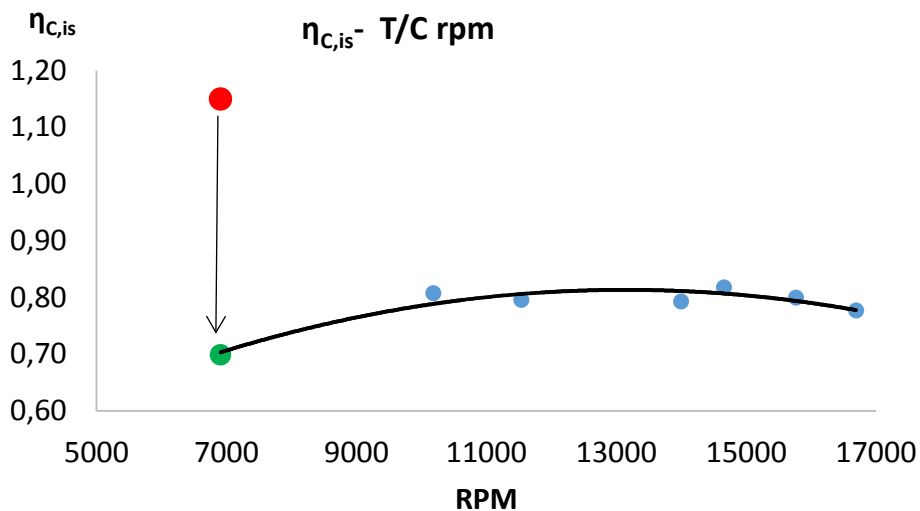
Αρχικά γίνεται μια πολυωνυμική προσέγγιση της καμπύλης που συνδέει γινόμενο ισεντροπικού βαθμού απόδοσης στροβίλου και μηχανικού βαθμού απόδοσης ατράκτου $\eta_{TM} = \eta_T \eta_{mech}$ όπως αυτός υπολογίζεται από τη σχέση 6.3 με τις στροφές του υπερπληρωτή χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το πρώτο σημείο για το οποίο και λειτουργεί ο φυσητήρας μιας και αντιστοιχεί σε χαμηλά φορτία.

Στη συνέχεια γίνεται αριθμητικά παρέκταση της καμπύλης προς το χαμηλότερο φορτίο και τις χαμηλότερες στροφές για να βρεθεί ο $\eta_{TM} = \eta_T \cdot \eta_{mech}$ στο χαμηλό φορτίο λειτουργίας (σχήμα 41., κόκκινο σημείο)

Στη συνέχεια λύνεται η σχέση 6.3 για να βρεθεί το έργο του συμπιεστή, οπότε υπολογίζεται και η πραγματική θερμοκρασία εξόδου από αυτόν (δεν χρησιμοποιείται η πειραματική τιμή, δεδομένου ότι όπως αναφέρθηκε, μέτρηση θερμοκρασιών με βιομηχανικό εξοπλισμό και ειδικά μικρών θερμοκρασιακών διαφορών ενέχει σημαντικό σφάλμα).



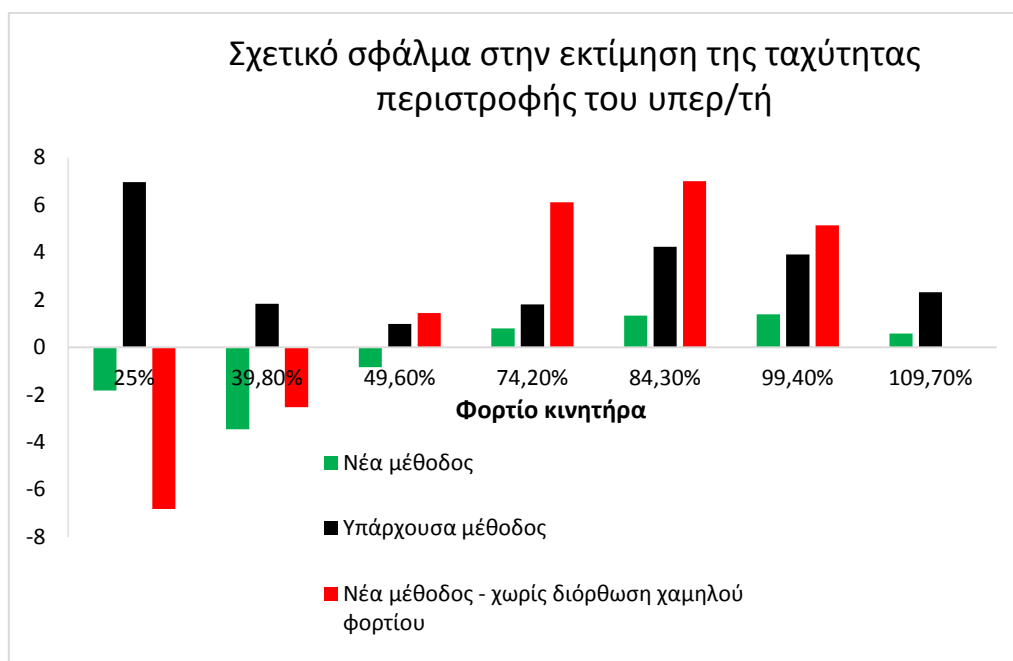
Σχήμα 41 Παρέκταση για το σημείο που αντιστοιχεί σε λειτουργία χαμηλού φορτίου (φουσητήρας σε λειτουργία)



Σχήμα 42 Διόρθωση σημείου χαμηλού φορτίου (λειτουργία φουσητήρα)

Υποθέτοντας μια λογική τιμή για το βαθμό απόδοσης του φουσητήρα μπορεί να υπολογιστεί η ανύψωση πίεσης που αυτός προκαλεί. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή υποτέθηκε η τιμή 0.6. Πλέον η επιρροή του φουσητήρα έχει προσδιορισθεί πλήρως. Στη συνέχεια η ανύψωση πίεσης του φουσητήρα αφαιρείται από την πειραματικά μετρημένη πίεση σάρωσης, και υπολογίζεται έτσι η πίεση στην κατάθλιψη του συμπιεστή. Έχοντας υπολογίσει πίεση και θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή, υπολογίζεται ο διορθωμένος βαθμός απόδοσης αυτού από τη σχέση 6.1. Στο σχήμα 42 παρατηρείται με κόκκινο χρώμα η τιμή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή πριν την διόρθωση, και με πράσινο η διορθωμένη τιμή.

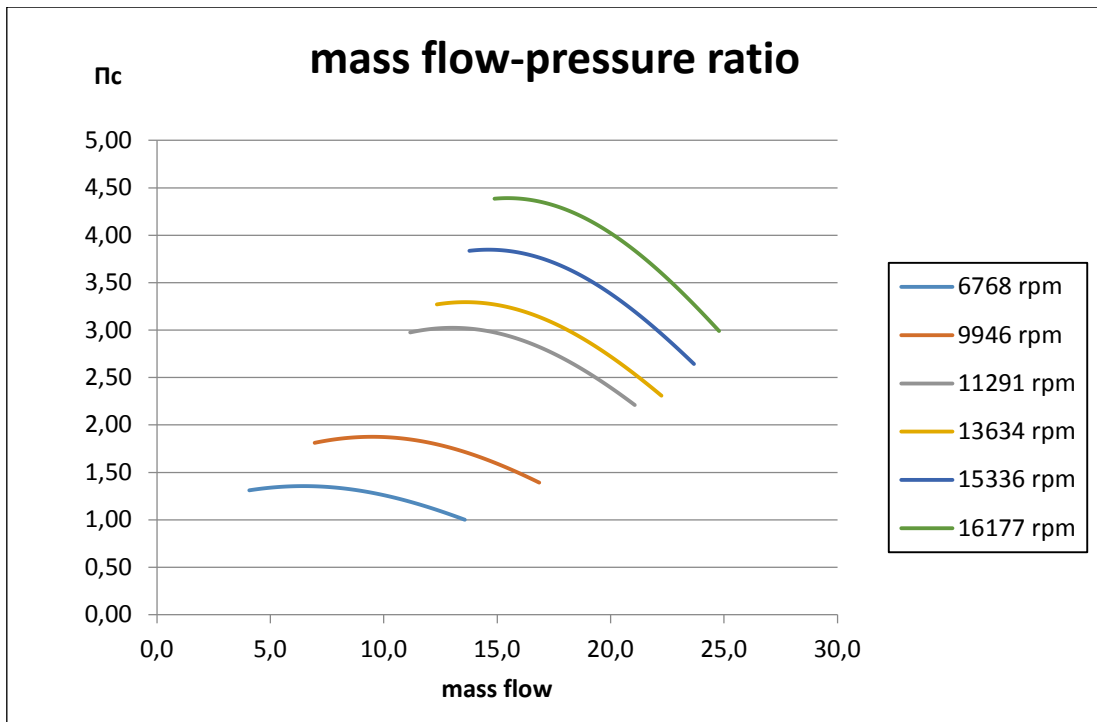
Τα αποτελέσματα όπως προαναφέραμε θα παρουσιαστούν με βάση την εκτίμηση για την ταχύτητα. Χρησιμοποιώντας λοιπόν κατά σειρά την υπάρχουσα μέθοδο καθώς και την πρακτική εφαρμογή με και χωρίς διόρθωση για τον φυσητήρα καταλήξαμε στα εξής που συνοψίζονται στο σχήμα 43. Η υπάρχουσα μέθοδος αφορά στις προβλέψεις του προσομοιωτή του διαγνωστικού EDS-VI, ο οποίος χρησιμοποιεί μεθοδολογία βασισμένη στην υπάρχουσα μέθοδο της λειτουργικής ομοιότητας.



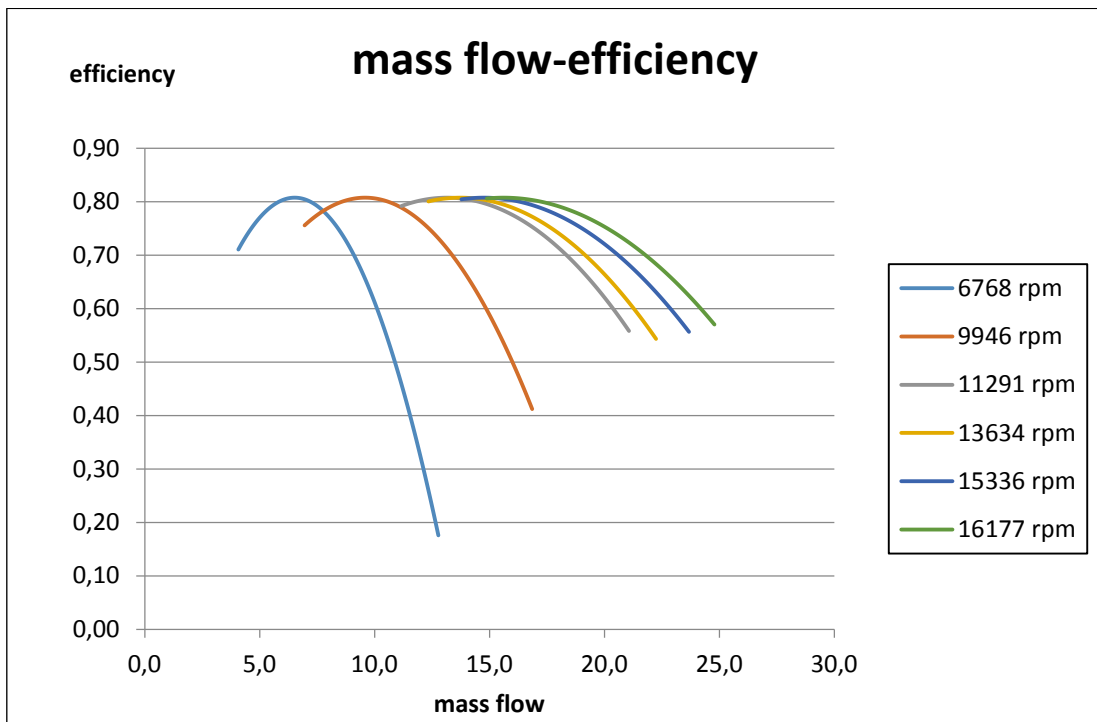
Σχήμα 43 Σχετικό σφάλμα στην εκτίμηση της ταχύτητας περιστροφής του υπερπληρωτή

Ουσιαστικά παρατηρούμε πως η νέα μέθοδος μετά την εισαγωγή της διαδικασίας διόρθωσης στα χαμηλά φορτία δίνει μικρότερο σχετικό σφάλμα (κάτω από 4%) στο σύνολο σχεδόν των σημείων λειτουργίας της μηχανής. Προσομοιώνεται λοιπόν ικανοποιητικά η λειτουργία του υπερπληρωτή μέσω της εφαρμογής που αναπτύξαμε. Αντίθετα χωρίς διόρθωση του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή στο χαμηλό φορτίο η μέθοδος υστερεί σημαντικά σε προβλεπτική ακρίβεια με σφάλμα μεγαλύτερο και από αυτό της υπάρχουσας μεθόδου.

Τέλος τα πολυώνυμα βαθμού απόδοσης και συντελεστή φόρτισης χρησιμοποιούνται ώστε να παραχθούν οι χάρτες του συμπιεστή στην μορφή ισοταχών λόγου πίεσης και ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει ανηγμένης παροχής μαζας. Παρατηρείται στα σχήματα 44 και 45 ότι η μορφή των χαρτών είναι η αναμενόμενη, η οποία παρατηρείται στους πειραματικούς χάρτες. Οι ταχύτητες περιστροφής στις οποίες υπολογίστηκε ο χαρτης αντιστοιχούν στα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία, ενώ όλα τα μεγέθη έχουν αναχθεί σε συνθήκες 288°K και 1 bar σύμφωνα με τις σχέσεις 4.7 και 4.8.



Σχήμα 44 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή - αποτέλεσμα πρακτικής εφαρμογής



Σχήμα 45 Χάρτης λειτουργίας συμπιεστή - αποτέλεσμα πρακτικής εφαρμογής

7 Συμπεράσματα/ Επίλογος

Στο σημείο αυτό, κλείνοντας την διπλωματική αυτή εργασία θα αναφερθούμε συνοπτικά στα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ενασχόληση με το θέμα.

Σκοπός της εκπόνησης της παρούσας εργασίας ήταν να μπορέσουμε να δώσουμε χρήσιμες κατευθύνσεις όσον αφορά την αναπαράσταση χαρτών λειτουργίας συμπιεστών, που χρησιμοποιούνται σε υπερπληρωμένους κινητήρες Ντήζελ.

Πιο συγκεκριμένα έγινε αξιολόγηση της μεθόδου που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην έρευνα και την βιομηχανία και αφορά στην αναπαράσταση με τη μέθοδο της λειτουργικής ομοιότητας.

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης αυτής, αρχικά, αναπτύχθηκε κώδικας - υπολογιστικό πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιώντας ως είσοδο ολόκληρο τον χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή με χρήση της προαναφερθείσας μεθόδου έδινε ως έξοδο - αποτέλεσμα έναν νέο χάρτη λειτουργίας, που πλέον αποτελούσε μια ακριβή προσέγγιση με βάση τη μέθοδο.

Με βάση τις αδυναμίες και τα σφάλματα που προέκυψαν από τη σύγκριση του πραγματικού χάρτη με τον χάρτη που προέκυψε από την προσέγγιση με χρήση της μεθόδου, εξάγαμε χρήσιμα συμπεράσματα. Η μέθοδος ουσιαστικά δείχνει να αναπαράγει ικανοποιητικά τις ισοταχείς καμπύλες παροχής συναρτήσει λόγου πίεσης του χάρτη λειτουργίας, αλλά να αδυνατεί να αναπαραστήσει με ακρίβεια την μορφή των καμπύλων του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης.

Στη συνέχεια, για την πιο πλήρη και ολοκληρωμένη αξιολόγηση της μεθόδου ο κώδικας μεταβλήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να δέχεται ως είσοδο όχι ολόκληρο τον χάρτη, παρά μόνο έναν μικρό αριθμό σημείων λειτουργίας του συμπιεστή. Αυτό έγινε γιατί περισσότερες εφαρμογές δεν είναι διαθέσιμος όλος ο χάρτης λειτουργίας, οπότε είναι σημαντικό να αξιολογηθεί η υπάρχουσα μεθοδολογία στην περίπτωση βαθμονόμησης της με βάση λίγα σημεία του χάρτη. Στην συνέχεια έγινε αναπαράσταση ολόκληρου του χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή.

Οι χάρτες που προέκυψαν κρίνονται ικανοποιητικοί και ακριβείς κοντά στα σημεία βαθμονόμησης, κοντά δηλαδή στα σημεία που δεχόμασταν ως είσοδο. Ιδιαίτερη αδυναμία παρουσιάζεται όχι τόσο στις ισοταχείς καμπύλες αλλά στις καμπύλες του βαθμού απόδοσης. Μακριά από τα σημεία βαθμονόμησης και ιδιαίτερα στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής του συμπιεστή η ακρίβεια των προβλέψεων μειώνεται.

Γνωρίζοντας πλέον τα μειονεκτήματα της υπάρχουσας μεθόδου έγινε προσπάθεια για την ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου, διαφορετικής φιλοσοφίας, με ενισχυμένη φυσική βάση, με σκοπό να καλυφθούν οι αδυναμίες που παρατηρήθηκαν.

Η νέα μέθοδος χρησιμοποιεί ως είσοδο γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αφορούν στο συμπιεστή, καθώς και ένα μοντέλο απωλειών για τον υπολογισμό των αδιάστατων παραγόντων που οδηγούν εν τέλει στην αναπαράσταση του χάρτη. Έτσι η μέθοδος ισχυροποιείται και δίνει καλύτερα αποτελέσματα και πιο σωστή αναπαράσταση των καμπύλων που εμφανίζονται στο χάρτη λειτουργίας ενός συμπιεστή. Πλέον οι καμπύλες βαθμού απόδοσης καθώς και οι ισοταχείς έχουν την κατάλληλη μορφή και βρίσκονται πολύ κοντά στις πραγματικές.

Μειονεκτήματα της νέας μεθόδου αποτελούν η απαίτηση για γνώση των γεωμετρικών διαστάσεων καθώς και το πολύπλοκο μοντέλο απωλειών. Παρόλα αυτά μέσω της

ανάπτυξής της εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν κυρίως στο σε ποια κατεύθυνση θα πρέπει να κινηθούμε για την βελτίωση της υπάρχουσας μεθόδου.

Στο πλαίσιο αυτό λοιπόν, στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής, παρουσιάζεται μια πρακτική εφαρμογή που χρησιμοποιεί στοιχεία από την νέα μέθοδο για την καλύτερη αναπαράσταση ενός χάρτη λειτουργίας συμπιεστή. Η εφαρμογή αυτή αποτελεί ουσιαστικά την μεταφορά της γνώσης που αποκομίσαμε από την αξιολόγηση και την ανάπτυξη των μεθόδων στην πράξη.

Η εφαρμογή αφορά συμπιεστή ναυτικού κινητήρα. Ως είσοδος χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα που αφορούσαν σημεία λειτουργίας ναυτικού δίχρονου κινητήρα. Επίσης χρησιμοποιήθηκε μεθοδολογία υπολογισμού του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή στα χαμηλά φορτία του κινητήρα λαμβάνοντας υπόψη την λειτουργία του βοηθητικού φυσητήρα (auxiliary blower), δεδομένου ότι χωρίς διόρθωση μπορεί να υπολογιστεί αφύσικος ισεντροπικός πολύ κοντά στη μονάδα.

Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένου ότι, όπως διαπιστώθηκε, η καμπύλη συσχέτισης του ισεντροπικού βαθμού με τον συντελεστή παροχής πρέπει να είναι κυρτή, δηλαδή με τα κοίλα προς τα κάτω. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή αυτό επιτεύχθηκε με χρήση πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού με αρνητικό το συντελεστή του δευτεροβάθμιου όρου.

Η νέα μέθοδος αξιολογήθηκε σε σχέση με την ικανότητά της να προβλέπει την ταχύτητα περιστροφής του υπερπληρωτή δεδομένης της παροχής μάζας και του λόγου πίεσης. Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά με τη νέα μέθοδο να υπολογίζει τις στροφές με σφάλμα μικρότερο του 4%. Τέλος αναπαρήχθη ο χάρτης λειτουργίας του συμπιεστή στη μορφή ισοταχών παροχής- λόγου πίεσης και ισεντροπικού βαθμού απόδοσης- λόγου πίεσης, παρουσιάζοντας την αναμενόμενη μορφή.

Περεταίρω έρευνα στο αντικείμενο, όπως δείχνουν τα αποτελέσματα της διερεύνησης, πρέπει να εστιαστεί στην ακριβέστερη αναπαράσταση των χαρτών ισεντροπικού βαθμού απόδοσης, καθώς και σε εφαρμογή της νέας μεθόδου σε χάρτες συμπιεστή ναυτικών κινητήρων αφού ληφθούν μετρήσεις βασικών γεωμετρικών μεγεθών της πτερωτής και του διαχύτη.

8 Βιβλιογραφία

Ξένη Βιβλιογραφία

- [1] Nicholas C. Baines, “Fundamentals of Turbocharging”, Concepts NREC, 2005
- [2] John B. Heywood, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, New York, McGraw-Hill, 1988
- [3] J.I Ramos, “Internal Combustion Engine Modelling” Hemisphere Publishing Corporation, 1989

Ελληνική Βιβλιογραφία

- [4] Νικόλαος Κυρτάτος, «Ναυτικοί Κινητήρες Diesel», Αθήνα, 1993, Εκδόσεις Συμμετρία
- [5] Κ. Μαθιουδάκης, «Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων», Αθήνα, 2007, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [6] Παπαηλίου, Κ. Μαθιουδάκης, Κ. Γιαννάκογλου, «Εισαγωγή στις θερμικές Στροβιλομηχανές», Αθήνα, 2000, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [7] Ρακόπουλος Κ.Δ., «Αρχές Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.», Εκδόσεις Γρ. Φούντας, Αθήνα 1988
- [8] Ρακόπουλος Κ.Δ., Γιακουμής Ε.Γ., «Εναλλαγή Αερίων και Υπερπλήρωση Μ.Ε.Κ.», .», Εκδόσεις Γρ. Φούντας, Αθήνα, 2011

Διπλωματικές Εργασίες

- [9] Νάτσης Π., «Μελέτη Στροβιλουπερπληρωτών και Μοντελοποίηση τους», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2011
- [10] Πλυτάς Γ.Β., «Εναλλακτικές μέθοδοι παράστασης χαρτών λειτουργίας υπερπληρωτών ναυτικών κινητήρων», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 1998

Δημοσιευμένα Επιστημονικά Άρθρα (Papers)

- [11] Magdy S. Attia and M. Taher Schobeiri, “ A new method for the prediction of compressor performance maps using one-dimensional row - by - row analysis”, Texas A&M University,
- [12] W Zhuge, Y Zhang, X Zheng, M Yang and Y He, “Development of an advanced turbocharger simulation method for cycle simulation of turbocharged internal combustion engines”, Journal of Automobile Engineering 2009
- [13] Mehdi Nakhjiri, Peter Pelz and Berthold Matyschok, Lorenz Däubler and Andreas Horn, “Physical Modeling of Automotive Turbocharger Compressor: Analytical Approach and Validation”, SAE 2011
- [14] Nikolaos Sakellaris and Dimitrios Hountalas, “Meanline Modeling of Radial Turbine Performance for Turbocharger Simulation and Diagnostic Applications”, SAE 2013

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

- [15] www.abb.com
- [16] www.mandieselturbo.com
- [17] www.wikipedia.org
- [18] www.mtee.eu
- [19] www.gtisoft.com
- [20] www.turboobygarrett.com