



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ ΓΙΑ
ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ Honda CBR 600RR



Συντάκτης: Κωσταντίνος Ντόνας

Επιβλέπων Καθηγητής: Αναστάσιος Σταμάτης

Βόλος, Ιούλιος 2014

ΥΠΕΒΛΗΘΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΠΛΗΡΩΣΗ ΜΕΡΟΥΣ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 12826/1
Ημερ. Εισ.: 08-09-2014
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2014
ΝΤΟ

© 2014 Κωνσταντίνος Ντόνας

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής
(Επιβλέπων)

Δρ. Σταμάτης Αναστάσιος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Σταπουντζής Ερρίκος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής. Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, καθώς και τον αδερφό μου Ανάργυρο για την υλική και ηθική υποστήριξη. Επίσης οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στους συνεργάτες από το εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών Απόστολο Γκούντα, Διαμαντή Μπακάλη και Δημήτρη Τζιουρτζιούμη για τις πολύ σημαντικές συμβουλές τους και την υποστήριξη που απλόχερα μου δώσανε.

Επίσης θα ήθελα πολύ να ευχαριστήσω την Centaurus Racing Team που τρία χρόνια τώρα, μου έχει χαρίσει αξέχαστες στιγμές χαράς και συγκίνησης με τις επιτυχίες της, καθώς και την πολύ μεγάλη υποστήριξη των μελών της στην πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής. Ένα ξεχωριστό ευχαριστώ στο μέλος της ομάδας Αναστάσιο Σαμαρά για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε τον χρόνο αυτό, διότι ένα καλό turbo για να παραμείνει καλό, χρειάζεται την κατάλληλη εισαγωγή και εξαγωγή. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου από τον βόλο για όλες τις στιγμές που περάσαμε αυτά τα πέντε χρόνια.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και αδερφούς μου από το Μαρούσι, Αλέξανδρο Ρόκα, Νίκο Γκίωνη, Μάριο Σταμουλιά, Γιάννη Ρένεση και Παναγιώτη Πολίτη για τη μεγάλη αγάπη και υποστήριξη που δέχθηκα όλα αυτά τα χρόνια καθώς και την αγάπη μου για τον τομέα της αυτοκίνησης η οποία οφείλεται σε αυτούς. Σας αγαπώ πολύ παιδιά.

Τέλος, θα ήθελα να πω το μεγαλύτερο ευχαριστώ στον κ. Αναστάσιο Σταμάτη για τη δυνατότητα που μου έδωσε να πραγματοποιήσω ένα μεγάλο μου όνειρο, το οποίο είναι η σχεδίαση ενός υπερσυμπιεστή. Επίσης τον ευχαριστώ για τις πολύτιμες συμβουλές του και την καθοδήγηση του, διότι χωρίς αυτόν η διπλωματική αυτή δεν θα πραγματοποιούνταν ποτέ και του εύχομαι να είναι πάντα γερός και δυνατός.

Λίστα Συμβόλων

P_0	Ολική πίεση
P	Στατική πίεση
s	Εντροπία
h_0	Ολική ενθαλπία
h	Στατική ενθαλπία
T_0	Ολική θερμοκρασία
T	Στατική θερμοκρασία
η	Απόδοση
W	Ισχύς
c	Συνησταμένη ταχύτητα
c_x	Αξονική ταχύτητα
c_r	Ακτινική ταχύτητα
\dot{m}	Μαζική παροχή
c_p	Ειδική θερμότητα
γ	Ισεντροπικός εκθέτης
β	Γωνία πτερυγίου
α	Γωνία ρευστού
u	Ταχύτητα πτερυγίου
N	Στροφές
ρ	Πυκνότητα
n	Αριθμός πτερυγίων
A	Εμβαδόν
R	Ακτίνα
ω	γωνιακή ταχύτητα
w	Σχετική ταχύτητα
c_u	Ταχύτητα συστροφής
c'_u	Ιδανική ταχύτητα συστροφής

σ	Παράγοντας ολίσθησης
C_f	Παράγοντας τριβής
D_f	Παράγοντας διάχυσης
J	Σταθερά θερμότητας
Δh	Απώλειες συμπίεστη
L	Απώλειες στροβίλου
k_w	Θερμική αγωγιμότητα
g	Επιτάχυνση βαρύτητας
l	Διορθωμένο μήκος
v	Ειδικός όγκος
U_o	Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
Q	Θερμοροή

Δείκτες

1...3	Θέση συμπίεστη
1...3	Θέση στροβίλου
0,i	Εσωτερική και εξωτερική θέση σωλήνα ψύξης
real	Πραγματική
ideal	Ιδανική
c	Συμπίεστης
t	Στρόβιλος
h	Ζεστό ρεύμα
c	Κρύο ρεύμα

Πίνακας Περιεχομένων

1.	Εισαγωγή στην υπερπλήρωση μηχανών εσωτερικής καύσης	9
1.1	Σκοπός εργασίας	9
1.2	Ιστορική αναδρομή υπερπληρωτών	10
1.2.1	Μηχανικός υπερπληρωτής (supercharger).....	10
1.2.2	Στροβιλοϋπερπληρωτής (turbocharger).....	11
1.3	Υπερπλήρωση	12
1.3.1	Σύγκριση ατμοσφαιρικών και υπερπληρώμενων κινητήρων	12
1.4	Τρόποι Υπερπλήρωσης.....	14
1.4.1	Κίνηση Συμπιεστή υπερπληρωτή	14
1.4.2	Σύγκριση υπερπληρωτών μηχανικής ισχύος και στροβιλοϋπερπληρωτών	14
1.4.3	Τύποι συμπιεστών που χρησιμοποιούνται στις μηχανές εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ)	17
1.5	Νέες μορφές υπερπλήρωσης.....	18
1.5.1	Twincharger	18
1.5.2	Twin Turbos.....	20
1.5.3	Στροβιλοσυμπιεστές μεταβλητής γεωμετρίας (VGTs).....	22
1.6	Ωθηση (Power Boost)	23
2.	Στροβιλοϋπερπλήρωσης σε μηχανές εσωτερικής καύσης.....	24
2.1	Αρχή λειτουργίας στροβιλοϋπερπλήρωσης.....	24
2.2	Φυγοκεντρικός συμπιεστής.....	26
2.2.1	Πτερωτή (impeller)	28
2.2.2	Διαχύτης (Diffuser).....	31
2.2.3	Housing.....	32
2.2.4	Απώλειες.....	33
2.2.5	Χάρτης Συμπιεστή	35
2.3	Ακτινικός Στρόβιλος.....	37
2.3.1	Πτερωτή (Impeller).....	38
2.3.2	Σταθερή πτερύγωση (nozzle vaned diffuser).....	41
2.3.3	Housing.....	42
2.3.4	Απώλειες.....	43
2.3.4	Χάρτης Στροβίλου	44
2.4	Σύστημα έδρασης και λίπανσης άξονα μετάδοσης κίνησης.....	45
2.4.1	Ακτινικό σύστημα κύλισης άξονα (Radial bearing system).....	46

2.4.2	Αξονικό Σύστημα κύλισης (Axial-thrust bearing system).....	46
2.4.3	Λίπανση	47
2.5	Waste gate	47
2.5.1	Εσωτερική waste gate	48
2.5.2	Εξωτερική waste gate	49
2.6	Βαλβίδα εκκένωσης (blow off valve)	50
2.6	Εναλλάκτης Θερμότητας (Intercooler)	51
2.6.1	Εναλλάκτες Αυλών-πτερυγίων	51
2.6.2	Είδη εναλλακτών θερμότητας για ψύξη του συμπιεσμένου αέρα	53
3.	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης με στροβιλουπερπληρωτή	54
3.1	Γενικά Στοιχεία Μηχανής Εσωτερικής Καύσης	54
3.1.1	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (Εμβολοφόρα)	54
3.1.2	Τετράχρονοι και Δίχρονοι κινητήρες.....	54
3.1.3	Μηχανές εσωτερικής καύσης ανάφλεξης με σπινθήρα και ανάφλεξης με συμπίεση τεσσάρων χρόνων	57
3.2	Ανάκτηση ενέργειας μηχανής εσωτερικής ενέργειας	60
3.3	Ενεργειακό ισοζύγιο ατράκτου στροβιλοϋπερπληρωτή	62
4.	Σχεδιασμός και προσομοίωση στροβιλουπερπληρωτή	63
4.1	Κινητήρας όπου προσαρμόζεται ο στροβιλουπερπληρωτής	63
4.1.1	Βασικά στοιχεία κινητήρα	63
4.1.2	Καμπύλη ισχύος κινητήρα χωρίς χρήση στροβιλοϋπερπλήρωσης.....	64
4.1.3	Καμπύλη ροπής κινητήρα χωρίς χρήση στροβιλοϋπερπλήρωσης.....	65
4.2	Αρχική υπόθεση και off-design	66
4.2.1	Αρχική υπόθεση	66
4.2.1	Συμπιεστής.....	66
4.1.3	Στρόβιλος.....	70
4.3	Καμπύλες λειτουργίας στροβιλοϋπερπληρωτή.....	74
4.3.1	Συμπιεστής.....	74
4.3.2	Στρόβιλος.....	75
4.4	Τρισδιάστατος σχεδιασμός	76
4.4.1	Συμπιεστής.....	76
4.4.2	Στρόβιλος.....	78
4.4	Προσομοίωση λειτουργίας και αποτελέσματα	80
4.4.1	Συμπιεστής.....	80
4.4.2	Στρόβιλος.....	85

4.6 Σύγκριση ατμοσφαιρικού με στροβιλοϋπερπληρούμενο κινητήρα.....	91
4.6.1 Καμπύλες ισχύος και ροπής στροβιλοϋπερπληρούμενου κινητήρα Honda Cbr 600 RR	91
4.7 Συμπεράσματα-Μελλοντική βελτίωση	93
Βιβλιογραφία	94

1. Εισαγωγή στην υπερπλήρωση μηχανών εσωτερικής καύσης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε μελέτη και τρισδιάστατη σχεδίαση στροβιλοϋπερπληρωτή με σκοπό την ενσωμάτωση και βελτίωση της λειτουργίας του κινητήρα Honda CBR 600RR με χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης μονοδιάστατης και τρισδιάστατης ροής στροβιλομηχανής καθώς και προσομοίωση μηχανής εσωτερικής καύσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια θεωρητική ανασκόπηση της έννοιας υπερπλήρωσης, καθώς και των διάφορων εναλλακτικών τύπων υπερπλήρωσης που έχουν αναπτυχθεί. Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται θερμοδυναμική και ρευστομηχανική ανάλυση της αρχής λειτουργίας της στροβιλοϋπερπλήρωσης, ενώ στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η θεωρητική ανάλυση της στροβιλοϋπερπλήρωσης σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο προβάλλονται τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας, το τρισδιάστατο σχέδιο του στροβιλοϋπερπληρωτή, καθώς και οι απαραίτητοι υπολογισμοί που το απαρτίζουν.

1.1 Σκοπός εργασίας

Ο σκοπός της πραγματοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η εξοικείωση του φοιτητή με τον τομέα των στροβιλομηχανών καθώς και την χρήση προγραμμάτων, τα οποία είναι απαραίτητα εργαλεία για την ανάλυση και επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων. Επίσης, στόχος της εργασίας και της συνολικότερης επαφής με τον εργαστηριακό χώρο ήταν η ανάπτυξη κριτικής σκέψης μέσα από την επίλυση προβλημάτων που προκύπτουν κατά την εκπόνηση της.

Τέλος, απώτερος σκοπός της διπλωματικής εργασίας που εκπονήθηκε είναι η κατασκευή και τοποθέτηση του στροβιλοϋπερπληρωτή που σχεδιάστηκε σε τρισδιάστατη μορφή, στο αυτοκίνητο τύπου formula 1 της φοιτητικής ομάδας Centaurus racing team της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, το οποίο διαγωνίζεται στον παγκόσμιο διαγωνισμό Formula student, ώστε να βελτιώνει την απόδοση και λειτουργία του κινητήρα.

1.2 Ιστορική αναδρομή υπερπληρωτών

1.2.1 Μηχανικός υπερπληρωτής (supercharger)

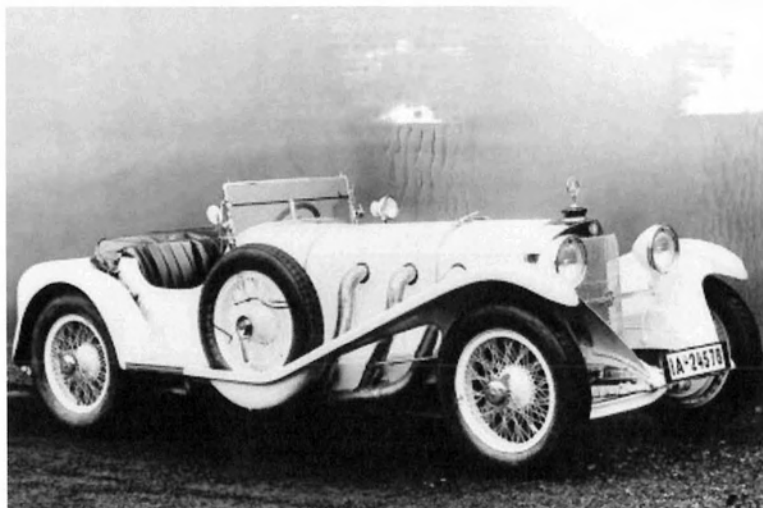
Το 1860 οι αδερφοί Philander και Francis Marrison ιδρυτές της εταιρίας Roots Blower (φουσητήρες Roots) στην Ιντιάνα των Η.Π.Α κατοχυρώνουν την πατέντα ενός φουσητήρα αέρα. Οι φουσητήρες αυτοί χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές , όπως αερισμού ανθρακωρυχείων και διαχωρισμού του σιταριού από την άχυρο. Το σχέδιο του φουσητήρα τροποποιήθηκε στη συνέχεια σε έναν συμπιεστή αέρα, με περιστρεφόμενους άξονες, από τον Krigar στη Γερμανία.

Σε λιγότερο από δύο δεκαετίες, ο κόσμος είδε το πρώτο λειτουργικό υπερσυμπιεστή για κινητήρα κατασκευασμένο από τον Dugald Clerk για μια δίχρονη μηχανή το 1878. Το 1896 , ο Rudolf Diesel έλαβε ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για τη χρήση ενός υπερσυμπιεστή με κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση (κινητήρας Diesel)

Ο Γερμανός Gottlieb Daimler έλαβε ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για υπερπλήρωση κινητήρα εσωτερικής καύσης το 1885 , ακολουθούμενο από τη Γαλλία του Rateau με την ανάπτυξη του φυγοκεντρικού συμπιεστή και στη συνέχεια του Louis Renault με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από ένα φυγοκεντρικό ανεμιστήρα , που τροφοδοτούσε με αέρα το καρμπυρατέρ.

Μετά το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του το 1885, ο Daimler εργάστηκε για την ανάπτυξη της αποτελεσματικότητας του συμπιεστή με έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης και μια σημαντική ανακάλυψη ήρθε το 1921, όταν η Mercedes ξεκίνησε μια σειρά παραγωγής κινητήρων με υπερτροφοδότηση (40 hp (1.6-λίτρων) και 65 hp (2,6 λίτρων) θέτοντας ένα νέο ορόσημο στην ιστορία της υπερπλήρωσης.

Τα δύο αυτά μοντέλα είχαν υπερσυμπιεστή Roots και απέκτησαν την ονομασία «Kompressor», το σήμα αυτό χρησιμοποιεί η εταιρεία, ακόμη και σήμερα.[1]



Σχήμα 1.1 Mercedes-Benz SSK με μηχανική υπερπλήρωση

1.2.2 Στροβιλοϋπερπληρωτής (turbocharger)

Τον πρώτο στροβιλοσυμπιεστή κατασκεύασε ο Δρ Alfred Büchi κατά τα έτη 1909 -1912. Τρία χρόνια αργότερα παρουσίασε ένα πρωτότυπο ενός υπερτροφοδοτούμενου κινητήρα diesel, αλλά η εφεύρεσή του δεν αναγνωρίστηκε εκείνη τη στιγμή.

Η δεκαετία του 1930 ήταν η εποχή της ανάπτυξης των υπερπληρωτών σε τεράστιες μηχανές (πλοία, ατμομηχανές και βιομηχανικά μηχανήματα). Οι Cummins, Scania και Volvo άρχισαν να κατασκευάζουν φορτηγά εξοπλισμένα με στροβιλοϋπερπληρωτή. Αυτό έγινε διότι το 1954 ο Kurt Beirer κατασκεύασε το πρώτο συμπαγές μοντέλο υπερσυμπιεστή.

Τα πρώτα αυτοκίνητα, τα οποία χρησιμοποίησαν κινητήρες turbo ήταν τα Chevrolet Corvair Monza (1962) και Oldsmobile Jetfire (1962), αλλά η χαμηλή αποδοτικότητα τους και η χαμηλή οικονομία ήταν ο λόγος που οι κινητήρες δεν είχαν επιτυχία με τα αυτοκίνητα .

Την δεκαετία του 1980 τα μοντέλα Mercedes 300 και Volkswagen Golf ήταν εξοπλισμένα με έναν υπερτροφοδοτούμενο κινητήρα diesel. Αυτή ήταν η στιγμή που η χρήση αυτή έγινε επιτυχία με τα αυτοκίνητα να χρησιμοποιούν στροβιλοϋπερπληρωτές μέχρι σήμερα .

Χάρη στο στρόβιλο, είναι σε θέση ο κινητήρας να αποκτήσει μια απίστευτη απόδοση, αλλά εμφανίζει παράλληλα αυξημένη μείωση των εκπομπών καυσαερίων στην ατμόσφαιρα και μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.[2]



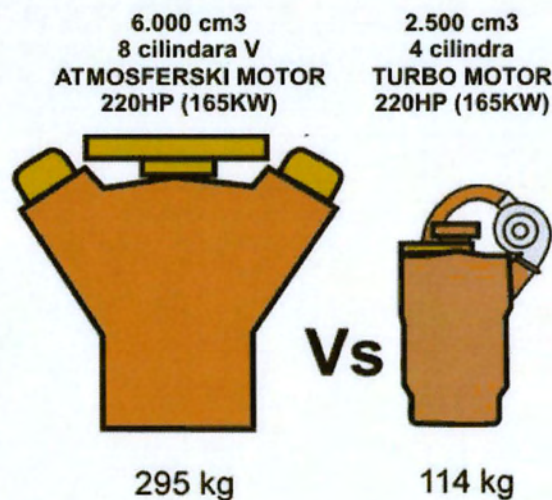
Σχήμα 1.2 Στροβιλοϋπερπληρούμενη Mercedes Benz 300 SD

1.3.Υπερπλήρωση

Με τον όρο υπερπλήρωση (supercharging) στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης ορίζουμε την συμπίεση και την αύξηση της πυκνότητας του εργαζόμενου μέσου (αέρα) εξωτερικά του κυλίνδρου με τη βοήθεια μηχανικού μέσου (συμπιεστή). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αύξηση της παραγόμενης ισχύος και ροπής του κινητήρα. [3]

1.3.1 Σύγκριση ατμοσφαιρικών και υπερπληρώμενων κινητήρων

- Ένα στοιχείο το οποίο απαρτίζει τους υπερπληρώμενους κινητήρες, είναι η οικονομικότητά τους. Συγκεκριμένα οι υπερπληρούμενοι κινητήρες έχουν μικρότερο φυσικό όγκο (μείωση αριθμού κυλίνδρων και μεγέθους κινητήρα), μικρότερο βάρος, μεγαλύτερη ειδική ισχύς (kW/kg) και μειωμένο κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος.

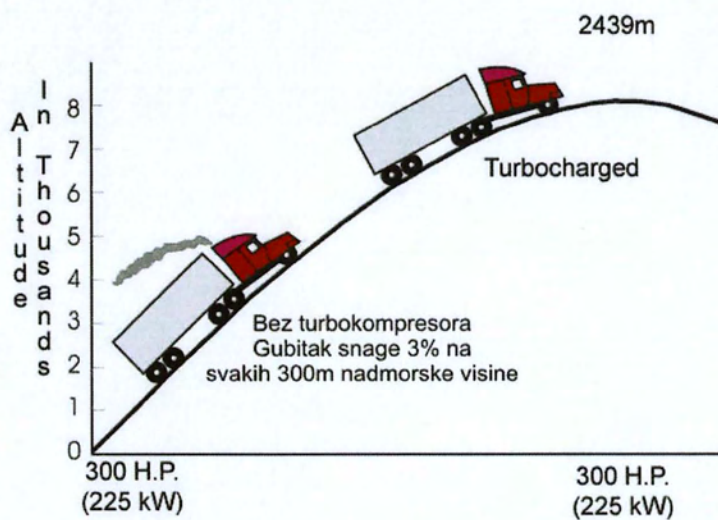


Σχήμα 1.3 Σύγκριση υπερπληρούμενου κινητήρα με ατμοσφαιρικό δεδομένης ισχύος

- Οι υπερπληρούμενοι κινητήρες έχουν μειωμένη ηχητική ένταση καυσαερίων. Ο μειωμένος θόρυβος στην εξαγωγή καυσαερίων προέρχεται λόγω της ύπαρξης στροβίλου (για τους κινητήρες που χρησιμοποιούν στροβιλοϋπερπληρωτή ‘turbocharger’)
- Ένα άλλο προσόν των υπερπληρούμενων κινητήρων είναι οι μειωμένες εκπομπές καυσαερίων. Συγκεκριμένα λόγω της αύξησης της πυκνότητας μέσω του συμπιεστή, παρέχεται περισσότερη μάζα αέρα μέσα στον θάλαμο καύσης με αποτέλεσμα η καύση να

είναι καλύτερη και οι εκπομπές καυσαερίων χαμηλότερες. Σήμερα, οι υπερτροφοδοτούμενοι κινητήρες σε σύγκριση με ατμοσφαιρικούς κινητήρες δεδομένης ισχύος έχουν εκπομπές CO₂ και NO_x περίπου 50% χαμηλότερα.

- Αύξηση της απόδοσης του κινητήρα (στροβιλοϋπερπληρώμενου) σε μεγάλο υψόμετρο. Η χαμηλή πίεση αέρα σε μεγάλο υψόμετρο μπορεί να δημιουργήσει απώλεια ισχύος ενός ατμοσφαιρικού κινητήρα. Σε αντίθεση, η απόδοση του στροβίλου βελτιώνεται σε μεγάλο υψόμετρο, εξαιτίας της μεγαλύτερης διαφοράς πίεσεως μεταξύ της πίεσεως του στροβίλου και της πίεσεως του περιβάλλοντος στην έξοδο η οποία είναι χαμηλότερη σε μεγαλύτερο υψόμετρο. Η χαμηλότερη πυκνότητα του αέρα στην είσοδο του συμπιεστή σε μεγάλο βαθμό εξισώνεται με την αύξηση της αποδόσεως του στροβίλου. Ως εκ τούτου, ο στροβιλοκινητήρας έχει σχεδόν καθόλου απώλεια ισχύος σε μεγαλύτερο υψόμετρο.



Σχήμα 1.4 Σύγκριση επιδόσεως ατμοσφαιρικού με στροβιλοϋπερπληρώμενου κινητήρα

1.4 Τρόποι Υπερπλήρωσης

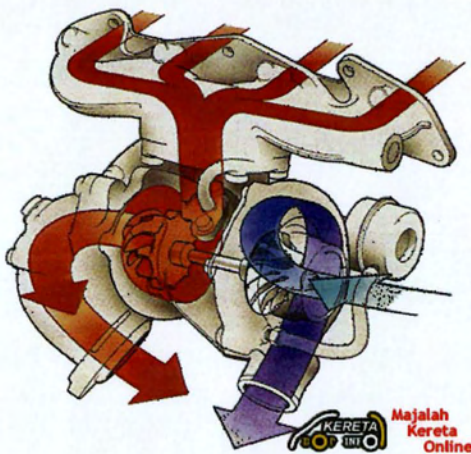
1.4.1 Κίνηση Συμπιεστή υπερπληρωτή

Υπερπληρωτής Μηχανικής Ισχύος(supercharger)

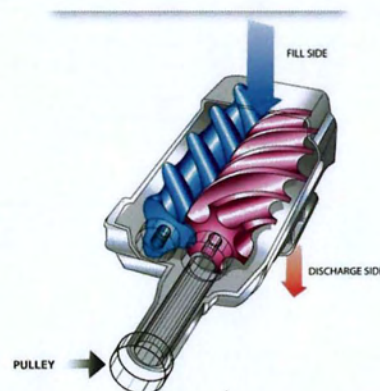
Η ισχύς του συμπιεστή παρέχεται από τον στροφαλοφόρο άξονα μέσω ιμάντα, οδοντωτού τροχού ή αλυσίδας [3].

Στροβιλοϋπερπληρωτής (Turbocharger ‘turbo’)

Η ισχύς του συμπιεστή παρέχεται από τον στρόβιλο μέσω ενός άξονα. Ο στρόβιλος αντλεί την ενέργεια αυτή μέσω της εκτόνωσης των καυσαερίων που εκκρίνονται από τον θάλαμο καύσης [3].



Σχήμα 1.3 Στροβιλοϋπερπληρωτής



Σχήμα 1.5 Υπερπληρωτής Μηχανικής Ισχύος

1.4.2 Σύγκριση υπερπληρωτών μηχανικής ισχύος και στροβιλοϋπερπληρωτών

Απόδοση

Ο στροβιλοϋπερπληρωτής είναι πιο αποδοτικός σε σχέση με τον Μηχανικό υπερπληρωτή διότι αποκτά ενέργεια από τα καυσαέρια και όχι από τον στρόφαλο. Είναι σημαντικό όμως να τονιστεί πως ο στρόβιλος δημιουργεί κάποιες πρόσθετες απώλειες στο σύστημα εξαιτίας της δημιουργίας «back pressure» στην εξάτμιση και της διακοπής της ροής στην εξαγωγή. [4]

Καθυστέρηση(Lag)

Σε αυτόν τον τομέα υπερέχουν οι μηχανικοί υπερπληρωτές. Δεδομένου ότι ο συμπιεστής περιστρέφεται μέσω ενός μάντα, παράγει πάντα ώθηση(boost) ακόμη και σε χαμηλές στροφές. Αντίθετα στον στροβιλοϋπερπληρωτή, θα πρέπει ο στρόβιλος να αποκτήσει την αναγκαία ενέργεια μέσω καυσαερίων προκειμένου να φτάσει στις απαραίτητες στροφές για να δώσει ώθηση στον κινητήρα, πράγμα χρονοβόρο λόγω αδρανειακών δυνάμεων. Όσο μεγαλύτερος σε μέγεθος είναι ο στρόβιλος, τόσο μεγαλύτερη καθυστέρηση έχει. [4]

Κόστος

Το κόστος εγκατάστασης ενός μηχανικού υπερπληρωτή και ενός στροβιλοϋπερπληρωτή είναι παρόμοιο. Όμως η αλλαγή των ρυθμίσεων σε στροβιλοϋπερπληρωτή είναι αρκετά φθηνότερη και ευκολότερη. Για να αλλάξει η ώθηση(boost) ενός μηχανικού υπερπληρωτή είναι αναγκαία η αντικατάσταση του άξονα μετάδοσης μεταξύ του στροφάλου και του συμπιεστή. [4]



Σχήμα 1.6 Μηχανή Εσωτερικής Καύσης με Υπερπληρωτή Μηχανικής Ισχύος

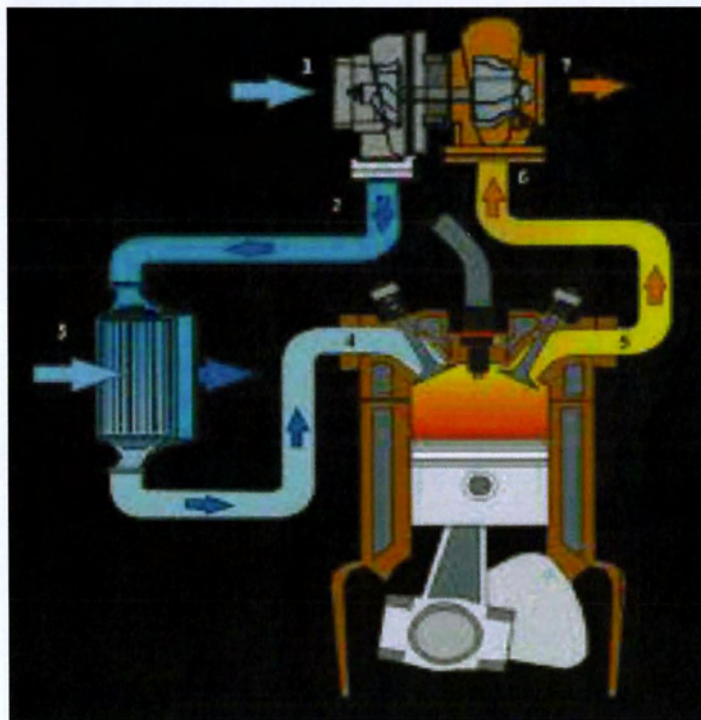
Υπέρταση

Οι στροβιλοϋπερπληρωτές εξαιτίας της καθυστέρησης(lag) που υπάρχει στις χαμηλές στροφές, δημιουργούν άμεσα ένα κύμα ενέργειας το οποίο μεταδίδεται στον κινητήρα ,όταν ο στρόβιλος αποκτήσει τις απαραίτητες στροφές για να δώσει ισχύ στον συμπιεστή (περίπου 3000rpm του κινητήρα). Αυτή η απότομη αύξηση μπορεί να είναι επιζήμια για τον κινητήρα, για το σύστημα μετάδοσης κίνησης καθώς και να κάνει το όχημα να χάσει την πρόσφυση του.

Αντίθετα, ο μηχανικός υπερπληρωτής δεν προκαλεί τέτοια απότομη αύξηση διότι παρέχει ώθηση από πολύ χαμηλές στροφές. [4]

Θόρυβος

Ο θόρυβος ενός κινητήρα ο οποίος έχει στροβιλοϋπερπληρωτή είναι αρκετά χαμηλότερος από έναν κινητήρα που περιέχει μηχανικό. Αυτό προκαλείται από την εκτόνωση των καυσαερίων στον στρόβιλο, ο οποίος είναι τοποθετημένος αμέσως μετά την πολλαπλή εξαγωγή. [4]



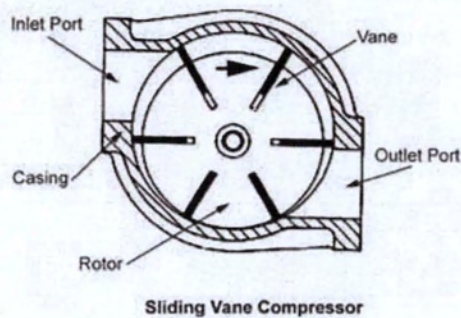
Σχήμα 1.7 Στροβιλοϋπερπληρούμενος κινητήρας

1.4.3 Τύποι συμπιεστών που χρησιμοποιούνται στις μηχανές εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ)

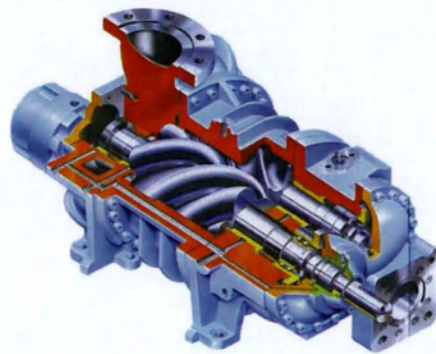
Οι τύποι συμπιεστών που χρησιμοποιούνται στις μηχανές εσωτερικής καύσης είναι δύο: οι θετικής μετατόπισης (ογκομετρικοί) και οι δυναμικοί. [3]

Θετικής μετατόπισης

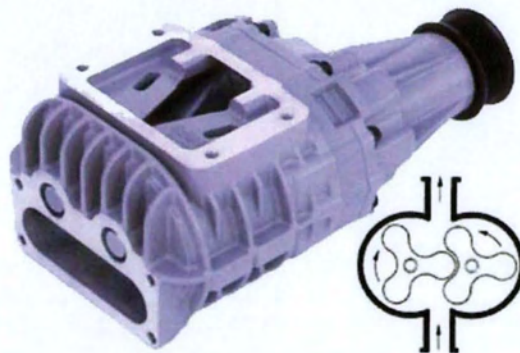
Στο συμπιεστή θετικής μετατόπισης, παγιδεύεται ένας όγκος αερίου και συμπιέζεται με την κίνηση ενός στοιχείου του συμπιεστή. Υπάρχουν τρεις τύποι συμπιεστών θετικής μετατόπισης: συμπιεστής Roots, περυγίων και κοχλιωτού έλικα.



Σχήμα 1.8 Συμπιεστής περυγίων



Σχήμα 1.9 Συμπιεστής κοχλιωτού έλικα



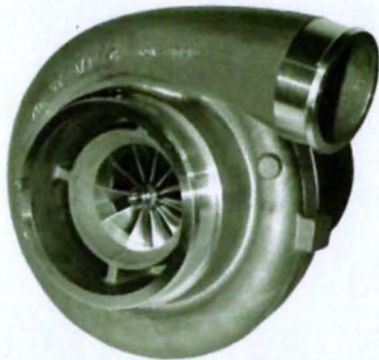
Σχήμα 1.10 Συμπιεστής Roots

Η απόδοση των συμπιεστών θετικής μετατόπισης ποικίλει από 50% για τους Roots, έως και 90% για τους κοχλιωτούς.

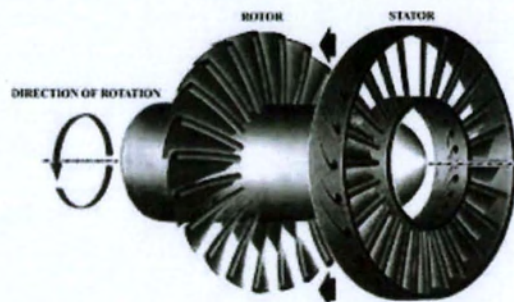
Δυναμικοί συμπιεστές

Οι δυναμικοί συμπιεστές έχουν ένα περιστροφικό στοιχείο που προσδίδει εφαπτομενική ταχύτητα στην ροή, η οποία μετατρέπεται σε πίεση σε έναν διάχυτη.

Υπάρχουν δυο είδη συμπιεστών και στροβίλων: ακτινικοί (φυγοκεντρικοί) και οι αξονικοί.



Σχήμα 1.12 Φυγοκεντρικός συμπιεστής



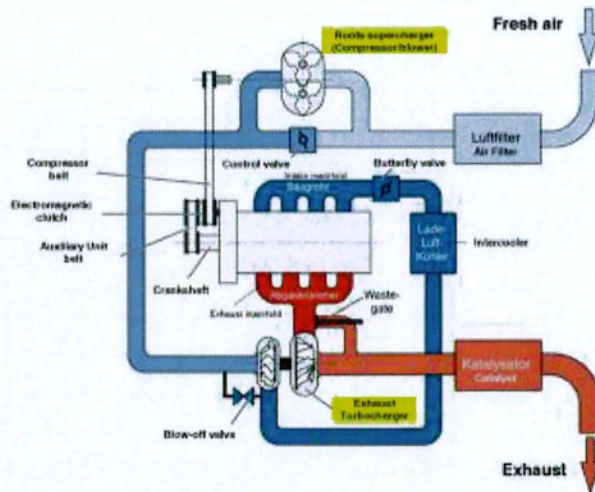
Σχήμα 1.11 Αξονικός Συμπιεστής

1.5 Νέες μορφές υπερπλήρωσης

1.5.1 Twincharger

Είναι ένας συνδυασμός ενός υπερσυμπιεστή καυσαερίων και και ενός μηχανικού υπερσυμπιεστή, με σκοπό την μετρίαση των αδυναμιών και των δύο. Ο υπερσυμπιεστής κινούμενος με ιμάντα προσφέρει εξαιρετική απόκριση και απόδοση στις χαμηλές στροφές, καθώς δεν έχει καμία χρονική υστέρηση μεταξύ της εφαρμογής του γκαζιού και της συμπίεση του συλλέκτη, σε αντίθεση με ένα στοβιλοσυμπιεστή που έχει μεγάλη καθυστέρηση και χαμηλή απόκριση στο φάσμα των χαμηλών στροφών.

Air Flow in the VW Twincharged TSI



Σχήμα 1.13 Σύστημα Twincharger

Ο κατάλληλος συνδυασμός των δύο μπορεί να προσφέρει μηδενική υστέρηση με υψηλή ροπή στις χαμηλότερες στροφές και αυξημένη ισχύ στις υψηλότερες. Συνεπώς, αυτή η τεχνολογία είναι επιθυμητή για τους κινητήρες μικρού κυβισμού (όπως 1.4TSI της VW), ειδικά όταν έχουν μεγάλο εύρος rpm, δεδομένου ότι μπορούν να επωφεληθούν από μια τεχνητή ευρεία ζώνη ροπής σε ένα μεγάλο εύρος στροφών.[5]



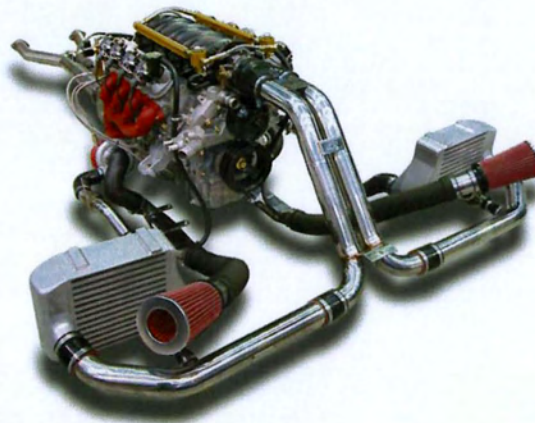
Σχήμα 1.14 Volkswagen's Twincharger

1.5.2 Twin Turbos

Παράλληλα twin turbos

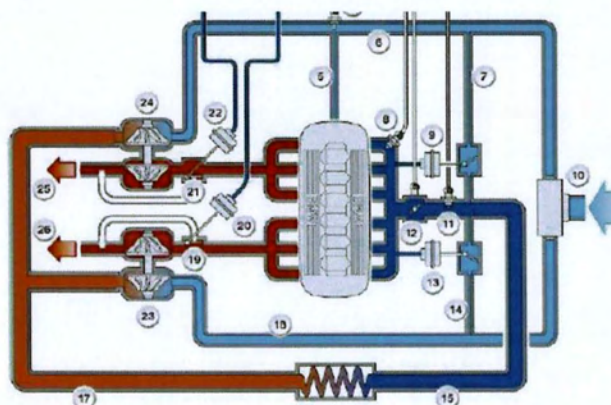
Το παράλληλο twin-turbos αναφέρεται στη διαμόρφωση του στροβιλοσυμπιεστή στην οποία δύο πανομοιότυποι στροβιλοσυμπιεστές λειτουργούν ταυτόχρονα, παρέχοντας την ίδια ενέργεια στην μηχανή. Κάθε στροβιλοϋπερπληρωτής αντλεί κατά το ήμισυ την ενέργεια των καυσαερίων του κινητήρα. Στις περισσότερες εφαρμογές, ο πεπιεσμένος αέρας και από τους δύο συμπιεστές συνδυάζεται σε μια κοινή πολλαπλή εισαγωγής και αποστέλλεται στους κυλίνδρους.

Συνήθως ο στρόβιλος του εκάστοτε στροβιλοϋπερπληρωτή τοποθετείται στην δική του ατομική πολλαπλή εξαγωγή, εκτός αν χρησιμοποιείται σε μηχανή παράλληλου - τύπου όπου και οι δύο στρόβιλοι τοποθετούνται σε μια ενιαία πολλαπλή εξαγωγή.



Σχήμα 1.15 Παράλληλο Twin Turbos

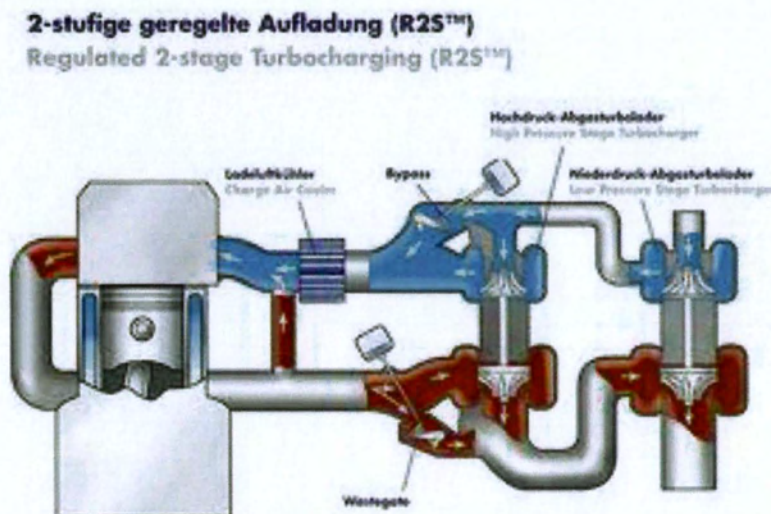
Σε κινητήρες τύπου-V ο κάθε στροβιλοϋπερπληρωτής έχει τη δική του πολλαπλή εξαγωγή και εισαγωγή συνδεόμενος σε μια σειρά κυλίνδρων. [6]



Σχήμα 1.16 Σύστημα Παράλληλου Twin Turbos

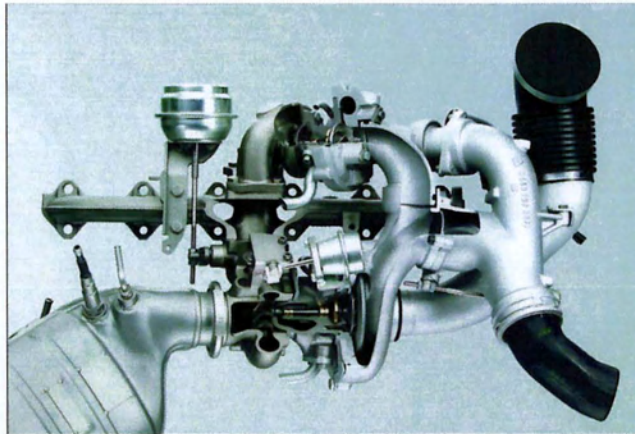
Διαδοχικά twin turbos

Τα Διαδοχικά τούρμπο αναφέρονται σε ένα σύστημα κατά το οποίο ο κινητήρας χρησιμοποιεί ένα στροβιλοσυμπιεστή για τις χαμηλότερες στροφές του κινητήρα , και ένα δεύτερο ή και τα δύο για τις υψηλότερες στροφές του κινητήρα . Συνήθως , οι μεγαλύτεροι υπερσυμπιεστές υψηλής ροής δεν είναι τόσο αποτελεσματικοί σε χαμηλές στροφές . Από την άλλη πλευρά , οι μικρότεροι έχουν υψηλότερη απόκριση , αλλά δεν μπορούν να παρέχουν αρκετό αέρα στις υψηλότερες στροφές του κινητήρα .



Σχήμα 1.17 Σύστημα Διαδοχικών turbos

Κατά τη διάρκεια των χαμηλών έως των μεσέων στροφών του κινητήρα όταν η ενέργεια των καυσαερίων είναι χαμηλή, μόνο ένας σχετικά μικρός στροβιλοσυμπιεστής (Λέγεται πρωτεύων στροβιλοσυμπιεστής) μπορεί να την αξιοποιήσει δίνοντας την αντίστοιχη ενέργεια στον κινητήρα. Καθώς αυξάνονται οι στροφές , ο μεγάλος στροβιλοσυμπιεστής είναι μερικώς ενεργοποιημένος ώστε να αποκτήσει τις αναγκαίες στροφές πριν από την πλήρη αξιοποίηση του.

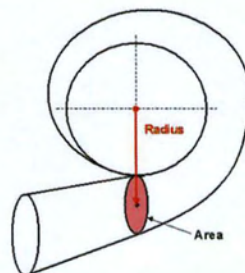


Σχήμα 1.18 Διαδοχικά turbo

Μόλις επιτευχθεί μια προκαθορισμένη ταχύτητα του κινητήρα ή η πίεση υπερπλήρωσης οι βαλβίδες ελέγχου του συμπιεστή και του στροβίλου του δευτερεύοντος στροβιλοϋπερπληρωτή ανοίγουν εντελώς δίνοντας την αναμενόμενη ενέργεια στον κινητήρα [6].

1.5.3 Στροβιλοσυμπιεστές μεταβλητής γεωμετρίας (VGTs)

Οι στροβιλοσυμπιεστές μεταβλητής γεωμετρίας (VGTs), (γνωστοί και ως μεταβλητών σταθερών πτερυγίων (variable nozzle), VNTs), είναι μια οικογένεια υπερσυμπιεστών, σχεδιασμένων να επιτρέπουν την αποτελεσματική αναλογία διαστάσεων A/R (Area/Radius) του στροβίλου, μεταβάλλοντας την γωνία των σταθερών πτερυγίων ενώ όσο αλλάζουν οι συνθήκες. Αυτό γίνεται επειδή η βέλτιστη αναλογία διαστάσεων σε χαμηλές στροφές του κινητήρα είναι πολύ διαφορετική από ότι σε υψηλές στροφές του κινητήρα.



Σχήμα 1.19 Λόγος A/R

Εάν η αναλογία είναι πολύ μεγάλη, ο συμπιεστής μέσω της μηχανικής ισχύος του στροβίλου θα αποτύχει να δημιουργήσει ώθηση(boost) στις χαμηλές στροφές του κινητήρα.

Εάν η αναλογία διαστάσεων είναι πολύ μικρή, ο συμπιεστής θα «πνίξει» τον κινητήρα στις υψηλές στροφές, οδηγώντας τον σε υψηλές πιέσεις πολλαπλής εξαγωγής και υψηλές απώλειες άντλησης με αποτέλεσμα την χαμηλότερη απόδοση του κινητήρα.



Σχήμα 1.20 Στροβιλοσυμπιεστής μεταβλητής γεωμετρίας

Με την μεταβολή αυτή επιτυγχάνεται μείωση της καθυστέρησης (lag) στις χαμηλές στροφές και αποτελεσματική ώθηση (boost) στις ψηλές στροφές. Τέλος τα VGTs δεν απαιτούν wastegate και βαλβίδα ανακούφισης (blow off valve). [6]

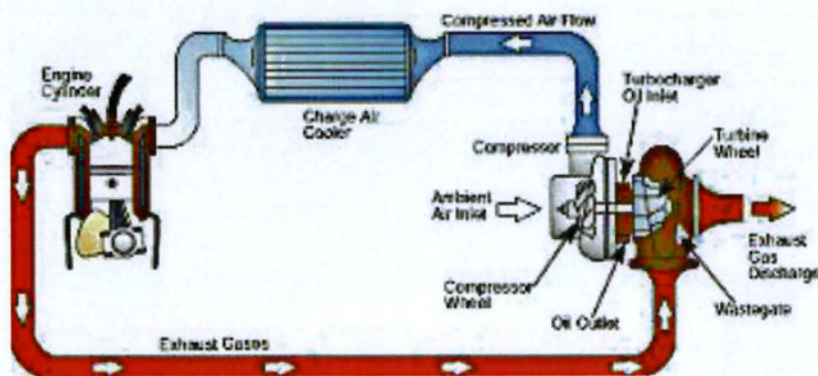
1.6 Ώθηση (Power Boost)

Η μέγιστη ισχύς που παράγεται από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης προσδιορίζεται κατά κύριο λόγο από την ποσότητα του καυσίμου που καίγεται μέσα στον κύλινδρο. Αυτό, με τη σειρά του, περιορίζεται από την ποσότητα του αέρα που εισάγεται στον κύλινδρο. Ο αέρας παρέχει τη οξείδωσή στο σύστημα η οποία παράγει την καύση. Περισσότερο αέρας εισαγόμενος στο σύστημα ισοδυναμεί με περισσότερη παραγόμενη δύναμη. Μια μέθοδος με την οποία περισσότερος αέρας εισάγεται μέσα στο σύστημα εισαγωγής είναι γνωστή ως αναγκαστική επαγωγή (forced induction). Κατά αυτήν ο αέρας συμπιέζεται σε πυκνότητα μεγαλύτερη από εκείνη του περιβάλλοντος με χρήση συμπιεστή, με αποτέλεσμα για δεδομένο όγκο κυλίνδρου, να περιέχεται μεγαλύτερη μάζα αέρα.[7]

2. Στροβιλουπερπλήρωσης σε μηχανές εσωτερικής καύσης

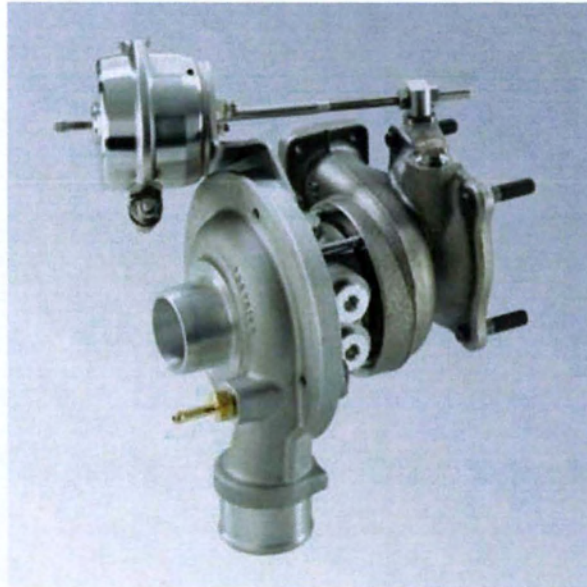
2.1 Αρχή λειτουργίας στροβιλουπερπλήρωσης

Ο στροβιλοϋπερπληρωτής αποτελείται από έναν φυγοκεντρικό συμπιεστή και έναν ακτινικό στρόβιλο, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με έναν άξονα. Ο στρόβιλος εκμεταλλεύεται την ενέργεια των καυσαερίων διοχετεύει ενέργεια μέσω του άξονα στον συμπιεστή ο οποίος αυξάνει την ενέργεια του αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αύξηση της ισχύος του κινητήρα καθώς και η απόδοσή του[7].



Σχήμα 2.1 Σύστημα στροβιλοϋπερπληρόμενου

Στο παραπάνω σχήμα παρίσταται η αρχή λειτουργίας ενός στροβιλοϋπερπληρούμενου κινητήρα. Συγκεκριμένα τα καυσαέρια οδηγούνται μέσω της πολλαπλής εξαγωγής στον στρόβιλο και εκτονώνονται δίνοντάς του ενέργεια μέσω περιστροφικής κίνησης.



Σχήμα 2.2 Στροβιλουπερπληρωτής

Η ενέργεια αυτή διοχετεύεται στον συμπιεστή μέσω του άξονα περιστρέφοντάς τον, με αποτέλεσμα να αυξάνει την στατική πίεση και την μαζική παροχή του αέρα. Στην συνέχεια ο συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος τον ψύχει αυξάνοντας την πυκνότητά του και καταλήγει στους κυλίνδρους της μηχανής.

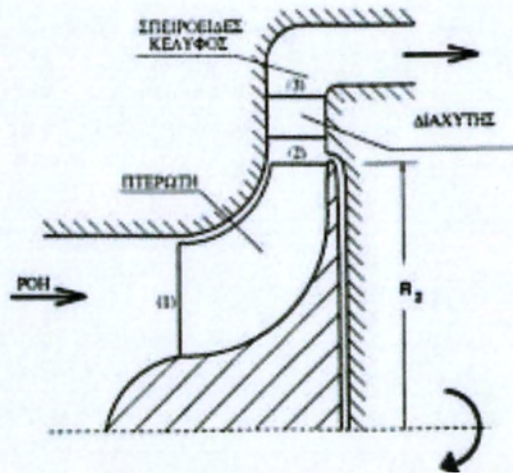
Η ανεξαρτησία του στροβιλουπερπληρωτή από την Μηχανή Εσωτερικής Καύσης τον καθιστά εύκολο τόσο στην κατασκευή, όσο και στην σύνδεσή του με τον κινητήρα.[7]

Στοιχεία συστήματος στροβιλοϋπερπλήρωσης

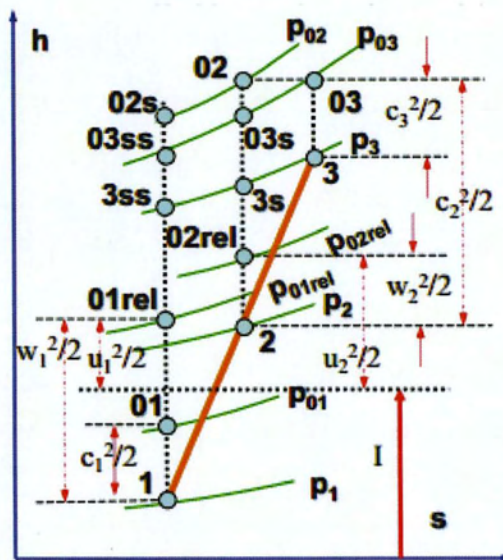
- Φυγοκεντρικός συμπιεστής
- Ακτινικός στρόβιλος
- Άξονας μεταφοράς κίνησης μεταξύ συμπιεστή-στροβίλου
- Σύστημα λύπανσης άξονα
- Waste gate
- Βαλβίδα εκκένωσης (blow off valve)
- Εναλλάκτης Θερμότητας

2.2 Φυγοκεντρικός συμπιεστής

Ο συμπιεστής είναι μια στροβιλομηχανή, η οποία επιτυγχάνει αύξηση της πίεσης με την προσθήκη κινητικής ενέργειας σε συνεχές ρευστό διαμέσου του ρότορα (περωτή).



Σχήμα 2.3 Φυγοκεντρικός συμπιεστής



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα ενθαλπίας-εντροπίας (h-s) σε έναν φυγοκεντρικό συμπιεστή

Πριν τον σχολιασμό του σχήματος Σχήμα 2.4 είναι σημαντικό να διατυπωθούν οι έννοιες των ολικών (Total) φαινομένων (Θερμοκρασία, Ενθαλπία, Πίεση), καθώς και της ισχύος του συμπιεστή. Γενικότερα, η διαφορά ενός ολικού από ένα στατικό φαινόμενο, είναι ότι το πρώτο εμπεριέχει μέσα την έννοια της κινητικής ενέργειας.

$$h_{0i} = h_i + \frac{1}{2} c_i^2 \quad 2-1$$

Η ισχύς που δίνει ο συμπιεστής δίνεται από το θερμοδυναμικό τύπο:

$$w_{ideal} = (\dot{m})(h_{02} - h_{01}) \quad 2-2$$

$$w_{ideal} = (\dot{m})c_{p,c}(T_{02} - T_{01}) \quad 2-3$$

Φυσικά, η παραπάνω ισχύς w_{ideal} είναι η ιδανική ισχύς η οποία χρειάζεται ο συμπιεστής προκειμένου να επιτύχει αυτήν την άνοδο της ενέργειας του ρευστού, αν λειτουργούσε ισεντροπικά.

$$\eta w_{ideal} = w_{real} \quad 2-4$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1} \quad 2-5$$

Όπου η είναι ο συντελεστής απόδοσης του συμπιεστή. Η απόδοση ενός συμπιεστή, σε σύστημα υπερπλήρωσης, της αγοράς κυμαίνεται από 57 έως 80%. Η χαμηλή αυτή απόδοση δικαιολογείται από τη μη ύπαρξη σταθερών πετυργίων.

Παρατηρώντας το σχήμα Σχήμα 2.4 ο συμπιεστής από την θέση 1 έως 2 αυξάνει αρκετά την ολική πίεση σε σχέση με την στατική. Αυτό συμβαίνει διότι προσδίδεται αρκετή κινητική ενέργεια στον αέρα. Το ίδιο μοτίβο ακολουθεί και η ενθαλπία. Από την θέση 2 έως την θέση 3 παρατηρείται αύξηση της στατικής πίεσης και ενθαλπίας λόγω της πτώσης της ταχύτητας πράγμα που δικαιολογεί την ύπαρξη του διαχύτη. Σε αντίθεση όμως με την ολική ενθαλπία, η ολική πίεση πέφτει, πράγμα λογικό, εξαιτίας των απωλειών στο διαχύτη. [8]

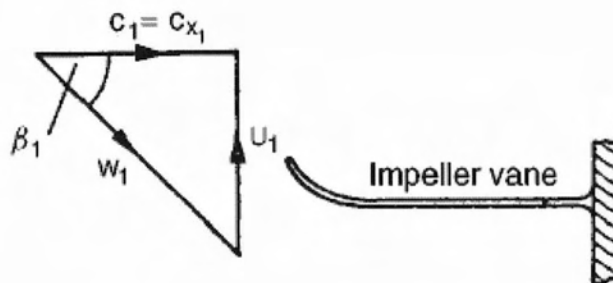
2.2.1 Πτερωτή (impeller)

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 2.4) , η πτερωτή μέσω της ισχύος που αντλεί από τον στρόβιλο αυξάνει την ενέργεια του αέρα (ενθαλπία) μέσω της αύξησης της πίεσης και της ταχύτητας του. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι υπάρχει και αύξηση της θερμοκρασίας η οποία για ένα μέσο στροβιλοϋπερπληρωτή κυμαίνεται στους $75^{\circ}C$.[9]



Σχήμα 2.5 Πτερωτή Φυγοκεντρικού Συμπιεστή

Τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο



Σχήμα 2.6 Τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο της πτερωτής

Η ροή στην είσοδο του συμπιεστή είναι αξονική καθώς δεν υπάρχει κάποιο σταθερό περύγιο να δώσει γωνία στην ροή, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει συστροφή και η c_{u1} ή $c_{\theta 1}$ να ισούται με 0. Η συνισταμένη ταχύτητα προέρχεται από την περιστροφική ταχύτητα του περυγίου u_1 και από την σχετική ταχύτητα του αέρα πάνω στο περύγιο w_1 .

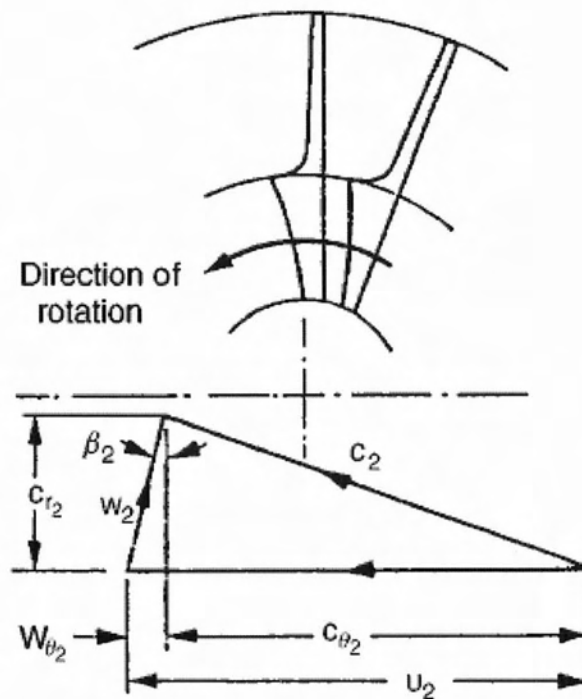
$$u_1 = \omega R_1 \quad 2-6$$

$$u_1 = 2\pi N \rho R_1 \quad 2-7$$

$$\dot{m} = \rho c_{x1} A_1 \quad 2-8$$

Όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα της περωτής, β_1 είναι η γωνία του περυγίου, N οι στροφές της περωτής σε RPS, ρ η πυκνότητα του αέρα και R_1 η ακτίνα της φερωτής. Τέλος A_1 είναι το εμβαδόν ροής στην είσοδο του συμπιεστή, το οποίο έχει δακτυλιοειδής μορφή (Σχήμα 2.3)

Τρίγωνο ταχυτήτων στην έξοδο



Σχήμα 2.7 Τρίγωνο Ταχυτήτων στην έξοδο της περωτής

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω Σχήμα 2.7 η ροή του αέρα στην έξοδο έχει πάρει μια μερικώς ακτινική ροή, η οποία εξαρτάται άμεσα από την γωνία εξόδου του περυγίου β_2

$$u_2 = \omega R_2 \quad 2-9$$

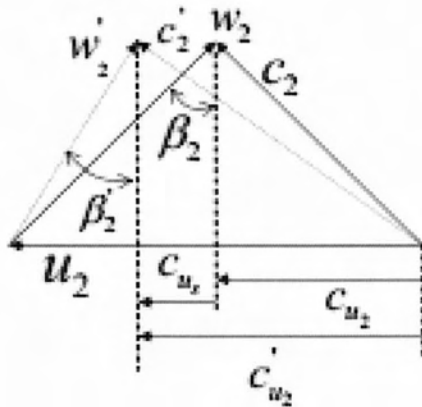
$$u_2 = 2\pi N\rho R_2 \quad 2-10$$

$$\dot{m} = \rho c_{r2} A_2 \quad 2-11$$

Όπου c_2 είναι η συνισταμένη ταχύτητα στην έξοδο της περωτής, c_{r2} η προβολή c_2 στον ακτινικό άξονα, u_2 είναι η περιστροφική ταχύτητα του περυγίου στην έξοδο, w_2 είναι η σχετική ταχύτητα του αέρα πάνω στο περύγιο και c_{u2} η ταχύτητα συστροφής του αέρα.

Παράγοντας ολίσθησης (slip factor)

Στην έξοδο της περωτής, η ροή του ρευστού δεν είναι παράλληλη με τα περύγια. Αυτό έχει σαν φυσικό επακόλουθο περιφερειακή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας είναι μικρότερη από αυτή που θα είχαμε αν ήταν παράλληλη. Μπορεί κανείς εύκολα να δει ότι αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι η πρόσδοση μικρότερου έργου.



Σχήμα 2.8 Ιδανικό και πραγματικό τρίγωνο ταχυτήτων στην έξοδο της περωτής

$$\sigma = \left(\frac{C_{u2}}{\dot{C}_{u2}} \right) \quad 2-12$$

$$\sigma = 1 - \frac{0.63 \pi}{n} \frac{1}{1 + \Phi_2 \tan(\beta_2)} \quad 2-13$$

Ο παραπάνω εμπειρικός τύπος 2-13 για τον υπολογισμό του παράγοντα ολίσθησης προέρχεται από τον Stanitz.

Σύμφωνα με τους παραπάνω τύπους (2-12,2-13) ,η διαφορά της πραγματικής συστροφής του αέρα εξαρτάται άμεσα από τον παράγοντα ολίσθησης σ , άρα από τον συντελεστή φόρτισης Φ_2 , την γωνία του πτερυγίου β_2 και κυρίως από τον αριθμό των πτερυγίων n . Αυξάνοντας τον αριθμό των πτερυγίων επιτυγχάνουμε μεγαλύτερες τιμές του σ . Φυσικά αυτό ισχύει μέχρι κάποιο άνω όριο. Από κει και πέρα έχουμε υπέρμετρη αύξηση των απωλειών λόγω τάσεων τριβής.

$$W_{ideal} = \dot{m} (u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) \quad 2-14$$

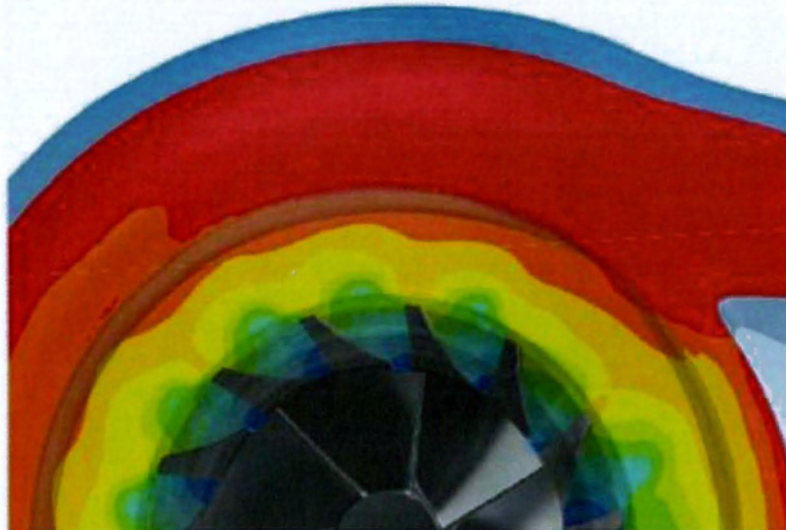
2.2.2 Διαχύτης (Diffuser)

Ο διαχύτης είναι μια συνιστώσα του συστήματος, η οποία μέσω της αύξησης της γεωμετρίας αξονικά, επιτυγχάνει αύξηση της στατικής πίεσης, ενώ ταυτόχρονα μειώνει την ταχύτητα του αέρα. Αυτός είναι ο λόγος που τοποθετείται μετά την πτερωτή, προκειμένου να μετατρέψει ποσό της κινητικής ενέργειας που έχει δεχτεί το ρευστό από την πτερωτή σε αύξηση πίεσης [9]. Οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του ιδανικού διαχύτη είναι οι (2-15)-(2-17):

$$h_{02} = h_{03} \quad 2-15$$

$$h_2 + \frac{1}{2} c_2^2 = h_3 + \frac{1}{2} c_3^2 \quad 2-16$$

$$c_2 A_2 = c_3 A_3 \quad 2-17$$



Σχήμα 2.9 Υπολογισμός στατικής πίεσης σε φυγοκεντρικό συμπιεστή

Όπως φαίνεται και από τους παραπάνω θερμοδυναμικούς τύπους που βρίσκουν εφαρμογή στο διαχύτη, δεν υπάρχει μεταβολή της ολικής ενθαλπίας διότι δεν προσδίδεται ενέργεια στον αέρα, ενώ παρατηρούμε αύξηση της στατικής ενθαλπίας και της στατικής πίεσης (όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9) μέσω της μείωσης της ταχύτητας. Ακόμη, μέσω της εξίσωσης της συνέχειας (2-17) αντιλαμβανόμαστε το λόγο για τον οποίο έχουμε μείωση της ταχύτητας, καθώς έχουμε αύξηση της διατομής του διαχύτη.

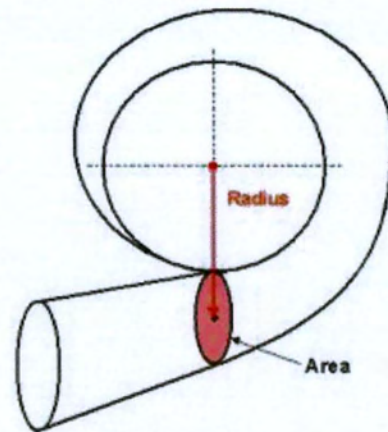
2.2.3 Housing

Πρόκειται για έναν ‘σωλήνα’ σε σχήμα σαλιγκαριού ο οποίος συλλέγει τον αέρα ο οποίος απορρέει από το διαχύτη, μετατρέποντας τη ροή από ακτινική και περιστροφική σε αξονική, με σκοπό τη συνέχεια της ροής ομαλά στην πολλαπλή εισαγωγή. Τέλος, εξαιτίας του μεγάλου όγκου του και της διαφοράς διατομής από το διαχύτη, καθώς αυτή μεγαλώνει, παρατηρείται ελάττωση της ταχύτητας ροής, λόγω της εξίσωσης της συνέχειας, και επομένως αύξηση της πίεσης (Σχήμα 2.9).

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ανάλογα με την χρήση του συμπιεστή, επιλέγεται ο κατάλληλος λόγος εμβαδού-ακτίνας για το housing (A/R). Για παράδειγμα, ένας μικρός λόγος (A/R) προσφέρει αμεσότερη απόκριση και καλύτερη συμπεριφορά στις μικρομεσαίες στροφές. Αντίθετα, ένας μεγάλος λόγος προσφέρει μεγαλύτερη τελική ώθηση με φυσικό επακόλουθο την ανάλογη μέγιστη ισχύ [10].



Σχήμα 2.10 Housing από φυγοκεντρικό συμπιεστή



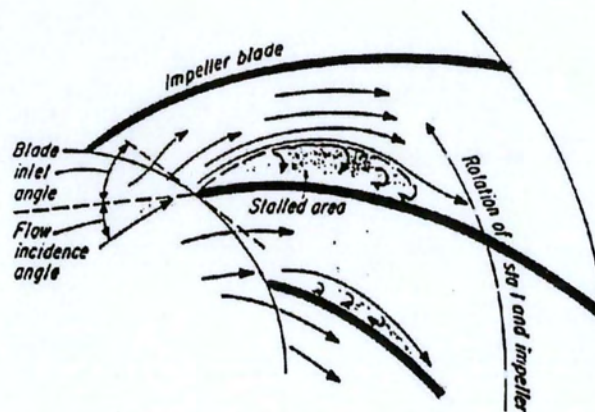
Σχήμα 2.11 Μέτρο κατηγοριοποίησης για housings A/R

2.2.4 Απώλειες

Ένας συμπιεστής, όσο καλά και να έχει σχεδιαστεί, είναι αδύνατον να λειτουργεί ιδανικά και να μην έχει απώλειες. Παρακάτω θα παρουσιαστούν κάποιες σημαντικές απώλειες που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του φυγοκεντρικού συμπιεστή, καθώς και οι σχέσεις, οι οποίες τις διέπουν όπου αυτό είναι δυνατόν.

Αεροδυναμικές απώλειες πτερυγίου (Incidence losses)

Ο συμπιεστής αποτελείται από πτερύγια, οπότε ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης β καθώς και την ταχύτητα του ρευστού δημιουργούνται απώλειες με αποτέλεσμα την πτώση της ολικής ενθαλπίας (σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12 Ροή γύρω από τα πτερύγια του συμπιεστή

Απώλειες λόγω τριβής (skin friction).

Το ρευστό ερχόμενο σε επαφή με την επιφάνεια των πτερυγίων αναπτύσσει ιξώδεις τάσεις, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη απωλειών λόγω τριβής.

$$\Delta h_{SF} = K_{DF} C_f \frac{\frac{l}{D_3}}{\frac{D_{hyd}}{D_3}} \left(\frac{\dot{m}}{u_3} \right)_{av}^2 u_3^2 \quad 2.18$$

Όπου l είναι το διορθωμένο ‘μήκος’ από την είσοδο μέχρι την έξοδο της περωτής, D_3 είναι η διάμετρος της περωτής στην έξοδο (exducer), D_{hyd} είναι η υδραυλική διάμετρος, είναι η μαζική παροχή, u_3 η περιστροφική ταχύτητα του πτερυγίου στην έξοδο, C_f ο παράγοντας τριβής ο οποίος εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό Reynolds και K_{DF} μία σταθερά, η οποία ισούται με 5.6 για συμβατικές περωτές και 7 για περωτές με splitter blades [11].

Απώλειες λόγω ανακυκλοφορίας (Recirculation loss)

Οι απώλειες της αναστροφής του αέρα μέσα στην περωτή προκύπτουν από τον τύπο:

$$\Delta h_{RC} = 0.02 \sqrt{\tan a_3} D_f^2 u_3^2 \quad 2.19$$

Η γωνία a_3 είναι η γωνία εκροής του αέρα στην έξοδο της περωτής ενώ D_f είναι ο παράγοντας διάχυσης. [11]

Απώλειες στο διαχύτη (Vaneless diffuser loss)

Κατά την ροή του ρευστού μέσα από διαχύτη, υπόκειται σε απώλειες, η τιμή των οποίων προσδιορίζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\Delta h_{VLD} = c_P \dot{T}_3 \left[\left(\frac{P_4}{\dot{P}_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - \left(\frac{P_4}{\dot{P}_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad 2.20$$

Όπου P_4 είναι η ολική πίεση στην έξοδο του διαχύτη, P_3 η στατική πίεση στην είσοδο και P_4 η πίεση στην έξοδο. Τέλος, c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα. [11]

2.2.5 Χάρτης Συμπιεστή

Κάθε συμπιεστής, όντας δυναμική συσκευή, διαθέτει ένα χαρακτηριστικό χάρτη λειτουργίας. Οι χάρτες αυτοί, μπορούν να κατασκευαστούν μέσω πειραματικών δεδομένων είτε μέσω προγραμμάτων, τα οποία βέβαια προσεγγίζουν απλώς τον πραγματικό χάρτη, όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας και θα αναφερθεί αργότερα.

Τα στοιχεία τα οποία εμπεριέχονται μέσα σε έναν χάρτη είναι:

Παροχή (x άξονας)

Σε αυτόν τον άξονα εκτός από την μαζική παροχή, μπορεί να εμφανίζεται η ογκομετρική παροχή, ενώ αρκετές φορές φαίνεται και η διορθωμένη ογκομετρική παροχή.

Λόγος Πίεσης (y άξονας)

Στον άξονα y παρίσταται ο λόγος πίεσης ($P_{\text{exit}} / P_{\text{inlet}}$). Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι κατά τον συγχρονισμό του στροβιλοϋπερπληρωτή με τον κινητήρα, πολλές φορές συγχέεται ο λόγος πίεσης με την αύξηση της πίεσης. Αυτό ισχύει μόνο όταν το αυτοκίνητο είναι σταματημένο και δουλεύει μόνη της η μηχανή εξαιτίας του ότι η ολική πίεση εισόδου είναι 1 ατμόσφαιρα. Κατά την κίνηση του αυτοκινήτου η ολική πίεση αυξάνεται εξαιτίας της κινητικής ενέργειας του αέρα η οποία είναι ανάλογη με την ταχύτητά του.

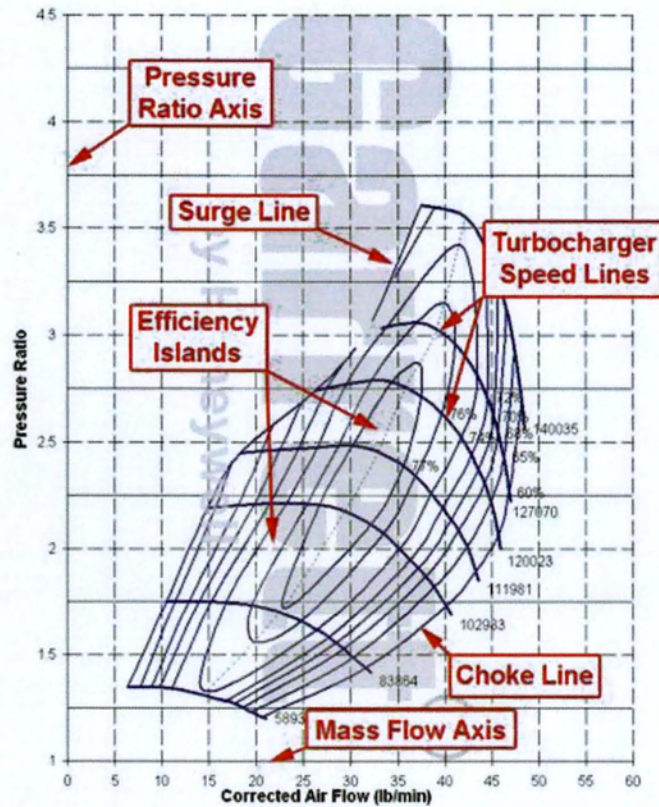
Γραμμή υπέρτασης (surge line)

Ουσιαστικά πρόκειται για μία ελαφρώς τεθλασμένη διαγώνια γραμμή στο κύριο τμήμα του χάρτη. Πάνω από αυτή τη γραμμή είναι μια περιοχή ασταθούς ροής, η οποία είναι καλύτερα να αποφεύγεται. Αρκετές φορές όταν η λειτουργία του συμπιεστή ξεπερνά την γραμμή υπέρτασης, δημιουργείται αντιστροφή ροής και ο συμπιεστής παύει να λειτουργεί σωστά.

Γραμμή Στραγγαλισμού (Choke line)

Όταν το σημείο λειτουργίας του συμπιεστή ξεπεράσει την γραμμή στραγγαλισμού, τότε η ταχύτητα ροής του ρευστού αποκτά την ταχύτητα του ήχου και αυτόματα η παροχή παίρνει

την μέγιστή της τιμή (στραγγαλισμός). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να πέφτει απότομα η τιμή της απόδοσης της συσκευής [12].



Σχήμα 2.13 Χάρτης λειτουργίας φυγοκεντρικού συμπιεστή

Γραμμή ταχύτητας (speed line)

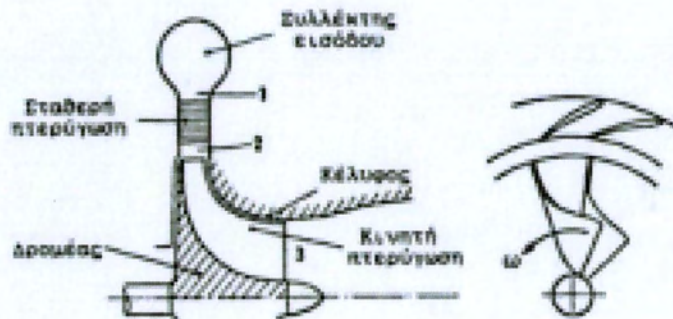
Κάθε χάρτης συμπιεστή περιέχει κάποιες γραμμές ταχύτητας οι οποίες αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες στροφές του συμπιεστή. Ουσιαστικά απεικονίζουν τις συνθήκες μόνιμης κατάστασης του συμπιεστή για συγκεκριμένες στροφές λειτουργίας. Με την χρήση αυτών των γραμμών για δεδομένη παροχή αντιστοιχεί συγκεκριμένος λόγος πίεσης και αντίστροφα.

Περιοχές απόδοσης

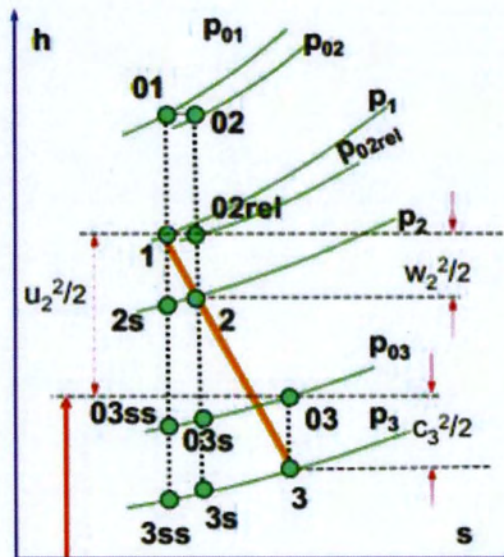
Ουσιαστικά πρόκειται για περιοχές του χάρτη οι οποίες περιβάλλονται από το εκάστοτε ελλειπτικό σχήμα. Κάθε σημείο λειτουργίας που βρίσκεται στην εκάστοτε περιοχή έχει την ίδια απόδοση.

2.3 Ακτινικός Στρόβιλος

Όπως και ο συμπιεστής, έτσι και ο στρόβιλος είναι μια στροβιλομηχανή, με κύρια ειδοποιό διαφορά, την λειτουργία του που είναι αντίθετη από τον συμπιεστή. Συγκεκριμένα, ο στρόβιλος δε δίνει έργο στο ρευστό αλλά αντλεί από αυτό, εκμεταλλευόμενο τη θερμική και κινητική του ενέργεια [8]. Τα βασικά στοιχεία, τα οποία αποτελούν τον ακτινικό στρόβιλο με τη σειρά που τα συναντάει η ροή είναι (όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.14) τα εξής: το housing, ο στάτορας και η περωτή. Παρακάτω, όπου πραγματοποιείται η ανάλυση των βασικών συνιστωσών του συστήματος του ακτινικού στρόβιλου, η σειρά με την οποία παρατίθενται έχει να κάνει με το πόσο σημαντικό είναι κάθε στοιχείο στο σχεδιασμό, και όχι με το αν η έξοδος μιας συνιστώσας αποτελεί είσοδο για την επόμενη.



Σχήμα 2.14 Ακτινικός στρόβιλος



Σχήμα 2.15 Διάγραμμα ενθαλπίας-εντροπίας (h-s) σε έναν ακτινικό στρόβιλο

Βλέποντας το Σχήμα 2.15 και συγκρίνοντάς το με το Σχήμα 2.4, είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς τις ομοιότητες που έχει ο στρόβιλος με το συμπιεστή, καθώς και ότι ακολουθεί ακριβώς την αντίστροφη διαδικασία .

Συγκεκριμένα, τα καυσαέρια εισέρχονται στον στρόβιλο, έχοντας κινητική και θερμική ενέργεια εξαιτίας της καύσης στον κινητήρα (κατάσταση 1) Σχήμα 2.14. Στην συνέχεια εισέρχονται στο ακροφύσιο του στροβίλου στο οποίο έχουν τοποθετηθεί σταθερά πτερύγια (nozzle) (κατάσταση 2). Εκεί η στατική πίεση του ρευστού πέφτει με αποτέλεσμα την αύξηση της κινητικής του ενέργειας. Φυσικά, επειδή το ακροφύσιο δεν είναι ιδανικό, παρατηρούμε μια μικρή πτώση στην ολική πίεση.

Μετά την είσοδο του ρευστού από το ακροφύσιο και αφού έχει αποκτήσει την απαραίτητη κινητική ενέργεια εισέρχεται στην περωτή. Κατά το πέρασμα του ρευστού από την περωτή, η ολική και η στατική πίεση καθώς και η θερμοκρασία του πέφτουν, με αποτέλεσμα την μετατροπή της ενέργειας του σε μηχανική την οποία αντλεί ο στρόβιλος.

Η ισχύς που αντλεί ο στρόβιλος δίνεται από το θερμοδυναμικό τύπο:

$$w_{ideal} = (\dot{m})(h_{02} - h_{03}) \quad 2-61$$

$$w_{ideal} = (\dot{m})C_{p,t}(T_{02} - T_{03}) \quad 2-22$$

Φυσικά, η παραπάνω ισχύς w_{ideal} είναι η ιδανική ισχύς η οποία μπορεί ο στρόβιλος να αντλήσει από το ρευστό, αν λειτουργούσε ισεντροπικά και συνδέεται με το πραγματικό μέσω του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης.

$$\eta w_{ideal} = w_{real} \quad 2-23$$

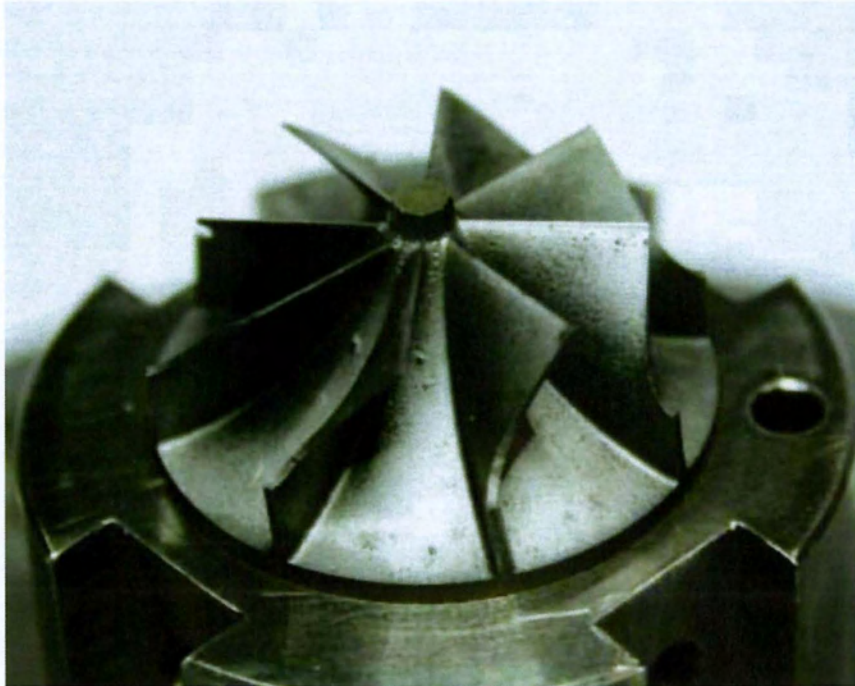
$$\eta = \frac{1 - \frac{T_{03}}{T_{02}}}{1 - \left(\frac{P_{03}}{P_{02}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad 2-24$$

Όπου η είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου. Η απόδοση ενός στροβίλου είναι παρόμοια με αυτήν ενός συμπιεστή.

2.3.1 Πτερωτή (Impeller)

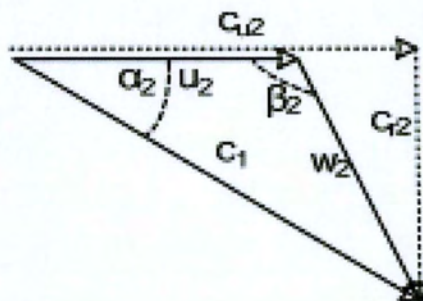
Ο ρόλος της περωτής στον στρόβιλο είναι η άντληση ενέργειας και μετατροπής της σε μηχανική , μέσω της εκτόνωσης του ρευστού διαμέσου της. Η διεύθυνση της ροής του ρευστού είναι αντίθετη με αυτήν της περωτής του συμπιεστή. Συγκεκριμένα το ρευστό διέρχεται σε αυτήν περιμετρικά, έχοντας μια σχετικά ακτινική ροή (η οποία καθορίζεται από την γωνία τον

σταθερών πτερυγίων) με κατεύθυνση προς το κέντρο του, και εκρέει από αυτήν με αξονική διεύθυνση ταχύτητας (Σχήμα 2.14 θέση 2-3) [9].



Σχήμα 2.16 Πτερωτή Στροβίλου

Τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο



Σχήμα 2.17 Τρίγωνο Ταχυτήτων στην Είσοδο της πτερωτής

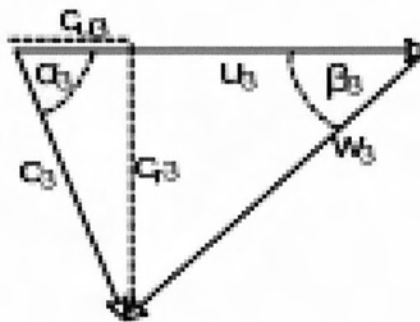
$$u_2 = \omega R_2 \quad 2-25$$

$$u_2 = 2\pi N \rho R_2 \quad 2-26$$

$$\dot{m} = \rho c_{r2} A_2 \quad 2-27$$

Όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα της περωτής, β_2 είναι η γωνία του περυγίου, N οι στροφές της περωτής σε RPS, ρ η πυκνότητα των καυσαερίων και R_2 η ακτίνα της φτερωτής. A_2 είναι το εμβαδόν ροής στην είσοδο του στροβίλου (Σχήμα 2.12). Το c_2 είναι η συνισταμένη ταχύτητα στην έξοδο της περωτής, c_{r2} η προβολή c_2 στον ακτινικό άξονα, u_2 είναι η περιστροφική ταχύτητα του περυγίου στην έξοδο, w_2 είναι η σχετική ταχύτητα του αέρα πάνω στο περύγιο και c_{u2} η ταχύτητα συστροφής του αέρα. Τέλος, α_2 είναι η γωνία με την οποία εισέρχεται το ρευστό στην φτερωτή και είναι ίδια με την γωνία που έχουν τα σταθερά περύγια.

Τρίγωνο ταχυτήτων στην έξοδο



Σχήμα 2.18 Τρίγωνο Ταχυτήτων στην Είσοδο της περωτής

$$u_3 = \omega R_3 \quad 2-28$$

$$u_3 = 2\pi N \rho R_3 \quad 2-29$$

$$\dot{m} = \rho c_{r3} A_3 \quad 2-30$$

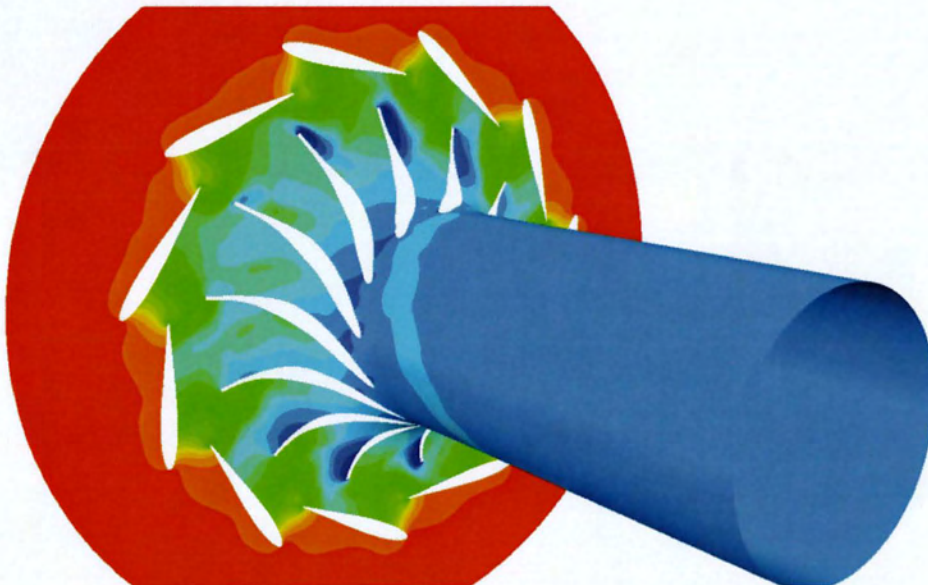
Όπου β_3 είναι η γωνία του περυγίου, R_3 η ακτίνα της φτερωτής. A_3 είναι το εμβαδόν ροής στην έξοδο του στροβίλου (σχήμα 2.12 και c_3 είναι η συνισταμένη ταχύτητα στην έξοδο της περωτής, c_{r3} η προβολή c_3 στον ακτινικό άξονα, u_3 είναι η περιστροφική ταχύτητα του περυγίου στην έξοδο, w_3 είναι η σχετική ταχύτητα του αέρα πάνω στο περύγιο και c_{u3} η ταχύτητα συστροφής του αέρα. Τέλος α_3 είναι η γωνία με την οποία εξέρχεται το ρευστό από την φτερωτή.

Η ισχύς που αντλεί ο στρόβιλος από τα καυσαέρια δίνεται από τον τύπο γνωστή σχέση ως ο τύπος του Euler.

$$W_{ideal} = \dot{m} (u_2 c_{u2} - u_3 c_{u3}) \quad 2-31$$

2.3.2 Σταθερή πτερώωση (nozzle vaned diffuser)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο ρόλος του ακροφυσίου είναι διπλός, καθώς αφενός αυξάνει την ταχύτητα των καυσαερίων και αφετέρου κατευθύνει τη ροή με τη βέλτιστη δυνατή γωνία προκειμένου να εισρέει στη φτερωτή με τις λιγότερες δυνατές απώλειες λόγω κρούσης στα κινητά πτερώγια.[9]



Σχήμα 2.19 Προσομοίωση στατικής πίεσης σε ακτινικό στρόβιλο

Το ακροφύσιο είναι μια συσκευή η οποία έχει την ακριβώς αντίστροφη λειτουργία με αυτή του διαχύτη. Συγκεκριμένα, κατά τη ροή του ρευστού μέσω του ακροφυσίου, το εμβαδόν ροής μειώνεται με αποτέλεσμα την μείωση της στατικής πίεσης και την αύξηση της ταχύτητας. Αυτό παρατηρείται και στο Σχήμα 2.17 όπου βλέπουμε την πίεση η οποία πέφτει όσο το ρευστό διαπερνά το ακροφύσιο και το χρώμα μετατρέπεται από θερμό σε ψυχρό. Επιπλέον, βλέπουμε το ρευστό να αλλάζει την γωνία ροής του χάρις τα σταθερά πτερώγια.

Είναι σημαντικό να τονιστεί, ότι η βέλτιστη γωνία σταθερών πτερωγίων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την παροχή των καυσαερίων και συνάμα και με της στροφές του στροβιλοϋπερπληρωτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η γωνία των πτερωγίων να ποικίλει σε ίδιας

γεωμετρίας στροβίλους, και να έχει άμεση σχέση με τον τρόπο χρήσης του στροβιλοϋπερπληρωτή καθώς και από τον κινητήρα που θα συνδεθεί. Αυτό το πρόβλημα λύθηκε με την κατασκευή των VG Turbos τα οποία αναλύθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο. Το ακροφύσιο με τα σταθερά πτερύγια πολλές φορές αναφέρεται και ως στάτορας.

2.3.3 Housing

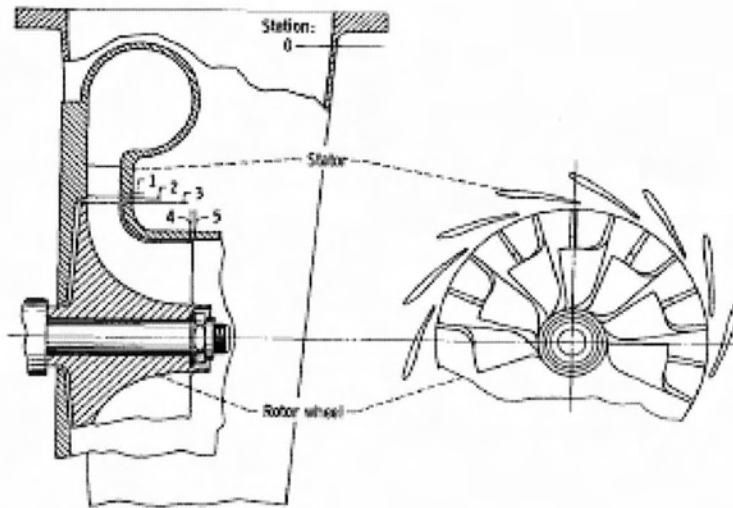
Στον στρόβιλο, όπως και στο συμπιεστή το housing έχει παρόμοια γεωμετρία, καθώς και παρόμοια χρήση. Η μόνη διαφορά είναι η κατεύθυνση της ροής. Συγκεκριμένα στο housing του στροβίλου το καυσαέριο εισρέει από την πολλαπλή εξαγωγή και κατευθύνεται στο στάτορα.



Σχήμα 2.20 Housing στροβίλου

Είναι σημαντικό να τονιστεί, ότι σε αντίθεση με τον συμπιεστή στο housing του στροβίλου η θερμοκρασίες του ρευστού είναι υψηλές, πράγμα το οποίο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή του υλικού. Αυτό ισχύει και για τα υπόλοιπα στοιχεία του στροβίλου [10], καθώς οι θερμοκρασίες που παρατηρούνται φτάνουν μέχρι και 1000 K.

2.3.4 Απώλειες



Σχήμα 2.21 Διάταξη Ακτινικού Στροβίλου

Απώλειες στον στάτορα (stator losses)

Ένα κομμάτι της κινητικής ενέργειας των καυσαερίων χάνεται μέσα στο ακροφύσιο του στροβίλου, εξαιτίας της κρούσης του ρευστού στα σταθερά περύγια. Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται από τον τύπο:

$$L_s = \frac{(c_{1,ideal}^2 - c_1^2)}{2gJ} = \frac{K_s (c_0^2 - c_1^2)}{2gJ} \quad 2-32$$

Όπου K_s είναι ο συντελεστής απωλειών στο στάτορα, J είναι η σταθερά θερμότητας (mechanical equivalent of heat) και ισούται με 778.029 ft-lb/Btu. Τέλος, c_0 είναι η απόλυτη ταχύτητα του ρευστού στο στρόβιλο και c_1 η απόλυτη ταχύτητα κατά την έξοδο από το στάτορα.[13]

Απώλειες στην πτερωτή (rotor losses)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, όταν ένα ρευστό εισέρχεται σε έναν όγκο ο οποίος αποτελείται από πτερύγια, ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας χάνεται. Αυτό έχει σαν φυσικό επακόλουθο τη δημιουργία απωλειών και στο ρότορα (πτερωτή). Επιπλέον σε αυτές τις απώλειες προστίθενται και οι απώλειες λόγω ιξωδών τάσεων. Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται από τον τύπο:

$$L_R = \frac{(w_{4,ideal}^2 - w_4^2)}{2gJ} = \frac{K (w_3^2 - w_4^2)}{2gJ} \quad 2-33$$

Όπου w_3 και w_4 είναι οι σχετικές ταχύτητες του ρευστού στην είσοδο και στην έξοδο της πτερωτής. Τέλος, το K είναι ο συντελεστής απωλειών στο ρότορα και ισούται με 0.3 [13].

2.3.4 Χάρτης Στροβίλου

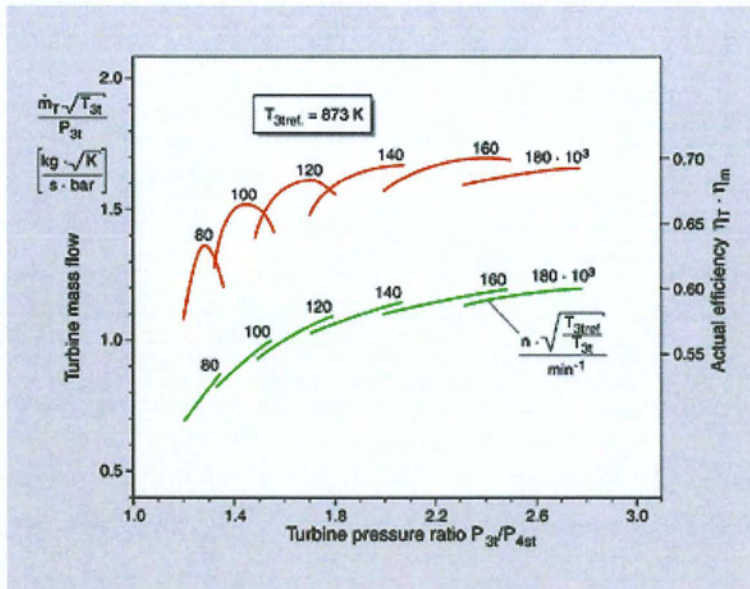
Όπως ο συμπιεστής, έτσι και ο στρόβιλος, όντας δυναμική συσκευή, έχει και αυτό χάρτη λειτουργίας. Όμως διαφέρει αρκετά από τον χάρτη του συμπιεστή.[12]

Λόγος Πίεσης και Παροχή

Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται ο λόγος πίεσης ο οποίος δείχνει κατά πόσο θα πέσει η πίεση του ρευστού (καυσαερίου) μετά τον στρόβιλο, ενώ στον κάθετο άξονα παρουσιάζεται η παροχή του καυσαερίου που απαιτείται.

Απόδοση και Στροφές Λειτουργίας

Η απόδοση παρουσιάζεται στον κάθετο άξονα από την δεξιά πλευρά, σε αντίθεση με τον χάρτη του συμπιεστή που είναι σε μορφή νησίδας (efficiency island). Τέλος, για τις στροφές παριστάνονται δύο ξεχωριστές ομάδες καμπυλών, σε αντίθεση με τον συμπιεστή που υπάρχει μόνο μία, και χωρίζονται στις αποδοτικές και λιγότερο αποδοτικές.

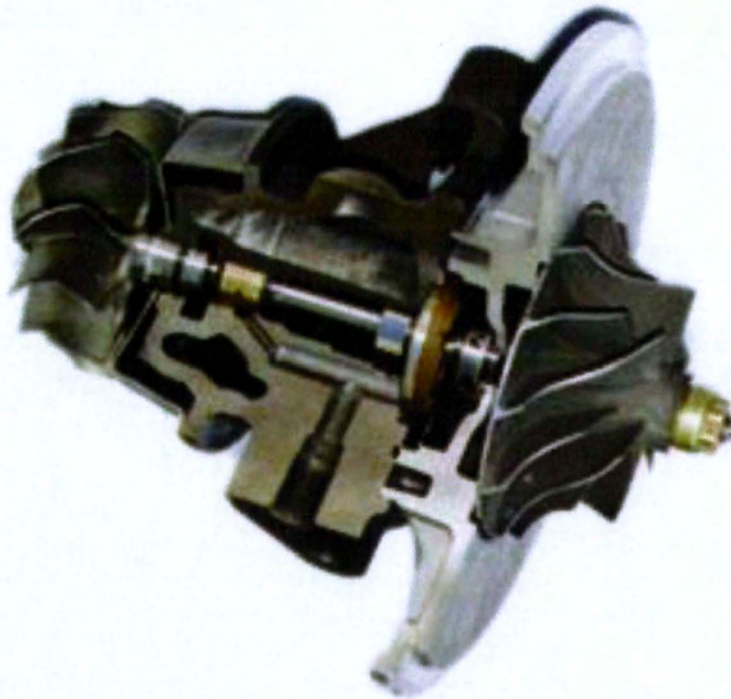


Σχήμα 2.22 Χάρτης Ακτινικού Στροβίλου

Αυτή είναι η πιο συνηθισμένη μορφή παρουσίασης του χάρτη του στροβίλου, αλλά σε αντίθεση με τον συμπιεστή δεν είναι η μοναδική.

2.4 Σύστημα έδρασης και λίπανσης άξονα μετάδοσης κίνησης

Το σύστημα συμπιεστής-στροβίλος σε έναν στροβιλοϋπερπληρωτή και συνεπώς και ο άξονας μετάδοσης κίνησης, περιστρέφεται από 100.000 rpm έως 300.000 rpm κατά μέσο όρο. Επιπλέον το σύστημα αυτό θα πρέπει να έχει ζωή παρόμοια με αυτήν ενός συμβατικού αυτοκινήτου (1.000.000 km). Για να μπορέσει να ανταπεξέλθει ο άξονας και να μην υπόκειται σε μεγάλες καταπονήσεις, λόγω των μεγάλων στροφών, χρησιμοποιούνται έδρανα κύλισης (κουζινέτα).



Σχήμα 2.23 Σύστημα έδρασης και λίπανσης άξονα κίνησης

2.4.1 Ακτινικό σύστημα κύλισης άξονα (Radial bearing system)

Ο άξονας μετάδοσης κίνησης είναι συνδεδεμένος με κουζινέτο το οποίο περιστρέφεται με τον άξονα χωρίς όμως να έχει επαφή με τα τοιχώματα. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση λαδιού, το οποίο προμηθεύεται από το σύστημα λίπανσης του κινητήρα.

Το λάδι διοχετεύεται τόσο ανάμεσα στο κουζινέτο και στο τοίχωμα, όσο και ανάμεσα στο κουζινέτο και στον άξονα επιτυγχάνοντας περιστροφή του κουζινέτου 50% μικρότερη από τον άξονα. Αυτό επιτρέπει υψηλές ταχύτητες περιστροφής, καθώς δεν υπάρχει καμία επαφή μεταξύ των μετάλλων. Παράλληλα η μεμβράνη λαδιού μεταξύ των στοιχείων λειτουργεί και ως αποσβεστήρας εξασφαλίζοντας σταθερότητα σε όλα τα κινούμενα στοιχεία του στροβιλοϋπερπληρωτή.

Κάποιες φορές χρησιμοποιείται ακτινικό σύστημα κύλισης με σταθερό το κουζινέτο. Ουσιαστικά το κουζινέτο εδράζεται στο τοίχωμα ενώ ο άξονας περιστρέφεται. Το λιπαντικό ρέει μόνο μεταξύ του κουζινέτου και του άξονα.[14]

2.4.2 Αξονικό Σύστημα κύλισης (Axial-thrust bearing system)

Το ακτινικό σύστημα κύλισης άξονα που αναφέρθηκε παραπάνω, δεν μπορεί να αντιμετωπίσει τις αξονικές δυνάμεις που δέχεται το σύστημα, οι οποίες προέρχονται είτε από τον

συμπιεστή, είτε από τον στρόβιλο. Για αυτό το λόγο, υπάρχει το αξονικό σύστημα λίπανσης, το οποίο αποτελείται από δύο δίσκους, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στα άκρα του κελύφους λίπανσης και συνδεδεμένοι με τον άξονα και απορροφούν τις αξονικές δυνάμεις. Τέλος, οι δίσκοι αυτοί προστατεύουν τα τμήματα του συμπιεστή και στροβίλου, από τα έλαια λίπανσης. [14]

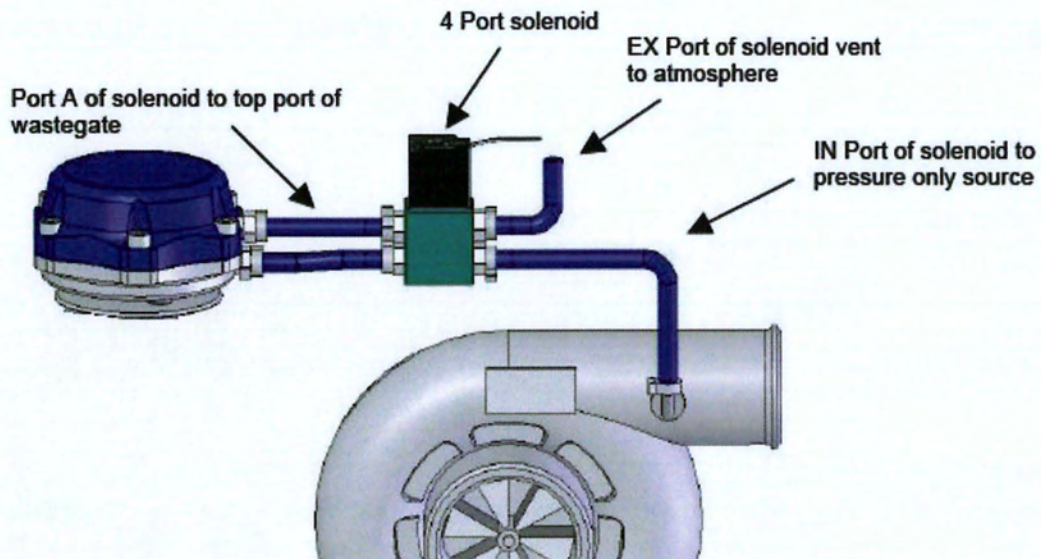
2.4.3 Λίπανση

Το λάδι λίπανσης που ρέει μέσα στο κέλυφος λίπανσης έχει πίεση περίπου 4 bar. Εξαιτίας του γεγονότος ότι κατά την αποβολή του, η πίεση είναι χαμηλότερη, η διατομή εξόδου θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη, από ότι στην είσοδο. [14]

2.5 Waste gate

Το σύστημα waste gate ουσιαστικά αποτελείται από μια βαλβίδα και ένα μηχανισμό, εκτρέποντας ελεγχόμενα (ανάλογα με την πίεση του συμπιεστή) ένα μέρος των καυσαερίων της εξαγωγής, από την είσοδό τους στο στρόβιλο, ρυθμίζοντας τις στροφές του στροβίλου και συνεπώς και του συμπιεστή. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η ώθηση (boost) η οποία δίνει ο στροβιλοϋπερπληρωτής στον κινητήρα, με αποτέλεσμα να είναι διαχειριζόμενη η μέγιστη ώθηση που δίνεται στη μηχανή, ιδιαίτερα για μηχανές, οι οποίες δεν έχουν υποστεί κατεργασία εσωτερικά του κυλίνδρου για την αύξηση της αντοχής λόγω της αυξημένης πίεσης του ρευστού, καθώς και μείωση της υπερώθησης που δέχεται ο κινητήρας ακαριαία, από τον συμπιεστή λόγω της χαμηλής απόκρισης του συστήματος. Το σύστημα waste gate χωρίζεται σε εσωτερικό και εξωτερικό, ανάλογα με το σημείο τοποθέτησης της βαλβίδας.

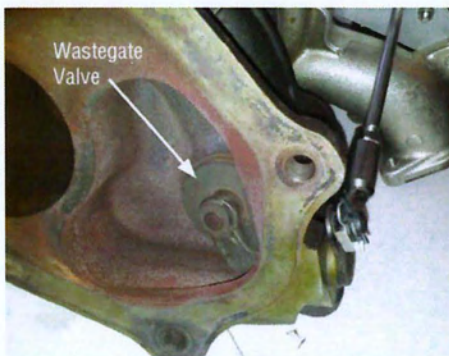
Ο μηχανισμός έλεγχου της βαλβίδας είναι τοποθετημένος στην εξωτερική πλευρά του συμπιεστή και συνδεδεμένος μαζί του. Όταν η πίεση του συμπιεστή ξεπεράσει την αντίσταση του ελατηρίου που βρίσκεται εσωτερικά του μηχανισμού, τότε η ράβδος μετακινείται ανάλογα, με αποτέλεσμα το αντίστοιχο άνοιγμα της βαλβίδας.



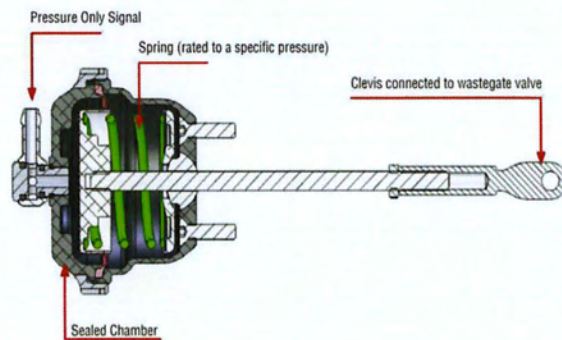
Σχήμα 2.24 Λειτουργία Του μηχανισμού έλεγχου βαλβίδας waste gate

2.5.1 Εσωτερική waste gate

Η βαλβίδα είναι τοποθετημένη μέσα στο στρόβιλο. Το ρευστό κατά την είσοδό του στο housing έρχεται σε επαφή με δύο διόδους. Η μία που οδηγεί στο ακροφύσιο και την περωτή, και η άλλη που οδηγεί στην εξαγωγή μετά τον στρόβιλο, ενώνοντας το με το υπόλοιπό εκτονωμένο ρευστό. Η βαλβίδα ενώνεται με τον μηχανισμό έλεγχου μέσω μιας ράβδου.[15]



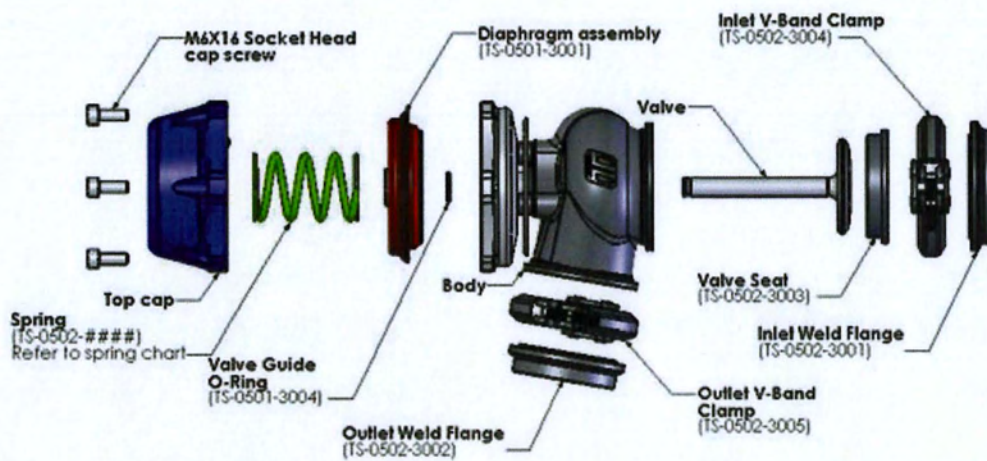
Σχήμα 2.26 Βαλβίδα εσωτερικής waste gate



Σχήμα 2.25 Σύστημα εσωτερικής waste gate

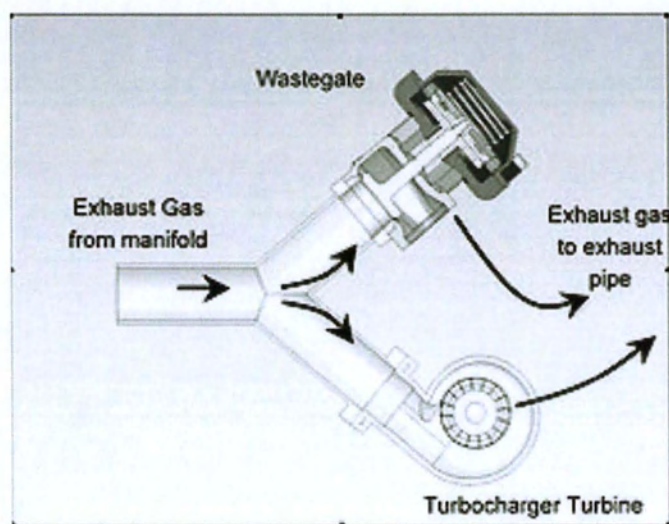
2.5.2 Εξωτερική waste gate

Σε αυτήν την περίπτωση, ο μηχανισμός και η βαλβίδα αποτελούν μία συσκευή.



Σχήμα 2.27 Σύστημα εξωτερικής waste gate

Η εξωτερική waste gate, τοποθετείται στην εξαγωγή πριν τον στρόβιλο. Συγκεκριμένα, η εισαγωγή διακλαδώνεται σε δύο επιμέρους σωλήνες. Ο ένας καταλήγει στον στρόβιλο, ενώ ο άλλος συνδέεται με την προέκταση της εξαγωγής μετά τον στρόβιλο. Στο δεύτερο σωλήνα τοποθετείται ενδιάμεσα η waste gate, καθορίζοντας έτσι την παροχή του ρευστού στους δυο επιμέρους σωλήνες. [15]



Σχήμα 2.28 Εξαγωγή στρόβιλου και wastegate

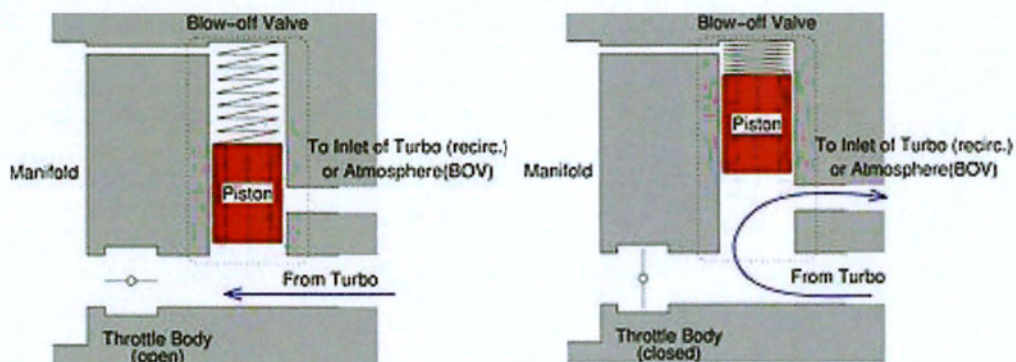
2.6 Βαλβίδα εκκένωσης (blow off valve)

Η βαλβίδα εκκένωσης (BOV) είναι μια συσκευή ανακούφισης πίεσης στο κομμάτι εισαγωγής ανάμεσα στον κινητήρα και στον συμπιεστή με σκοπό να αποτρέψει τη μετάβαση από τη γραμμής λειτουργίας του συμπιεστή στη γραμμή της υπέρτασης (surge line).



Σχήμα 2.29 Βαλβίδα εκκένωσης

Το εσωτερικό κύριο περίβλημα της βαλβίδας αποτελείται από ένα ελατήριο και ένα έμβολο. Το έμβολο (το οποίο λειτουργεί σαν βαλβίδα) αντιδρά στις αλλαγές της πίεσης και σε μία προκαθορισμένη τιμή, η οποία είναι ικανή να υπερνικήσει την αντίσταση του ελατηρίου, πιέζεται εσωτερικά δίνοντας την δυνατότητα σε ένα μέρος του αέρα να ελευθερωθεί στο περιβάλλον, ή να επιστρέψει στην είσοδο του συμπιεστή μέσω παράλληλου σωλήνα.[16]



Σχήμα 2.30 Λειτουργία Βαλβίδας εκκένωσης

2.6 Εναλλάκτης Θερμότητας (Intercooler)

Η συσκευή αυτή όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 στην αρχή του κεφαλαίου, ουσιαστικά είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας αυλών-πτερυγίων, ο οποίος ψύχει το συμπιεσμένο αέρα που εκρέει από το συμπιεστή, αυξάνοντας την απόδοση του συστήματος στροβιλοϋπερπληρωτή-κινητήρα.

Με τη μείωση της θερμοκρασίας και διατηρώντας την πίεση σταθερή, μειώνεται ο ειδικός όγκος ($v=1/\rho$, $\rho \rightarrow$ πυκνότητα) του ρευστού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να εισέρχεται μεγαλύτερη ποσότητα αέρα στον κινητήρα βελτιώνοντας την καύση μέσα στον κύλινδρο και την απόδοση του κινητήρα.

Από Καταστατική εξίσωση:

$$\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2} \quad 2-34$$

Όπου v_1 και v_2 είναι ο ειδικός όγκος πριν και μετά τον εναλλάκτη T_1 και T_2 είναι η θερμοκρασία πριν και μετά τον εναλλάκτη. Οι P_1 και P_2 είναι οι πιέσεις πριν και μετά τον εναλλάκτη, οι οποίες δεν μεταβάλλονται σχεδόν καθόλου.[17]

2.6.1 Εναλλάκτες Αυλών-πτερυγίων

Οι εναλλάκτες αυλών-πτερυγίων χρησιμοποιούνται για την μεταφορά θερμότητας προς αέρια ρεύματα (όπως ο αέρας στην συγκεκριμένη περίπτωση), καθώς η εκτεταμένη επιφάνεια των πτερυγίων αναπληρώνει τον χαμηλό συντελεστή συναγωγής των αερίων.[18, 19]

Ολικός συντελεστής μεταφοράς

$$\frac{1}{U_o A} = \left(\frac{1}{h_i A_i} \right) + \frac{\ln(d_o/d_i)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta L \cdot k_w} + \left(\frac{1}{h_o A_o} \right) \quad 2-35$$

Όπου U_o είναι ο ολικός συντελεστής μεταφοράς, A_o είναι το εμβαδό εξωτερικά του αυλού, A_i το εμβαδόν εσωτερικά του αυλού, h_i ο συντελεστής συναγωγής του ρευστού στον αυλό, d_o και d_i η διάμετρος εξωτερικά και εσωτερικά του αυλού, k_w η θερμική αγωγιμότητα του

υλικού, A_i το εμβαδόν των πτερυγίων και h_o ο συντελεστής αγωγής του εξωτερικού αέρα που περικλείει τα πτερύγια.

Υπολογισμός Θερμορροής συστήματος

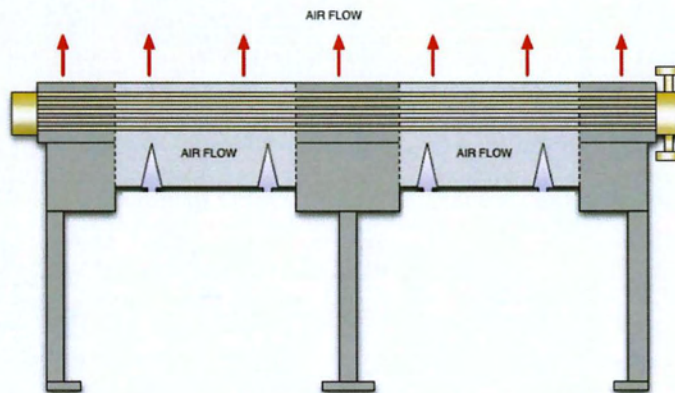
$$Q = U_o A_o \Delta T_{o\lambda} \quad 2-36$$

$$\Delta T_{o\lambda} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad 2-37$$

$$\Delta T_1 = T_{h1} - T_{c1} \quad 2-38$$

$$\Delta T_2 = T_{h2} - T_{c2} \quad 2-39$$

Όπου T_{h1} και T_{h2} είναι η θερμοκρασία του ζεστού ρεύματος προς ψύξη στην είσοδο και στην έξοδο του αυλού και T_{c1} και T_{c2} είναι η θερμοκρασία του αέρα πριν περάσει από τον εναλλάκτη και αφού περάσει.

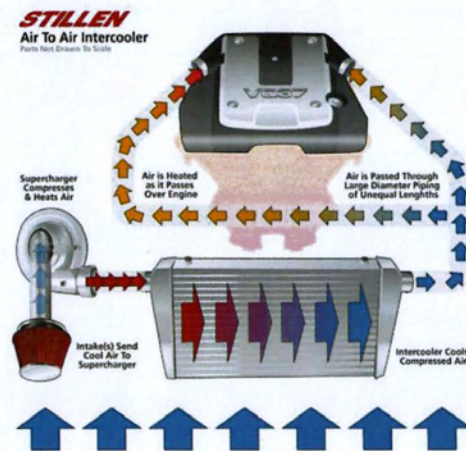


Σχήμα 2.31 Εναλλάκτης θερμότητας αυλών-πτερυγίων

2.6.2 Είδη εναλλακτών θερμότητας για ψύξη του συμπιεσμένου αέρα

Αέρα με Αέρα

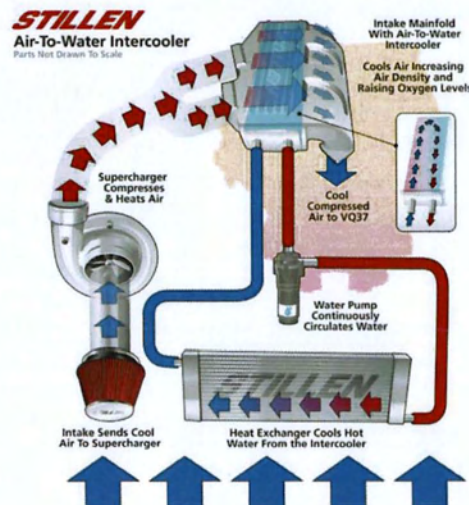
Αυτή η μορφή εναλλάκτη είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιημένη σε αυτοκίνητα με στροβιλοϋπερπληρωτή. Συγκεκριμένα, ο αέρας του συμπιεστή ψύχεται άμεσα μέσω του αέρα στο περιβάλλον.[17]



Σχήμα 2.32 Εναλλάκτης Αέρα με Αέρα

Αέρας με Νερό

Σε αυτήν την περίπτωση η ψύξη του συμπιεσμένου αέρα είναι όμοια με αυτήν της ψύξης του κινητήρα. Συγκεκριμένα, υπάρχει κλειστό κύκλωμα με νερό το οποίο κινείται μέσω αντλίας. Το νερό αυτό αντλεί θερμότητα από τον συμπιεσμένο αέρα και την οποία αποβάλλει στο περιβάλλον. [17]



Σχήμα 2.33 Εναλλάκτης Αέρα με Νερό

3. Μηχανή Εσωτερικής Καύσης με στροβιλοϋπερπληρωτή

3.1 Γενικά Στοιχεία Μηχανής Εσωτερικής Καύσης

3.1.1 Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (Εμβολοφόρα)

Η μηχανή εσωτερικής καύσης είναι ένας κινητήρας στον οποίο η μηχανική ενέργεια παράγεται μέσω της καύσης ενός καυσίμου (συνήθως ένα ορυκτό καύσιμο) μαζί με ένα οξειδωτή (συνήθως αέρα) σε θάλαμο καύσης κυλινδρικής γεωμετρίας. Η δύναμη, η οποία παράγεται μέσω της ενέργειας που εκλύεται από την καύση του καυσίμου και του οξειδωτικού, μετακινώντας το έμβολο το οποίο βρίσκεται στον θάλαμο καύσης και παράγοντας χρήσιμη μηχανική ενέργεια.

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης χωρίζονται ανάλογα με την διάταξή τους σε τετράχρονο κύκλο και δίχρονο κύκλο καθώς και ανάλογα με τον τρόπο ανάφλεξης σε κινητήρες ανάφλεξης μέσω σπινθήρα και ανάφλεξης μέσω συμπίεσης

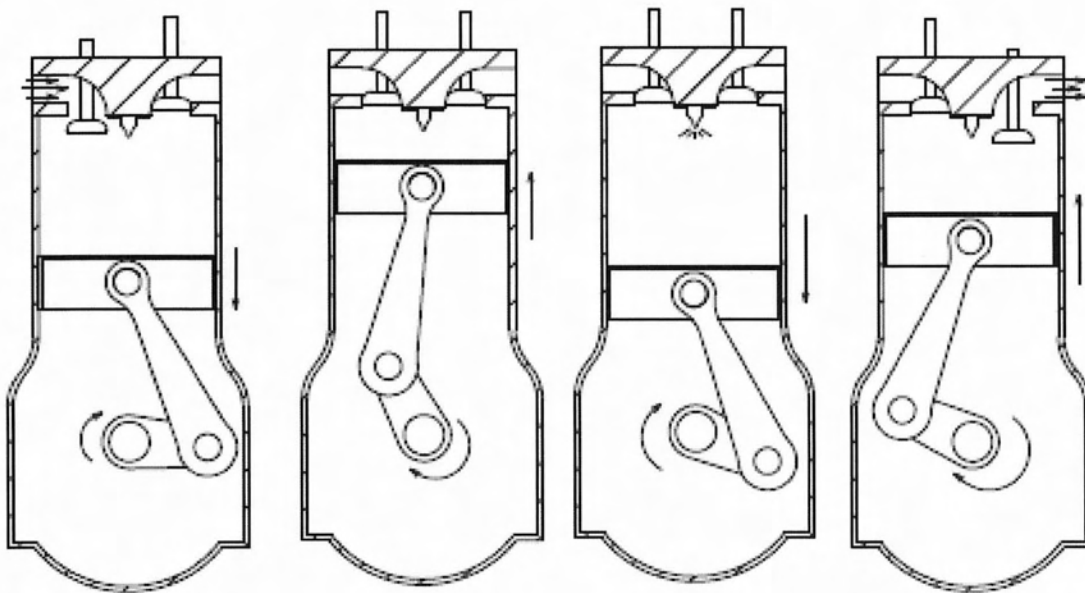
3.1.2 Τετράχρονοι και Δίχρονοι κινητήρες

Σε όλους τους κινητήρες αυτοί οι κύκλοι είναι κυρίως ένα πρότυπο, καθώς υπάρχουν διαφορές από μηχανή σε μηχανή με βάση τον επιμέρους σχεδιασμό που έχουν υποστεί. Ωστόσο, οι αρχές λειτουργίας είναι οι ίδιες.[3]

Τετράχρονοι

- 1^{ος} Χρόνος: Το έμβολο κινείται από το άνω νεκρό σημείο μέχρι το κάτω νεκρό σημείο δημιουργώντας υποπίεση με αποτέλεσμα την εισροή στον κύλινδρο του ρευστού. Παράλληλα η βαλβίδα εισαγωγής έχει βυθιστεί προκειμένου να επιτρέψει την εισροή αυτήν. (Σε κινητήρες τύπου Otto το ρευστό που εισρέει είναι μίγμα καυσίμου και οξειδωτικού, ενώ στους κινητήρες Diesel οξειδωτικό)
- 2^{ος} Χρόνος: Το έμβολο κινείται από το κάτω νεκρό σημείο στο άνω νεκρό σημείο προκαλώντας αύξηση της πίεσης του ρευστού μέσω της μείωσης του όγκου. Παράλληλα, όλες οι βαλβίδες είναι κλειστές προκειμένου να αποτρέψουν τη διαρροή του ρευστού.

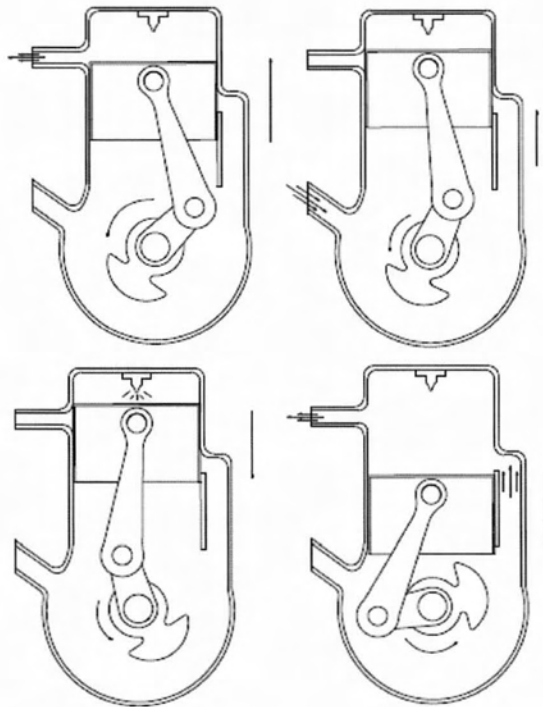
- 3^{ος} Χρόνος: Πραγματοποιείται η καύση μεταφέροντας μηχανική ενέργεια στο έμβολο , μέσω της εκτόνωσης των καυσαερίων, το οποίο κινείται από το άνω νεκρό σημείο στο κάτω νεκρό σημείο. (Σε κινητήρες τύπου Otto η καύση πραγματοποιείται μέσω της δημιουργίας σπινθήρα, ενώ στους κινητήρες Diesel μέσω της άμεσης έκχυσης καυσίμου σε υψηλή πίεση.)
- 4^{ος} Χρόνος: Το έμβολο κινείται από το κάτω νεκρό σημείο, στο άνω νεκρό σημείο, δίνοντας ώθηση στα καυσαέρια να εξέλθουν του θαλάμου καύσεως, μέσω της βαλβίδας εξαγωγής που είναι ανοιχτή.



Σχήμα 3.1 Οι χρόνοι ενός τετράχρονου κινητήρα

Δίχρονοι

- 1^{ος} Χρόνος: Καθώς το έμβολο κινείται από το κάτω νεκρό σημείο στο άνω νεκρό σημείο και πραγματοποιείται κλείσιμο των στομιών εισαγωγής και εξαγωγής , ο κύλινδρος συμπιέζει το μίγμα και, ταυτόχρονα, ένα φρέσκο-μίγμα εισέρχεται στον θάλαμο του στροφάλου.
- 2^{ος} Χρόνος: Πραγματοποιείται η καύση με αποτέλεσμα την κίνηση του εμβόλου από το άνω νεκρό σημείο στο κάτω νεκρό σημείο. Αυτό επιτρέπει την εκροή των καυσαερίων και την εισροή φρέσκου μίγματος καθώς ανοίγει το στόμιο εισαγωγής και εξαγωγής.

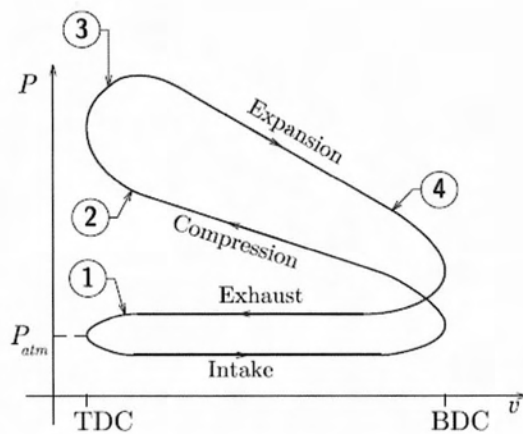


Σχήμα 3.2 Χρόνοι Δίχρονου κινητήρα

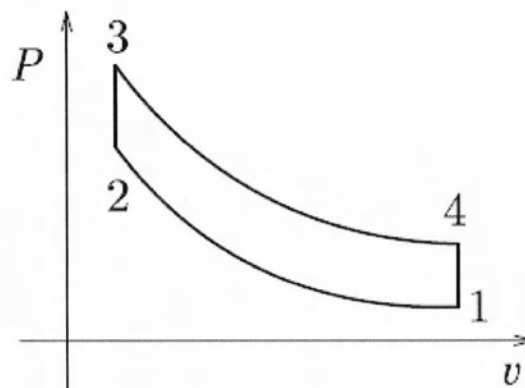
3.1.3 Μηχανές εσωτερικής καύσης ανάφλεξης με σπινθήρα και ανάφλεξης με συμπίεση τεσσάρων χρόνων

Μηχανές εσωτερικής καύσης ανάφλεξης με σπινθήρα (Otto)

Στους κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα (κύκλου Otto) πραγματοποιείται μίξη του αέρα και του καυσίμου πριν από την είσοδο τους στον θάλαμο καύσης του κινητήρα (κύλινδρος). Η ανάφλεξη του συμπιεσμένου από το έμβολο μίγματος, πραγματοποιείται μέσω δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου από το σπινθήρα.



Σχήμα 3.3 Κύκλος μηχανής εσωτερικής καύσης Otto



Σχήμα 3.4 Πρότυπος κύκλος αέρα Otto

Ο κύκλος αποτελείται από τέσσερις καταστάσεις Σχήμα 3.3:

- Κατάσταση 1-2: Αρχικά εισρέει το μίγμα στον θάλαμο καύσης με την κάθοδο του εμβόλου στο κάτω νεκρό σημείο και έπειτα συμπιέζεται σχεδόν αδιαβατικά καθώς το έμβολο ανέρχεται στο άνω νεκρό σημείο.
- Κατάσταση 2-3: Το μίγμα αναφλέγεται μέσω του σπινθήρα. Η ταχύτητα της καύσης είναι αρκετά γρήγορη, με αποτέλεσμα η πίεση να αυξάνεται κατά μήκος του δρόμου 2-3 ενώ ο όγκος να παραμένει σχεδόν σταθερός.
- Κατάσταση 3-4: Στην κατάσταση αυτήν παράγεται το έργο της μηχανής
- Κατάσταση 4-1: Στην κατάσταση αυτήν το έμβολο πιέζει τα προϊόντα της καύσης να εξέλθουν του κυλίνδρου.[20]

Η θερμική απόδοση του προτύπου κύκλου αέρα Otto Σχήμα 3.4 δίνεται από τον τύπο:

$$\eta_{otto} = \frac{W_s}{Q_{32}} = \frac{Q_{32} + Q_{41}}{Q_{32}} \quad 3.1$$

Για 1 mol αέρα με σταθερές θερμοχωρητικότητες:

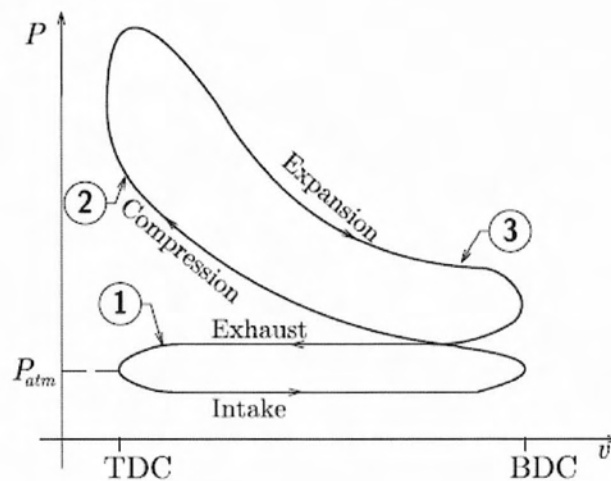
$$Q_{32} = c_v(T_3 - T_2) \quad 3.2$$

$$Q_{41} = c_v(T_4 - T_1) \quad 3.3$$

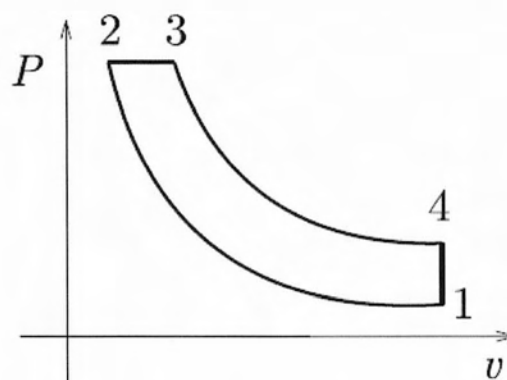
Όπου Q_{32} είναι η θερμότητα που εισρέει στην κατάσταση 2-3 και Q_{41} είναι η θερμότητα που εκλύεται στην κατάσταση 4-1.

Μηχανές εσωτερικής καύσης ανάφλεξης με συμπίεση (Diesel)

Η διαδικασία εισαγωγής σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση (Diesel) είναι διαφορετική από ότι η περιγραφόμενη σε Μηχανές εσωτερικής καύσης ανάφλεξης με καθώς μόνο ο αέρας εισάγεται στον κύλινδρο. Ως εκ τούτου, μόνο αέρας συμπιέζεται στη διαδρομή συμπίεσεως και δεδομένου ότι δεν υπάρχει καύσιμο στο κυλίνδρου, η συμπίεση γίνεται σε υψηλότερη πίεση και θερμοκρασία.



Σχήμα 3.5 Κύκλος μηχανής εσωτερικής καύσης Diesel



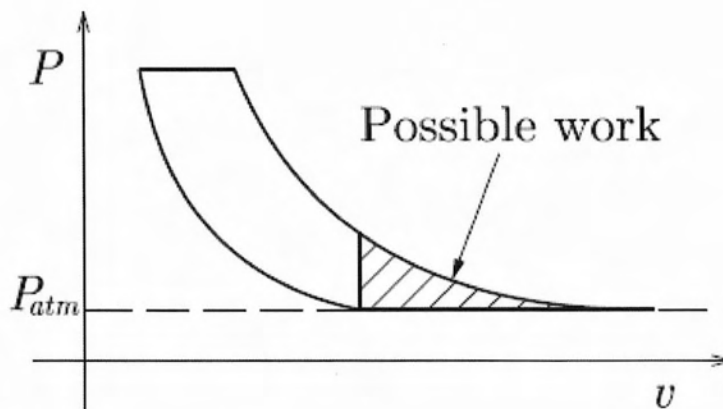
Σχήμα 3.6 Πρότυπος κύκλος αέρα Diesel

Σε κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα ο έλεγχος φορτίου ισχύς του κινητήρα, γίνεται μεταβάλλοντας την ποσότητα του καυσίμου και τον αέρα, δεδομένου ότι εισέρχονται στον κύλινδρο ταυτόχρονα ως ένα μίγμα. Σε αυτό το είδος των κινητήρων η ποσότητα του αέρα, ανά κύκλο, παραμένει σχεδόν σταθερή, έτσι ο έλεγχος φορτίου γίνεται τροποποιώντας την ποσότητα του καυσίμου που εγχύεται. [3]

Θερμοδυναμικά η μηχανή Diesel διαφέρει από τη μηχανή Otto στο γεγονός ότι η θερμοκρασία στο τέλος της συμπίεσης είναι ικανοποιητικά υψηλή, γεγονός που κάνει τη συμπίεση να οδηγεί σε αυτόματη ανάφλεξη. Το καύσιμο δε διοχετεύεται μέχρι το τέλος του βήματος συμπίεσης, οπότε και προστίθεται τόσο αργά ώστε η καύση να γίνεται με σταθερή προσεγγιστική πίεση.[20]

3.2 Ανάκτηση ενέργειας μηχανής εσωτερικής ενέργειας

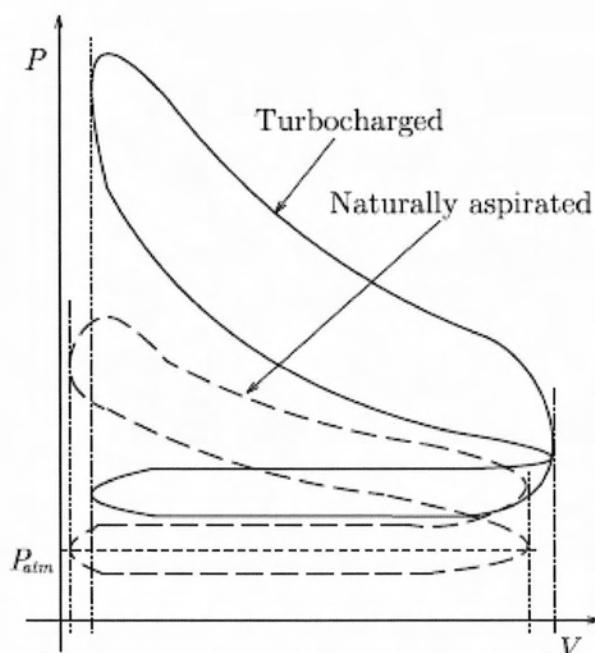
Κατά τη λειτουργία τετράχρονου κινητήρα η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει όταν το έμβολο είναι κοντά κατώτερο νεκρό σημείο, όπου η πίεση στο εσωτερικό του κυλίνδρου είναι υψηλότερη από την ατμοσφαιρική. Με την εκροή των καυσαερίων από τον θάλαμο καύσης, ένα ποσό ενέργεια χάνεται στο περιβάλλον.



Σχήμα 3.7 Δυνατό έργο σε ιδανικό κύκλο Diesel φυσικής αναπνοής

Η ενέργεια αυτή, φαίνεται στη σκιαγραφημένη περιοχή του Σχήμα 3.7 Δυνατό έργο σε ιδανικό κύκλο Diesel φυσικής αναπνοής. Ο σκοπός της στροβιλοϋπερπλήρωσης είναι να αυξήσει την ενέργεια της ροής εισόδου στον κινητήρα εκμεταλλευόμενος την ενέργεια αυτή. Η μάζα που εισέρχεται στον κινητήρα σε κάθε κύκλο αυξάνοντας την πυκνότητα του αέρα.

Πριν από την είσοδο του κυλίνδρου, σε υπερπληρούμενους κινητήρες, ο αέρας συμπιέζεται σε ένα συμπίεστή. Η κίνηση του συμπίεστή γίνεται από έναν άξονα συνδεδεμένο με στρόβιλο που αντλεί ενέργεια από τα καυσαέρια τα οποία διαφορετικά θα χάνονταν κατά το τέλος του. Ως εκ τούτου, δεν αντλείται μηχανική ενέργεια από τον κινητήρα προκειμένου να πραγματοποιηθεί η συμπίεση του αέρα στην εισαγωγή.



Σχήμα 3.8 Διάγραμμα P-v κινητήρα φυσικής αναπνοής και στροβιλοϋπερπληρούμενου κινητήρα

Οι ατμοσφαιρικοί κινητήρες έχουν σχεδόν ίσες πιέσεις εισαγωγής και εξαγωγής, με αποτέλεσμα να μην πραγματοποιείται καθαρισμός του υπολείμματος καυσαερίων. Αντίθετα, σε κινητήρες με στροβιλοϋπερπληρωτή εξαιτίας της διαφοράς πίεσης στην πολλαπλή εισαγωγή και εξαγωγή δημιουργήθει μια παροχή αέρα η οποία βοηθάει στον καθαρισμό του κυλίνδρου από τα υπολείμματα καυσαερίων την στιγμή που οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής είναι ανοιχτές ταυτόχρονα.

3.3 Ενεργειακό ισοζύγιο ατράκτου στροβιλοϋπερπληρωτή

Σε έναν στροβιλοϋπερπληρωτή ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι ενωμένοι με έναν άξονα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, εκτός από τις ίδιες στροφές να έχουν και το ίδιο μέτρο έργου.

$$\dot{m}_c c_{p,c} \frac{T_2 - T_1}{\eta_c} = \dot{m}_t c_{p,t} (T_3 - T_4) \eta_t \quad 3.4$$

$$\dot{m}_c = \dot{m}_{air} \quad 3.5$$

$$\dot{m}_t = \dot{m}_{ex} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel} \quad 3.6$$

Όπου \dot{m}_c είναι η παροχή του στροβίλου στον κινητήρα. T_2 και T_1 είναι η θερμοκρασίες πριν και μετά τον συμπιεστή. T_3 και T_4 είναι οι θερμοκρασίες πριν και μετά τον στρόβιλο. Τα $C_{p,c}$ και $C_{p,t}$ είναι οι θερμοχωρητικότητες με σταθερή πίεση του συμπιεστή και του στροβίλου αντίστοιχα. \dot{m}_{ex} είναι η παροχή των καυσαερίων ενώ \dot{m}_{air} και \dot{m}_{fuel} είναι οι παροχές αέρα και καυσίμου στον θάλαμο καύσης.

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

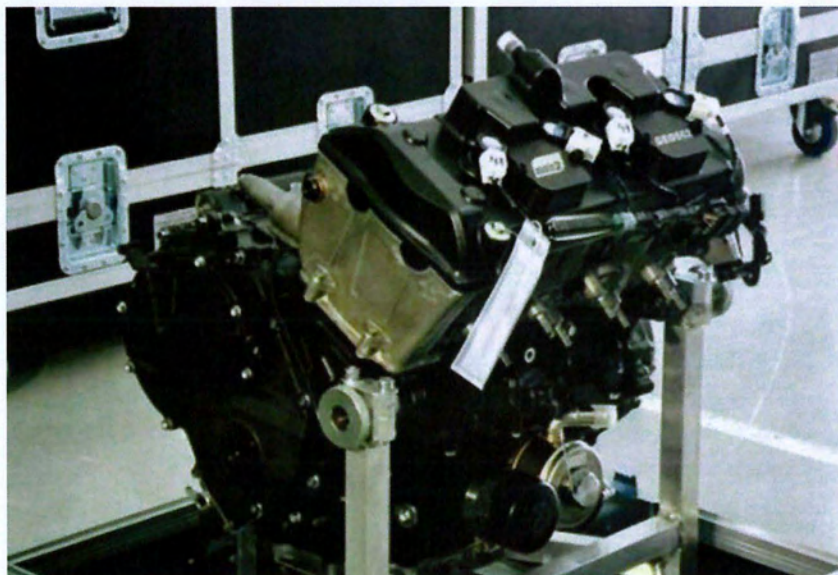
$$\dot{m}_c c_{pc} \frac{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - T_1}{\eta_c} = \dot{m}_t c_{tc} \left(T_3 - \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \eta_t \quad 3.7$$

Όπου P_1, P_2, P_3, P_4 είναι οι πιέσεις πριν το συμπιεστή, μετά τον συμπιεστή, πριν το στρόβιλο και μετά το στρόβιλο.

4. Σχεδιασμός και προσομοίωση στροβιλοϋπερπληρωτής

4.1 Κινητήρας όπου προσαρμόζεται ο στροβιλοϋπερπληρωτής

Ο κινητήρας για τον οποίο σχεδιάστηκε και αναλύθηκε ο στροβιλοϋπερπληρωτής στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας είναι ο κινητήρας Cbr 600 RR της εταιρίας Honda. Ουσιαστικά πρόκειται για μια μηχανή εσωτερικής καύσης εξακοσίων κυβικών , τεσσάρων χρόνων , με ανάφλεξη μέσω σπινθήρα.



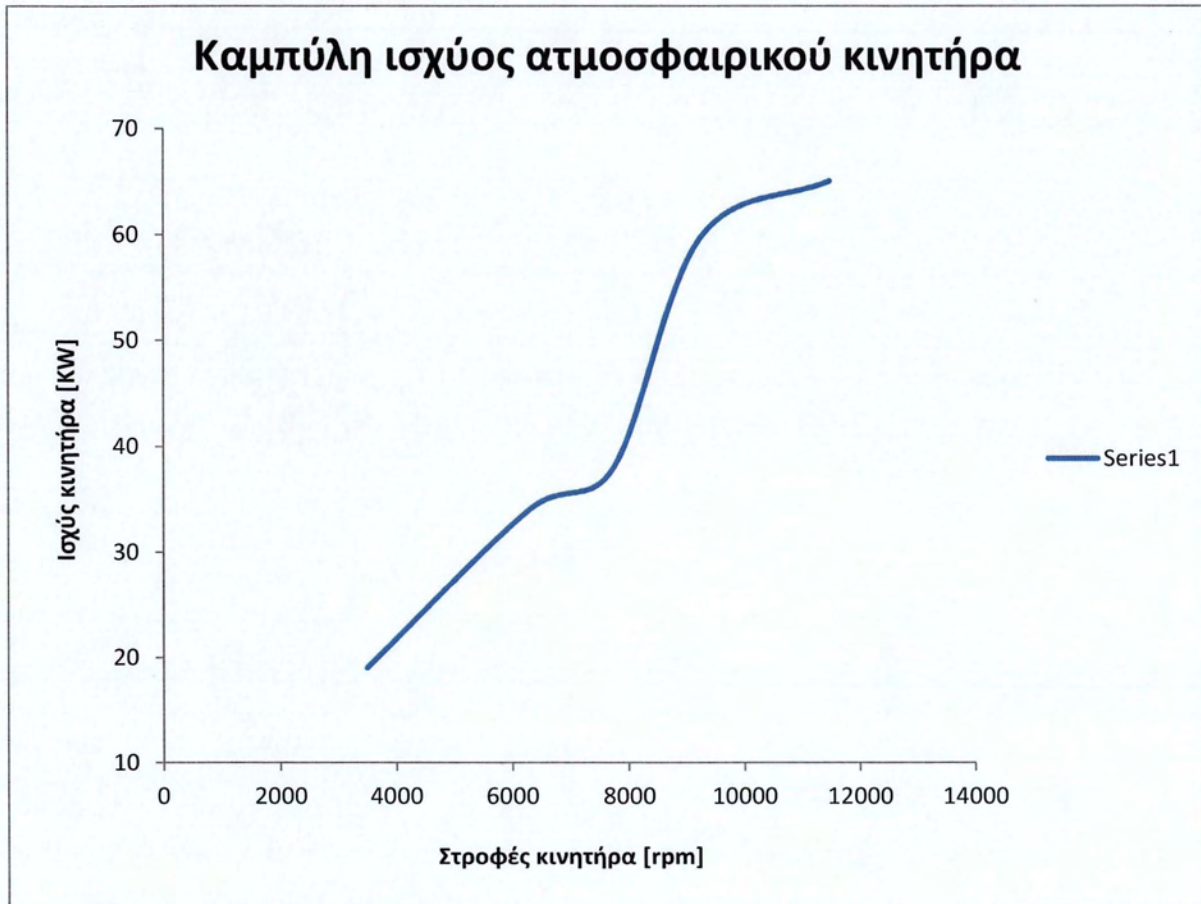
Σχήμα 4.1 Κινητήρας Honda Cbr 600 RR

4.1.1 Βασικά στοιχεία κινητήρα

	Κινητήρας
Τύπος κινητήρα	4 κύλινδροι παράλληλοι / Τεσσάρων χρόνων
Κυβισμός	599 cc
Bore/Stroke	67.0 mm x 42.5 mm
Συμπίεση	12:1
Βαλβίδες ανά κύλινδρο	4
Μέγιστη ισχύς	65 KW (83 hp) @ 12000 rpm
Μέγιστη ροπή	58 Nm @ 9500 rpm

4.1.2 Καμπύλη ισχύος κινητήρα χωρίς χρήση στροβιλοϋπερπλήρωσης

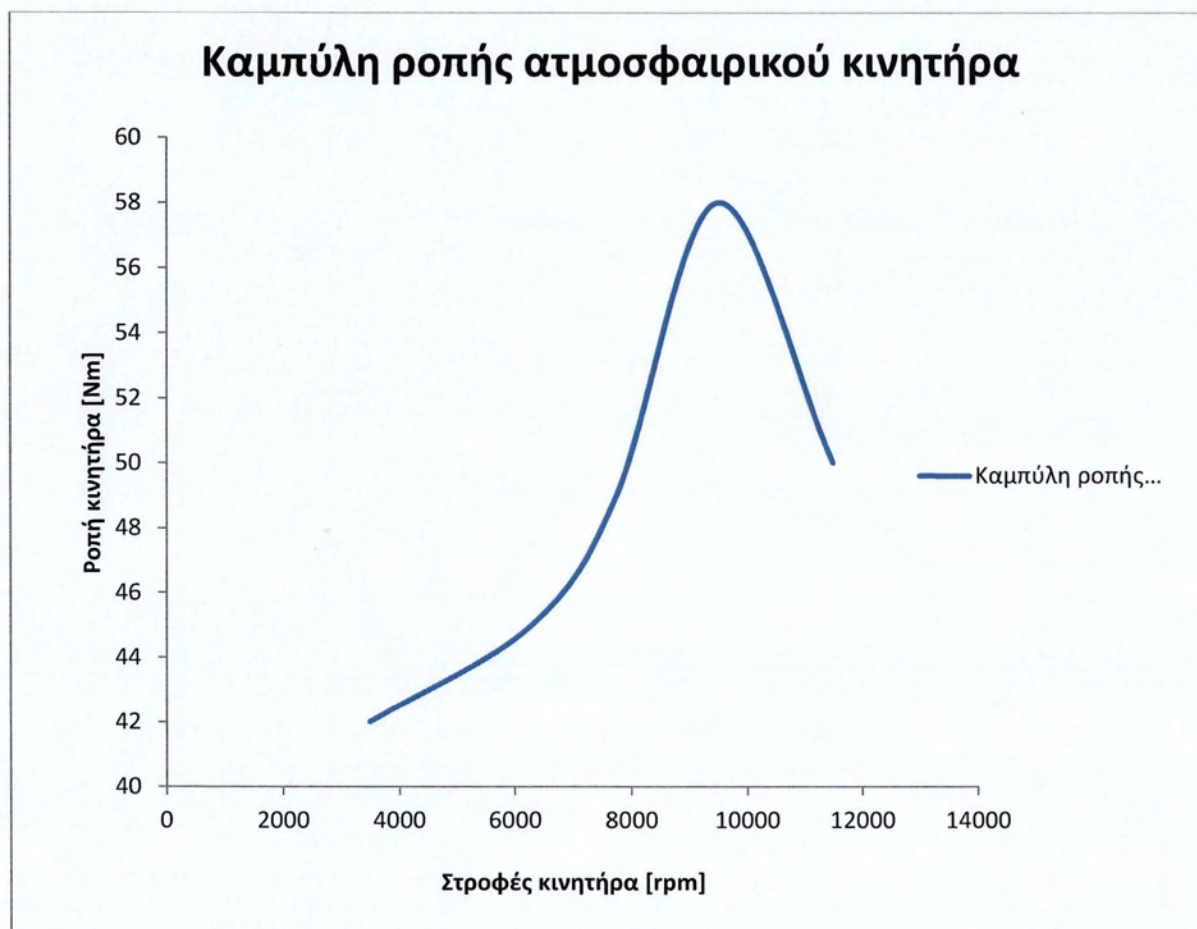
Παρακάτω στο σχήμα 4.2 απεικονίζεται η καμπύλη ισχύος του κινητήρα, η οποία υπολογίστηκε με τη χρήση του προγράμματος προσομοίωσης μηχανών εσωτερικής καύσης Ricardo.



Σχήμα 4.2 Καμπύλη ισχύος Honda Cbr RR ατμοσφαιρικής αναπνοής

4.1.3 Καμπύλη ροπής κινητήρα χωρίς χρήση στροβιλοϋπερπλήρωσης

Παρακάτω στο σχήμα 4.3 απεικονίζεται η καμπύλη ροπής του κινητήρα, η οποία υπολογίστηκε με την χρήση του προγράμματος προσομοίωσης μηχανών εσωτερικής καύσης Ricardo.



Σχήμα 4.3 καμπύλη ροπής Honda Cbr RR ατμοσφαιρικής αναπνοής

4.2 Αρχική υπόθεση και off-design

Με τον όρο off-design καλείται η διαδικασία υπολογισμού της προβλεπόμενης συμπεριφοράς μίας συσκευής (π.χ. χάρτης λειτουργίας) χρησιμοποιώντας βασικά στοιχεία γεωμετρίας, όπως διάμετροι εισόδου και εξόδου και γωνίες πτερυγίων, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης τρισδιάστατου σχεδίου.

Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει στον μηχανικό να βρει τις βέλτιστες για το πρόβλημα γεωμετρίες, χωρίς υπερβολικά μεγάλη δαπάνη χρόνου, προκειμένου να προβεί στον τρισδιάστατο σχεδιασμό.

4.2.1 Αρχική υπόθεση

Για να πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση γεωμετρίας στροβιλοϋπερπληρωτή, είναι αναγκαία η επιλογή αρχικών γεωμετριών τόσο για τον συμπιεστή, όσο και για το στρόβιλο προκειμένου να δημιουργηθεί ένας αρχικός χάρτης για κάθε συσκευή και στη συνέχεια να γίνει η εκάστοτε βελτιστοποίηση. Ο υπολογισμός του χάρτη λειτουργίας γίνεται με την χρήση δύο προγραμμάτων που είχαν αναπτυχθεί σε κώδικα Fortran (εγχειρίδιο κώδικα για συμπιεστή [11], εγχειρίδιο κώδικα για στρόβιλο [13]). Ο στροβιλοϋπερπληρωτής που επιλέχθηκε είναι ο gt0632sz της εταιρείας Garret διότι ικανοποιούσε αρκετές από τις απαιτήσεις του κινητήρα, όπως μικρός λόγος πίεσης και εύρος παροχών κοντά στη μέγιστη παροχή του κινητήρα. Φυσικά οι γεωμετρίες τις οποίες προβάλλει η εταιρεία είναι μόνο οι βασικές και όχι όλες όσες χρειάζεται σαν είσοδο το πρόγραμμα Fortran, για αυτό το λόγο οι υπόλοιπες γεωμετρίες επιλέχθηκαν εμπειρικά .

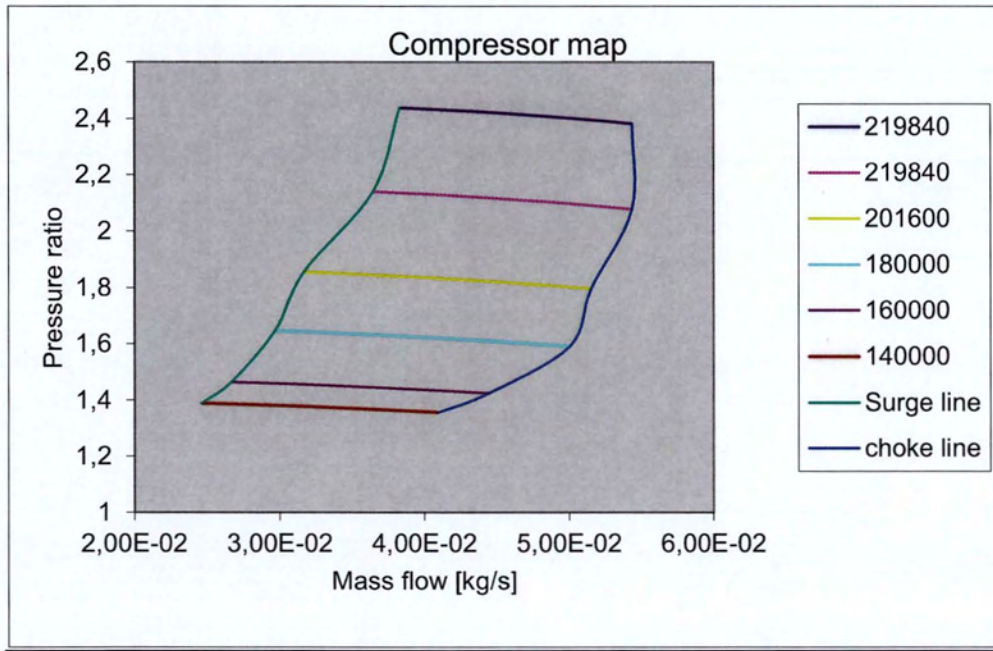
4.2.1 Συμπιεστής

Αρχική γεωμετρία

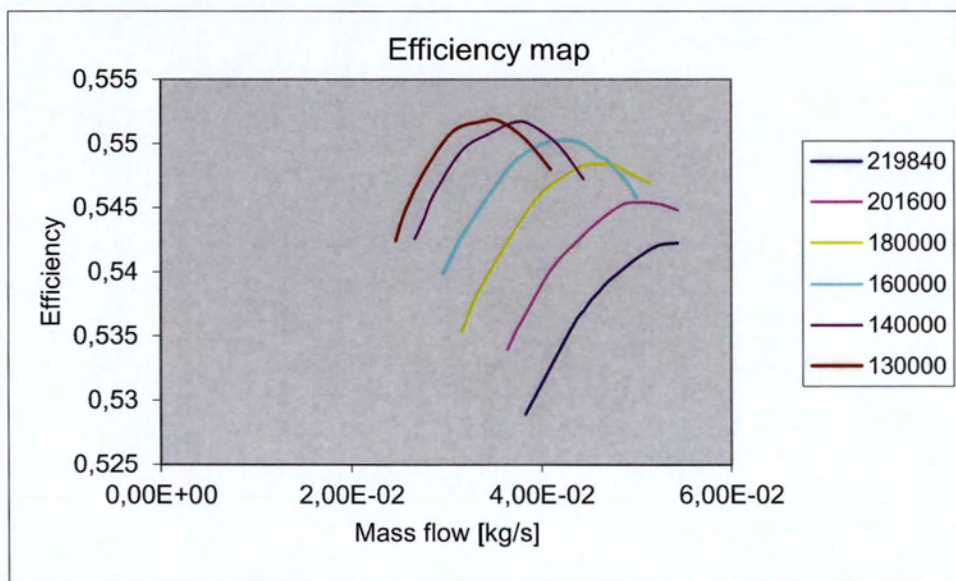
Διάμετρος πτερωτής εισόδου	22.63 mm
Διάμετρος πλύμνης πτερωτής εισόδου	12 mm
Διάμετρος πτερωτής εξόδου	29 mm
Αριθμός πτερυγίων	9
Γωνία εισόδου πτερωτής (αξονικά)	49°
Γωνία εξόδου πτερωτής (αξονικά)	25°
Μήκος πτερυγίου στην έξοδο της πτερωτής	6 mm

Λόγος εμβαδών εξόδου διαχύτη με εξόδου πτερωτής 1.14

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χάρτες που απορρέουν από την αρχική γεωμετρία του συμπιεστή.



Σχήμα 4.4 Χάρτης συμπιεστή αρχικής γεωμετρίας

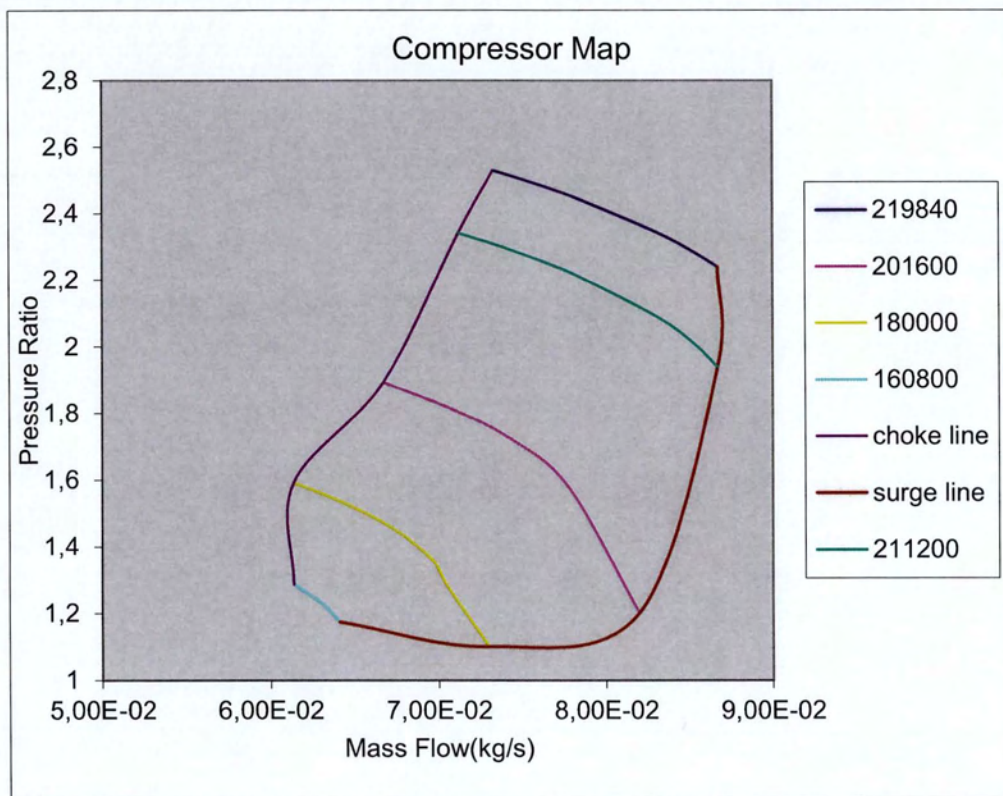


Σχήμα 4.5 Χάρτης απόδοσης συμπιεστή αρχικής γεωμετρίας

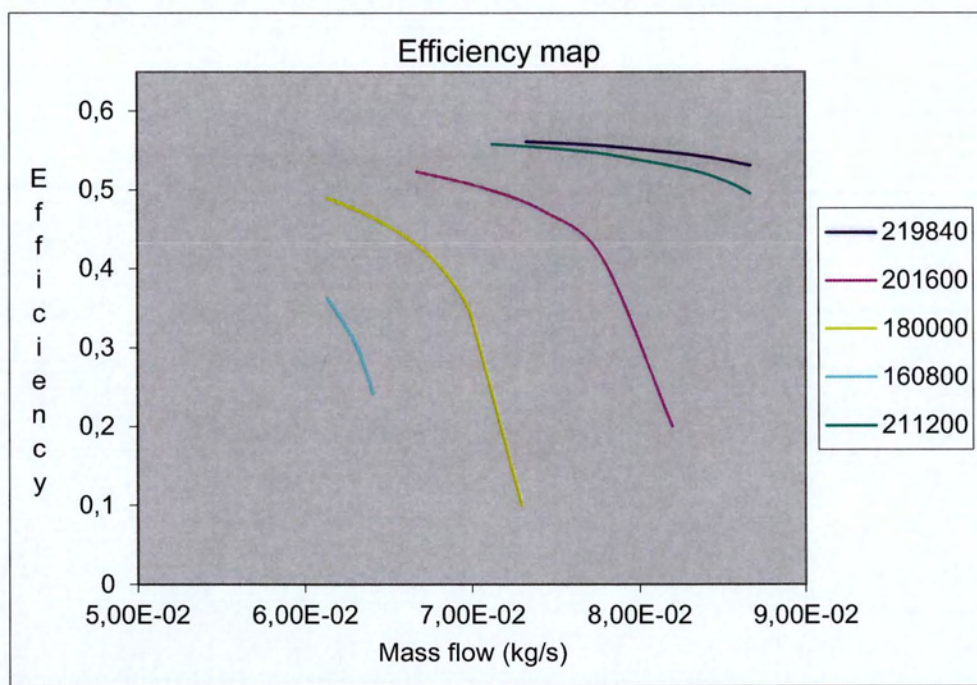
Τελική γεωμετρία

Διάμετρος περωτής εισόδου	28 mm
Διάμετρος πλύμνης περωτής εισόδου	14.8 mm
Διάμετρος περωτής εξόδου	40 mm
Αριθμός περυγίων	9
Γωνία εισόδου περωτής (αξονικά)	39°
Γωνία εξόδου περωτής (αξονικά)	25°
Μήκος περηγίου στην έξοδο της περωτής	4 mm
Λόγος εμβαδών εξόδου διαχύτη με εξόδου περωτής	1.08

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χάρτες που απορρέουν από την τελική υπολογισμένη γεωμετρία του συμπιεστή.



Σχήμα 4.6 Τελικός χάρτης συμπιεστή



Σχήμα 4.7 Τελικός χάρτης αποδόσεως συμπιεστή

Σχολιασμός

Από παλιότερες μελέτες του κινητήρα η μέγιστη παροχή κυμαινόταν κοντά στο 0.06 kg/s στις 11500 rpm του κινητήρα. Αυτό έχει σαν φυσικό επακόλουθο η μέγιστη παροχή του κινητήρα, εφαρμόζοντας τον στροβιλοϋπερπληρωτή, να είναι μεγαλύτερη.

Παρατηρώντας τον αρχικό χάρτη (Σχήμα 4.4 Χάρτης συμπιεστή αρχικής γεωμετρίας), η μέγιστη δυνατή τιμή παροχής είναι 0.055 kg/s. Εφαρμόζοντας έναν τέτοιο συμπιεστή στον κινητήρα μας, θα προκαλούσε μεταβολή της γραμμής λειτουργίας που θα οδηγούσε έξω από τη γραμμή στραγγαλισμού, μειώνοντας σημαντικά την απόδοση του συμπιεστή και συνάμα του κινητήρα σε επίπεδα χαμηλότερα και από την ατμοσφαιρική λειτουργία του.

Με τη βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε στον συμπιεστή (Σχήμα 4.6), επιτεύχθηκε η δημιουργία ενός εύρους παροχών ικανοποιητικό, προκειμένου να αποσοβήσει τον κίνδυνο εξόδου της γραμμής λειτουργίας από τον χάρτη του συμπιεστή. Οι μέγιστες στροφές λειτουργίας του συμπιεστή θα είναι 201600 rpm καθώς δεν είναι επιθυμητή η αύξηση της πίεσης άνω των 1.8 bar διασφαλίζοντας τη ζωή του κινητήρα, καθώς τα έμβολά του δεν έχουν υποστεί καμία κατεργασία.

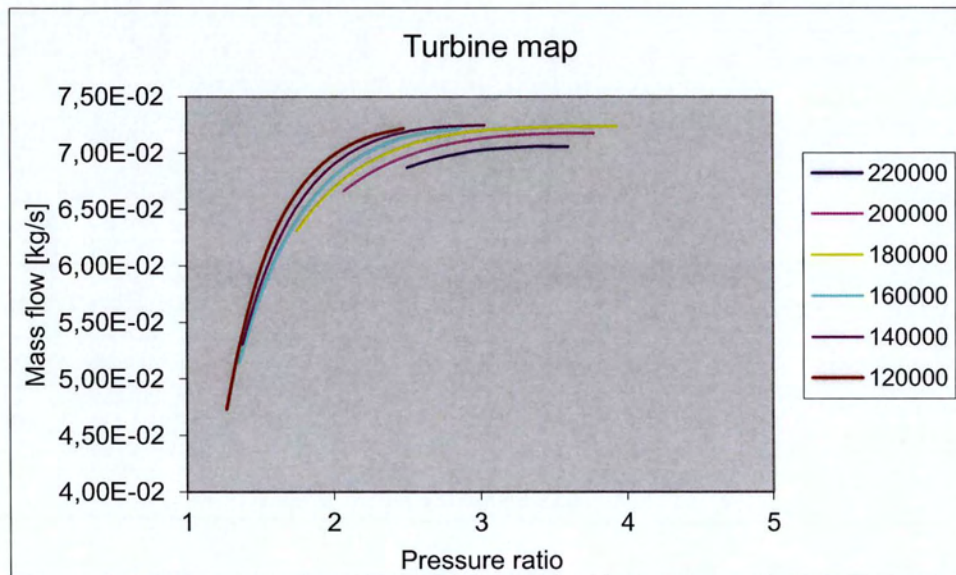
Παράλληλα, επιτεύχθηκε αύξηση της απόδοσης του συμπιεστή (Σχήμα 4.5-Σχήμα 4.7) στις 180000 rpm. Με την χρήση της waste gate οι στροφές αυτές αντιστοιχούν στις 9500 rpm στις οποίες επιτυγχάνεται η μέγιστη ροπή του κινητήρα, πράγμα το οποίο είναι σημαντικότερο από την μέγιστη ισχύ του κινητήρα, εξαιτίας της φύσης του διαγωνισμού fsae.

4.1.3 Στρόβιλος

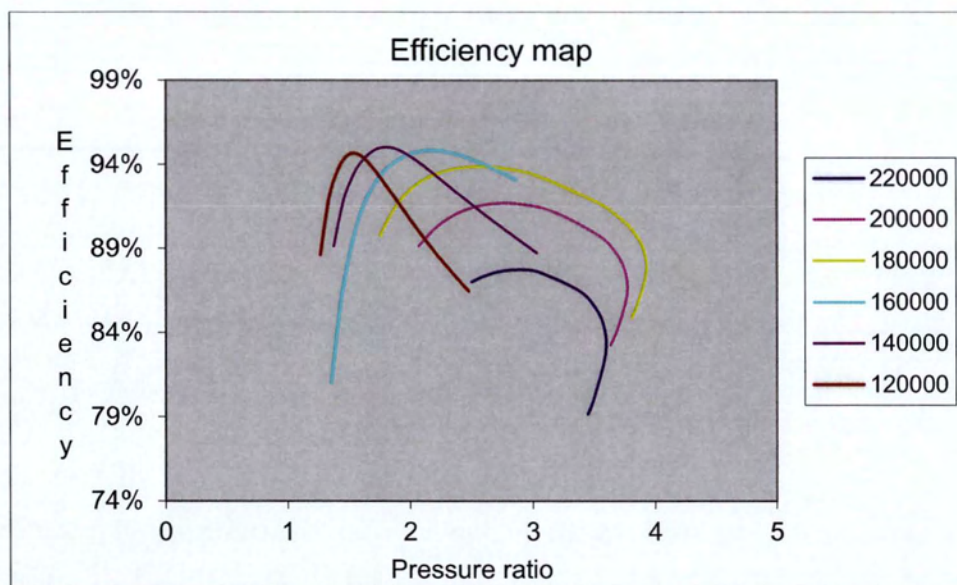
Αρχική γεωμετρία

Διάμετρος περωτής εισόδου	40 mm
Διάμετρος πλήμνης περωτής εξόδου	10 mm
Διάμετρος περωτής εξόδου	25 mm
Αριθμός περυγίων	9
Γωνία εισόδου σταθερών περυγίων (αξονικά)	10°
Γωνία εξόδου περωτής (αξονικά)	-30°
Μήκος περυγίου στην έξοδο της περωτής	6 mm
Διάμετρος εισόδου σταθερών περυγίων	43mm
Μήκος περυγίου στην έξοδο της περωτής	6 mm
Διάμετρος εισόδου housing	25 mm

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χάρτες που απορρέουν από την αρχική γεωμετρία του στροβίλου.



Σχήμα 4.8 Χάρτης στροβίλου αρχικής γεωμετρίας

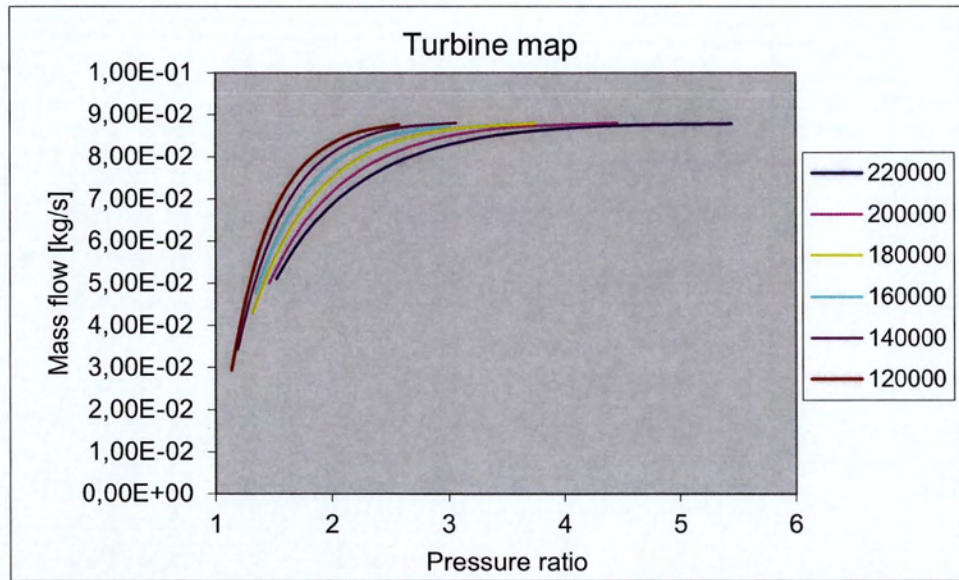


Σχήμα 4.9 Χάρτης απόδοσης στροβίλου αρχικής γεωμετρίας

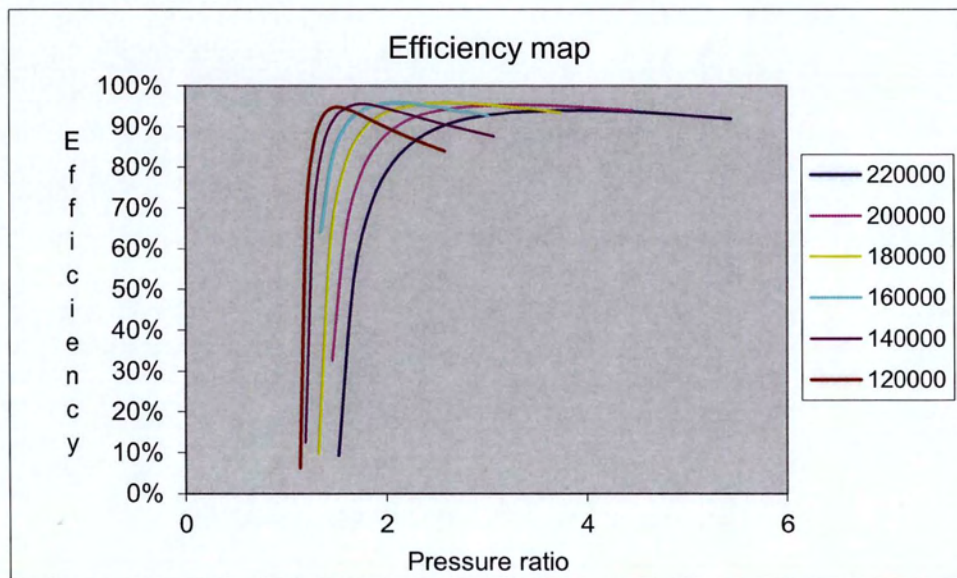
Τελική γεωμετρία

Διάμετρος περωτής εισόδου	35.6 mm
Διάμετρος πλήμνης περωτής εισόδου	8.9 mm
Διάμετρος περωτής εξόδου	22.25 mm
Αριθμός πτερυγίων	9
Γωνία εισόδου σταθερών πτερυγίων (αξονικά)	13°
Γωνία εξόδου περωτής (αξονικά)	-30°
Μήκος πτερυγίου στην έξοδο της περωτής	4 mm
Διάμετρος εισόδου σταθερών πτερυγίων	39 mm
Μήκος πτερυγίου στην έξοδο της περωτής	4 mm
Διάμετρος εισόδου housing	25 mm

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χάρτες που απορρέουν από την τελική υπολογισμένη γεωμετρία του συμπιεστή.



Σχήμα 4.10 Τελικός χάρτης στροβίλου



Σχήμα 4.11 Τελικός χάρτης αποδόσεως στροβίλου

Σχολιασμός

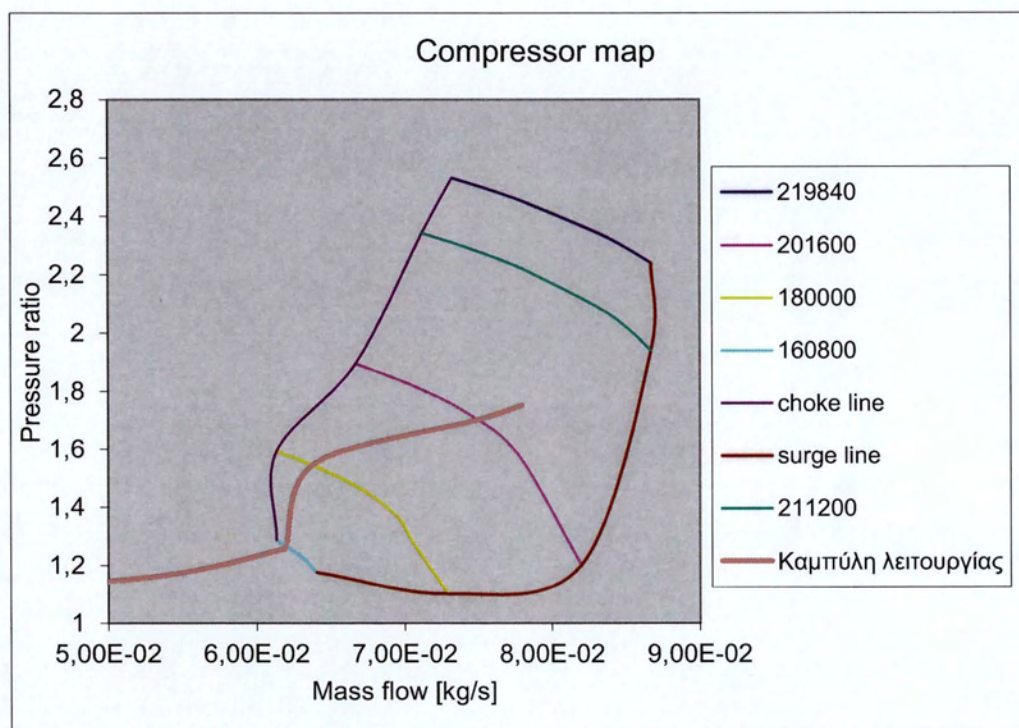
Παρατηρώντας τον αρχικό χάρτη (Σχήμα 4.8), για να αποκτήσει 180000 gpm ο στρόβιλος απαιτείται υψηλή παροχή, πράγμα το οποίο επιφυλάσσει κινδύνους για την επίτευξη αυτών των στροφών στις 9500 rpm του κινητήρα. Παράλληλα, παρατηρώντας τον αρχικό χάρτη αποδόσεως (Σχήμα 4.9) παρατηρούμε απότομες αλλαγές στις καμπύλες απόδοσης του στροβίλου με την αύξηση του λόγου πίεσης, πράγμα που υποδηλώνει απότομη πτώση της απόδοσης με την αύξηση των στροφών του κινητήρα, εφόσον διατηρούμε σταθερή την παροχή με τη χρήση της waste gate.

Με τη βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε στο στρόβιλο (Σχήμα 4.10), επιτεύχθηκε η δημιουργία ενός μεγαλύτερου εύρους παροχών σε όλες τις καμπύλες στροφών, προκειμένου να είναι περισσότερο διαχειρίσιμες οι στροφές του στροβίλου. Παράλληλα, οι γραμμές απόδοσης (Σχήμα 4.11) έγιναν ομαλότερες στην αύξηση της πτώσης πίεσης του στροβίλου και παράλληλα έγινε αύξηση της απόδοσης σε όλες τις καμπύλες στροφών, προκειμένου ο στρόβιλος να είναι περισσότερο αποδοτικός.

4.3 Καμπύλες λειτουργίας στροβιλοϋπερπληρωτή

Οι καμπύλες λειτουργίας προκύπτουν με τη χρήση του προγράμματος Ricardo το οποίο προσομοιώνει μηχανές εσωτερικής καύσης. Ουσιαστικά, ενσωματώθηκαν στο πρόγραμμα όλα τα απαραίτητα στοιχεία του κινητήρα, οι βασικές γεωμετρίες του στροβιλοϋπερπληρωτή καθώς και οι χάρτες λειτουργίας και απόδοσης του (συμπιεστής και στρόβιλος).

4.3.1 Συμπιεστής



Σχήμα 4.12 Χάρτης συμπιεστή με καμπύλη λειτουργίας

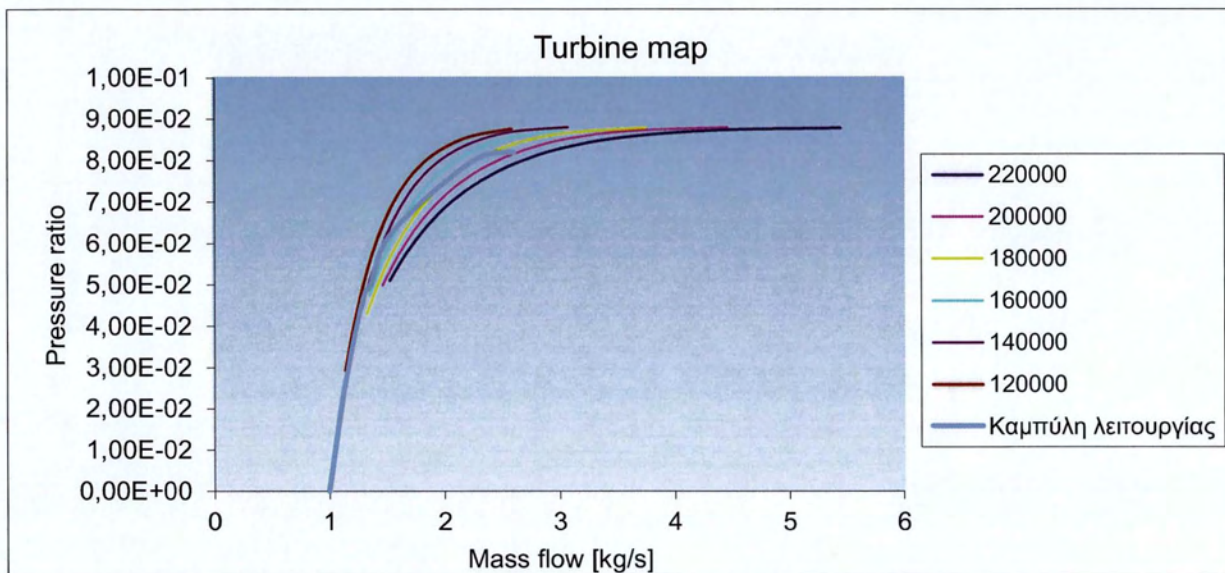
Παρατηρώντας την παραπάνω γραμμή λειτουργίας, υπάρχει πολύ μικρή άνοδος πίεσης μέχρι να εισέρθει στον χάρτη. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτό το στάδιο ο στροβιλοϋπερπληρωτής βρίσκεται σε μεταβατικό στάδιο κατά το οποίο υπολειτουργεί. Αυτό το στάδιο ευθύνεται για την καθυστέρηση η οποία αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.

Από τις 160000 στροφές μέχρι τις 180000 παρατηρείται απότομη αύξηση της πίεσης σε σχέση με την παροχή. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της απότομης αύξησης των στροφών του

στροβίλου (και συμπιεστή) όντας κλειστή η waste gate και την αδυναμία της μηχανής να αύξηση σε όμοιο βαθμό την παροχή της.

Από τις 180000 και μέχρι λίγο μετά 201600 στροφές η μετάβαση γίνεται πιο ομαλά και ρυθμιζόμενα με την χρήση της wastegate. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται αύξηση της παροχής με μικρή άνοδο της πίεσης. Έτσι πετυχαίνουμε υψηλά επίπεδα παροχή χωρίς να ξεπερνάμε το φράγμα των 1.8 bar.

4.3.2 Στρόβιλος



Σχήμα 4.13 Χάρτης στροβίλου με καμπύλη λειτουργίας

Παρατηρώντας και την καμπύλη λειτουργίας του στροβίλου, είναι εμφανής τα τρία στάδια που ακολουθεί και ο συμπιεστής. Από 0 έως 160000 στροφές η μετάβαση είναι ακαριαία και με μικρή πτώση πίεσης μέσω του στροβίλου. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεγάλης μεταβολής της ενέργειας των καυσαερίων. Από τις 160000 έως τις η μετάβαση είναι απότομη εξαιτίας της κλειστής διόδου της wastegate αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό όσο από 0 έως 160000.

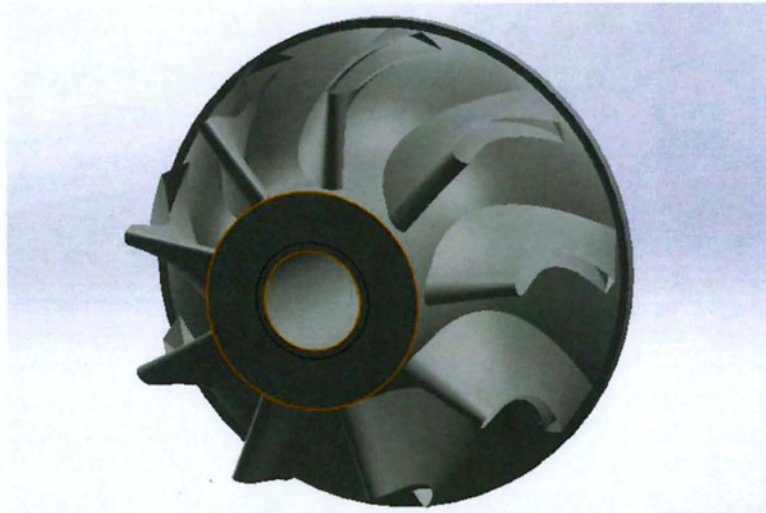
Τέλος παρατηρούμαι στην μετάβαση από 180000 έως 201600 μικρή άνοδος της παροχής. Σε αυτήν την κατάσταση η waste gate είναι ρυθμισμένη να επιτρέπει πολύ μικρή αύξηση της παροχής σταδιακά προκειμένου ο συμπιεστής να μην υπερβεί το ανώτερο όριο των 1.8 bar.

4.4 Τρισδιάστατος σχεδιασμός

Ο τρισδιάστατος σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε στο σχεδιαστικό λογισμικό Solidworks. Ο σκοπός του σχεδιασμού είναι αφενός η εισαγωγή του σχεδίου στο υπολογιστικό πακέτο προσομοίωσης ροών ANSYS, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του κάθε στοιχείου και αφετέρου η δυνατότητα κατασκευής του στροβιλοϋπερπληρωτή.

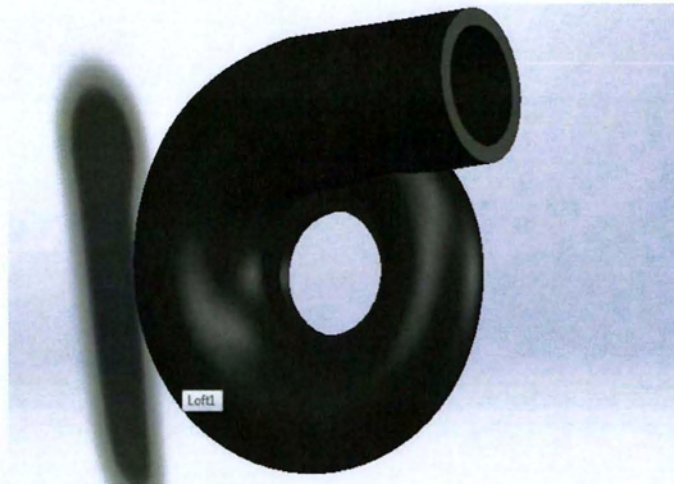
4.4.1 Συμπιεστής

Πτερωτή (Impeller)



Σχήμα 4.14 Τρισδιάστατο σχέδιο πτερωτής συμπιεστή

Housing



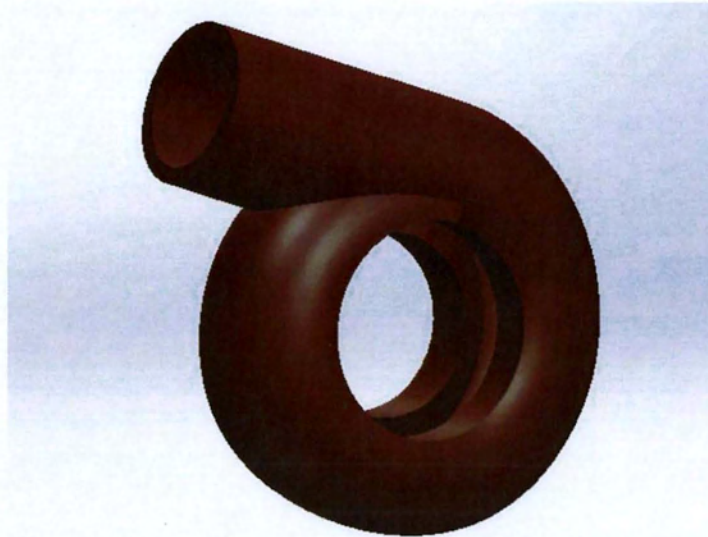
Σχήμα 4.15 Τρισδιάστατο σχέδιο housing συμπιεστή



Σχήμα 4.16 Τρισδιάστατο σχέδιο housing συμπιεστή με ορατή την διόδο του αέρα

4.4.2 Στρόβιλος

Housing



Σχήμα 4.17 Τρισδιάστατο σχέδιο housing στροβίλου



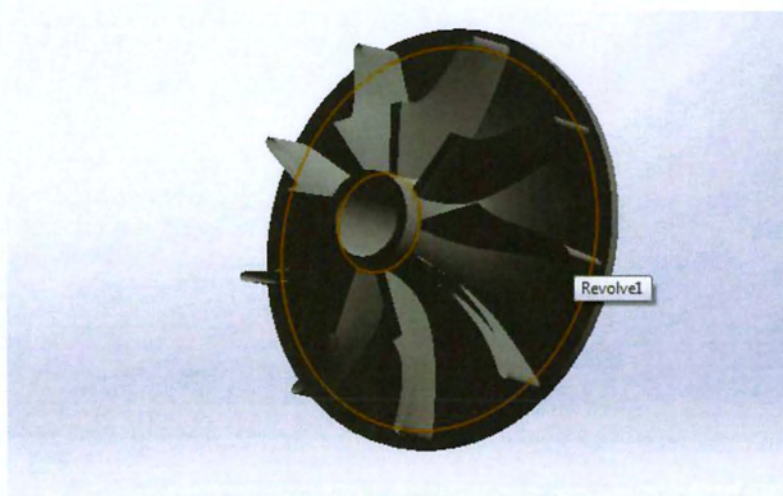
Σχήμα 4.18 Τομή τρισδιάστατου σχεδίου housing στροβίλου

Στάτορας (Διαχύτης)



Σχήμα 4.19 Τρισδιάστατο σχέδιο στάτορα στροβίλου

Πτερωτή



Σχήμα 4.20 Τρισδιάστατο σχέδιο πτερωτής στροβίλου

4.4 Προσομοίωση λειτουργίας και αποτελέσματα

Είναι σημαντικό για τον σχεδιασμό, να γίνει προσομοίωση των τρισδιάστατων σχεδίων με σκοπό να είναι εμφανές κατά το πόσο αποκλίνει από το off-design. Οπότε για την κάθε συσκευή (συμπιεστής-στρόβιλος) θα πραγματοποιηθεί προσομοίωση σε ένα σημείο πάνω στην καμπύλη λειτουργίας. Τέλος η προσομοίωση θα πραγματοποιηθεί σε steady state κατάσταση, δηλαδή μη μεταβαλλόμενη κατάσταση με το χρόνο. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η προσομοίωση γίνεται με επίλυση των τρισδιάστατων διαφορικών εξισώσεων Navier-Stokes τόσο για σταθερό πλαίσιο (steady frame) όσο και για περιστρεφόμενο (Rotating frame) με χρήση πεπερασμένων όγκων.

4.4.1 Συμπιεστής

Η προσομοίωση για το κάθε στοιχείο του συμπιεστή (πτερωτή, housing) έγινε ξεχωριστά. Επίσης έχουν ιεραρχηθεί με βάση την σειρά ροής του ρευστού που εισέρχεται στον συμπιεστή. Η συσκευή αυτή θα προσομοιωθεί στις 180000 rpm με παροχή 0.063 kg/s προκειμένου να δειχθεί κατά το πόσο αποκλίνει η τιμή αυτή από την θεωρητική του χάρτη.

Πτερωτή

Αρχικά το τρισδιάστατο σχέδιο (Σχήμα 4.14) εισέρχεται στο πρόγραμμα Turbogrid του ANSYS προκειμένου να πραγματοποιηθεί η απαραίτητη πλεγματοποίηση. Εξαιτίας της μικρής υπολογιστικής δυνατότητας του υπολογιστή, η προσομοίωση έγινε μόνο σε ένα περύγιο της πτερωτής, αλλά ορίζοντας εκατέρωθεν της συνοριακές συνθήκες την συνέχεια της ροής (passage).

Οι συνοριακές συνθήκες που δίνονται στην πτερωτή είναι:

Είσοδος πτερωτής

$$P_{total} = 1 \text{ bar}$$

Έξοδος πτερωτής

$$\dot{m} = 0.063 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

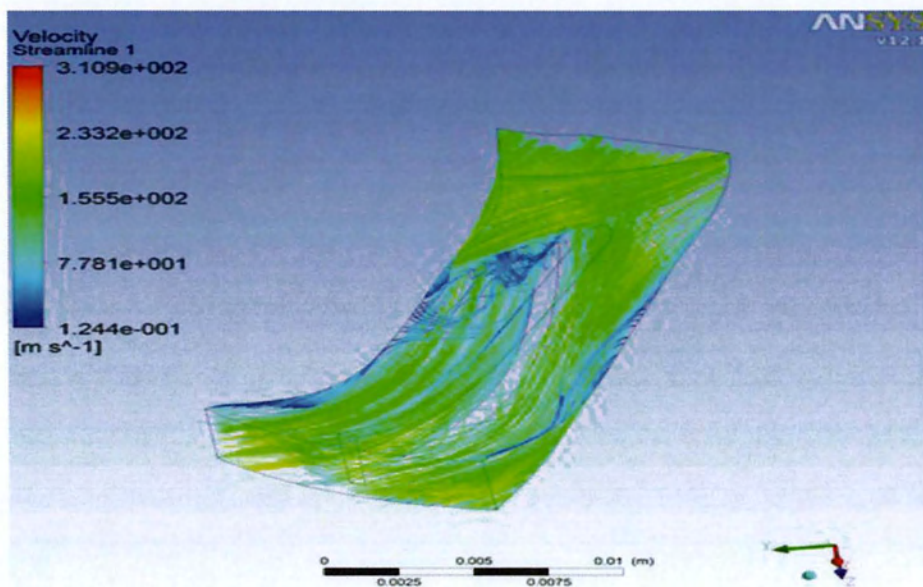
Μοντέλο τύρβης

Shear stress transport (SST)

Το πρόγραμμα ANSYS δίνει την δυνατότητα να επιλεγεί το μοντέλο τύρβης μεταξύ της στρωτής ροής, του μοντέλου τύρβης zero equation και των two equations model (κ-ε και SST). Η επιλογή του παραπάνω τύπου τύρβης έγινε με βάση την πολυπλοκότητα της ροής σε μια

στροβιλομηχανή και την ακρίβεια του μοντέλου, στον προσδιορισμό της τυρβώδους ροής, καθώς τόσο η στρωτή ροή και το μοντέλο zero equation όσο και το μεγάλης ακρίβειας μοντέλο κ-ε αδυνατούν να προσδιορίσουν καλά την τύρβη μέσα στην στροβιλομηχανή [21]. Φυσικά αυτό κάνει το πρόβλημα αρκετά περίπλοκο με αποτέλεσμα ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος να αυξάνει κατά πολύ. Για αυτόν τον λόγο, για προσομοιώσεις περωτών και στάτορα θα χρησιμοποιείται αυτό το μοντέλο τύρβης.

Ροή μέσα στην περωτή

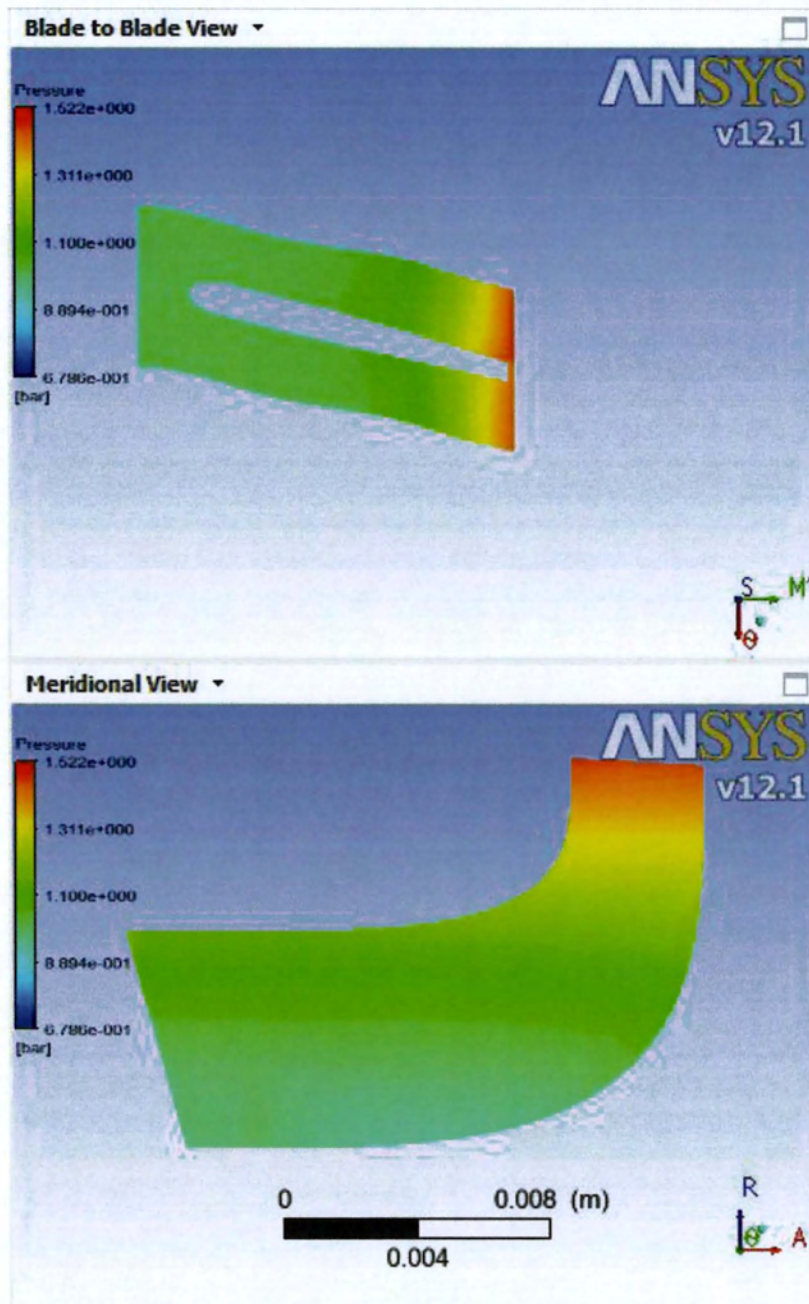


Σχήμα 4.21 3-D προσομοίωση ροής (σχετικής ταχύτητας) μέσα στην περωτή

Παρατηρώντας τη ροή μέσα στην περωτή (Σχήμα 4.21 3-D προσομοίωση ροής (σχετικής ταχύτητας) μέσα στην περωτή είναι εμφανής η διάτμηση στην οποία υπέκυψε το ρευστό λόγο του σταθερού τοιχώματος στο πάνω μέρος (shroud) με αποτέλεσμα την δημιουργία δινών ανακυκλοφορίας. Επίσης, παρατηρώντας τις τιμές της ταχύτητας κοντά στο shroud τείνουν να φτάσουν στην τιμή 0 πράγμα που υποδηλώνει μια συνοριακή συνθήκη που θέτει αυτόματα το πρόγραμμα, δηλαδή ότι στην επιφάνεια του shroud η ταχύτητα είναι 0 m/s.

Τέλος, είναι ορατή η συνέχεια της ροής εκατέρωθεν του περυγίου πράγμα που είναι αναγκαίο προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι ίδια με τα αποτελέσματα που θα απορρέανε στην περίπτωση της προσομοίωσης της ροής σε όλη την περωτή.

Δισδιάστατη προσομοίωση πίεσης



Σχήμα 4.22 2-D απεικόνιση πίεσης μέσα στην Πτερωτή

Στο Σχήμα 4.22 2-D απεικόνιση πίεσης μέσα στην Πτερωτή απεικονίζεται δισδιάστατα αύξηση της πίεσης τόσο μέσω της κάτωφης του πτερυγίου (blade to blade view), όσο και μέσω της πλάγιας όψης της πτερωτής.

Παρατηρώντας την blade to blade view δεν είναι εμφανέστατα ορατή η αύξηση της πίεσης γρηγορότερα από την επιφάνεια της οποίας το κάθετο διάνυσμα έχει ίδια κατεύθυνση με

την περιστροφή (πάνω μεριά). Αυτό συμβαίνει λόγω του μικρού λόγου πίεσης της συσκευής. Παρόλα αυτά, φαίνεται μια οριακά γρηγορότερη αύξηση της πίεσης κοντά στα 2/3 του πτερυγίου.

Στην πλάγια όψη, είναι εμφανής η διαφορά πίεσης από το hub μέχρι το shroud. Αυτό προκύπτει εξαιτίας της διαφοράς της ταχύτητας μεταξύ των δύο άκρων καθώς το ένα είναι κινητό και το άλλο ακίνητο. Επιπλέον καθώς το ρευστό ρέει από την είσοδο, προς την έξοδο υπάρχει αύξηση της πίεσεως παρότι η διατομή ροής μειώνεται. Αυτό είναι απόρροια της αύξησης της ολικής πίεσης.

Λοιπά αποτελέσματα

Έξοδος	$P_{total} = 1.5 \text{ bar}$
Έξοδος	Γωνία εκροής ρευστού (α_2)= 35°

Παρατηρώντας την ολική πίεση η υπολογίστηκε μέσω του ANSYS και γνωρίζοντας πως η πτώση θα είναι πολύ μικρή μέσα στο housing, είναι εμφανής πως αυτή θα είναι και η ολική πίεση του συμπιεστή. Με βάση το σχήμα Σχήμα 4.12 Χάρτης συμπιεστή με καμπύλη λειτουργίας παρατηρούμε πως η διαφορά είναι πολύ μικρή, πράγμα που καθιστά το χάρτη και την καμπύλη λειτουργίας ακριβή.

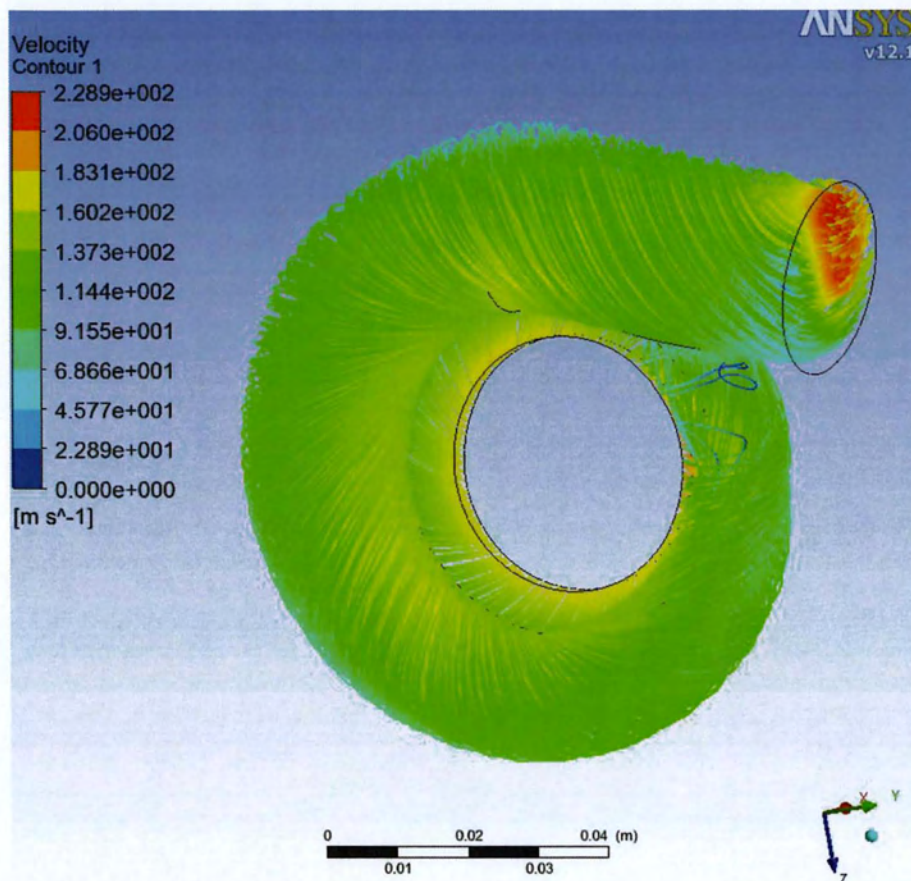
Housing

Εξαιτίας της συνέχειας της ροής στο housing (Σχήμα 4.15) από την περωτή τα αποτελέσματα της ορίζονται ως συνοριακές συνθήκες του housing.

Είσοδος housing	$P_{total} = 1.5 \text{ bar}$
Γωνία ροής ρευστού στην είσοδο του housing	35°
Έξοδος housing	$\dot{m} = 0.063 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Μοντέλο τύρβης housing	κ-ε

Ουσιαστικά το housing είναι ένας αγωγός, με αποτέλεσμα οι συνθήκες τύρβης να είναι πιο απλές, από ότι σε μία στροβιλομηχανή. Αυτό μας δίνει την ικανότητα να χρησιμοποιήσουμε πιο απλό μοντέλο τύρβης (κ.ε) με μικρότερο χρόνο υπολογισμού, δίνοντας μας λύση υψηλής ακρίβειας καθώς είναι και αυτό μοντέλο δύο εξισώσεων (two equation model).

Ροή μέσα στο housing



Σχήμα 4.23 Προσομοίωση ροής στο housing

Όπως είναι εμφανές και από το σχήμα 4.23 το housing μετατρέπει την ακτινική και περιστροφική κίνηση του ρευστού σε αξονική. Παρατηρώντας την έξοδο της ροή από αυτό είναι ορατό το προφίλ ταχύτητας του, όπου η ταχύτητα στο άνω άκρο είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα στο κάτω άκρο ενώ έχει και περιστροφική ταχύτητα, πράγμα το οποίο είναι προϊόν της γεωμετρίας του. Φυσικά, το προφίλ ταχύτητας κατά την ροή στην πολλαπλή εισαγωγή θα ομαλοποιηθεί και θα μετατραπεί σε ένα πλήρως αξονικό προφίλ με μέγιστη ταχύτητα στο κέντρο εξαιτίας των ιξωδών τάσεων.

Λοιπά αποτελέσματα

Έξοδος	$P_{total} = 1.45 \text{ bar}$
--------	--------------------------------

Έξοδος	$P_{static} = 1.305 \text{ bar}$
--------	----------------------------------

Με βάση το αποτέλεσμα της ολικής πίεσης στην έξοδο του housing, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα, πως ο σχεδιασμός ήταν ικανοποιητικός διότι οι απώλειες στην ολική πίεση ήταν πολύ μικρές.

4.4.2 Στρόβιλος

Η προσομοίωση για το κάθε στοιχείο του στροβίλου (housing, στάτορας, πτερωτή) έγινε ξεχωριστά. Επίσης έχουν ιεραρχηθεί με βάση την σειρά ροής του ρευστού που εισέρχεται στον στρόβιλο. Η συσκευή αυτή θα προσομοιωθεί στις 180000 rpm με παροχή 0.080 kg/s προκειμένου να δειχθεί κατά το πόσο αποκλίνει η τιμή αυτή από την θεωρητική του χάρτη.

Housing

Είσοδος housing	$P_{total} = 2.5 \text{ bar}$
-----------------	-------------------------------

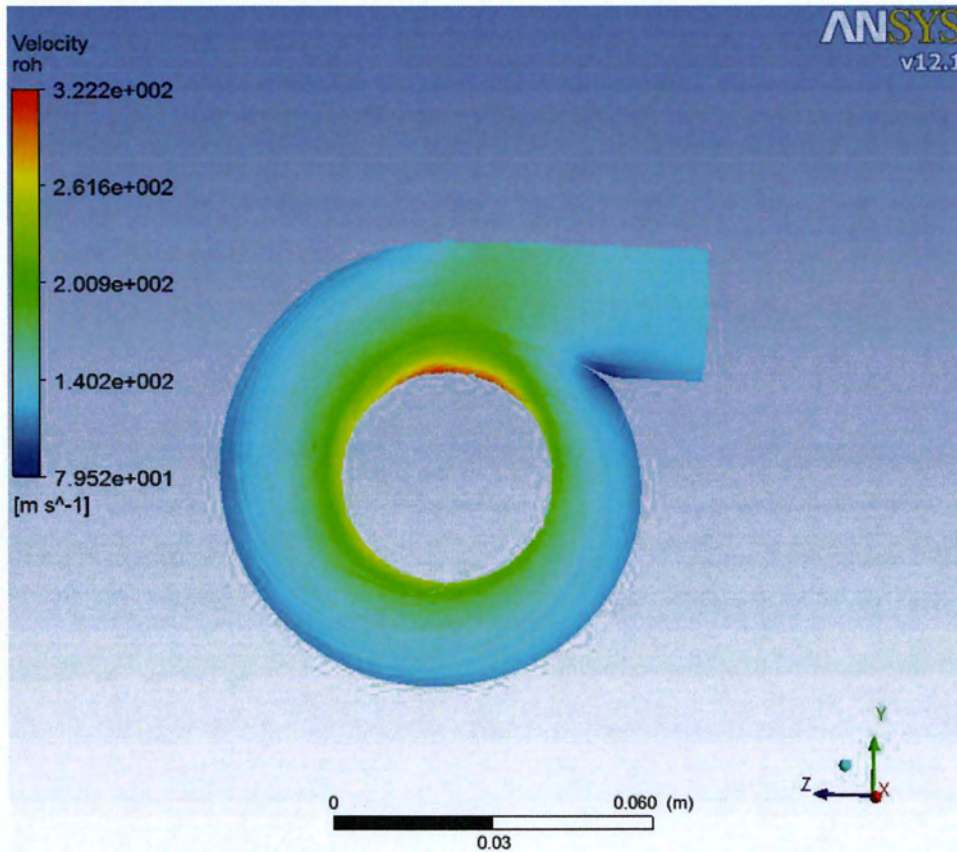
Θερμοκρασία ρευστού στην είσοδο του housing	981 K
---	-------

Έξοδος housing	$\dot{m} = 0.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
----------------	---

Μοντέλο τύρβης housing	κ-ε
------------------------	-----

Οι συνοριακές συνθήκες της πίεσης και της θερμοκρασίας προέρχονται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κινητήρα με στροβιλοϋπερπλήρωση, μέσω του προγράμματος Ricardo.

Ροή μέσα στο housing



Σχήμα 4.24 Προσομοίωση ροής στο housing του στροβίλου

Παρατηρώντας το σχήμα 4.24, είναι ορατή η αντίστροφη λειτουργία του housing (Σχήμα 4.17 Τρισδιάστατο σχέδιο housing στροβίλου) του στροβίλου, έναντι του housing του συμπιεστή, μετατρέποντας την αξονική ροή σε ακτινική και περιστροφική προκειμένου η περρωτή να ικανοποιήσει την ενέργεια του ρευστού.

Λοιπά αποτελέσματα

Έξοδος	$P_{total} = 2.13 \text{ bar}$
Έξοδος	$T = 981 \text{ K}$
Γωνία ρευστού στην έξοδο του housing	30°

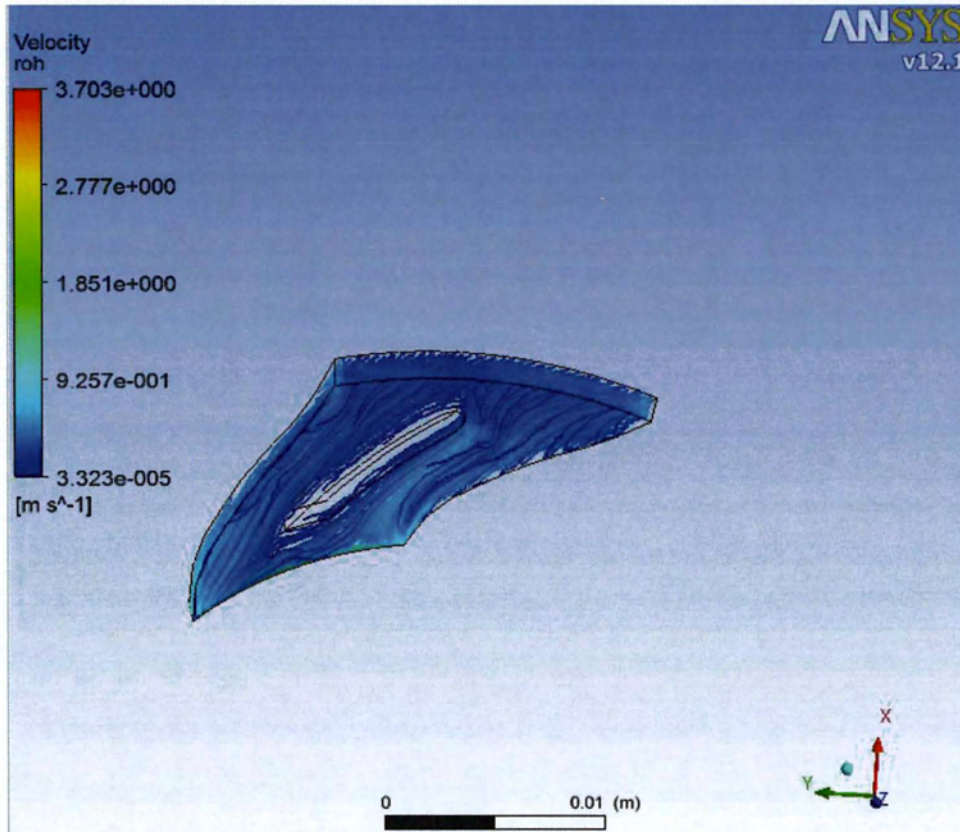
Όπως είναι διακριτό και στα παραπάνω αποτελέσματα της προσομοίωσης ο σχεδιασμός του housing είναι ικανοποιητικός εξαιτίας της μικρής πτώσης ολικής πίεσης λόγω απωλειών καθώς και της θερμοκρασίας η οποία παρέμεινε σταθερή.

Στάτορας

Εξαιτίας της συνέχειας της ροής στον στάτορα (Σχήμα 4.19) από το housing τα αποτελέσματα του ορίζονται ως συνοριακές συνθήκες του στάτορα.

Είσοδος στάτορα	$P_{\text{total}} = 2.13 \text{ bar}$
Θερμοκρασία ρευστού στην είσοδο του στάτορα	981 K
Γωνία ροής ρευστού στην είσοδο του στάτορα	$\alpha_3 = 30^\circ$
Έξοδος στάτορα	$\dot{m} = 0.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Μοντέλο τύρβης στάτορα	SST

Ροή μέσα στον στάτορα



Σχήμα 4.25 Προσομοίωση ροής μέσα στον στάτορα

Πριν πραγματοποιηθεί σχολιασμός του Σχήμα 4.25, είναι αναγκαίο να γίνει υπενθύμιση της γωνίας των πτερυγίων του στάτορα, η οποία είναι 13° (Κεφάλαιο 4.1.3). Η διαφορά της γωνίας αυτής σε σχέση με την γωνία εισόδου του ρευστού, είναι εμφανής στο σχήμα 4.25, καθώς είναι ορατή η πτώση του ρευστού στο πάνω μέρος του πτερυγίου. Η διαφορά βέβαια δεν είναι αρκετά μεγάλη προκειμένου να δημιουργούνται σημαντικές απώλειες στην ροή του ρευστού.

Επίσης είναι ορατή η αύξηση της ταχύτητας στην έξοδο του στάτορα και συνάμα της κινητικής του ενέργειας, που είναι σημαντική για την άντληση της ενέργειας του από την πτερωτή. Τέλος, είναι εμφανής η περιοδικότητα της κίνησης του ρευστού δεξιά και αριστερά του πτερυγίου, πράγμα που δείχνει το πως επηρεάζεται η ροή από την ύπαρξη των γειτονικών πτερυγίων.

Λοιπά αποτελέσματα

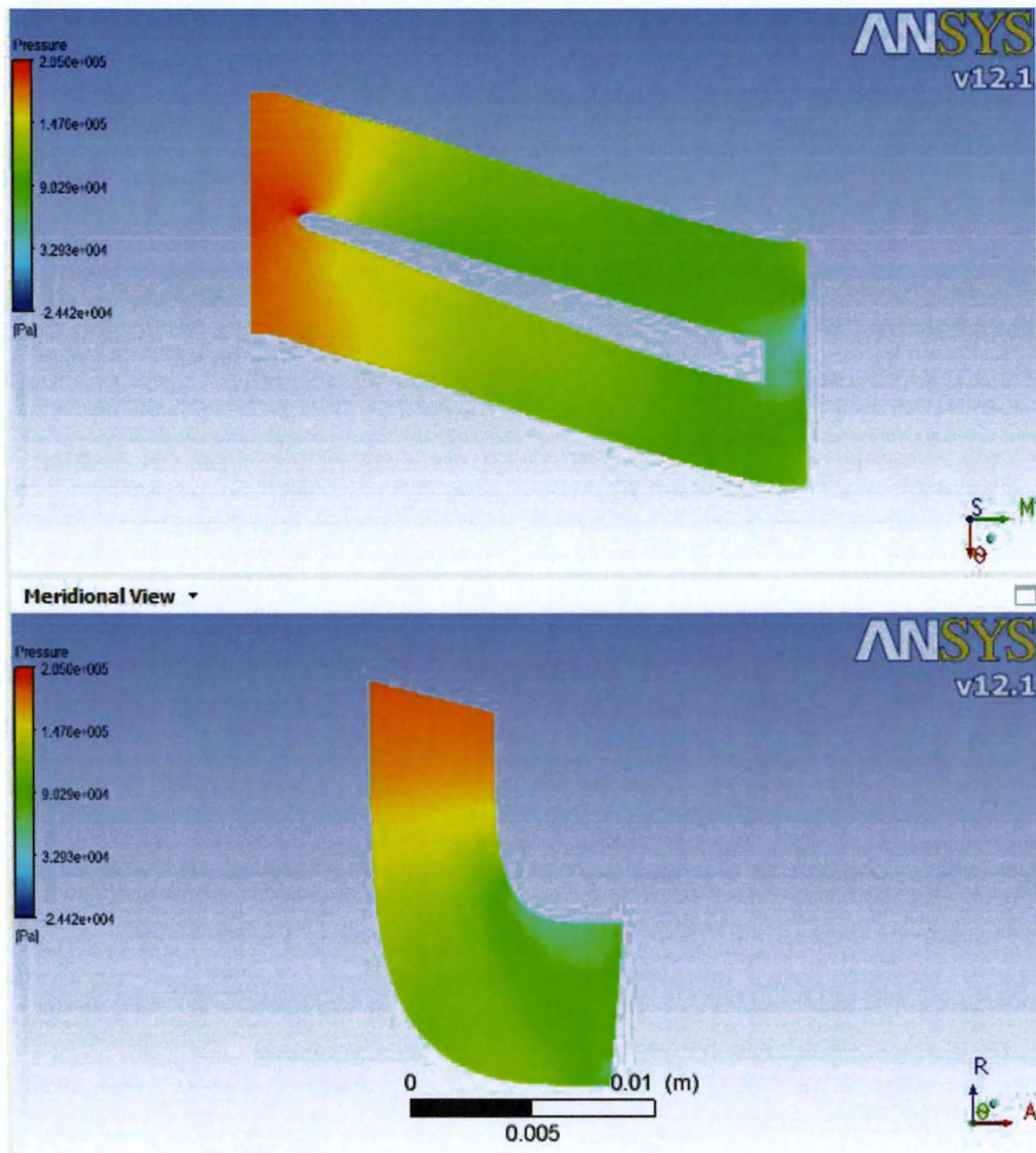
Έξοδος	$P_{total} = 2.05 \text{ bar}$
Έξοδος	$T = 981 \text{ K}$
Γωνία ρευστού στην έξοδο του housing	27.5°

Παρατηρείται πολύ μικρή πτώση στην ολική πίεση, ενώ η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Φυσικά η θερμοκρασία είναι ένα σφάλμα του προσομοιωτή καθώς θα υπάρχει μια στοιχειώδης πτώση, αλλά θα είναι πολύ μικρή. Τέλος η γωνία εξόδου του ρευστού, μειώθηκε εξαιτίας των σταθερών πτερυγίων, πράγμα ικανοποιητικό προκειμένου να έχουμε λιγότερες απώλειες στην πτερωτή. Φυσικά η ιδανική γωνία θα ήταν 13° . Τέλος, είναι σημαντικό να ειπωθεί, πως για να υπάρξει μείωση της γωνίας ροής του ρευστού, θα έπρεπε να υπήρχαν περισσότερα πτερύγια σταθερά. Αυτό όμως θα είχε σαν αποτέλεσμα το πάχος τους να ήταν κατά πολύ μικρότερο, πράγμα αδύνατον όσο αναφορά την κατασκευή με CNC μηχανή.

Πτερωτή

Εξαιτίας της συνέχειας της ροής στην πτερωτή (Σχήμα 4.20) από το στάτορα τα αποτελέσματα του ορίζονται ως συνοριακές συνθήκες του στάτορα.

Είσοδος στάτορα	$P_{total} = 2.05 \text{ bar}$
Θερμοκρασία ρευστού στην είσοδο του στάτορα	981 K
Γωνία ροής ρευστού στην είσοδο του στάτορα	$\alpha_3 = 27,5^\circ$
Έξοδος στάτορα	$\dot{m} = 0.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Μοντέλο τύρβης στάτορα	SST



Σχήμα 4.26 2-D απεικόνιση πίεσης μέσα στην Πτερωτή

Στο σχήμα 4.26 απεικονίζεται διδιάστατα μείωση της πίεσης τόσο μέσω της κάτοψης του πτερυγίου (blade to blade view), όσο και μέσω της πλάγιας όψης της πτερωτής.

Παρατηρώντας την blade to blade view είναι ορατή η διαφορά πίεσης στο πάνω μέρος του πτερυγίου λόγω της πρόσκρουσης του ρευστού σε αυτό, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Επιπλέον, καθώς το ρευστό ρέει από την είσοδο, προς την έξοδο όπως φαίνεται στην πλάγια όψη, όπως και στην blade to blade, υπάρχει μείωση της πίεσεως παρότι η διατομή ροής αυξάνεται. Αυτό είναι απόρροια της μείωσης της ολικής πίεσης.

Λοιπά αποτελέσματα

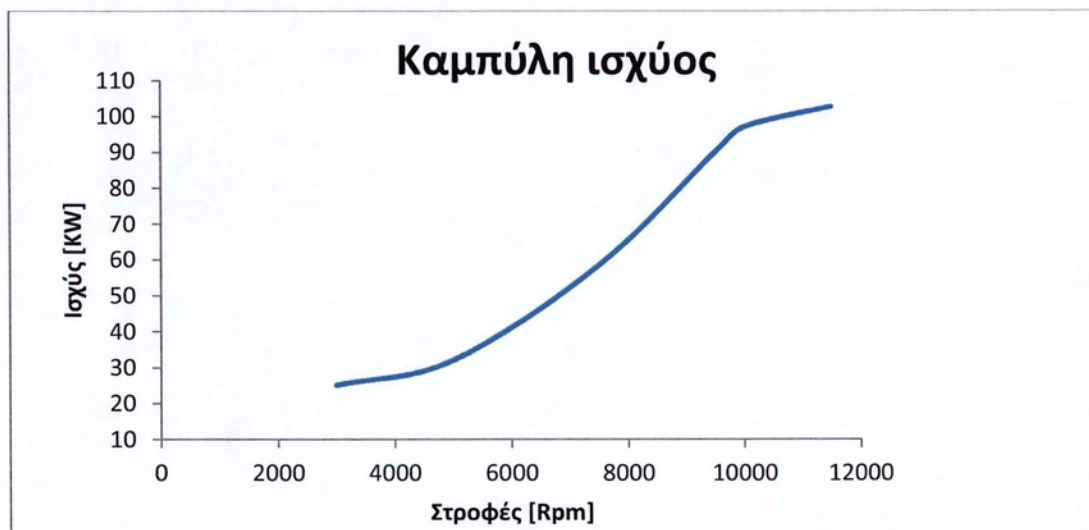
Έξοδος

$P_{total} = 1.1327513 \text{ bar}$

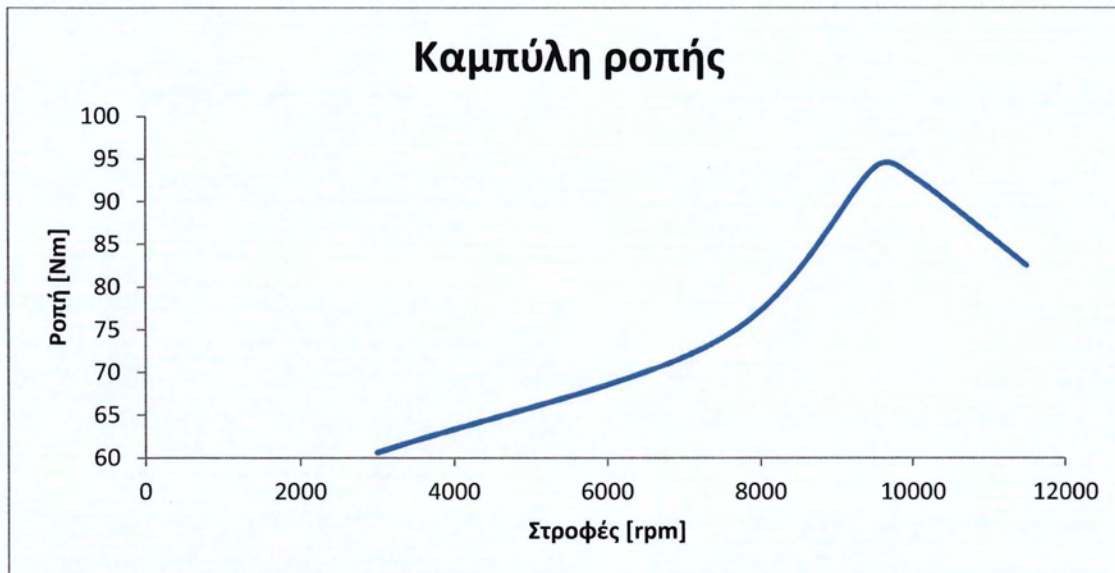
Σύμφωνα με το παραπάνω αποτέλεσμα της ολικής πίεσης εξόδου και έχοντας σαν αρχική τιμή εισόδου στον στρόβιλο, ολική πίεση 2.5 bar, ο λόγος πίεσης είναι 2.21. Αυτό το αποτέλεσμα με βάση την γεωμετρία, δείχνει πως ο χάρτης είναι έγκυρος και κοντά στις πραγματικές τιμές.

4.6 Σύγκριση ατμοσφαιρικού με στροβιλοϋπερπληρούμενο κινητήρα

4.6.1 Καμπύλες ισχύος και ροπής στροβιλοϋπερπληρούμενου κινητήρα Honda Cbr 600 RR



Σχήμα 4.27 Καμπύλη ισχύος στροβιλοϋπερπληρούμενου κινητήρα Honda Cbr 600 RR



Σχήμα 4.28 Καμπύλη ροπής στροβιλοϋπερπληρούμενου κινητήρα Honda Cbr 600 RR

Με τη χρήση του υπερπληρωτή στον κινητήρα Honda που μελετήθηκε, όπως γίνεται αντιληπτό και από τα σχήματα Σχήμα 4.2 και Σχήμα 4.27, υπήρξε μια σημαντική άνοδος της μέγιστης ισχύος κατά 40 kW (52 hp), πράγμα που είναι απολύτως φυσικό εξαιτίας της αύξησης της πίεσης η οποία εισέρχεται στον κύλινδρο. Επίσης, υπάρχει πολύ σημαντική βελτίωση στην κλίση της καμπύλης στην περιοχή κοντά στις 7000 rpm, καθώς η καμπύλη της ισχύος δεν ήταν αρκετά ομαλή.

Με βάση τα σχήματα Σχήμα 4.3 Σχήμα 4.28 παρατηρείται πολύ σημαντική αύξηση της μέγιστης ροπής κατά 37 Nm, πράγμα πολύ σημαντικό για την λειτουργία του αυτοκινήτου εξαιτίας της ανάγκης σε μεγάλη επιτάχυνση.

Τέλος, παρατηρώντας και τα τέσσερα σχήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι ορατή η αύξηση του εύρους ισχύος και ροπής στον στροβιλοϋπερπληρούμενο έναντι του ατμοσφαιρικού. Η κατάσταση αυτή είναι απολύτως λογική, εξαιτίας του μεταβαλλόμενου λόγου πίεσης του συμπιεστή, καθώς οι στροφές του μεταβάλλονται ανάλογα με την παροχή καυσαερίων μέσω του στροβίλου.

4.7 Συμπεράσματα-Μελλοντική βελτίωση

Από την σχεδίαση του στροβιλοϋπερπληρωτή για τον κινητήρα Honda Cbr 600RR προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα καθώς και θέματα μελλοντικής βελτίωσης.

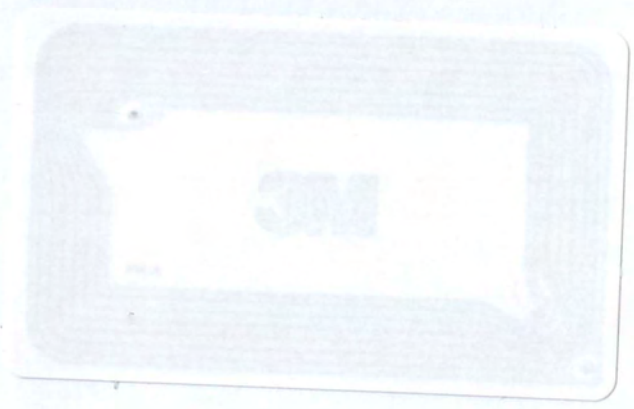
1. Η σχεδίαση ενός στροβιλοϋπερπληρωτή για μηχανή εσωτερικής καύσης απαιτεί προσεκτική και ακριβής μελέτη, τόσο στον ορισμό των γεωμετριών του καθώς και στον τρόπο λειτουργία του, καθώς μπορεί να αποβεί καταστροφικός ακόμη και για τον κινητήρα.
2. Οι μελέτες τρισδιάστατης προσομοίωσης έγιναν σε μη χρονικά μεταβαλλόμενες καταστάσεις (steady state). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει ακριβής ανάλυση της απόκρισης του κινητήρα σε μεταβατική λειτουργία. Θα παρουσίαζε μεγάλο ενδιαφέρον να εξεταστεί η συμπεριφορά του στροβιλοϋπερπληρωτή σε απότομες αλλαγές του φορτίου. Φυσικά, αυτό συνεπάγεται και χρήση υπολογιστικών συστημάτων με πολύ μεγαλύτερη υπολογιστική δυνατότητα.
3. Μελλοντική εργασία θα μπορούσε να αποτελεί η προσομοίωση του συμπιεστή και του στροβίλου ταυτόχρονα και όχι σαν επιμέρους στοιχεία, πράγμα που δεν έγινε στην παρούσα διπλωματική, εξαιτίας του χρόνου και της υπολογιστικής δυνατότητας των υπολογιστών. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα να μπορούμε να βελτιώνουμε τα αποτελέσματα και στις δύο συνιστώσες, καθώς θα ήταν εφικτό να παίρνουμε πιο ακριβή προφίλ ταχυτήτων αφού δε θα υπολογίζουμε πλέον μέσες τιμές.
4. Μελλοντικός πειραματικός υπολογισμός των χαρτών λειτουργίας, τόσο του συμπιεστή, όσο και του στροβίλου, προκειμένου να μελετηθεί κατά το πόσο αποκλίνουν, τόσο τα μοντέλα off-design και τρισδιάστατης προσομοίωσης, καθώς και η μέθοδος σχεδιασμού από την πραγματική κατάσταση.
5. Μελέτη λειτουργίας στροβίλου με χρήση μεταβαλλόμενων πτερυγίων και σύγκριση με τα ήδη υπάρχοντα πτερύγια. Η μελέτη αυτή είναι πολύ σημαντική, διότι βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του στροβίλου και συνεπώς του στροβιλοϋπερπληρωτή, ενώ παράλληλα είναι μια μέθοδος που ακολουθείται κατά κύριο λόγο κατά την υπερπλήρωση κινητήρων αγωνιστικών αυτοκινήτων.

Βιβλιογραφία

- [1] carsvw.net. *History of Supercharger*. Available: <http://www.carsvw.net/history-of-supercharger/>
- [2] reman-tec.com. *History of turbocharging*. Available: <http://www.reman-tec.com/history-of-turbocharging>
- [3] C. R. Ferguson and A. Kirkpatrick, *Internal combustion engines : applied thermosciences*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [4] SimplyStance.com. *Turbocharger vs Supercharger*. Available: <http://www.simplystance.com/en/handleiding/turbo-vs-supercharger>
- [5] M. Millikin. (2005, 31 August). "Twincharger" TSI Engine. *Green Car Congress*. Available: http://www.greencarcongress.com/2005/08/inside_vws_new_.html
- [6] M. Wan. (2007, Turbocharging. *AutoZine*. Available: http://www.autozine.org/technical_school/engine/Forced_Induction_3.html
- [7] H. Hiereth and P. H. W. Prenninger, *Charging the internal combustion engine*. Wien ; New York: Springer, 2007.
- [8] A. Whitfield and N. C. Baines, *Design of radial turbomachines*. Harlow, Essex, England New York, NY: Longman Scientific & Technical ; Wiley, 1990.
- [9] S. L. Dixon, *Fluid mechanics, thermodynamics of turbomachinery*, 5th ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier-Butterworth-Heinemann, 2005.
- [10] Garret. *Compressor Turbine housing A/R and sizing*. Available: http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/turbine_housing_AR_and_housing_sizing
- [11] L. R. C. Michael R. Galvas , U.S. Army Air Mobility R&D Laboratory, "Fortran program for predicting off-design performance centrifugal compressor " National aeronautics and space administration, Washington D.C1973.
- [12] Garret, "Turbo Tech 103 (Expert)."
- [13] C. A. W. a. A. J. Glassman, "Fortran program for predicting off-design performance of radial-inflow turbines," National aeronautics and space administration, Nasa technical notes SEPTEMBER 1975.
- [14] B. T. Systems. *Design and Function of a Turbocharger: Bearing Systems*. Available: <http://www.turbos.bwauto.com/products/turbochargerBearingSystem.aspx>
- [15] Turbosmart. Wastegate. Available: <http://www.turbosmartusa.com/technical/articles/how-does-a-wastegate-work/>
- [16] J. Edgar, "Blow off valve," *Auto speed*.
- [17] M. Muqem, "Turbocharging With Air Conditioner Assisted Intercooler," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSRJMCE) ISSN*, Sep-Oct 2012.
- [18] J. E. Hesselgreaves, *Compact heat exchangers : selection, design, and operation*. Amsterdam ; New York: Pergamon, 2001.
- [19] W. M. Kays and A. L. London, *Compact heat exchangers; a summary of basic heat transfer and flow friction design data*. New York,: McGraw-Hill, 1958.
- [20] J. M. Smith and H. C. Van Ness, *Introduction to chemical engineering thermodynamics*, 3d ed. New York,: McGraw-Hill, 1975.
- [21] R. L. F.R. Menter, T. Hansen, "CFD SIMULATION OF TURBOMACHINERY FLOWS – VERIFICATION, VALIDATION AND MODELLING " European Congress on

Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Staudenfeldweg 12, 83624 Otterfing, Germany 24—28 July 2004.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ (ΙΤΥΣΣΕ)



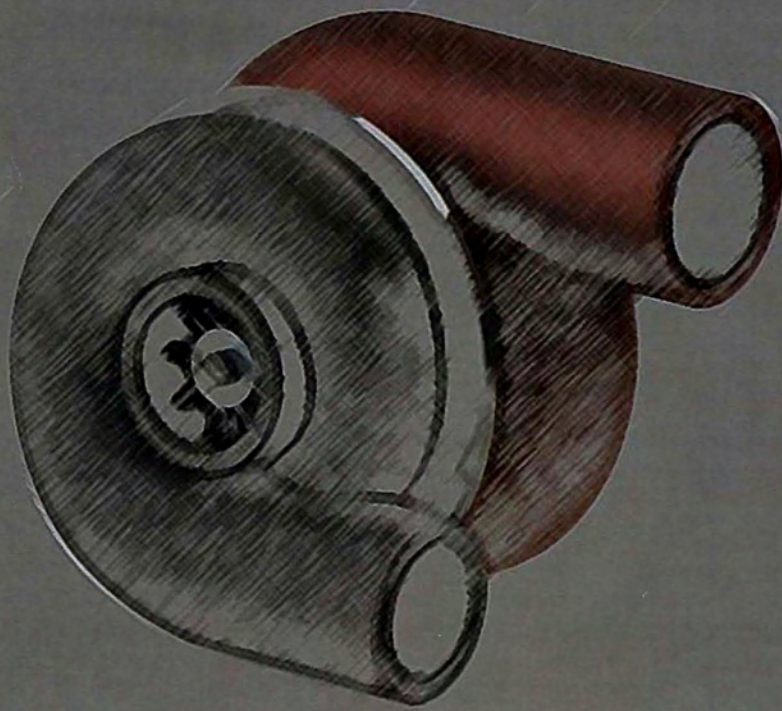
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000121280



Καταχώριση: 1999



Βόλος, Ιούλιος 2014