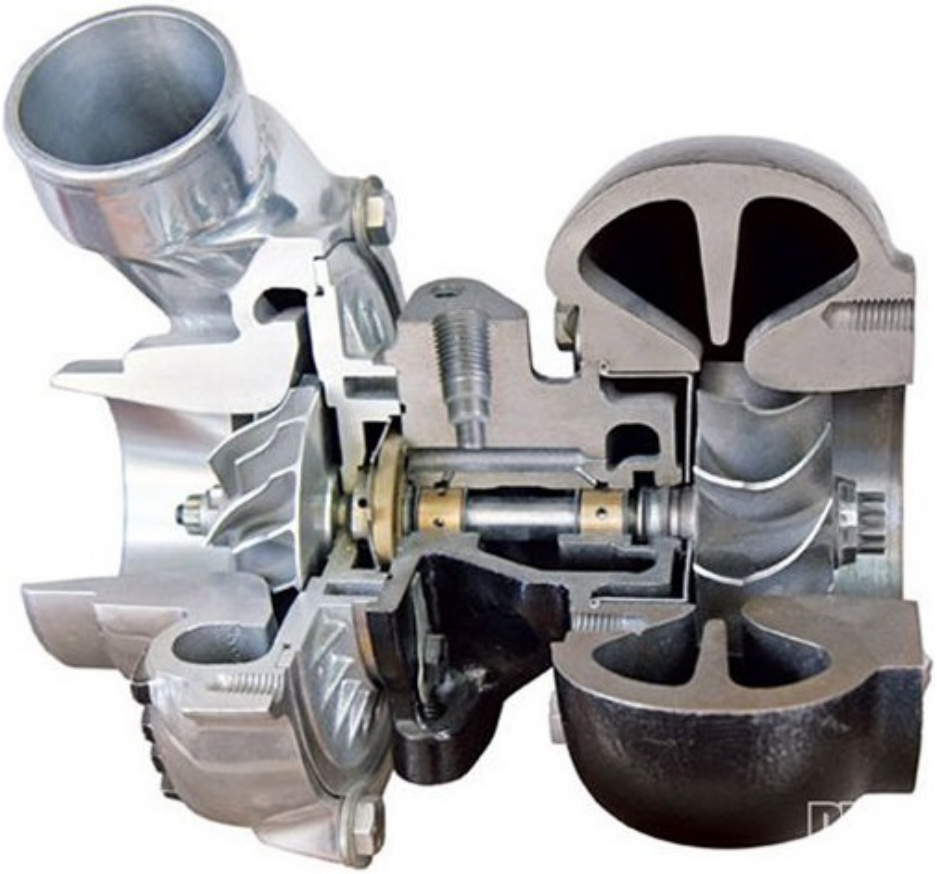
ΤΕΙ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών (Σ.Τ.ΕΦ.)
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.
ΠΜΣ Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων
Αγωνιστικών Οχημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΜΕΚ ΚΑΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ



Γαβρίδης Δημήτριος

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ.Μηχ. Α. Φατσής

Ψαχνά Ευβοίας
Δεκέμβριος 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στη χώρα μας, όπως άλλωστε και σε πολλές άλλες το αυτοκίνητο εκτός από μεταφορικό μέσο, αποτελεί και ένα σοβαρό χόμπι για μια μικρότερη κοινωνία. Μια κοινωνία που ξεπερνάει πολλές φορές φράγματα ηλικίας και κοινωνικής θέσης. Για τα μέλη αυτής της κοινωνίας, η βελτίωση των επιδόσεων του αυτοκινήτου, είναι μια απασχόληση που διαρκεί αρκετά χρόνια.

Πολλά χρόνια πριν, όλα τα μονοθέσια της F1 είχαν στροβιλο-υπερπληρούμενους κινητήρες. Το ίδιο ισχύει και σήμερα. Η λατρεία του στροβιλο-υπερπληρωτή έγινε κομμάτι της ζωή μας γενικά. Δεν υπάρχει κατασκευαστής πλέον που να μην προσφέρει τουλάχιστον ένα μοντέλο με στροβιλο-υπερπληρούμενο κινητήρα.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να καταδείξει την τεχνολογία του στροβιλο-υπερπληρωτή και τον τρόπο που γίνεται το "ταίριασμά" του με τον κινητήρα, με σκοπό την αποδοτική λειτουργία του. Πειραματικά θα πραγματοποιηθεί "ταίριασμα" ενός συγκεκριμένου βενζινοκινητήρα με δύο διαφορετικούς στροβιλο-υπερπληρωτές και θα γίνει σύγκριση σε σχέση με τον εργοστασιακό στροβιλο-υπερπληρωτή που διαθέτει. Όλα αυτά θα γίνουν μέσω μετρήσεων που θα ληφθούν σε κατάλληλο δυναμόμετρο και με τη βοήθεια διαγνωστικού μηχανήματος, όπως θα δούμε σε ανάλογο κεφάλαιο παρακάτω.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον κ. Αντώνιο Φατσή, καθηγητή και διευθυντή του μεταπτυχιακού, για την ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με το εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα της στροβιλο-υπερπλήρωσης των μηχανών εσωτερικής καύσης. Τέλος αυτή διπλωματική δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την βοήθεια του κ. Γεώργιου Κούτση, ιδιοκτήτη της εταιρίας Microchips Tuning, καθώς στις σύγχρονες εγκαταστάσεις που διαθέτει και με τα τελευταίας τεχνολογίας μηχανήματα, λήφθηκαν όλα τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων.

INTRODUCTION

In our country, like in many others, the car drive except for a means of transport it is also a serious hobby for a smaller society. A society that many times surpasses generation gaps and social status. For the members of this society, improving the performance of the car is a work that lasts several years.

Many years ago, all F1 cars had turbocharged engines. The same is true today. The cult of the turbocharger became part of our life in general. There is no manufacturer now that does not offer at least one model with a turbocharged engine.

The aim of this thesis is to demonstrate the turbocharger technology and how it is matched with the engine for an effective operation. Experimentally a given gasoline engine with two different turbochargers will be carried-treated in matching, and will be compared with respect to the factory turbocharger available. All this will be done through measurements which will be received to an appropriate dynamometer and using diagnostic machine, as we will see a similar section below.

I would like to express my special thanks to Mr. Antony Fatsis, professor and director of the Master, for the opportunity offered to me to deal with the extremely interesting subject of turbocharged internal combustion engines. Finally this thesis could not be done without the help of Mr. George Koutsis, owner of the Microchips Tuning company, as in the modern facilities available with the latest technology all the experimental results of the measurements were received.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ. 1

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ. 8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ. 9

1.2 ΤΟ TURBO ΣΤΗ ΔΕΚΑΕΤΙΑ ΤΟΥ '70. 9

1.3 ΤΑ ΠΡΩΤΑ ΥΠΕΡΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΑ ΕΠΙΒΑΤΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ. 10

1.4 Η ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΧΗ ΣΗΜΕΡΑ. 10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ

2.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ. 12

2.2 ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ. 12

2.3 ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΕΣ. 13

2.3.1 ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΕΩΣ (Supercharger). 14

2.3.2 ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΣΥΣΚΕΥΗ. 14

2.3.3 ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ (Turbocharger). 15

2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ. 15

2.5 ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ. 17

2.5.1 ΔΙΒΑΘΜΙΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ. 19

2.5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΒΑΘΜΙΑΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ. 20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΕΣ (TURBO)

3.1 ΓΕΝΙΚΑ. 21

3.2 Η "ΑΝΑΤΟΜΙΑ" ΕΝΟΣ TURBO. 22

3.2.1 ΤΑ ΚΕΛΥΦΗ. 24

3.2.2 ΟΙ ΠΤΕΡΩΤΕΣ. 25
3.3 TURBO ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ A/R (VATN). 30
3.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ TURBO. 31
3.5 Η ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΗ ΠΟΡΕΙΑ ΤΟΥ TURBO. 35
3.6 ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ TURBO. 39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ. ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ – ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ
4.1 ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ. 41
4.1.1 ΑΥΞΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ. 41
4.1.2 ΑΥΞΗΣΗ ΜΕΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ. 42
4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ. 43
4.3 ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ. 46
4.3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ. 46
4.3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ. 48
4.3.3 ΧΑΡΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΚΤΙΝΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ. . 51
4.4 ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ. 54
4.4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ. 54
4.4.2 ΡΥΘΜΙΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΩΝ. 57
4.4.3 ΒΑΘΜΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ. 58
4.4.4 ΙΣΕΝΤΡΟΠΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ. 59
4.4.5 ΙΣΧΥΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ. 60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΤΑΙΡΙΑΣΜΑ (MATCHING) ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ. 61
5.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΑΤΡΑΚΤΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ. 62
5.3 ΧΑΡΤΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ. 63
5.4 ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ 4-ΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ. . . .65
5.5 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ. 67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ

6.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ. 69
6.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΕ ΧΑΡΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ. 71
6.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ TURBO. 79
6.3.1 ΜΙΚΡΟ TURBO. 81
6.3.2 ΜΕΓΑΛΟ TURBO. 82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

7.1 ΒΑΛΒΙΔΑ ΑΝΑΚΟΥΦΙΣΗΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ (WASTEGATE). . 84
7.2 ΒΑΛΒΙΔΑ ΑΝΑΚΟΥΦΙΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ (ΣΧΑΣΤΡΑ). 87
7.2.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΧΑΣΤΡΑΣ. 88
7.2.2 ΕΙΔΗ ΣΧΑΣΤΡΑΣ ΠΟΥ ΥΠΑΡΧΟΥΝ. 89
7.2.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕ ΤΙΣ ΣΧΑΣΤΡΕΣ. 91
7.3 ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (INTERCOOLER). 92
7.3.1 ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ INTERCOOLER. 93
7.3.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ. 93
7.3.3 ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ (TURBO LAG). 94
7.3.4 ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ. 95
7.3.5 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΟΝ ΘΑΛΑΜΟ ΚΑΥΣΗΣ. 96
7.3.6 ΤΥΠΟΙ INTERCOOLER. 96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ. 102
8.2 ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΘΡΟΣ. 102
8.3 “ΞΥΡΑΦΙΑΣΜΑ” ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ. 103
8.4 ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ. 104
8.5 ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΜΕΡΗ ΤΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ. 106

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΛΙΠΑΝΣΗ – ΑΙΤΙΕΣ ΦΘΟΡΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΩΝ

9.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΙΠΑΝΣΗΣ. 109
9.2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ – ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ. 113
9.3 ΑΙΤΙΕΣ ΦΘΟΡΩΝ ΤΟΥ TURBO. 114
9.3.1 ΒΛΑΒΕΣ ΑΠΟ ΔΙΑΡΡΟΕΣ ΛΑΔΙΟΥ. 114
9.3.2 ΕΛΛΕΙΨΗ Ή ΣΤΕΡΗΣΗ ΛΑΔΙΟΥ. 115
9.3.3 ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΛΑΔΙΟΥ. 116
9.3.4 ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗ. 117
9.3.5 ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗ ΚΟΥΖΙΝΕΤΩΝ ΑΠΟ “ΒΡΩΜΙΚΟ” ΛΑΔΙ. 118
9.3.6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΞΕΝΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ. 119
9.3.7 ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ. 119
9.3.8 ΚΡΟΥΣΗ ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ. 120
9.3.9 ΜΗ ΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΣΗ. 120
9.3.10 ΥΨΗΛΟΣ ΛΟΓΟΣ ΠΙΕΣΗΣ. 122
9.3.11 ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ. 122
9.3.12 ΚΑΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ. 124
9.4 ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ. 124

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ. ΤΑΙΡΙΑΣΜΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

10.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ. 127
10.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 129
10.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑΚΟ SETUP TURBO KKK K03-029. 132
10.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ SETUP TURBO KKK K04-023. 134

10.5 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ BIG TURBO SETUP
GARRETT GT2871R. 137
10.6 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ. 142

ΓΛΩΣΣΑΡΙ. 147

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ. 154

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	**Επεξήγηση**	**Μονάδα**
Q_c, Q_t	Προσδιδόμενη/απορροφώμενη θερμότητα συμπιεστή/στροβίλου	Joule
W_c, W_t	Ισχύς συμπιεστή/στροβίλου	Watt
$\dot{m}_c, \dot{m}_T$	Παροχή μάζας συμπιεστή/στροβίλου	g/sec
$\bar{p}_e$	Μέση πραγματική πίεση κινητήρα	Pa
m_1	Συνολική μάζα εμβόλου-διωστήρα	kg
r	Ακτίνα στροφάλου	m
P_{max}	Μέγιστη πίεση κινητήρα	Pa
D	Διάμετρος κυλίνδρου	mm
s	Διαδρομή εμβόλου	mm
ε	Λόγος συμπίεσης κινητήρα	-
C	Ταχύτητα ρευστού	m/sec
$P_{01,02,03,...}$	Ολική πίεση κατάστασης 1,2,3...	Pa
$P_{1,2,3,...}$	Στατική πίεση κατάστασης 1,2,3...	Pa
$T_{01,02,03...}$	Ολική θερμοκρασία κατάστασης 1,2,3..	°K
$T_{1,2,3...}$	Στατική θερμοκρασία κατάστασης 1,2,3...	°K
$h_{01,02,03...}$	Ολική ειδική ενθαλπία κατάστασης 1,2,3...	J/kg
$h_{1,2,3...}$	Στατική ειδική ενθαλπία κατάστασης 1,2,3...	J/kg
c_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ανά kg μάζας ρευστού	J/kg°K
$\eta_{t-t,\ t-s....}$	Βαθμός απόδοσης (ολικά/ολικά μεγέθη, ολικά/στατικά...)	-
$M_{κιν.}$	Ροπή κινητήρα (στο στρόφαλο)	kg·m
$P_{κιν.}$	Ισχύς κινητήρα (στο στρόφαλο)	HP
n	Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα	rpm
CFM	Ροή αέρα στον κινητήρα (flow rate)	ft^3/min
PR	Λόγος πιέσεων συμπιεστή (pressure ratio)	-
P_{turbo}	Πίεση αέρα εισαγωγής (turbo)	bar
MAF	Παροχή μάζας εισερχόμενου αέρα	g/sec
$T_{εισ.}$	Θερμοκρασία αέρα εισαγωγής	°C
I_{BTDC}	Γωνία αβάνς - advance	μοίρες
K_S	Πειράκια – knocks (πόσες μοίρες "κόβει" από την I_{BTDC} – "retards")	μοίρες
λ	Διόρθωση αισθητήρα "λ"	-
$T_{καυσ.}$	Θερμοκρασία καυσαερίων	°C

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιστορία είναι σχεδόν τόσο παλαιά όσο αυτή της μηχανής εσωτερικής καύσης. Από το 1885 και 1896, ο Gottlieb Daimler και ο Rudolf Diesel ερεύνησαν την αύξηση της εξόδου ισχύος και τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου των μηχανών από επανασυμπίεση του αέρα καύσης [13].

Το 1925, ο Ελβετός μηχανικός Alfred Buchi ήταν ο πρώτος που κατάφερε να υπερσυμπιέσει με επιτυχία τον αέρα εισαγωγής μέσω των καυσαερίων της εξάτμισης, και πέτυχε μια αύξηση ισχύος περισσότερο από 40%. Αυτό ήταν η αρχή της εισαγωγής της υπερπλήρωσης στην βιομηχανία αυτοκινήτων.

Οι πρώτες εφαρμογές των στροβιλο-υπερπληρωτών (turbo) περιορίστηκαν στις πολύ μεγάλες μηχανές. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, η υπερσυμπίεση αρχίζει με τις μηχανές των φορτηγών. Το 1938, η "Swiss Machine Works Saurer" κατασκεύασε τον πρώτο υπερσυμπιεστή για φορτηγό.

Το Chevrolet Corvair Monza και το Olds-mobile Jetfire ήταν τα πρώτα στροβιλο-υπερπληρούμενα επιβατικά αυτοκίνητα, και έκαναν την εμφάνισή τους στην αμερικάνικη αγορά το 1962-63. Η “φτωχή” αξιοπιστία τους, προκάλεσε την εξαφάνισή τους γρήγορα από την αγορά.

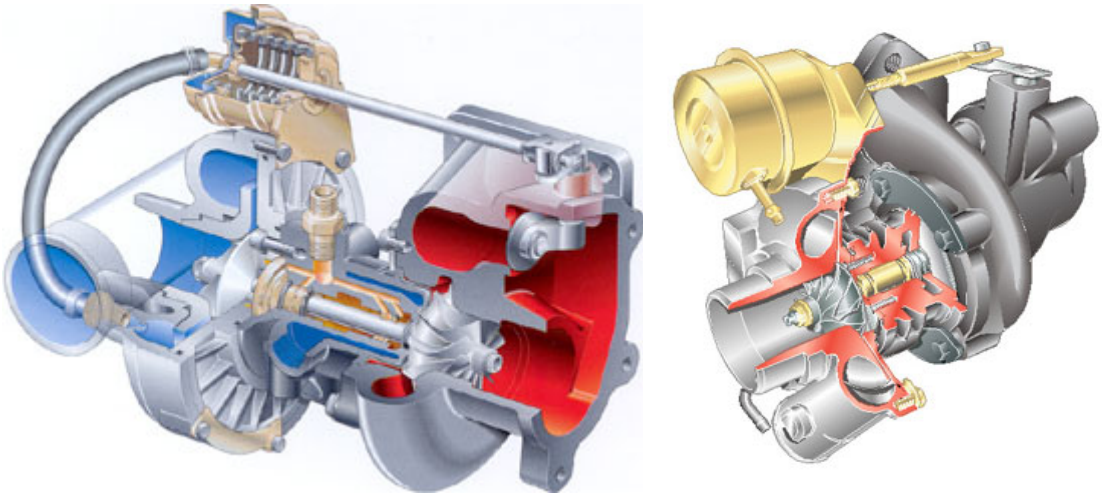
Μετά από την πρώτη κρίση πετρελαίου το 1973, έγινε πιο αποδεκτό στις εμπορικές εφαρμογές diesel. Μέχρι τότε, οι υψηλές δαπάνες επένδυσης αντισταθμίστηκαν μόνο από την αποταμίευση δαπανών καυσίμου, η οποία ήταν ελάχιστη. Οι όλο και περισσότερο αυστηροί κανονισμοί εκπομπής καυσαερίων προς το τέλος της δεκαετίας του '80 οδήγησαν σε μια αύξηση στον αριθμό των υπερτροφοδοτούμενων φορτηγών, έτσι ώστε σήμερα, ουσιαστικά κάθε μηχανή φορτηγού να είναι υπερτροφοδοτούμενη.

1.2 ΤΟ TURBO ΣΤΗ ΔΕΚΑΕΤΙΑ ΤΟΥ '70

Στην δεκαετία του '70, με την είσοδο του στροβιλο-υπερπληρωτή μέσα στον αυτοκινούμενο αθλητισμό, ειδικά μέσα από τον συναγωνισμό στην Formula 1, τα επιβατικά αυτοκίνητα με υπερσυμπιεστές turbo έγιναν πολύ

δημοφιλή. Εντούτοις, αυτό το φαινόμενο εξαφανίστηκε μετά από μερικά έτη, επειδή αν και ο βενζινοκινητήρας με στροβιλο-υπερπληρωτή ήταν ισχυρότερος, δεν ήταν οικονομικός.

Επιπλέον, η "στροβιλο-καθυστέρηση" [12], δηλαδή η καθυστερημένη ανταπόκριση επιτάχυνσης των στροβιλο-υπερπληρούμενων οχημάτων, ήταν σε εκείνη την περίοδο ακόμα σχετικά μεγάλη και μη αποδεκτή από τους περισσότερους πελάτες.



Σχήμα 1.1 Τομές στροβιλο-υπερπληρωτών.

1.3 ΤΑ ΠΡΩΤΑ ΥΠΕΡΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΑ ΕΠΙΒΑΤΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ

Η πραγματική σημαντική πρόοδος στα επιβατικά αυτοκίνητα επιτεύχθηκε το 1978, με την εισαγωγή του πρώτου υπερτροφοδοτούμενου αυτοκινήτου με πετρελαιο-κινητήρα από την Mercedes-Benz (300 SD) και ακολουθήθηκε από το Golf Turbodiesel της VW το 1981.

Με την βοήθεια του στροβιλο-υπερπληρωτή, η αποδοτικότητα των πετρελαιομηχανών ενός επιβατικού αυτοκινήτου θα μπορούσε να αυξηθεί, σχεδόν το ίδιο με έναν βενζινοκινητήρα στην "δυνατότητα κίνησης", αλλά και οι εκπομπές καυσαερίων να μειωθούν σημαντικά.

1.4 Η ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΧΗ ΣΗΜΕΡΑ

Σήμερα, οι βενζινοκινητήρες turbo όχι μόνο ξεχωρίζουν από την προοπτική της απόδοσης, αλλά εμφανίζονται και ως μέσο μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου και συνεπώς της περιβαλλοντικής ρύπανσης, εξαιτίας των χαμηλότερων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Εντούτοις, μερικοί βενζινοκινητήρες με

υπερτροφοδότηση από τη δεκαετία του '60 και τη δεκαετία του '70 υπάρχουν ακόμα και σήμερα.

Αυτήν την περίοδο, η αρχή λειτουργίας της υπερτροφοδότησης είναι η χρήση της ενέργειας του αερίου της καύσης, με απώτερο σκοπό την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και της εκπομπής καυσαερίων. Επομένως, οι στροβιλο-υπερπληρωτές συμβάλλουν αρκετά στην περιβαλλοντική προστασία και την διατήρηση των στοιχείων συμπεριφοράς ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ

2.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Σκοπός του κινητήρα εσωτερικής καύσης είναι η μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε θερμική ενέργεια και στη συνέχεια σε κινητική ενέργεια, δηλαδή σε ωφέλιμο μηχανικό έργο. Στην πράξη μόνο το 22-28% της ενέργειας από την καύση της βενζίνης μετατρέπεται σε μηχανικό έργο [6]. Η υπόλοιπη θερμική ενέργεια αποτελεί απώλειες, οι οποίες διαμοιράζονται σε ίσες περίπου αναλογίες στο σύστημα ψύξης, στα καυσαέρια που διοχετεύονται στο περιβάλλον και στις απώλειες λόγω ακτινοβολίας. Η βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα έγκειται στον περιορισμό των θερμικών απωλειών του, είτε μειώνοντας τις τριβές, είτε με την εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμότητας.

2.2 ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Κανένας ατμοσφαιρικός κινητήρας δεν μπορεί να "γεμίσει" τους κυλίνδρους του εξ' ολοκλήρου με φρέσκο μείγμα (αέρα-καυσίμου) σε κάθε κύκλο λειτουργίας του. Αυτό οφείλεται σε παράγοντες όπως : ο σχεδιασμός του συστήματος εισαγωγής και εξαγωγής, οι τριβές του αέρα κατά την ροή του στην εισαγωγή, ο σχεδιασμός της κυλινδροκεφαλής και του θαλάμου καύσης, ο χρονισμός των βαλβίδων, η μικρή χρονική διάρκεια κάθε κύκλου λειτουργίας, κ.ο.κ. Έτσι η ογκομετρική απόδοση (volumetric efficiency) ενός σύγχρονου κινητήρα παραγωγής φτάνει το 80-85% [5]. Στην πράξη, ένας ατμοσφαιρικός κινητήρας χωρητικότητας 2 λίτρων αποδίδει την ισχύ που βάσει της θεωρίας (δηλαδή με ογκομετρική απόδοση 100%) θα απέδιδε ένας ίδιος κινητήρας χωρητικότητας 1,6 λίτρων.

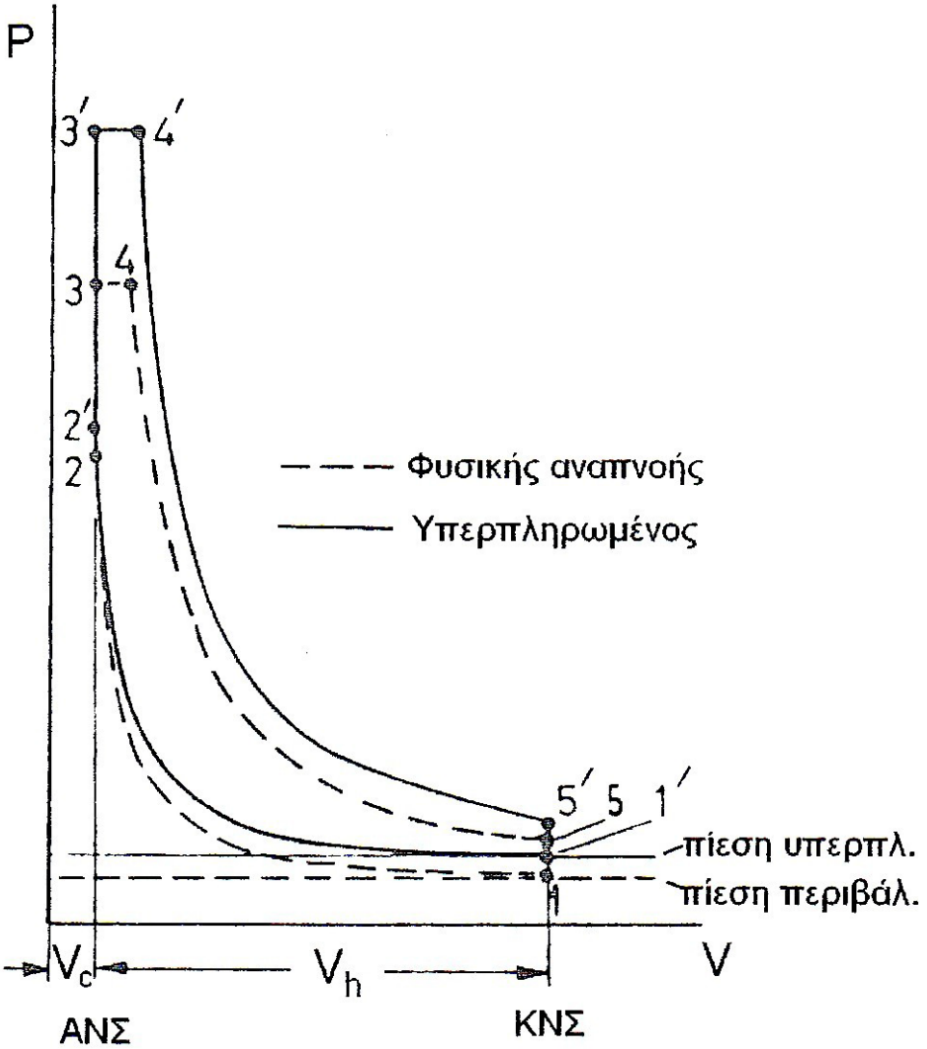
Εκμεταλλευόμενοι τις αρχές της ρευστομηχανικής και της αεροδυναμικής μπορούμε σε ορισμένες περιπτώσεις να προσεγγίσουμε ή και να ξεπεράσουμε το 100% της ογκομετρικής απόδοσης σε έναν ατμοσφαιρικό κινητήρα, αλλά σε περιορισμένο φάσμα ρυθμού περιστροφής και σε συνθήκες λειτουργίας που καμία σχέση δεν έχουν με τις καθημερινές μας μετακινήσεις.

Στα πρώτα της βήματα η υπερτροφοδότηση αποσκοπούσε στην αποκατάσταση του 100% της ογκο-

μετρικής απόδοσης των Μ.Ε.Κ. (Μηχανές Εσωτερικής Καύσης), αλλά σύντομα οι σχεδιαστές την χρησιμοποίησαν ως ένα μέσο (κατά βούληση) "υπερκυβισμού" των κινητήρων τους.

2.3 ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΕΣ

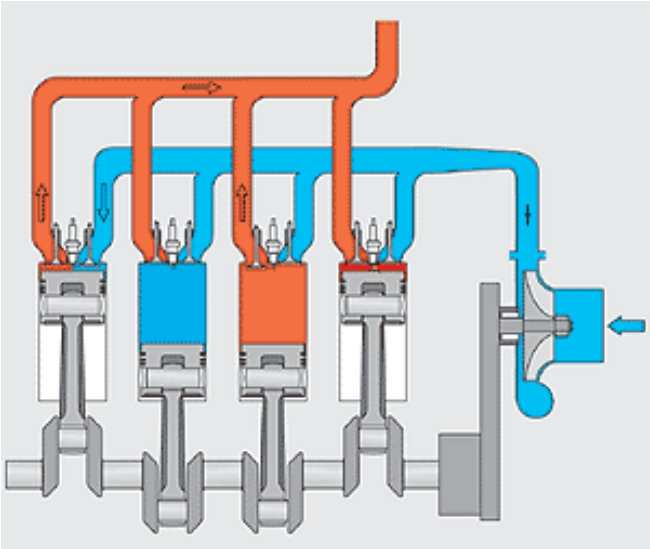
Η βασική αρχή της υπερπλήρωσης είναι η παροχή αέρα στην εισαγωγή του κινητήρα με μάζα ίση ή μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να αντλήσει μόνος του από το περιβάλλον. Στην ουσία οι υπερπληρωτές είναι αντλίες που συμπιέζουν αέρα στην εισαγωγή του κινητήρα. Οι αντλίες αυτές μπορεί να κινούνται είτε από τον στροφαλοφόρο άξονα μέσω ιμάντων, γραναζιών, κ.λ.π. (μηχανικοί υπερσυμπιεστές - "κομπρέσορες"), ή να παίρνουν κίνηση από τα καυσαέρια του κινητήρα (στροβιλο-υπερπληρωτές εξάτμισης - turbo) [4].



<u>Διάγραμμα 2.1</u> Γραφική σύγκριση μικτού κύκλου κινητήρα φυσικής αναπνοής (123451) και υπερπληρωμένου κινητήρα ίδιου βαθμού συμπίεσης (1'2'3'4'5'1').

2.3.1 ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΕΩΣ (Supercharger)

Με τον μηχανικό υπερπληρωτή, ο αέρας καύσης συμπιέζεται από έναν συμπιεστή που οδηγείται άμεσα από τη μηχανή (συγκεκριμένα από τον στροφαλοφόρο άξονα). Εντούτοις, η αύξηση της ισχύος εξόδου χάνεται εν μέρει, οφειλόμενη στις παρασιτικές απώλειες λόγω μετάδοσης της κίνησης για την λειτουργία του συμπιεστή. Η ισχύς που χρειάζεται για να κινηθεί ένας μηχανικός υπερπληρωτής είναι μέχρι 15% της ισχύος εξόδου της μηχανής. Επομένως, η κατανάλωση καυσίμου είναι υψηλότερη σε σύγκριση με μια ατμοσφαιρική (ή φυσικής αναπνοής) μηχανή με την ίδια ισχύ εξόδου.



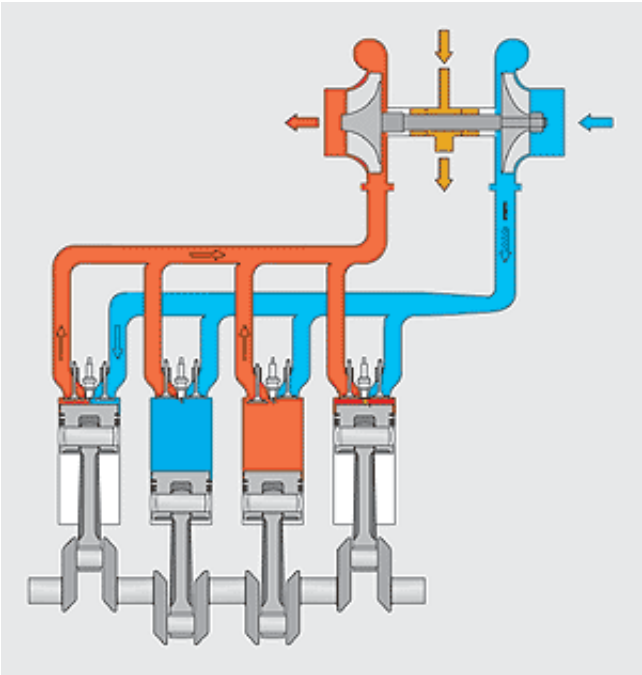
Σχήμα 2.1
Λειτουργία μηχανικού υπερπληρωτή.

2.3.2 ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΣΥΣΚΕΥΗ

Η υπερπλήρωση με αυτόνομη συσκευή προβλέπει τροφοδοσία της μηχανής με αέρα, που κατευθύνεται στους κυλίνδρους της με τη βοήθεια συσκευής, η οποία εργάζεται ανεξάρτητα από αυτή (τη μηχανή), π.χ. με την βοήθεια ηλεκτροκινητήρα. Πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η ανεξαρτησία της κίνησής του από την μηχανή, και με τον τρόπο αυτό η μεγάλη του προσαρμοστικότητα στις διάφορες απαιτήσεις της μηχανής, προπαντός όταν αυτή εργάζεται σε χαμηλές στροφές. Μειονέκτημα του συστήματος είναι το υψηλό κόστος που παρουσιάζει και για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιείται μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις ή σαν συμπληρωματική υπερπλήρωση στους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες μεγάλης ισχύος.

2.3.3 ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ (Turbocharger)

Σε αυτόν τον τύπο υπερπλήρωσης, μερική ενέργεια από τα αέρια καύσης που θα χάνονταν στην ατμόσφαιρα κανονικά, χρησιμοποιείται για να οδηγήσει έναν στρόβιλο. Επικολλημένος στον ίδιο άξονα με τον στρόβιλο είναι ένας συμπιεστής, που οδηγεί τον εισαγόμενο ατμοσφαιρικό αέρα, τον συμπιέζει και τον παρέχει έπειτα στη μηχανή. Δεν υπάρχει καμία μηχανική σύζευξη με τη μηχανή.



Σχήμα 2.2
Λειτουργία στροβιλο-υπερπληρωτή.

2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ

Τα πλεονεκτήματα της υπερπλήρωσης των κινητήρων με στροβιλο-υπερπληρωτή είναι πάρα πολλά όταν αυτά συγκριθούν με τα μειονεκτήματα. Μερικά από αυτά είναι τα παρακάτω [9] :

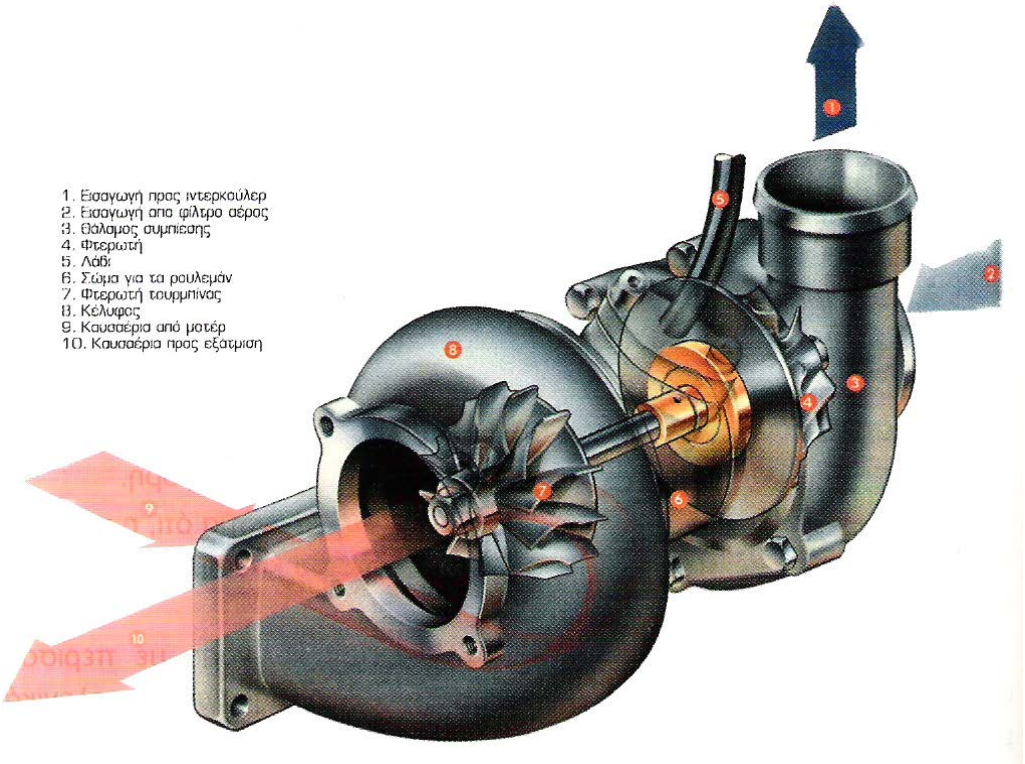
1. Συγκρινόμενη με μια ατμοσφαιρική μηχανή της ίδιας ισχύος εξόδου, η κατανάλωση καυσίμου μιας μηχανής με στροβιλο-υπερπληρωτή (turbo) είναι χαμηλότερη, καθώς έχουμε χρήση της “σπαταλημένης” ενέργειας των καυσαερίων, η οποία συμβάλλει στην αποδοτικότητα της μηχανής. Λόγω της χαμηλότερης ογκομετρικής διάστασης μια μηχανής με turbo, οι τριβές και οι θερμικές απώλειες είναι λιγότερες.
2. Η αναλογία ισχύος, δηλαδή ίπποι (ισχύς εξόδου) / χιλιόγραμμα (βάρος μηχανών) των κινητήρων με στροβιλο-

υπερπληρωτή είναι πολύ καλύτερη από αυτή μιας ατμοσφαιρικής μηχανής.
3. Ο χώρος που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός turbo είναι μικρότερος από αυτόν μιας ατμοσφαιρικής μηχανής με την ίδια ισχύ εξόδου.
4. Η χαρακτηριστική ροπή ενός κινητήρα με turbo μπορεί να βελτιωθεί. Οφειλόμενη στο αποκαλούμενο "χαρακτηριστικό maxidyne" (μια πολύ υψηλή αύξηση ροπής σε χαμηλές στροφές του κινητήρα), κοντά στην πλήρη ισχύ εξόδου, η οποία διατηρείται καλά κάτω από την εκτιμώμενη ταχύτητα της μηχανής. Επομένως, η αναρρίχηση ενός λόφου απαιτεί τις λιγότερες εναλλαγές στο κιβώτιο ταχυτήτων και η απώλεια ταχύτητας είναι χαμηλότερη.
5. Η απόδοση που παρέχει ένας στροβιλο-υπερπληρωτής σε υψηλά υψόμετρα είναι σημαντικά καλύτερη. Λόγω της χαμηλότερης πίεσης αέρα στα μεγάλα υψόμετρα, η απώλεια ισχύος μιας ατμοσφαιρικής μηχανής είναι ιδιαίτερα χαρακτηριστική. Σε αντίθετη περίπτωση, η απόδοση του turbo βελτιώνεται λόγω του υψομέτρου ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης διαφοράς πίεσης μεταξύ της ουσιαστικά σταθερής πίεσης προς το turbo και της χαμηλότερης περιβαλλοντικής πίεσης στην έξοδο. Η χαμηλότερη πυκνότητα αέρα στην είσοδο του κελύφους εισαγωγής εξισώνεται κατά ένα μεγάλο μέρος. Ως εκ τούτου, η απώλεια ισχύος της μηχανής είναι πολύ μικρή ως αμελητέα.
6. Λόγω του μειωμένου γενικού μεγέθους, η εκπομπή ηχορύπανσης ενός turbo είναι μικρότερη σε σχέση με μια ατμοσφαιρική μηχανή με την ίδια ισχύ εξόδου. Ο ίδιος ο στροβιλο-υπερπληρωτής ενεργεί ως πρόσθετος σιγαστήρας εξάτμισης.

Περιορισμοί : Η επιτρεπόμενη υπερπλήρωση εξαρτάται από την ικανότητα του υλικού της μηχανής να αντιστέκεται σε μηχανικά και θερμικά φορτία :
α. Στις αυξημένες πιέσεις, οι οποίες αυξάνουν την καταπόνηση ανά μονάδα επιφάνειας του τριβέως και συνεπώς στις μηχανικές απώλειες λόγω τριβών.
β. Στις θερμοκρασίες. Οι μεγάλες θερμοκρασίες εξαγωγής απαιτούν ανθεκτικότερα μέταλλα, για να μην "καούν" οι κεφαλές των εμβόλων ως και οι έδρες και οι βαλβίδες εξαγωγής. Αυτό αυξάνει το κόστος της μηχανής, αλλά αντισταθμίζεται με το κέρδος από το μικρότερο βάρος της. Η επίδραση της θερμοκρασίας μικραίνει με αύξηση της ψύξης των εμβόλων εσωτερικά με λάδι ή νερό και προς το μέρος του χώρου καύσης με τον ψυχρότερο αέρα.

2.5 ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Όπως φαίνεται και από την ονομασία, ο στροβιλο-υπερπληρωτής αποτελείται από δύο "εξαρτήματα" [5] : ένα στρόβιλο και ένα συμπιεστή, οι οποίοι συνδέονται με ένα κοινό άξονα και είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε ο στρόβιλος να παρεμβάλλεται στο σύστημα εξαγωγής του κινητήρα, ενώ ο συμπιεστής στο σύστημα εισαγωγής. Τα καυσαέρια, στο δρόμο τους προς την εξάτμιση, συναντούν τον στρόβιλο και τον θέτουν σε περιστροφική κίνηση. Μέσω του κοινού άξονα παρασύρεται σε περιστροφική κίνηση και ο συμπιεστής, ο οποίος συμπιέζει τον αέρα εισαγωγής και τον μεταφέρει στους θαλάμους καύσης με πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, επιτυγχάνοντας έτσι την υπερπλήρωση.



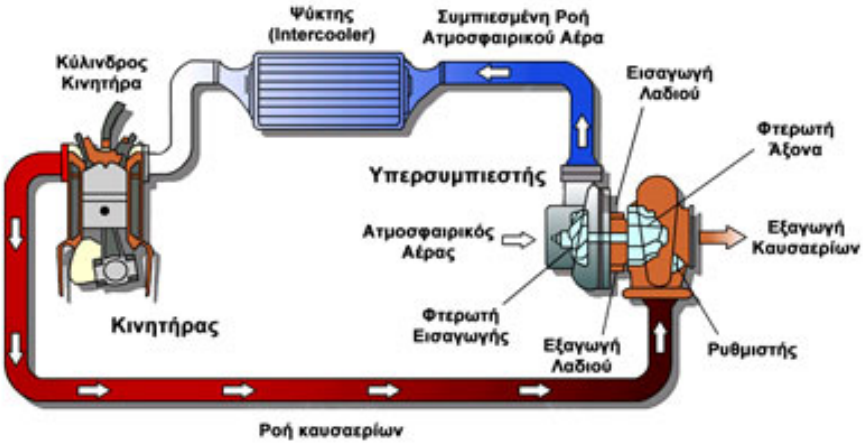
Σχήμα 2.3 Στροβιλο-υπερπληρωτής (turbo).

Για την προστασία του κινητήρα από την υπερβολική συμπίεση του αέρα στις υψηλές στροφές λειτουργίας, τοποθετείται μια βαλβίδα διαφυγής (ή βαλβίδα ανακούφισης στροβίλου - wastegate) μεταξύ της πολλαπλής εξαγωγής και του στροβίλου, η οποία ενεργοποιείται από την πίεση του αέρα εισαγωγής. Μόλις η πίεση φθάσει το όριο ασφαλείας, τότε η βαλβίδα ανοίγει επιτρέποντας στα καυσαέρια να παρακάμπτουν το στρόβιλο, περιορίζοντας έτσι την συμπίεση.

Βέβαια, τα σύγχρονα συστήματα turbo επιτρέπουν την στιγμιαία αύξηση της υπερπλήρωσης γύρω στα 1,8 bar (αγωνιστικοί κινητήρες πάνω από 3 bar, ναυτικές μηχανές

περίπου 3,7 bar) σε περίπτωση που πατηθεί τέρμα το πεντάλ του γκαζιού. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός πρόσθετου μηχανισμού (overboost), ο οποίος καθυστερεί την λειτουργία της βαλβίδας ανακούφισης, προσφέροντας στον οδηγό τη δυνατότητα καλύτερης επιτάχυνσης.

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία των υπερτροφοδοτούμενων κινητήρων, είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα εισαγωγής, λόγω της συμπίεσής του, όπως επίσης και η αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στους κυλίνδρους από την καύση μεγαλύτερης ποσότητας μείγματος. Για τη λύση του προβλήματος επιστρατεύεται ένας εναλλάκτης θερμότητας (intercooler), ο οποίος τοποθετείται μεταξύ του στροβιλο-υπερπληρωτή και της πολλαπλής εισαγωγής και ψύχει τον συμπιεσμένο αέρα πριν αυτός φθάσει στους θαλάμους καύσης. Με την μείωση της θερμοκρασίας του αέρα, αυξάνεται βέβαια και η πυκνότητά του, με αποτέλεσμα να μπορεί να καεί περισσότερο καύσιμο ανά μονάδα όγκου μείγματος, προς όφελος της απόδοσης.



Σχήμα 2.4 Μονοβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση.

Για την προστασία του κινητήρα, χρησιμοποιείται και ένας αισθητήρας προανάφλεξης για τη μεταβολή της προπορείας ανάφλεξης, σε περίπτωση που η αυξημένη θερμοκρασία του μείγματος προκαλέσει την αυτανάφλεξή του, ή ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα, το οποίο δίνει εντολή για το άνοιγμα της βαλβίδας ανακούφισης. Το αποτέλεσμα είναι βέβαια το ίδιο, αφού με την πτώση της πίεσης του αέρα εισαγωγής σταματά η προανάφλεξη του μείγματος.

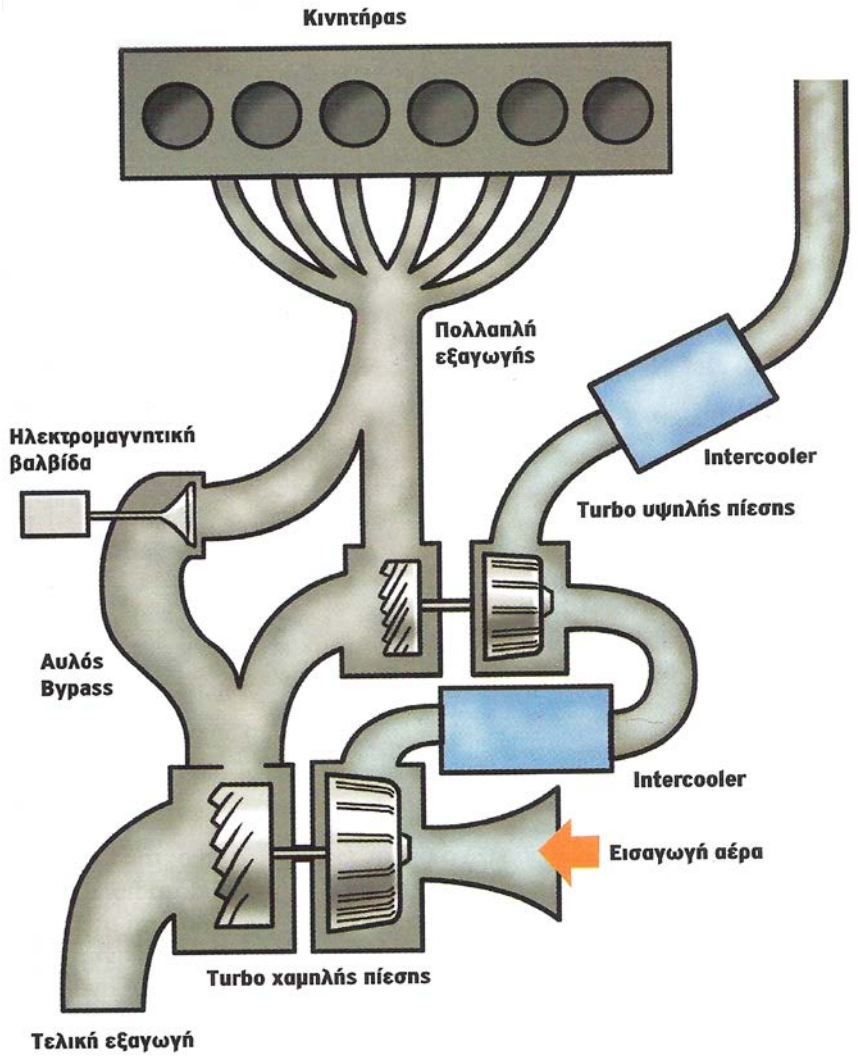
Ένα ακόμα βασικό πρόβλημα, παρατηρείται στην καθυστέρηση απόκρισης του turbo. Όταν δηλαδή ο οδηγός πατήσει το πεντάλ του γκαζιού, το αυτοκίνητο δεν επιταχύνει αμέσως, αλλά καθυστερεί ορισμένα δέκατα του δευτερολέπτου, πράγμα που οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα καυσαέρια (που δεν έχουν και πολλή ενέργεια στις χαμηλές στροφές) πρέπει να υπερνικήσουν την αδράνεια

του συστήματος στροβίλου, συμπιεστή και άξονα, πριν τον θέσουν σε κίνηση. Για την άμβλυνση του προβλήματος (αφού η πλήρης εξάλειψή του δεν είναι δυνατή), οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν υλικά ελαφρών κραμάτων, με στόχο να περιορίσουν το βάρος των κινούμενων τμημάτων και κατά συνέπεια την αδράνειά τους.

2.5.1 ΔΙΒΑΘΜΙΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ

Ένας τρόπος για την μείωση της αδράνειας είναι η χρησιμοποίηση της διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης, η οποία ορίζεται σαν χρήση δύο turbo διαφορετικών μεγεθών (εξαιτίας της διαφοράς των επιπέδων πίεσης και των ρυθμών της ογκομετρικής ροής) σε σειρά.

Η διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση εφαρμόζεται για πολλά χρόνια, σαν μέσο που οδηγεί στην αύξηση της απόδοσης των στροβιλο-υπερπληρούμενων μηχανών πέρα από τα όρια που επιβάλλονται κυρίως από τα χαρακτηριστικά ροής του μονοβάθμιου στροβιλο-υπερπληρωτή [12].



Σχήμα 2.5 Στροβιλο-υπερπλήρωση με δυο βαθμίδες.

Η χρήση δύο στροβίλων και δύο συμπιεστών (υψηλής και χαμηλής πίεσης), επιτρέπει την εφαρμογή πολύ υψηλότερων συνολικά αναλογιών πίεσης, χωρίς να ξεπερνιέται το εύρος ροής είτε του συμπιεστή είτε το ικανοποιητικό εύρος λειτουργίας του στροβίλου. Το περίγραμμα μιας ενδιάμεσα ψυχόμενης (intercooler) και μεταψυχόμενης (aftercooler) στροβιλο-υπερπληρούμενης μηχανής φαίνεται παραπάνω στο σχήμα.

Τα συνολικά λειτουργικά χαρακτηριστικά δείχνουν έναν πολύ ικανοποιητικό συνδυασμό καλής ροπής στρέψης, υψηλής BMEP (μέση ενεργός πραγματική πίεση) και καλής SFC (ειδικής κατανάλωσης καυσίμου) ιδιαίτερα στην περιοχή αιχμής της ροπής στρέψης.

2.5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΒΑΘΜΙΑΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ

Η διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση συγκρινόμενη με την μονοβάθμια έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα :

1. Σημαντικά υψηλότερα επίπεδα βοηθητικής πίεσης που επιτρέπουν την πραγματοποίηση υψηλότερων μέσων αποτελεσματικών πιέσεων.
2. Μεγαλύτερη απόδοση, ακόμα και σε δεδομένη βοηθητική πίεση, εξαιτίας της μείωσης στην απόδοση τόσο του συμπιεστή όσο και του στροβίλου στο στάδιο κατά το οποίο έχουμε αυξημένη αναλογία πίεσης. Η απόδοση της διβάθμιας στροβιλο-υπερπλήρωσης μπορεί να δεχθεί και παραπέρα αύξηση, με σύστημα ενδιάμεσης ψύξης (intercooler) του αέρα. Η συστολή του όγκου του διευκολύνει το έργο της συμπίεσης.
3. Ευρύτερο φάσμα λειτουργίας και καλύτερο συσχετισμό (ταίριασμα) στις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής.

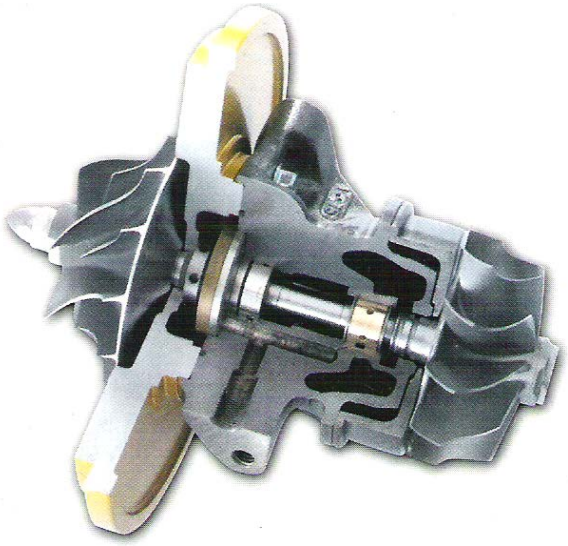
Απεναντίας η διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση απαιτεί περισσότερο χώρο, έχει μικρότερη επιτάχυνση, ο εξοπλισμός της είναι βαρύτερος και φυσικά είναι περισσότερο δαπανηρή από την μονοβάθμια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΕΣ (TURBO)

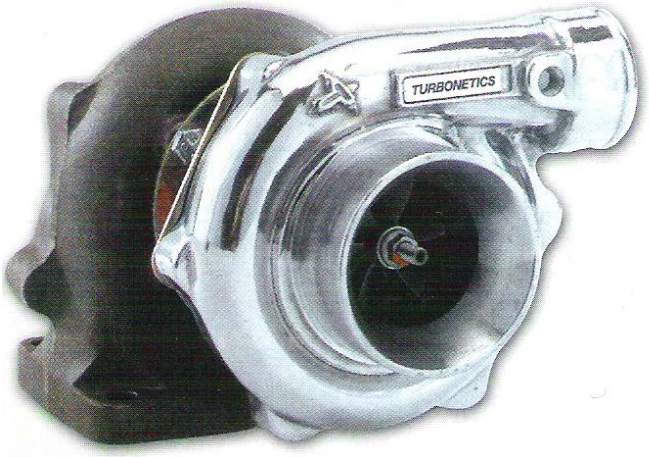
3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το turbo (σύντμηση της Αγγλικής λέξης turbocharger) έφερε την επανάσταση στην βιομηχανία κινητήρων, με πρώτες εφαρμογές στους αεροπορικούς και βιομηχανικούς κινητήρες. Η αξιοπιστία και τα πλεονεκτήματα του turbo σε σχέση με τους μηχανικούς υπερπληρωτές, οδήγησε στην καθιέρωσή του στην αυτοκινητοβιομηχανία. Το κύριο "αβαντάζ" του turbo είναι ότι δεν καταναλώνει ενέργεια από τον κινητήρα για την λειτουργία του.

Κινητήρια δύναμή του είναι η θερμότητα και η ταχύτητα των καυσαερίων. Με άλλα λόγια το 35% της χαμένης ισχύος ενός κινητήρα (αυτό που αποβάλλεται μέσω των καυσαερίων και ισοδυναμεί με ισχύ μεγαλύτερη ακόμα και από εκείνη που παράγει ο κινητήρας), μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έναν βαθμό, για την κίνηση του turbo. Στα καθημερινά αυτοκίνητα ο άξονας του turbo μεταφέρει ισχύ σχεδόν ίση με το 20% της ισχύος του κινητήρα, ποσό που μπορεί να φτάσει ακόμα και το 100% αυτής της ισχύος σε αγωνιστικούς κινητήρες.



Σχήμα 3.1 Τομή turbo με ένσφαιρους τριβείς στον άξονα και θρος 360°.

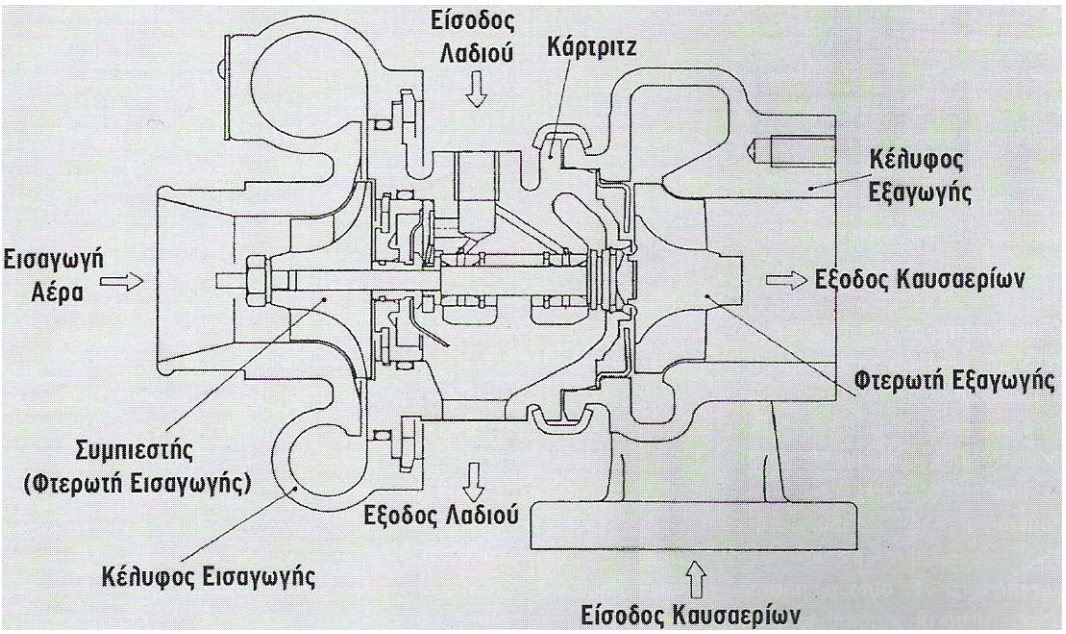


Σχήμα 3.2 Turbo με παροχή ικανή για επίτευξη ισχύος μέχρι 330 PS.

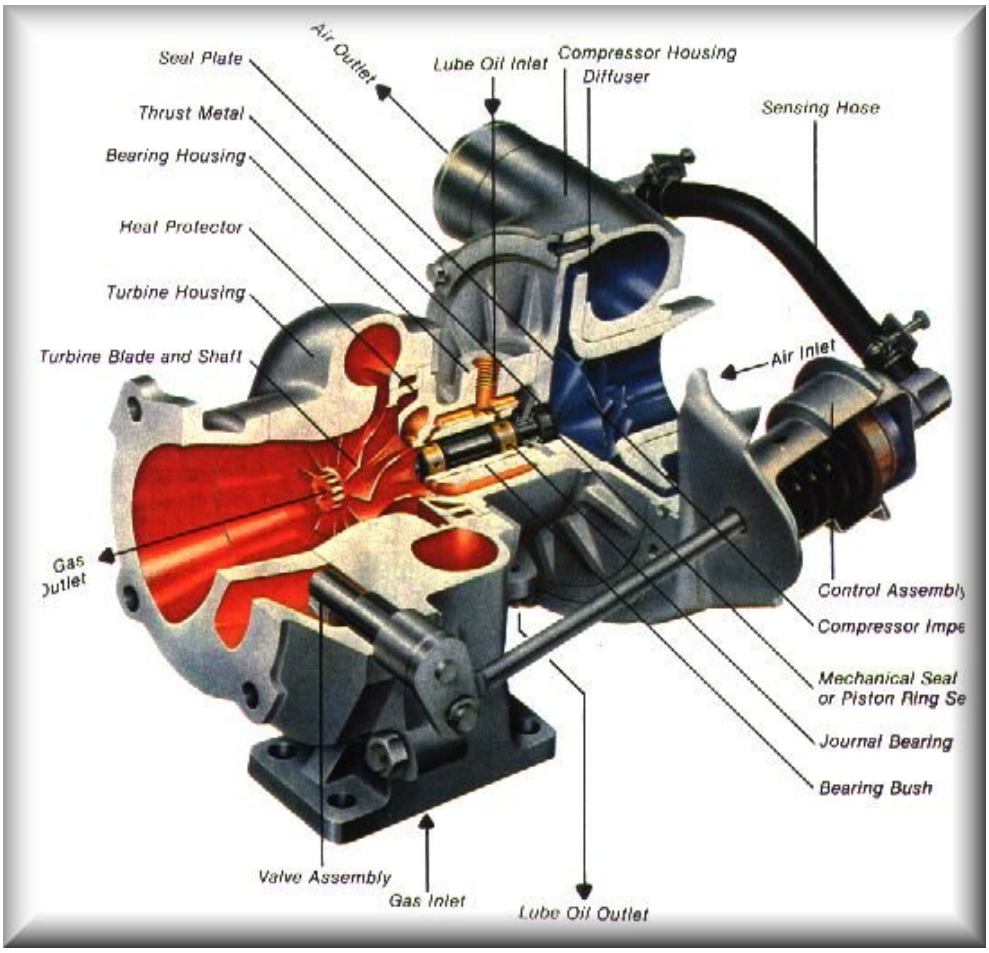
3.2 Η "ΑΝΑΤΟΜΙΑ" ΕΝΟΣ TURBO

Όλοι οι στροβιλο-υπερπληρωτές αποτελούνται από κάποια κοινά εξαρτήματα. Ανάλογα με την εφαρμογή και τον τύπο του turbo, έχουμε παραλλαγές ως προς τη στήριξη του άξονα, τη μορφή των πτερωτών, τα περιφερειακά συστήματα ελέγχου, κ.λ.π. Σε γενικές γραμμές, το turbo αποτελείται από τα εξής μέρη [10] :

- ***Άξονας:*** Φέρει τις πτερωτές αποτελώντας την "καρδιά" του turbo.
- ***Κουζινέτα:*** Εδράζουν τον άξονα, του επιτρέπουν να περιστρέφεται σε ταχύτητες που φτάνουν μέχρι τις 200.000rpm (για μικρά turbo) και αποτρέπουν τις εγκάρσιες μετακινήσεις του, παραλαμβάνοντας τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη συμπίεση του αέρα.
- ***Σώμα (cartridge):*** Περιέχει τα κουζινέτα του άξονα (bearings) που τον στηρίζουν κατά την περιστροφή του. Επίσης περιλαμβάνει τους αγωγούς και τις κοιλότητες λίπανσης και ψύξης του turbo και στηρίζει τα κελύφη εισαγωγής και εξαγωγής.
- ***Πτερωτές:*** Η πτερωτή εξαγωγής ή στρόβιλος, (τουρμπίνα, turbine wheel) βρίσκεται μέσα στο κέλυφος εξαγωγής και μετατρέπει την ενέργεια των καυσαερίων σε περιστροφή του άξονα. Η πτερωτή εισαγωγής ή συμπιεστής (compressor wheel), που βρίσκεται μέσα στο κέλυφος εισαγωγής και στηρίζεται στην άλλη μεριά του άξονα του turbo, συμπιέζει τον αέρα προς την εισαγωγή του κινητήρα.
- ***Κέλυφος ('σαλιγκάρι'):*** Οδηγεί τις αέριες μάζες μεταβάλλοντας την πίεση και την ταχύτητά τους.
- ***Κέλυφος εξαγωγής ή στροβίλου ('μαυτέμι'):*** Επιταχύνει τη ροή των καυσαερίων που προσκρούουν στη πτερωτή εξαγωγής για να κινήσουν τον άξονα. Συνήθως περιλαμβάνει τη βαλβίδα διαφυγής (wastegate), μία διάταξη που εκτρέπει τη ροή των καυσαερίων από τη πτερωτή εξαγωγής και τα οδηγεί κατευθείαν στην εξάτμιση, ώστε να περιορίζεται η ταχύτητα περιστροφής του turbo και να σταθεροποιείται η πίεση υπερπλήρωσης στα επιθυμητά επίπεδα.
- ***Κέλυφος εισαγωγής ή συμπιεστή ('αλουμίνιο'):*** Οδηγεί τον αέρα εισαγωγής στο συμπιεστή, ο οποίος κατά την περιστροφή του επιταχύνει τον αέρα και τον συμπιέζει.



<u>Σχήμα 3.3</u> Η "ταυτότητα" του στροβιλο-υπερπληρωτή.



<u>Σχήμα 3.4</u> Στην τομή του παραπάνω στροβιλο-υπερπληρωτή φαίνονται ξεκάθαρα όλα τα μέρη του.

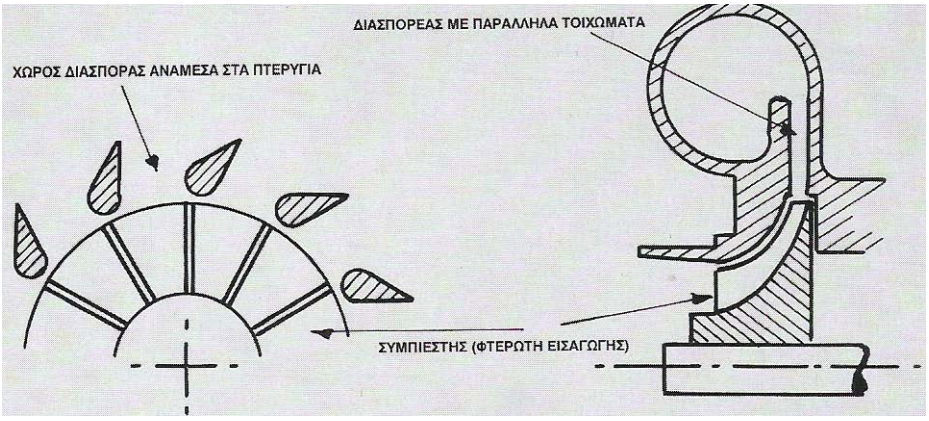
3.2.1 ΤΑ ΚΕΛΥΦΗ

Κέλυφος συμπιεστή (εισαγωγής): Παραλαμβάνει τον ατμοσφαιρικό αέρα, οδηγώντας τον στο συμπιεστή (πτερωτή εισαγωγής). Καθώς ο αέρας φτάνει στην άκρη του συμπιεστή, η πίεσή του πέφτει και η ταχύτητά του αυξάνεται ανάλογα. Τα πτερύγια του συμπιεστή στροβιλίζουν τον αέρα, ενώ αυξάνουν και την κινητική του ενέργεια. Καθώς ο αέρας φτάνει στην περιφέρεια του συμπιεστή (compressor tip), η πίεση και η ταχύτητά του έχουν αυξηθεί, εξαιτίας της επιτάχυνσης που δέχτηκε από τα πτερύγια και της αυξημένης του κινητικής ενέργειας. Η ταχύτητα με την οποία ο αέρας φεύγει από τον συμπιεστή φτάνει (και συχνά ξεπερνάει) αυτήν του ήχου.

Αναγκαστικά ο αέρας πρέπει να επιβραδυνθεί και η αυξημένη του κινητική ενέργεια να μετατραπεί σε ωφέλιμη άνοδο της πίεσής του, προτού αυτός διοχετευτεί στον κινητήρα. Αυτή τη λειτουργία επιτελεί ο διασπορέας (diffuser), ένα άλλο εξάρτημα ενσωματωμένο στο κέλυφος. Στα πρώτα βήματα του turbo, ο διασπορέας αποτελείτο από μια σειρά αποκλινόντων ακροφυσίων (nozzles), τα οποία επιβράδυναν τον αέρα εκτωνώνοντάς τον (αυξάνοντας τον όγκο του). Στη συνέχεια τα ακροφύσια αντικαταστάθηκαν από έναν δακτύλιο με λεπίδες ή πτερύγια, που σχημάτιζαν τους κατάλληλους αυλούς για την εκτόνωση του αέρα. Ωστόσο, η απλούστερη μορφή διασπορέα που χρησιμοποιείται κατά κόρον σήμερα στους βενζινο-κινητήρες, είναι αυτή χωρίς πτερύγια.

Το κέλυφος είναι κατάλληλα διαμορφωμένο γύρω από την πτερωτή και σχηματίζει ένα στενό πέρασμα ανάμεσα στα τοιχώματά του. Τα τοιχώματα είναι παράλληλα, και όσο ο αέρας απομακρύνεται από το κέντρο της πτερωτής, τόσο ο όγκος που περικλείεται ανάμεσα στα τοιχώματα αυξάνει και η ταχύτητα του αέρα επιβραδύνεται. Στη συνέχεια διοχετεύεται στον συλλέκτη του κελύφους, δηλαδή το σωληνοειδές τμήμα του “σαλιγκαριού” περιμετρικά της πτερωτής. Εκεί σταθεροποιείται η πίεση και η ροή του, μέχρι να φτάσει στην έξοδο του κελύφους κατευθυνόμενος προς τον κινητήρα. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα τοιχώματα του διασπορέα μπορεί να είναι σχηματισμένα, έτσι ώστε η αύξηση του περικλειόμενου όγκου να μην είναι γραμμική.

Ο διασπορέας χωρίς πτερύγια είναι πολύ διαδεδομένος στις αυτοκινητιστικές εφαρμογές, χάρη στο μεγάλο εύρος λειτουργίας του, το χαμηλό του κόστος και την καλή του συμπεριφορά έναντι της διάβρωσης και της φθοράς. Το μειονέκτημά του είναι η πολύ μικρότερη άνοδος της πίεσης, σε σύγκριση με ένα διασπορέα (ανάλογης διαμέτρου) με πτερύγια.



<u>Σχήμα 3.5</u> Σύγκριση διασπορέα με και χωρίς πτερύγια. Αριστερά διακρίνεται ο διασπορέας με πτερύγια, όπου μια σειρά κεκλιμένων πτερυγίων περιβάλλει τον συμπιεστή. Ο χώρος ανάμεσα στα πτερύγια δημιουργεί τα αποκλίνοντα περάσματα διασποράς του αέρα. Δεξιά βλέπουμε τον διασπορέα χωρίς πτερύγια, όπου τα τοιχώματα του κελύφους σχηματίζουν τον χώρο διασποράς.

Κέλυφος στροβίλου (εξαγωγής): Συλλέγει τα καυσαέρια (όπως αυτά έρχονται από την πολλαπλή εξαγωγής), αυξάνει την ταχύτητά τους και τα στροβιλίζει, κατευθύνοντάς τα στη πτερωτή εξαγωγής, την οποία θέτουν σε κίνηση. Λειτουργεί παρόμοια με το κέλυφος εισαγωγής, μόνο που το κάνει ανάποδα. Δηλαδή αντί να περιέχει μια κινούμενη πτερωτή και να εκμεταλλεύεται την επιτάχυνση του αέρα που αυτή προκαλεί, το κέλυφος επιταχύνει τα αέρια (που παραλαμβάνει από την πολλαπλή εξαγωγής) και τα στροβιλίζει (αντί να σταθεροποιεί την ροή τους), ώστε να τα διοχετεύσει πάνω στην πτερωτή του στροβίλου και να την περιστρέψει, καθιστώντας την κινητήρια. Το ακροφύσιο του κελύφους του στροβίλου είναι ο “ομόλογος” του διασπορέα και είναι το μέρος του κελύφους που προκαλεί τον στροβιλισμό των καυσαερίων.

Στα αυτοκινητιστικά turbo για λόγους κατασκευής και κόστους δεν χρειάζεται το ακροφύσιο να έχει πτερύγια, καθώς τα καυσαέρια κινούνται ήδη με μεγάλη ταχύτητα στην έξοδο της πολλαπλής εξαγωγής. Η μικρή επιπλέον απαιτούμενη επιτάχυνση των καυσαερίων που θα κινήσουν την πτερωτή, εξασφαλίζεται με την κατάλληλη διαμόρφωση του θαλάμου του κελύφους, δηλαδή με την σταδιακή μείωση της ακτίνας του θαλάμου περιμετρικά της πτερωτής.

3.2.2 ΟΙ ΠΤΕΡΩΤΕΣ

Η επέμβαση στις πτερωτές ενός turbo μπορεί να “λύσει” πολλά προβλήματα ή να δημιουργήσει νέα.

Πτερωτή στροβίλου ή εξαγωγής (τουρμπίνα): Ο σκοπός για τον οποίο προορίζεται ένα turbo (είδος κινητήρα, στροφές μέγιστης απόδοσης κ.λ.π.) καθορίζει το μέγεθος της τουρμπίνας που θα χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση. Υπάρχουν δύο

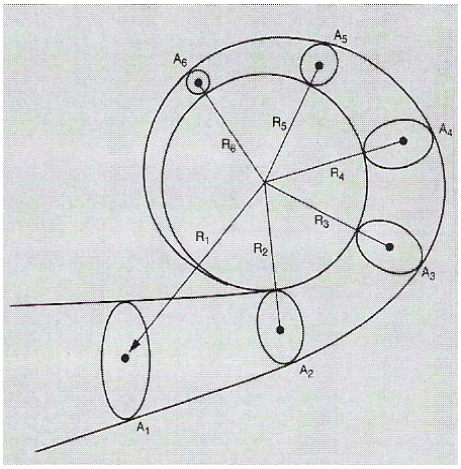
κριτήρια γι' αυτή την επιλογή, η βασική διάμετρος της τουρμπίνας και ο λόγος A/R.

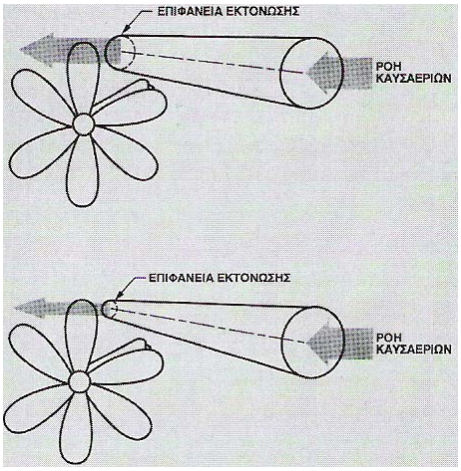
Βασικό μέγεθος (ή απλά "μέγεθος"): Χοντρικά το μέγεθος αντικατοπτρίζει την ικανότητα μιας τουρμπίνας να περιστρέφει τον άξονα με τέτοια ροπή και ταχύτητα, ώστε ο συμπιεστής να μπορεί να μας δώσει την απαιτούμενη πίεση και ροή. Συνεπώς οι μεγαλύτερες τουρμπίνες παράγουν περισσότερη δύναμη στον άξονα (και άρα ισχύ στον κινητήρα) απ' ότι οι μικρότερες. Για λόγους απλούστευσης στον υπολογισμό, το μέγεθος της τουρμπίνας μπορεί γενικά να προκύψει από την διάμετρο της εξόδου των καυσαερίων στο κέλυφος εξαγωγής. Μπορεί αυτή να είναι μια υπεραπλούστευση του πράγματος, ωστόσο αποτελεί μια λογική αναπαράσταση της ροϊκής ικανότητας της τουρμπίνας. Η γραφική παράσταση του μεγέθους προς τη ροή (σε κυβικά πόδια ανα λεπτό), δεν αποτελεί ακριβές εργαλείο για την επιλογή μιας τουρμπίνας, ωστόσο δείχνει περίπου πως συμπεριφέρονται τα εκάστοτε μεγέθη.

Λόγος A/R: Ενώ το μέγεθος προσδιορίζει την ροϊκή ικανότητα μιας τουρμπίνας και κατ' επέκταση όλου του turbo, ο λόγος A/R είναι μια μέθοδος για ακριβέστερη παραμετροποίηση της εκάστοτε τουρμπίνας. Για να αντιληφθείτε καλύτερα την ιδέα του λόγου A/R, φανταστείτε το κέλυφος εξαγωγής ως έναν κώνο τυλιγμένο γύρω από τον άξονα, ώστε να μοιάζει με σαλιγκάρι. Ξετυλίξτε τον κώνο και κόψτε την μύτη του σε μικρή απόσταση από την άκρη. Η οπή στο τέλος του κώνου είναι η επιφάνεια εκτόνωσης (discharge area). Η επιφάνεια αυτής της οπής είναι η παράμετρος A του λόγου A/R.

Το μέγεθος αυτής της οπής είναι σημαντικό, και καθορίζει την ταχύτητα με την οποία τα καυσαέρια εξέρχονται από τον θάλαμο εξαγωγής και προσκρούουν στις "λεπίδες" της τουρμπίνας. Για οποιαδήποτε δεδομένη ροή καυσαερίων, μια μικρή επιφάνεια εκτόνωσης θα προκαλεί την ταχύτερη κίνησή τους απ' ότι μια μεγαλύτερη. Συνεπώς αυτή η ταχύτητα των καυσαερίων είναι βασικός παράγοντας ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του turbo. Ωστόσο πρέπει πάντα να έχουμε υπόψην, ότι η επιφάνεια εκτόνωσης είναι και ο καθοριστικός παράγων της πίεσης που δημιουργεί το turbo στην εξαγωγή (backpressure), μια παρενέργεια που ευθύνεται και για την επιστροφή καυσαερίων στο θάλαμο καύσης.

Το R του λόγου A/R είναι η απόσταση από το κέντρο της τομής του κώνου ως το κέντρο του άξονα της τουρμπίνας. Όλα τα A, διαιρούμενα από τα αντίστοιχά τους R, θα δώσουν το ίδιο πηλίκο, δηλαδή Area/Radius = σταθερό [8].

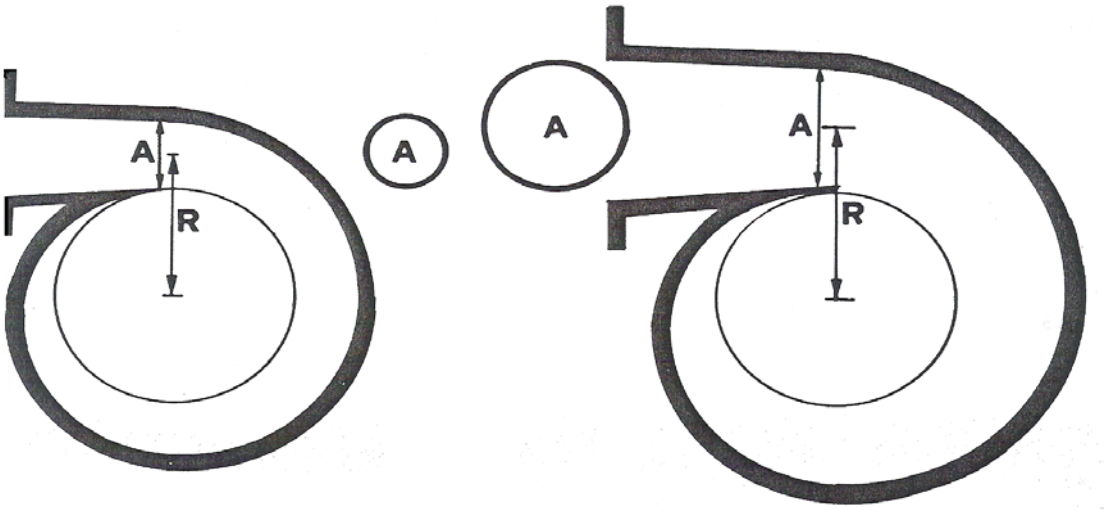




Σχήμα 3.6 *Σχήμα 3.7*

Στο αριστερό σχήμα διακρίνονται οι παράμετροι A και R του λόγου A/R. Σύμφωνα με το δεξί σχήμα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο μικραίνει η επιφάνεια διασποράς (άρα και ο λόγος A/R), τόσο αυξάνεται η ταχύτητα πρόσκρουσης των καυσαερίων πάνω στην τουρμπίνα, αλλά αυξάνεται και η πίεση στην εξαγωγή του κινητήρα.

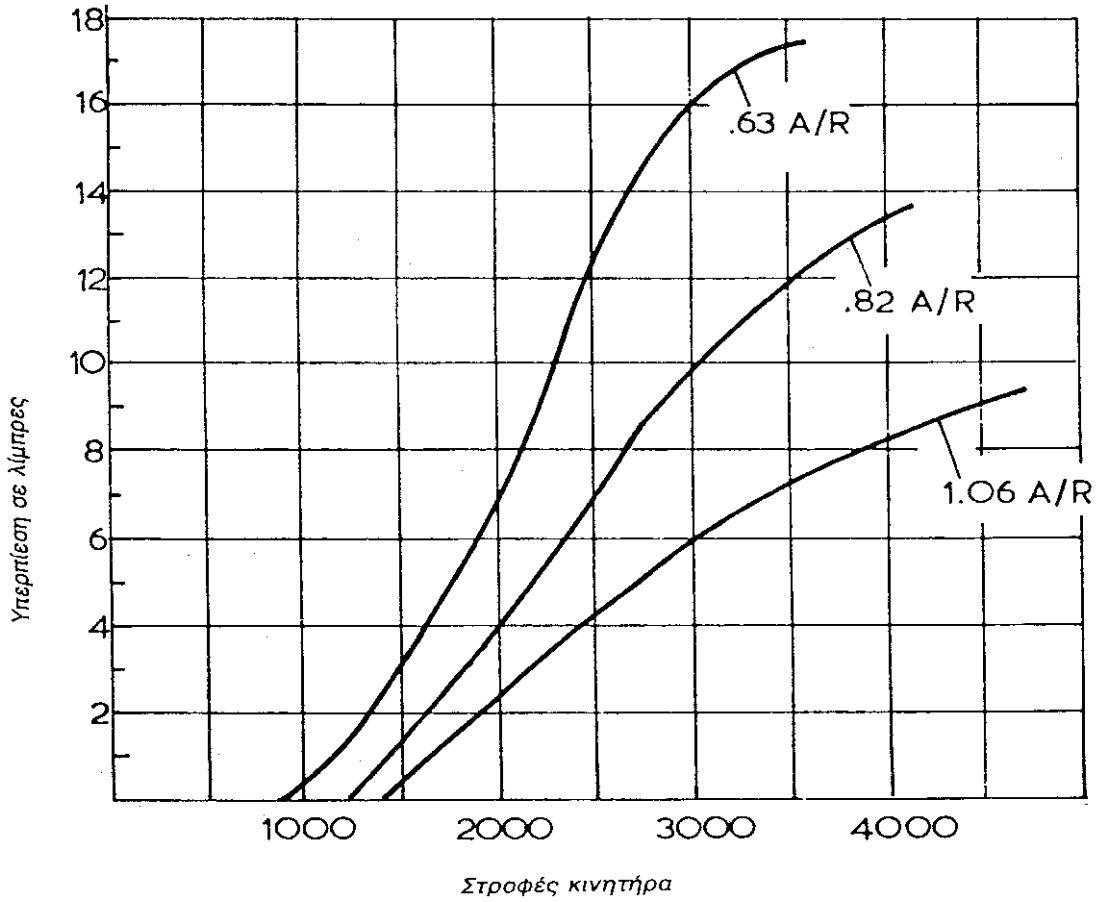
Η ακτίνα R παίζει και αυτή σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής και στη ροπή που θα παραλαμβάνει ο άξονας. Είναι προφανές ότι ένα μικρότερο R θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής του turbo, ενώ ένα μεγαλύτερο R μικρότετρη ταχύτητα, αλλά μεγαλύτερη ροπή στρέψης ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτεροι συμπιεστές όπου αυτό κρίνεται σκόπιμο. Παρ' όλα αυτά, στη πράξη, αυτό που διαφοροποιούν στα κελύφη τους οι κατασκευαστές turbo προκειμένου να διευρύνουν την γκάμα των προϊόντων τους, είναι η επιφάνεια εκτόνωσης A και όχι η ακτίνα.



Σχήμα 3.8 Η βασική σχέση που διέπει και την επιλογή της τουρμπίνας, ξεκινά από τα μεγέθη του σχήματος.

Σε έναν κινητήρα "δρόμου", ο λόγος A/R είναι συνήθως μικρότερος του 0.5, επιτρέποντας την πιο αποδοτική λειτουργία της τουρμπίνας, σε συνδυασμό με τις

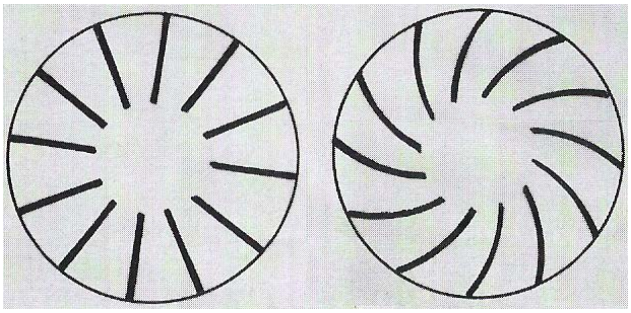
χαμηλές σχετικά στροφές του κινητήρα και μια πολύ γρήγορη απόκριση και στις χαμηλότερες ακόμα στροφές.



Διάγραμμα 3.1 Διαγραμματική διαφορά τριών turbo με διαφορετικούς λόγους A/R.

Σε κινητήρες "πίστας" γενικά, ο λόγος A/R πλησιάζει το 1, όπου για να κινηθεί το turbo στις αποδοτικές του στροφές, χρειάζεται να λειτουργήσει και ο κινητήρας ανάλογα, ώστε το σύνολο να παράγει μεν πολύ μεγαλύτερη ισχύ στις υψηλές στροφές, αλλά να υστερεί σοβαρά στις χαμηλές επιταχύνσεις, σπάνια όμως περίπτωση εδώ.

Πτερωτή συμπιεστή (εισαγωγής): Κάθε συμπιεστής έχει έναν συγκεκριμένο συνδυασμό πίεσης και ροής, στον οποίον παρουσιάζει τη μέγιστη απόδοσή του.



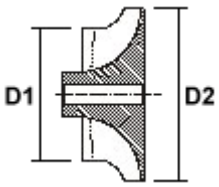
Σχήμα 3.9 Τύποι συμπιεστών.

Στο διπλανό σχήμα απεικονίζονται οι δύο τύποι συμπιεστών : με ευθεία και κυρτά πτερύγια. Με ευθεία πτερύγια επιτυγχάνουμε μεγαλύτερες αποδόσεις, αλλά σε περιορισμένο εύρος στροφών. Παράλληλα υπάρχει ο κίνδυνος

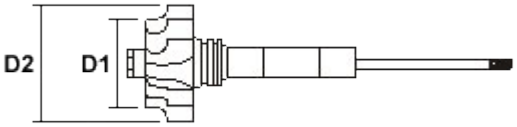
συσσώρευσης ακαθαρσιών. Από την άλλη, οι συμπιεστές με κυρτά πτερύγια έχουν μικρότερη μηχανική αντοχή και λειτουργούν σε μικρότερους λόγους πίεσης. Η απόδοση του συμπιεστή (compressor efficiency) είναι ένα ποσοστιαίο μέγεθος, το οποίο προκύπτει από τη σύγκριση δύο θερμοκρασιών : της πραγματικής θερμοκρασίας του συμπιεσμένου αέρα στην έξοδο του turbo, και της ιδανικής θερμοκρασίας που θα περιμέναμε να έχει (βάσει των αρχών της θερμοδυναμικής, που προβλέπουν ότι για συγκεκριμένη άνοδο της πίεσης θα πρέπει να ανέβει ανάλογα και η θερμοκρασία του αέρα). Με άλλα λόγια η απόδοση του συμπιεστή δείχνει πόσο καλά η πτερωτή συμπεριφέρεται βάση της θερμοδυναμικής.

Κάθε κατασκευαστής turbo διαθέτει στο κοινό του χάρτες απόδοσης για κάθε τύπο συμπιεστή που κατασκευάζει. Αυτοί οι χάρτες, απεικονίζουν την απόδοση του συμπιεστή με συγκεκριμένη πίεση και ροή για κάθε περιοχή λειτουργίας του κινητήρα. Χρησιμοποιώντας τους μπορούμε να επιλέξουμε ακριβώς το συμπιεστή που καλύπτει τις ανάγκες του μοτέρ μας και τις οδηγικές απαιτήσεις μας.

Το trim: Είναι ένας παράγοντας άγνωστος στους πολλούς, ο οποίος έχει να κάνει με τη γεωμετρία της πτερωτής εισαγωγής. Κάθε πτερωτή εισαγωγής έχει δύο βασικές διαμέτρους, τη μικρή διάμετρο στην είσοδο του αέρα και τη μεγάλη διάμετρο στη βάση της πτερωτής, απ' όπου ο αέρας διαφεύγει προς τον διασπορέα. Οι διάμετροι δεν είναι τυχαίες και παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του turbo. Το trim είναι ένας αριθμός, ο οποίος προκύπτει από την ύψωση στο τετράγωνο του πηλίκου της μικρής διαμέτρου προς τη μεγάλη και τον πολλαπλασιασμό του πηλίκου αυτού επί 100 [3].



Σχήμα 3.10
Πτερωτή εισαγωγής.



Σχήμα 3.11
Άξονας.

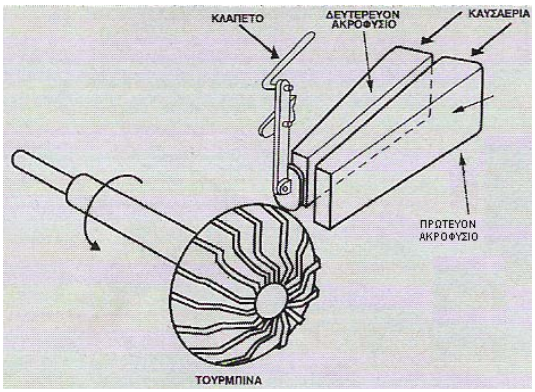
Παράδειγμα : Έστω ένας συμπιεστής με μικρή διάμετρο (D1=35mm) και μεγάλη διάμετρο (D2=50mm). Το trim θα είναι $(D1/D2)^2 \times 100 = 0{,}49 \times 100 = 49$.

Όσο μεγαλύτερο είναι το trim, τόσο μεγαλύτερη είναι η παροχή του συμπιεστή και το εύρος λειτουργίας του. Όμως τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενέργεια που απαιτείται για την περιστροφή του, δηλαδή τόσο μεγαλύτερη δύναμη θα πρέπει να παράγει η τουρμπίνα. Για παράδειγμα, ένας συμπιεστής με trim 55 έχει 10% παραπάνω παροχή από έναν με trim 50 με την ίδια εξωτερική διάμετρο, αλλά απαιτεί ανάλογα μεγαλύτερη ροπή στρέψης του άξονα για να κινηθεί στην ίδια ταχύτητα με το

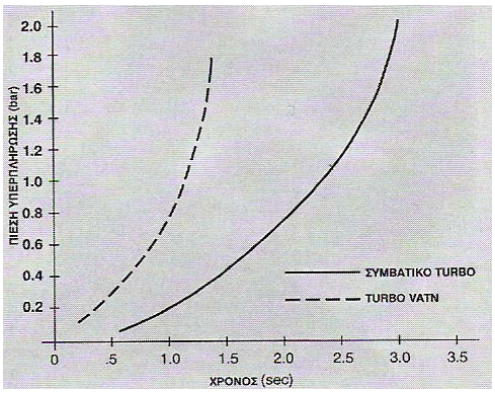
μικρό συμπιεστή. Εφόσον η τουρμπίνα έχει την ικανότητα, δηλαδή είναι αρκετά μεγάλη, πολλοί βελτιωτές χρησιμοποιούν στα turbo των πελατών τους συμπιεστές με μεγαλύτερο trim από το εργοστασιακό, ώστε το turbo να αποκτήσει μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας και να παράγει πίεση από χαμηλότερους ρυθμούς περιστροφής, μειώνοντας στις περισσότερες περιπτώσεις την καθυστέρηση απόκρισης ("turbo lag") και αυξάνοντας την απόδοση του κινητήρα, αφού ένας συμπιεστής με μεγαλύτερο trim συχνά έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης απ'ότι ένας με μικρότερο trim για τον ίδιο λόγο πίεσης.

3.3 TURBO ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ A/R (VATN)

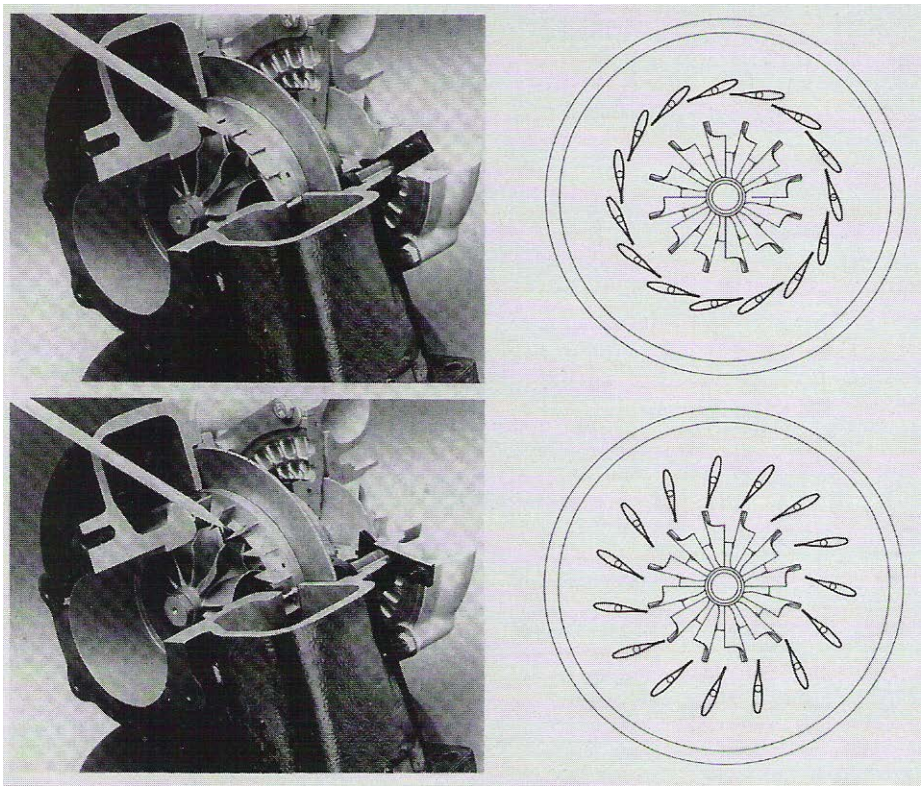
Σε αυτούς τους στροβιλο-υπερπληρωτές, ένας ρυθμιστής (σαν wastegate) ανοιγοκλείνει τα πτερύγια, αυξομειώνοντας το A/R στην εξαγωγή. Το μεγάλο A/R ανεβάζει την ισχύ στον άξονα του turbo, μειώνοντας παράλληλα το backpressure. Ο ρυθμιστής αντιλαμβάνεται ακαριαία πότε θέλουμε άμεση απόκριση, και κλείνει τα πτερύγια για αστραπιαίο "στροφάρισμα" και εκτίναξη του λόγου πίεσης. Μόλις η ταχύτητα του κινητήρα ή η πίεση του αέρα σταθεροποιηθεί, τα πτερύγια ανοίγουν σταδιακά μειώνοντας την αντίσταση των καυσαερίων, ενώ παράλληλα διατηρείται σε υψηλά επίπεδα η ισχύς του κινητήρα, η παροχή και η απόδοση του turbo [15].



Σχήμα 3.12 Αρχή λειτουργίας κελύφους με μεταβλητό A/R. Το κλαπέτο ανοίγει το δευτερεύον ακροφύσιο στις υψηλές στροφές και το κλείνει για ταχύτερη απόκριση στις χαμηλές.



Σχήμα 3.13 Σύγκριση του χρόνου απόκρισης ενός turbo τεχνολογίας VATN σε σχέση με ενός «παραδοσιακού» turbo. Το VATN χρειάζεται σχεδόν το μισό χρόνο.

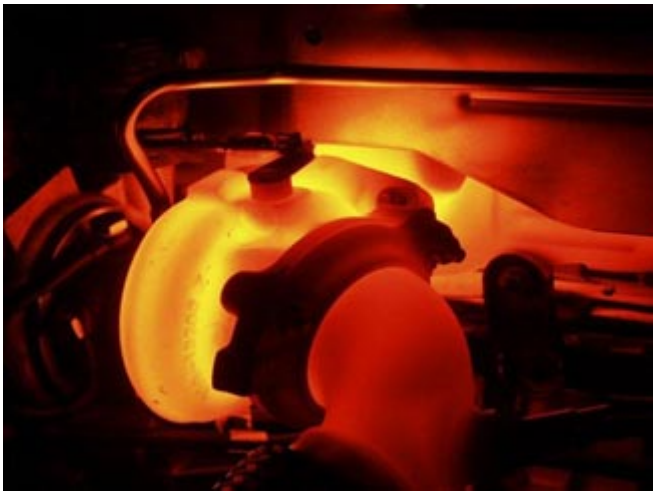


<u>Σχήμα 3.14</u> Το Aerocharger VATN turbo σε λεπτομέρεια. Όταν τα πτερύγια είναι σχεδόν κλειστά, η ταχύτητα των καυσαερίων είναι μεγάλη και η απόκριση στο γκάζι άμεση. Όταν είναι ανοιχτά, η ταχύτητα και επομένως το backpressure ελαττώνονται σημαντικά.

Πολλοί κατασκευαστές έχουν κατασκευάσει τέτοιας φιλοσοφίας turbo, με πτερύγια που ανοιγοκλείνουν περιμετρικά της πτερωτής εξαγωγής ή με ένα διπλό ακροφύσιο εκτόνωσης στο κέλυφος του στροβίλου και ένα κλαπέτο, που να ανοίγει το δεύτερο ακροφύσιο στις ίδιες συνθήκες που ανοίγουν και τα πτερύγια της τουρμπίνας. Ωστόσο, αυτά τα συστήματα είναι ακόμα ευπαθή στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην εξαγωγή των βενζινοκινητήρων, λειτουργούν σε σχετικά μικρούς λόγους πίεσης (το πολύ μέχρι 2,2-2,5) και είναι ακριβά στην κτήση και συντήρηση.

3.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ TURBO

Η μηχανική λειτουργία ενός turbo προϋποθέτει μεγάλες κατασκευαστικές ακρίβειες και ειδικές σχεδιαστικές μεθόδους, προκειμένου να εξασφαλίζεται η μακροζωία και αξιοπιστία του μηχανισμού. Σημείο κλειδί είναι η κατασκευή και η έδραση του άξονα. Τα καυσαέρια ενός βενζινοκινητήρα φτάνουν στην πτερωτή εξαγωγής με θερμοκρασίες που ενίοται ξεπερνούν τους 1100°C (περίπου στους 900°C το μαντέμι γίνεται κόκκινο) [10].



Σχήμα 3.15 Κέλυφος σε πολύ υψηλή θερμοκρασία.

Με τις ταχύτητες που περιστρέφονται οι πτερωτές, δέχονται υψηλές μηχανικές καταπονήσεις, λόγω της κεντρομόλου δύναμης που ασκείται στα μόρια του υλικού τους.

Σχετικά με την κατασκευή του turbo, πρέπει να πούμε ότι τα χρησιμοποιούμενα μέταλλα είναι πολύ μεγάλης αντοχής, ειδικά στην τουρμπίνα. Τέτοια μέταλλα είναι ο στελίτης και το ινκονέλ.

Επίσης η κατασκευή του πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερη, για πιο εύκολη συντήρηση και μεγαλύτερη αξιοπιστία. Για να ελέγξουμε το πόσο σωστά "εργάζεται" ένας στροβιλο-υπερπληρωτής, τον υποβάλλουμε σ' ένα τεστ θραύσεως το οποίο γίνεται δειγματοληπτικά στο εργοστάσιο παραγωγής σε ορισμένα κομμάτια μιας μεγάλης παρτίδας. Κατά το τεστ αυτό, το turbo υποχρεώνεται να περιστραφεί με 250000 στροφές το λεπτό ή περίπου 4150 στροφές το δευτερόλεπτο, οπότε λόγω υπερβολικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο στροφείο από την φυγόκεντρο, το στροφείο τελικά διαλύεται σε μικρά κομμάτια. Μ' αυτό το τεστ επίσης μελετάται και αν το κέλυφος του στροφείου συγκρατεί τα θραύσματα χωρίς το ίδιο να σπάει, πράγμα που αν συνέβαινε στην πράξη θα δημιουργούσε πολλά προβλήματα.

Εκτός βέβαια από αυτή τη δοκιμή, ο στροβιλο-υπερπληρωτής υποβάλλεται σε μεγάλα θερμικά και μηχανικά φορτία σε σχέση μ' αυτά που θα συναντήσει στην πράξη, επί πολλές ώρες και γίνονται έτσι πολλές μετρήσεις βγάζοντας συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του. Όλες αυτές οι δοκιμές αφορούν μόνο τον στροβιλο-υπερπληρωτή. Οι τελικές του όμως επιδόσεις φαίνονται αφού ο στροβιλο-υπερπληρωτής δοκιμαστεί για μεγάλο χρονικό διάστημα πάνω στον κινητήρα, όπου αλλάζοντας διάφορα κελύφη συμπιεστή και τουρμπίνας, βρίσκουμε τα ιδανικά που θα μας επιτρέψουν να επιτύχουμε τις επιδόσεις του κινητήρα που έχουν προδιαγραφή από τον

κατασκευαστή. Και σ' αυτό το στάδιο, όταν δηλαδή ο στροβιλο-υπερπληρωτής βρίσκεται πάνω στην μηχανή, επαναλαμβάνονται όλες οι δοκιμές (εργαστηριακές) που έγιναν με σκέτο τον στροβιλο-υπερπληρωτή, εκτός από τη δοκιμή της "έκρηξης".

Άλλες δοκιμές που γίνονται αφορούν τις μεταθέσεις του άξονα κατά τις διάφορες συνθήκες και ταχύτητες λειτουργίας. Χρησιμοποιούμε έναν παλμογράφο που καταγράφει τις θέσεις του άξονα. Αυτές με τη βοήθεια βίντεο καταγράφονται σε ταινία κι έτσι εμείς έχουμε τη δυνατότητα να εξετάσουμε τι συμβαίνει σε κάθε περίπτωση, παρακολουθώντας την ταινία του βίντεο από την αρχή όσες φορές θέλουμε.

Κατόπιν με τη βοήθεια κεραμικών συγκολλητικών ουσιών, τοποθετούμε στα πτερύγια του στροβίλου και του συμπιεστή διάφορους μετρητές καταπονήσεων, των οποίων τις μετρήσεις καταγράφουμε με ηλεκτρονική παρακολούθηση σε όλες τις συνθήκες φορτίου και ταχυτήτων.

Έχουμε έτσι μια πλήρη εικόνα των δονήσεων και των τάσεων που καταπονούν τον στροβιλο-υπερπληρωτή κατά την λειτουργία του πάνω στη μηχανή. Αν θέλουμε να απομονώσουμε ορισμένες δονήσεις για να εξετάσουμε, αναλύοντας τις συχνότητες της κάθε μιας, χρησιμοποιούμε τον αναλυτή συχνοτήτων.

Για την κατασκευή των στροβιλο-υπερπληρωτών χρησιμοποιούνται πολύ σύγχρονα μηχανήματα. Για παράδειγμα το κέλυφος του στροβιλο-υπερπληρωτή αφού βγει από το χυτήριο, το τοποθετούμε σε ένα μηχάνημα στο οποίο υφίστανται συγχρόνως 8 διαφορετικές επεξεργασίες και έτσι παίρνει την τελική μορφή. Ειδική επίσης φροντίδα λαμβάνεται κατά την τελική επεξεργασία του άξονα του στροφείου (λείανση, σκλήρυνση), ειδικά στα σημεία όπου συνεργάζεται με τα κουζινέτα και εκεί που υπάρχουν τα ελατήρια. Η ακρίβεια στις διαστάσεις του άξονα είναι της τάξης του ενός δεκάτου του χιλιοστού της ίντσας.

Η ίδια ακρίβεια πρέπει να υπάρχει και μεταξύ του στροφείου και του κελύφους, διαφορετικά δεν υπάρχει καλή απόδοση λόγω διαφυγών. Αυτή όμως η τόσο μικρή ανοχή, δεν επιτρέπει μεγάλες μεταθέσεις του άξονα εμπρός - πίσω, όταν ο στροβιλο-υπερπληρωτής δέχεται κατά την λειτουργία του εναλλασσόμενο φορτίο. Γι' αυτό τα σημεία που θα τοποθετηθούν κουζινέτα, πρέπει να είναι επεξεργασμένα με μεγάλη ακρίβεια.

Οι ανοχές των κουζινέτων φθάνουν τις τιμές των 0,4 έως 0,6 χιλιοστών, που εκ πρώτης όψεως φαίνονται υπερβολικά μεγάλες για τις κατασκευαστικές απαιτήσεις ενός turbo. Αν όμως δεν ήταν μεγάλες τότε το λάδι δεν θα μπορούσε να περάσει εύκολα και θα είχαμε κακή λίπανση,

με άμεσο αποτέλεσμα την ταχύτατη καταστροφή του στροβιλο-υπερπληρωτή.

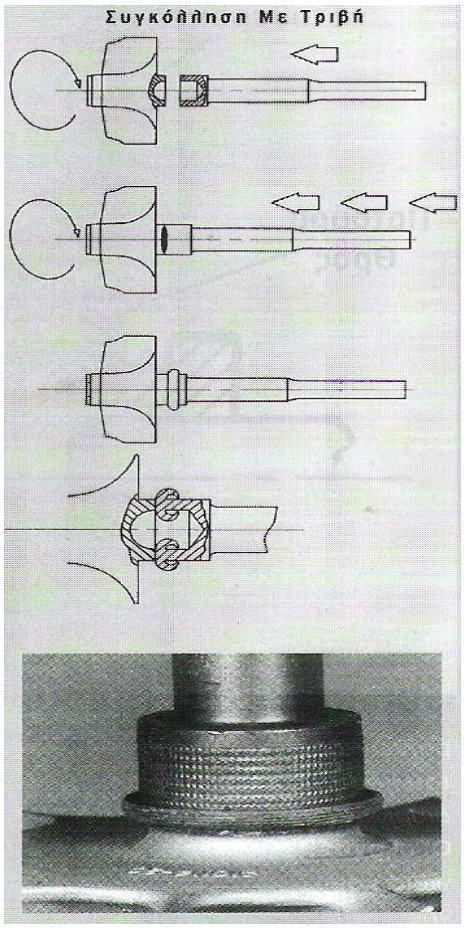
Έτσι πρέπει να αποφεύγεται κάθε προσπάθεια μεταβολής των διαστάσεων αυτών. Τα διάκενα μετρώνται από το κέντρο του τροχού του συμπιεστή. Μετά την κατασκευή του στροφείου, ακολουθεί η ζυγοστάθμισή του. Εδώ η εργασία θέλει μεγάλη ακρίβεια και προσοχή, καθώς και μεγάλο σεβασμό στις συμβουλές και τα όρια που προκαθορίζει ο κατασκευαστής. Αυτό θα το υιοθετήσουμε αν φανταστούμε ότι μια φυγοκεντρική δύναμη 9 γραμμαρίων στις 2000 στροφές το λεπτό γίνεται 20 ολόκληρα κιλά στις 90000 στροφές το λεπτό, όπου συνήθως δουλεύει ένας στροβιλο-υπερπληρωτής. Γι' αυτό ζυγοσταθμίζουμε πρώτα τα στροφεία σε δύο επίπεδα ξεχωριστά, μετά ζυγοσταθμίζουμε τον άξονα, και τέλος και τα δύο μαζί. Για να γίνει το ζύγισμα, αφαιρούμε υλικό εκεί όπου δεν χρειάζεται και μας δημιουργεί προβλήματα.

Όσον αφορά την λεπτομερή σύσταση των μετάλλων για την κατασκευή των διαφόρων μερών του στροβιλο-υπερπληρωτή, τηρείται κάποια “σιγή” εκ μέρους των εργοστασίων (είναι απόρρητα). Σε γενικές γραμμές πάντως μπορούμε να πούμε ότι στα κουζινέτα χρησιμοποιείται ο γραφιτούχος σφαιρόκοκκος σίδηρος. Ο γραφίτης από την φύση του έχει λιπαντικές ιδιότητες και έτσι σε περίπτωση που το εξάρτημα το οποίο είναι κατασκευασμένο από αυτόν, μένει από λάδι κατά την λειτουργία του για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα, αυτολιπαίνεται και παθαίνει πολύ λιγότερη ζημιά.

Ο άξονας είναι συνήθως από εξαιρετικά λεπτόκοκκο χάλυβα, η δε σκλήρυνσή του επιφανειακά στα μέρη όπου θα “πατήσει” πάνω σε κουζινέτα, γίνεται με το λεγόμενο επιδερμικό φαινόμενο. Δηλαδή με τη βοήθεια του φαινομένου της επαγωγής, δημιουργείται υψηλή τάση πάνω στα προς σκλήρυνση μέρη, με αποτέλεσμα την τοπική επιφανειακή θέρμανση του κομματιού. Στη συνέχεια εμβαπτίζεται μέσα σε ειδικά υγρά και έτσι επιτυγχάνουμε την επιθυμητή τοπική αντοχή, χωρίς να αλλοιώνονται τα χαρακτηριστικά του μετάλλου ως προς την ελαστικότητά του. Ο τροχός του στροβίλου κατασκευάζεται από ινκονέλ και συγκολλείται με τον άξονα με ακτίνες laser, αφού θέλουμε η κόλληση να είναι εξαιρετικά ανθεκτική και ακριβής, χωρίς να θερμαίνει τα γύρω μέταλλα με συνέπεια να χάσουν τις ιδιότητές τους.

Ο τροχός του συμπιεστή, επειδή καταπονείται λιγότερο, γίνεται χυτός από ντουραλουμίνιο σε μήτρες από ελαστικό και στη συνέχεια τον κατεργαζόμαστε σε ειδικό μηχάνημα, για να δώσουμε στα πτερύγια την τελική τους μορφή. Ακολουθεί σχολαστικό ζυγοστάθμισμα.

Τα πτερύγια του στροβίλου τα οποία καταπονούνται υπερβολικά από θερμικά φορτία, κατασκευάζονται από ειδικά κράμματα που περιέχουν τιτάνιο, κοβάλτιο, χρώμιο, βολφράμιο, πυρίτιο, μολυβδαίνιο, νικέλιο και βανάδιο.



Σχήμα 3.16

Στα σύγχρονα turbo το συγκρότημα στροβίλου – άξονα ασφαλίζεται με συγκόλληση τριβής. Ο άξονας και η πτερωτή έχουν μια τρύπα στο κέντρο τους. Η πτερωτή περιστρέφεται σε υψηλές ταχύτητες και στη συνέχεια ο άξονας πιέζεται πάνω της με μεγάλη δύναμη. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω της τριβής κατά την επαφή των δυο εξαρτημάτων, προκαλεί την τήξη (λιώσιμο) και τη συγκόλληση του υλικού γύρω από τις τρύπες. Στο σχήμα βλέπετε τα στάδια της διαδικασίας, ενώ στην εικόνα διακρίνεται η λεπτομέρεια του άξονα στο σημείο της συγκόλλησης.

Στα κύρια κουζινέτα θα συναντήσουμε μολυβδαινιούχο ορείχαλκο με επικάλυψη καδμίου με ηλεκτρόλυση. Το πάχος της επικάλυψης φθάνει τα 2 χιλιοστά της ίντσας. Τέλος τα ελατήρια είναι χυτά. Το καπάκι του συμπιεστή γίνεται και αυτό από ντουραλουμίνιο.

3.5 Η ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΗ ΠΟΡΕΙΑ ΤΟΥ TURBO

Στην εξελικτική πορεία του turbo εφαρμόστηκαν διάφοροι τύποι έδρασης του άξονα με ρουλεμάν και κουζινέτα. Μεταξύ τους διέφεραν ως προς τις διαστάσεις τους και την χωροταξία των διατάξεων, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του turbo (αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, ταχύτητες περιστροφής κ.λ.π.). Ωστόσο τα turbo για εφαρμογή σε κινητήρες αυτοκινήτων έγιναν μικρότερα και πιο πολύστροφα, οπότε οι σχεδιαστές τους αναθεώρησαν τις μεθόδους τους. Σήμερα τα turbo

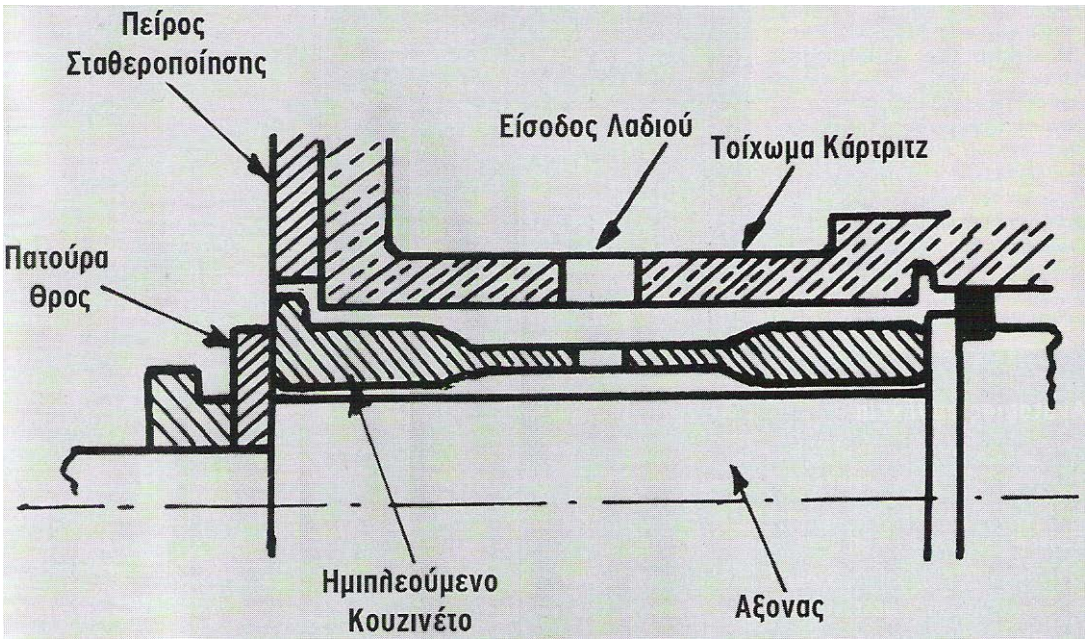
αυτοκινήτων ακολουθούν σε γενικές γραμμές τα παρακάτω χαρακτηριστικά [10].

Τα έδρανα του άξονα βρίσκονται στο σώμα (cartridge), ανάμεσα στις πτερωτές εισαγωγής και εξαγωγής. Στις περισσότερες περιπτώσεις ("συμβατικά" turbo χαμηλού κόστους και μέσης απόδοσης), ο άξονας εδράζεται σε κουζινέτα που λιπαίνονται με υδροδυναμική λίπανση από το κυρίως κύκλωμα λίπανσης του κινητήρα. Δηλαδή ο κινητήρας παρέχει λάδι (συνήθως σε πιέσεις 0,9 – 1,5 bar) στο cartridge, το οποίο διαθέτει ειδικές κοιλότητες και αυλακώσεις για την λίπανση των εδράνων. Τα έδρανα και ο άξονας είναι σχεδιασμένα με ανοχές τέτοιες, ώστε ο άξονας να "επιπλέει" πάνω σε ένα λεπτό φίλμ λαδιού. Τα κουζινέτα είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο (για εφαρμογές όπου δεν αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες) ή από κράματα ορείχαλκου, εμπλουτισμένα με μόλυβδο ή επικαλυμμένα με αλουμίνιο, μόλυβδο ή λευκομέταλλα.

Τα σταθερά κουζινέτα (πρεσσαριστά στο cartridge) ήταν απλά στην κατασκευή και χαμηλού κόστους, όμως τα έβλεπαν "σκούρα" με τους συντονισμούς του άξονα στις υψηλές ταχύτητες. Όταν ο άξονας έφτανε την κρίσιμη ταχύτητά του (κάθε άξονας σε κάποιες ταχύτητες αρχίζει να ταλαντεύεται σαν "διαπασών"), ή όταν χανόταν η ζυγοστάθμιση του στροφείου (ή ρότορα, το σύμπλεγμα άξονα και πτερωτών), ο άξονας εμφάνιζε κραδασμούς. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, το κέντρο περιστροφής του να μετακινείται συνεχώς μέσα στις ανοχές για την λίπανσή του και το σύνολο να χτυπάει στα κουζινέτα. Παρ' ότι ο άξονας είναι βαμμένος (υπόκειται σε επιφανειακή σκλήρυνση) στα σημεία έδρασής του, οι φθορές με αυτό το σύστημα είναι αναπόφευκτες και η διάρκεια ζωής του turbo περιορισμένη.

Λύση στο πρόβλημα δόθηκε μερικώς με την εφαρμογή των πλεούμενων κουζινέτων (full floating bearings). Τα κουζινέτα πλέον δεν είναι πακτωμένα στο σώμα, αλλά έχουν και αυτά ανοχές. Έτσι το λιπαντικό κυκλοφορεί μεταξύ άξονα - κουζινέτων και μεταξύ κουζινέτων - cartridge. Τα κουζινέτα περιστρέφονται με ταχύτητες που μπορεί να φτάσουν το 50% αυτής του άξονα, παρασυρόμενα από τις υδροδυναμικές τριβές του λιπαντικού. Με αυτό τον τρόπο το κουζινέτο λειτουργεί ως "αμορτισέρ", μετατρέποντας τους συντονισμούς του στροφείου σε πλευρικές κινήσεις που τις αποσβένει μέσα στο λιπαντικό. Αυτή η μέθοδος προϋποθέτει περίπλοκες διαμορφώσεις στο cartridge και ειδική κατεργασία του, ενώ συχνά το υλικό κατασκευής του είναι σίδηρος ή μαντέμι, για να αντέχει στη φθορά από την τριβή των κουζινέτων πάνω του.

Η τελευταία παραλλαγή της έδρασης με κουζινέτα είναι τα ημιπλεούμενα (semi-floating bearings), τα οποία είναι στηριγμένα με πείρους ώστε να μην περιστέφονται, αλλά διατηρούν την δυνατότητα να κινούνται κάθετα προς τον άξονα για να μειώνουν τους κραδασμούς και τα κρουστικά φορτία του.



<u>Σχήμα 3.17</u> Η διάταξη έδρασης με ημιπλεούμενο κουζινέτο σε τομή.

<u>Θρος ή Thrust bearing:</u> Πρόκειται για ένα "δίσκο" κατασκευασμένο από κράματα, ανάλογα με των κουζινέτων. Παραλαμβάνει τα αξονικά φορτία του στροφείου, ώστε να μην κινδυνεύουν οι πτερωτές να έρθουν σε επαφή με τα κελύφη τους. Οι επιφάνειές του λιπαίνονται και αυτές υδροδυναμικά και διαθέτουν ειδικές αυλακώσεις και οπές για την κίνηση του λιπαντικού.

<u>Φλίνγκερ (flinger):</u> Είναι ένας ειδικά διαμορφωμένος δακτύλιος που τοποθετείται στον άξονα, και που κοντράρει από τη μία σε μια ειδική "πατούρα" στο καλάμι του και από την άλλη σε έναν αποστάτη πίσω από το συμπιεστή. Το φλίνγκερ περικλείει τις παράλληλες επιφάνειες τριβής του θρος και κοντράρει πάνω τους, ώστε να μη μετακινείται αξονικά ο ρότορας υπό την πίεση των καυσαερίων και του συμπιεσμένου αέρα.

Φυσικά όλα αυτά δεν γίνονται εν ξηρώ, αλλά με τη μεσολάβηση ενός "φιλμ" λιπαντικού που αποτρέπει την απευθείας επαφή του φλίνγκερ με το θρος. Αυτή η αποτρόπαια επαφή οδηγεί στην απότομη και πρόωρη φθορά τους, η οποία αν προχωρήσει μπορεί να σημάνει ακόμη και ολική καταστροφή του turbo, αν οι αξονικές

ανοχές βγουν εκτός προδιαγραφών και οι πτερωτές ακουμπίσουν στα κελύφη.

Επίσης, το φλίνγκερ είναι το εξάρτημα που είναι αρμόδιο για την δυναμική στεγανοποίηση του λαδιού της τουρμπίνας, φέροντας τις ακτινικές οπές που φυγοκεντρίζουν το λάδι, προτού φτάσει στα ελατήρια στεγανοποίησης.

Τον τελευταίο καιρό εφαρμόζονται νέες τεχνικές έδρασης με μειωμένες τριβές, όπως με έδρανα αέρος (ο άξονας αιωρείται σε ένα στρώμα αέρα που εξασφαλίζει μια ειδική αεραντλία) και με μαγνητικά έδρανα. Όμως η πολυπλοκότητα, το βάρος και ο μεγάλος όγκος της κατασκευής τους, προς το παρόν αποτρέπουν τη χρήση τους σε turbo αυτοκίνητα.

Με την εξέλιξη της μεταλλουργίας και της κατασκευής ένσφαιρων τριβέων (ρουλεμάν), κατέστη δυνατή η χρήση τους σε πολύστροφα turbo υψηλών θερμοκρασιών. Το βασικό πλεονέκτημα των ρουλεμάν σε σχέση με τα κουζινέτα είναι οι μειωμένες τριβές και οι πολύ μικρότερες ανοχές. Έτσι αυξάνεται η ευστροφία και η πολυστροφία του turbo και μειώνονται οι απαιτούμενες ανοχές μεταξύ πτερωτών και κελυφών, γεγονός που μειώνει τις απώλειες πίεσης και αυξάνει την απόδοση του στροβιλο-υπερπληρωτή. Η κατασκευή του ρουλεμάν έκανε το θρος περιττό, καθώς οι ράγες στις οποίες κινούνται τα σφαιρίδια, προσφέρουν και αξονική στήριξη στο στροφείο. Επίσης το ρουλεμάν δεν απαιτεί συνεχή παροχή λαδιού υπό πίεση για τη λίπανσή του, παρά μόνο ένα λεπτό σπρέι λαδιού. Έτσι εξαλείφονται πολλά από τα προβλήματα στεγανοποίησης του turbo και κατανάλωσης λαδιού από αυτό, ενώ οι υδροδυναμικές τριβές μειώνονται και οι εσωτερικές απώλειες ισχύος του turbo περιορίζονται.

Ένας στροβιλο-υπερπληρωτής με ένσφαιρους τριβείς στον άξονα ("ρουλεμανάτο" turbo) έχει μεγαλύτερο ρελαντί (idle speed) από ένα "συμβατικό", προσφέροντας μειωμένο χρόνο ανάληψης ωφέλιμης ταχύτητας λειτουργίας (spool-up time) στο πάτημα του γκαζιού. Με άλλα λόγια, τα "ρουλεμανάτα" turbo πάσχουν λιγότερο από το ανεπιθύμητο φαινόμενο της υστέρησης (turbo lag).

Συγκρίνοντας ένα "ρουλεμανάτο" και ένα "συμβατικό" turbo με ολόιδια χαρακτηριστικά, το "ρουλεμανάτο" εμφάνισε 75% μικρότερες εσωτερικές απώλειες ισχύος, λόγω μειωμένων τριβών του άξονα. Ακόμη σε ταχύτητα περιστροφής 150000rpm, η αξονική μετακίνηση του στροφείου ήταν 0,025mm για το "ρουλεμανάτο", ενώ 0,13-0,25mm για το "συμβατικό" με ημιπλεούμενα κουζινέτα, δηλαδή 5-10 φορές μεγαλύτερη.

Η τελειότητα κοστίζει. Έτσι λόγω της ανάγκης αυξημένης αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, τα turbo με

ρουλεμάν έχουν υψηλό κόστος. Επίσης απαιτούν την ύπαρξη υγρόψυκτου cartridge για την αύξηση της μακροζωίας τους, με αποτέλεσμα να ανεβαίνει το κόστος ακόμα περισσότερο. Οι κατασκευαστές στρέφονται προς τα κεραμικά υλικά για την κατασκευή των σφαιριδίων του ρουλεμάν, ώστε να εξαλείψουν τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην εξαγωγή. Προς το παρόν για λόγους αξιοπιστίας και μακροζωίας, οι κατασκευαστές "ρουλεμανάτων" turbo χρησιμοποιούν κεραμικό ρουλεμάν μόνο στην πλευρά του συμπιεστή και διατηρούν το κλασικό κουζινέτο στη "θερμή" πλευρά. Επίσης ενσωματώνουν και ένα θρος για να μειώνουν τις αξονικές καταπονήσεις του ρουλεμάν.

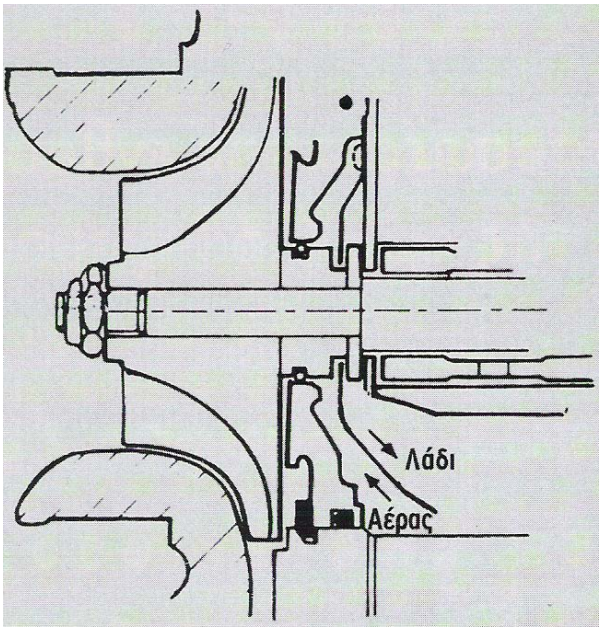
3.6 ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ TURBO

Για την στεγανοποίηση του turbo έχουν εφαρμοστεί κατά καιρούς διάφορες μέθοδοι, όμως η ιδιομορφία των turbo για βενζινοκινητήρες αυτοκινήτων (υψηλές θερμοκρασίες και ταχύτητες λειτουργίας), έχει οδηγήσει στην καθιέρωση εξειδικευμένων διατάξεων [15].

Η πιο συνηθισμένη λύση, είναι η τοποθέτηση στα κελύφη ελατηρίων ίδιων με αυτά που χρησιμοποιούνται στα πιστόνια για τη στεγανοποίηση των αερίων, αλλά με διαστάσεις ανάλογες του άξονα του turbo. Το ελατήριο σχεδόν εφαρμόζει στον άξονα χωρίς να τον ακουμπάει, και αφήνει πολύ μικρά περιθώρια διαφυγής στα αέρια και το λάδι.

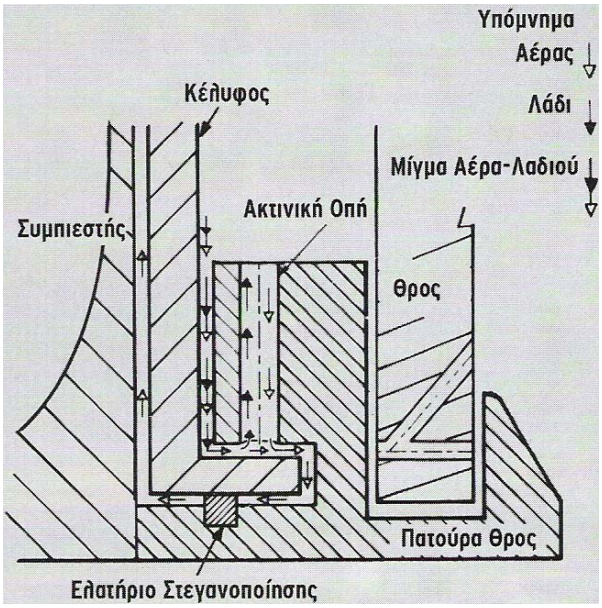
Στην εξαγωγή επικρατούν σχεδόν πάντα συνθήκες υψηλής πίεσης λόγω των καυσαερίων. Τα πράγματα είναι σχετικά απλά, αφού η μικρή ποσότητα καυσαερίων (που εισέρχεται από το κέλυφος στο cartridge) ακολουθεί το λιπαντικό προς την ελαιολεκάνη (κάρτερ) και στη συνέχεια ακολουθεί την ίδια οδό με τις αναθυμιάσεις του, προς την εισαγωγή του κινητήρα.

Στην πλευρά του συμπιεστή η κατάσταση περιπλέκεται. Συχνά επικρατούν συνθήκες υποπίεσης, είτε λόγω της λειτουργίας του κινητήρα χωρίς turbo στις χαμηλές στροφές, ή εξαιτίας της κλειστής πεταλούδας όταν αφήνουμε το γκάζι, ή λόγω των ρευμάτων του αέρα μεταξύ πτερωτής εισαγωγής και κελύφους. Στην προκειμένη περίπτωση, το λιπαντικό αναρροφάται μαζί με καυσαέρια προς τον συμπιεστή και καίγεται από τον κινητήρα. Οι κατασκευαστές έχουν δώσει διάφορες λύσεις που προσφέρουν ικανοποιητική στεγανότητα. Μία από αυτές είναι η προσθήκη στο cartridge ενός ελάσματος κοντά στο στεγανοποιητικό ελατήριο, το οποίο διαχωρίζει το λιπαντικό από τον αέρα και το οδηγεί πίσω στα κουζινέτα.



Σχήμα 3.18
Στο διπλανό σχήμα, διακρίνεται το έλασμα που είναι τοποθετημένο δίπλα στο κουζινέτο στη μεριά του συμπιεστή και εμποδίζει το λιπαντικό να καταλήξει στην πτερωτή.

Η άλλη αποδοτική πρακτική ακούει στο όνομα "δυναμική στεγανοποίηση" (dynamic oil seal), και την πρωτοεφάρμοσε η Garrett. Εδώ η "πατούρα" του άξονα για το θρος είναι διάτρητη ακτινικά, ώστε όταν φτάσει σε αυτό το σημείο το μείγμα αερίων και λιπαντικού, το λάδι (που είναι βαρύτερο) παρασύρεται από τη φυγόκεντρο δύναμη και διαχωρίζεται από τα αέρια, οδηγούμενο μέσα από τις τρύπες προς το εσωτερικό του cartridge.



Σχήμα 3.19
Στο διπλανό σχήμα, διακρίνεται η διάταξη δυναμικής στεγανοποίησης, όπου το περιστρεφόμενο δακτυλίδι με τις ακτινικές οπές φυγοκεντρίζει το λιπαντικό, επιτρέποντας μόνο στο αέριο να φτάσει στον συμπιεστή.

Κατά καιρούς δοκιμάστηκε ένα άλλο είδος στεγανοποίησης, με δακτύλιους από γραφίτη που εφάπτονται στον άξονα με τη βοήθεια προφορτισμένων ελατηρίων στο κέλυφος. Η στεγανοποίηση σε αυτή την περίπτωση είναι σχεδόν τέλεια, ωστόσο οι τριβές είναι μεγάλες και περιορίζουν την ευστροφία του turbo και γι'αυτό η μέθοδος δεν έχει διαδοθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ. ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ-ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ

4.1 ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ

Η ισχύς ενός κινητήρα, είναι αντίστοιχη της ποσότητας του καυσίμου που αυτός διαχειρίζεται. Κατά συνέπεια εξαρτάται και από την παροχή του αναρροφώμενου αέρα. Γενικά επιδιώκεται η αύξηση της ισχύος μέσω υπερπλήρωσης, χωρίς την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του. Τόσο η υπερπλήρωση όσο και οι αυξημένες στροφές, μπορούν να βελτιώσουν την αναπνοή του κινητήρα, ωστόσο και οι δύο υπόκεινται σε τεχνολογικούς περιορισμούς της παραγόμενης ισχύος [4]. Η ισχύς ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης δίδεται από τη σχέση :

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

Όπου K=4 για 4-Χρονο κινητήρα και K=2 για 2-Χρονο.

Για δεδομένο αριθμό κυλίνδρων z και επιφάνεια εμβόλου $A_e=\pi D^2/4$, η αύξηση της ισχύος επιτυγχάνεται κυρίως με δύο μεθόδους [5] : είτε με αύξηση της ταχύτητας περιστροφής (και συνεπώς της μέσης ταχύτητας εμβόλου c_e), είτε με αύξηση της μέσης πραγματικής πίεσης. Ακολουθεί η σύγκριση των δύο μεθόδων.

4.1.1 ΑΥΞΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ

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

$$F_l = -m_l r\omega^2 (b/r\omega^2)$$

Όπου b η επιτάχυνση του εμβόλου, και m_l το άθροισμα μαζών εμβόλου (m_ε) και διωστήρα (m_δ). Παράλληλα έχουμε σημαντική αύξηση των μηχανικών απωλειών της μορφής :

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

με δ>1. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι στην περίπτωση αύξησης της ταχύτητας περιστροφής (και συνεπώς της μέσης ταχύτητας εμβόλου), απαιτούνται κινούμενα μέρη λιγότερου βάρους, για ελαχιστοποίηση των αδρανειακών φαινομένων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ακριβή σχεδιασμό και υλικά υψηλού κόστους, ενώ κατά τη μελέτη λαμβάνεται υπόψη η σχέση : l•n=σταθ.

Όπου l κάποια χαρακτηριστική διάσταση του κινητήρα, όπως είναι η διάμετρος του εμβόλου D.

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

4.1.2 ΑΥΞΗΣΗ ΜΕΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

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

$$F_g = p_g D^2/4$$

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

Κατά κανόνα οι δυνάμεις εξ' αερίων αντιμετωπίζονται πιο εύκολα, σε σχέση με τις δυναμικές φορτίσεις και συνεπώς η υπερπλήρωση δημιουργεί λιγότερο έντονες συνθήκες καταπονήσεων, σε σχέση με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής.

Για την αντιμετώπιση των φορτίσεων αυτών επιλέγονται κατάλληλα υλικά, ώστε να προκύψει "στιβαρή" κατασκευή που θα αντέχει στις καταπονήσεις. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερο βάρος κινητήρα, όμως κατά κανόνα η τιμή του ειδικού βάρους (kg/kW παραγόμενης ισχύος) μειώνεται, διότι η ισχύς αυξάνεται πολύ περισσότερο.

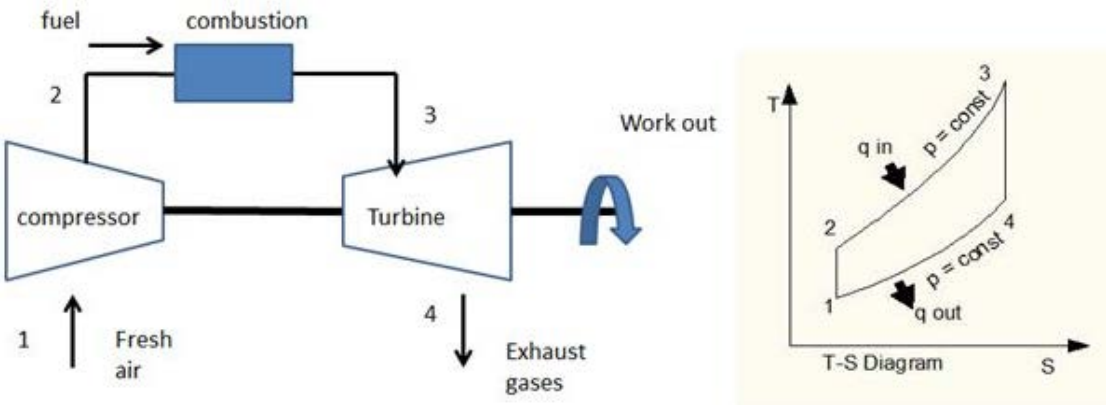
Τυπικές τιμές μέσης πραγματικής πίεσης κυμαίνονται από 10bar (4-X Otto) μέχρι 16bar (υπερπληρούμενοι 4-X Diesel). Ωστόσο, σε ορισμένες κατηγορίες κινητήρων Diesel όπως οι ναυτικοί, συναντάμε μέσες πιέσεις της τάξεως των 18-25bar (πολύ μεγαλύτερες από το συνηθισμένο), και μάλιστα σε μόνιμες καταστάσεις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

Οι μειωμένες φορτίσεις, το χαμηλότερο ειδικό βάρος και η ευελιξία επιλογής τιμών πίεσης υπερπλήρωσης (σε αντίθεση με τις πιο περιορισμένες τιμές ταχύτητας περιστροφής), καθιστούν την υπερπλήρωση ως την καταλ-

ληλότερη μέθοδο αύξησης ισχύος στις ΜΕΚ. Εκτός αυτού, η υπερπλήρωση μπορεί να εφαρμοστεί πιο εύκολα σε υπάρχοντες κινητήρες, χωρίς να χρειαστεί να γίνει εκ νέου μελέτη και σχεδίαση (όπως θα συνέβαινε αν επιχειρούσαμε να αυξήσουμε την ταχύτητα περιστροφής).

4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟ-ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Το παρακάτω διάγραμμα παριστάνει τις θερμο-δυναμικές μεταβολές [3] τυπικού ζεύγους στροβιλο-υπερπλήρωσης, σε άξονες θερμοκρασίας (T) - εντροπίας (S).



Σχήμα 4.1 Διάταξη στροβιλο-υπερπληρωτή και θεωρητικό διάγραμμα μεταβολών των T-S.

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής για τον συμπιεστή έχει ως εξής :

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

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

Εισάγοντας την έννοια της ενθαλπίας ανακοπής h_o έχουμε ότι :

$$h_o = h + C^2/2$$

Αγνοώντας τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας ως πρακτικά αμελητέα, η εξίσωση του συμπιεστή καταλήγει ως εξής :

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

Με ανάλογο τρόπο έχουμε και την εξίσωση του στροβίλου :

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

Ορίζουμε ως ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή το πηλίκο :

$$\eta_{iC}=\frac{\text{ισεντροπικό έργο}}{\text{πραγματικό έργο}}=\frac{h'_{02}-h_{01}}{h_{02}-h_{01}}=\frac{T'_{02}-T_{01}}{T_{02}-T_{01}}$$

Όπου η τρίτη ισότητα ισχύει για σταθερό c_p.

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

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

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

Όπου $P_{02}=P_{02'}$. Οπότε ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή γίνεται :

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

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

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

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

Τέλος, ορίζεται ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή :

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

Ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή συνδέεται με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης μέσω της παρακάτω σχέσης :

$$\eta_{iC} = \frac{\left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a - 1}} - 1}{\left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a \eta_{C\infty}}} - 1}$$

Η θερμοκρασία T_2 στην έξοδο του συμπιεστή μπορεί να υπολογιστεί μέσω του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης "στατικά προς στατικά/static to static" :

$$\eta_{iC\ s\text{-}s} = \frac{T_2' - T_1}{T_2 - T_1}$$

Επομένως :

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

Για τον στρόβιλο ορίζονται ανάλογες σχέσεις. Δηλαδή έχουμε :

Ισεντροπικός βαθμός στροβίλου "ολικά προς ολικά" :

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

Ισεντροπικός βαθμός στροβίλου "ολικά προς στατικά" :

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

Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου :

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

Ενώ η θερμοκρασία T_4 στην έξοδο του στροβίλου, υπολογίζεται με την βοήθεια του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης “στατικά προς στατικά” :

$$\eta_{iT\,s\text{-}s} = \frac{T_3' - T_4}{T_3 - T_4'}$$

Επομένως :

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

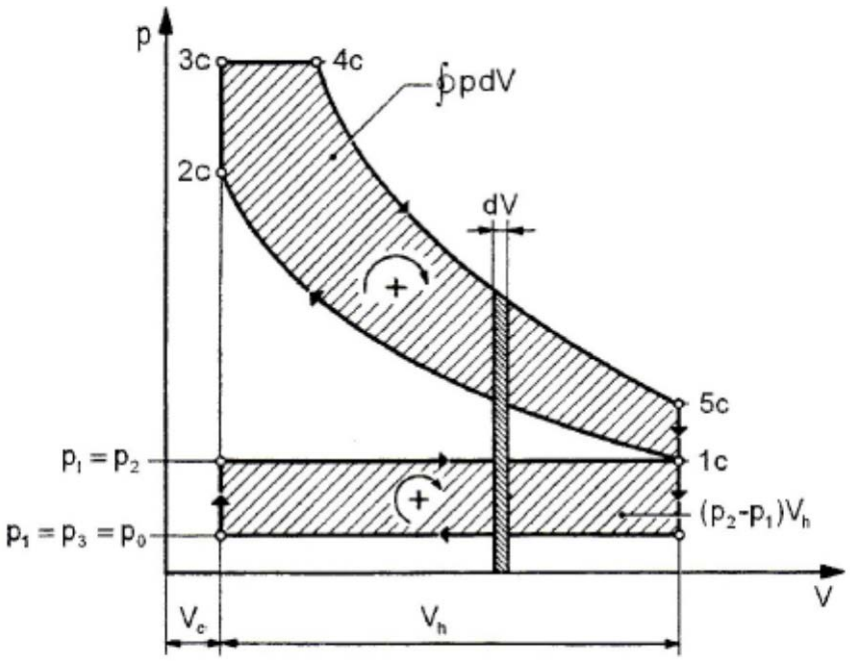
4.3 ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ

Το μέγεθος του συμπιεστή είναι πολύ σημαντικό για το ταίριασμα κινητήρα – “συστήματος υπερπλήρωσης” και καθορίζεται από παράγοντες όπως : η παροχή εργαζόμενου μέσου και ο λόγος πιέσεων P_2/P_1 κατάντη και ανάντη του συμπιεστή αντίστοιχα.

4.3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ

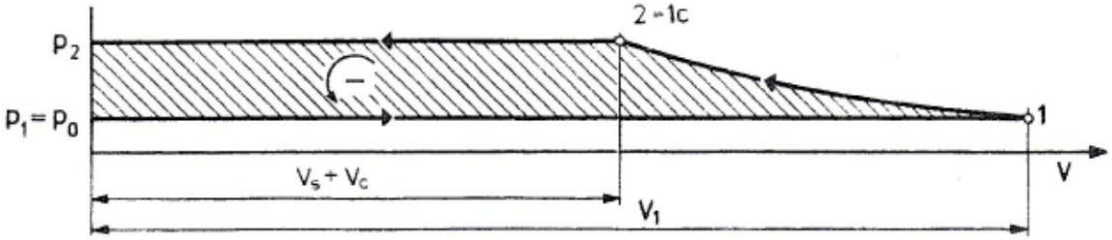
Στο διάγραμμα 4.1 παριστάνεται το εξιδανικευμένο δυναμοδεικτικό διάγραμμα τετράχρονου μηχανικά υπερπληρούμενου κινητήρα [5]. Το ενδεικνυμένο έργο W_{id} του ιδανικού κινητήρα, περιέχει τον όρο πίεσης $P \bullet dV$ και τον όρο του βρόγχου αναρρόφησης $(P_2\text{-}P_1)V_h$:

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



<u>Διάγραμμα 4.1</u> Εξιδανικευμένο δυναμοδεικτικό διάγραμμα 4-χρονου μηχανικά υπερπληρούμενου κινητήρα.

Το θετικό έργο αναρρόφησης του 4-χρονου κινητήρα, πρέπει να εξασφαλιστεί από το έργο που καταναλώνει ο συμπιεστής. Ο όγκος V_h+V_c του κυλίνδρου του ιδανικού κινητήρα πληρώνεται εκ νέου με εργαζόμενο μέσο, οπότε η επιφάνεια που αντιστοιχεί στο έργο του συμπιεστή (διάγραμμα 4.2), πρέπει να επεκταθεί μέχρι τον κατακόρυφο άξονα.



Διάγραμμα 4.2 Καμπύλη P-V συμπιεστή.

Το έργο της ισεντροπικής συμπίεσης είναι :

$$W_{iC}=p_1V_1\frac{\gamma}{\gamma-1}[1-(\frac{p_2}{p_1})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}]$$

Στην παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται η πίεση ανακοπής (στατική + δυναμική πίεση). Εφόσον $P_2/P_1>0$, το έργο συμπίεσης είναι αρνητικό.

Κατά την ισεντροπική συμπίεση έχουμε μεταβολή ενθαλπίας :

$$\Delta h_{iC}=c_p(T_2'-T_1)=c_pT_1[(\frac{p_2}{p_1})^{\frac{\gamma_a-1}{\gamma_a}}-1]$$

Και το ισεντροπικό έργο συμπίεσης είναι :

$$W_{iC}=mRT_1\frac{\gamma_a}{\gamma_a-1}[1-(\frac{p_2}{p_1})^{\frac{\gamma_a-1}{\gamma_a}}]=-m\Delta h_{iC}$$

Συνήθως το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω εξίσωση παραλείπεται.

Το έργο πραγματικής συμπίεσης είναι :

$$W_c=\frac{m\Delta h_{iC}}{\eta_{iC}}$$

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

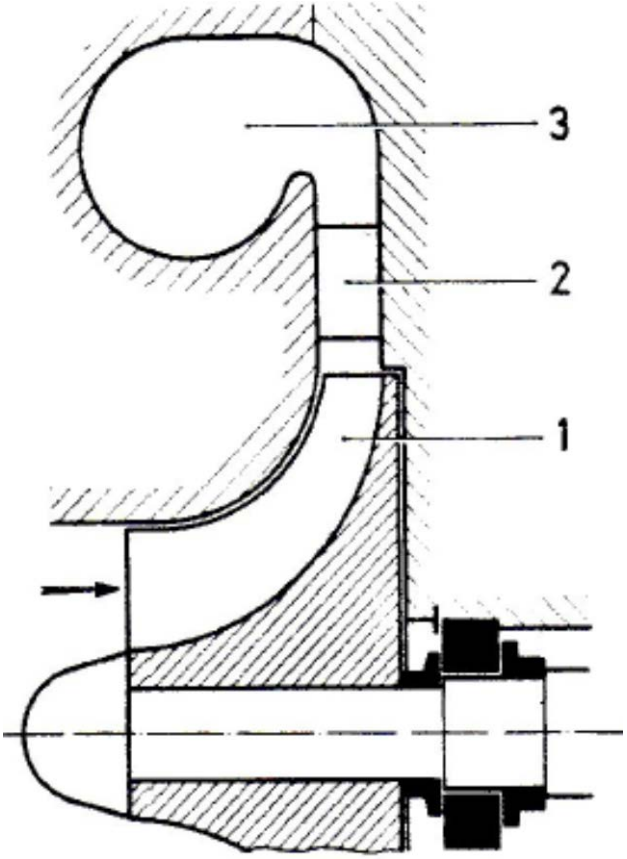
$$P_c=\dot{W}_{iC}=\frac{\dot{m}\Delta h_{iC}}{\eta_{iC}}$$

4.3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ

Στις εφαρμογές στροβιλο-υπερπλήρωσης κινητήρων οχημάτων, χρησιμοποιούνται ακτινικοί συμπιεστές. Ονομάζονται ακτινικοί (φυγοκεντρικοί), λόγω της ακτινικής εξόδου του αέρα κατάντη. Η κατεύθυνση της εισερχόμενης ροής είναι αξονική [5].

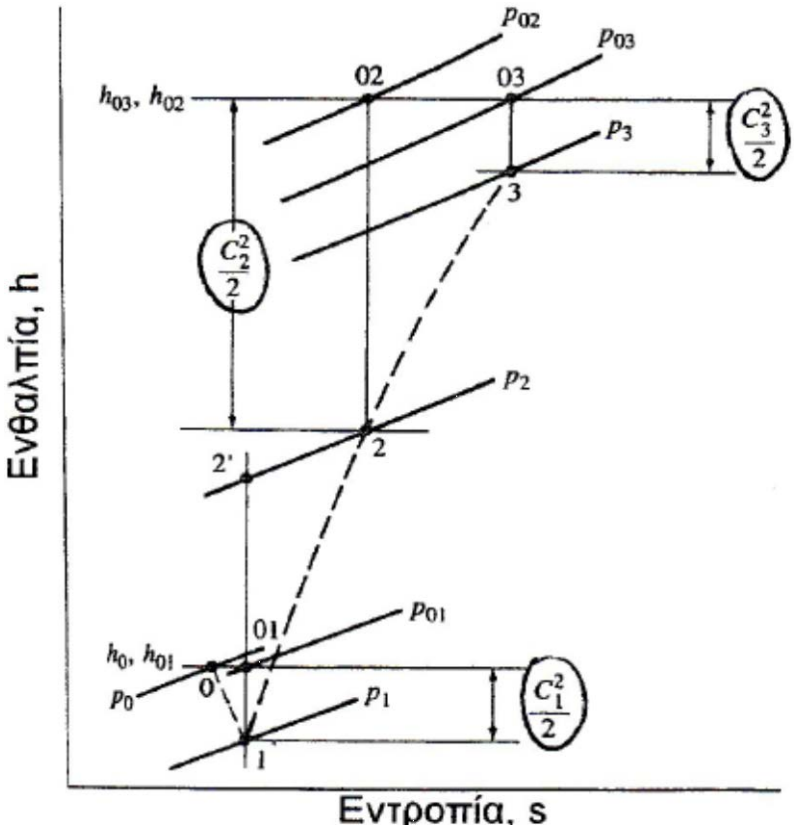
Οι ακτινικοί συμπιεστές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά σε εφαρμογές στροβιλο-υπερπλήρωσης με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης, ενώ ο λόγος πίεσης φτάνει μέχρι το 3,5:1 ανά βαθμίδα.

Στο σχήμα 4.2 διακρίνουμε τα κύρια μέρη ενός ακτινικού συμπιεστή. Διαμέσου της πτερωτής (1) η ταχύτητα του ρευστού αυξάνει, λόγω μεταφοράς ορμής από τα πτερύγιά της και στην συνέχεια η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε στατική πίεση στο διαχύτη (2) και στο σπειροειδές κέλυφος (3).



Σχήμα 4.2 Τμήματα ακτινικού συμπιεστή: 1.πτερωτή, 2.διαχύτης, 3.σπειροειδές κέλυφος.

Στο παρακάτω διάγραμμα 4.3 παριστάνεται η καμπύλη h – s (ενθαλπία – εντροπία) τυπικού ακτινικού συμπιεστή.



<u>Διάγραμμα 4.3</u> Καμπύλες ενθαλπίας - εντροπίας ακτινικού συμπιεστή.

Ο αέρας από την κατάσταση 0 (περιβάλλον) επιταχύνεται στη εισαγωγή (πίεση P_1, ταχύτητα C_1). Η ολική ενθαλπία (κατάσταση ανακοπής 01) διαφέρει από την στατική ενθαλπία κατά τον όρο κινητικής ενέργειας $(C_1)^2/2$.

Στη συνέχεια το ρευστό συμπιέζεται στην πτερωτή και μεταβαίνει στην κατάσταση 2 (P_2,C_2). Η αντίστοιχη ισεντροπική συμπίεση έχει κατάσταση εξόδου τη 2'. Με 2' συμβολίζεται η αντίστοιχη ισεντροπική κατάσταση συμπίεσης, ενώ η κατάσταση 02 αναφέρεται στα μεγέθη ανακοπής.

Στο κέλυφος (μεταβολή 2-3), το μεγαλύτερο ποσοστό κινητικής ενέργειας ρευστού στην έξοδο της πτερωτής (όρος $(C_2)^2/2$), μετατρέπεται σε αύξηση στατικής πίεσης από P_2 σε P_3 (επιβράδυνση της ροής).

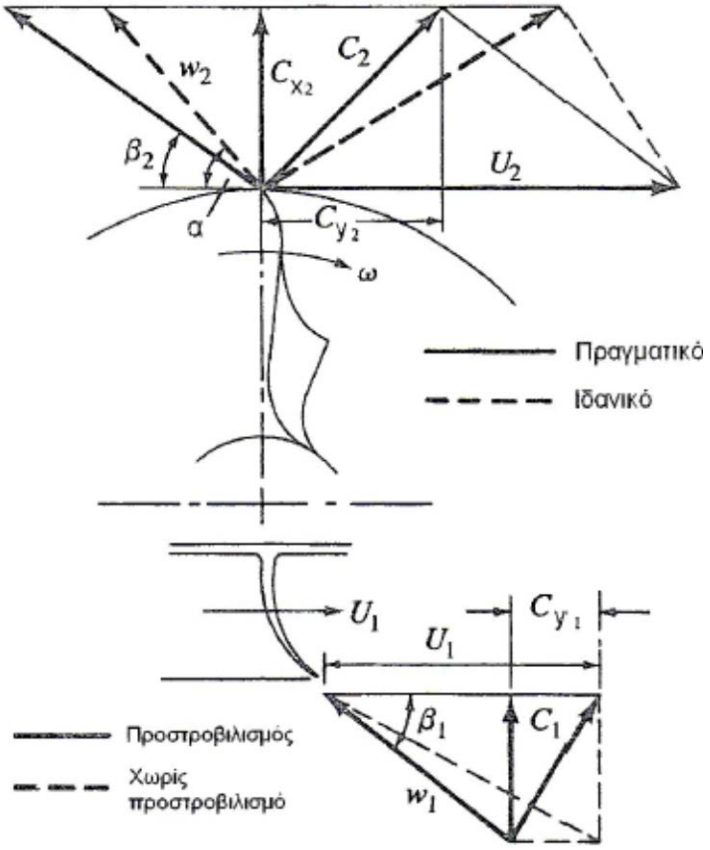
Στην έξοδο του κελύφους (P_3,C_3) έχουμε πλέον χαμηλή κινητική ενέργεια και πίεση ανακοπής P_{03} πολύ μικρότερη της P_{02} (μη αναστρέψιμη διεργασία).

Η βασική εξίσωση υπολογισμού αυτού του είδους συμπιεστών, είναι η γνωστή από τις στροβιλομηχανές εξίσωση Euler (σχήμα 4.3) :

$$-W_c = M\omega_{TC} = m\,\omega_{TC}(r_2C_{y2} \pm r_1C_{y1}) = m(U_2C_{y2} \pm U_1C_{y1})$$

Οι δείκτες 1 και 2 αντιστοιχούν στην είσοδο και στην έξοδο της πτερωτής αντίστοιχα. Με U συμβολίζεται η

εφαπτομενική και με C η απόλυτη ταχύτητα, ενώ r είναι η αντίστοιχη ακτίνα (εισόδου/εξόδου) της πτερωτής.



<u>Σχήμα 4.3</u> Τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο (1) και έξοδο (2) πτερωτής ακτινικού συμπιεστή.

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

$$-\dot{W}_c=\dot{m}(h_{03}-h_{01})=\dot{m}c_p(T_{03}-T_{01})=\dot{m}(U_2C_{y2}\pm U_1C_{y1})$$

Άρα :

$$\Delta T_c=T_{03}-T_{01}=\frac{U_2C_{y2}\pm U_1C_{y1}}{c_p}$$

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

$$-\dot{W}_C=\dot{m}U_2(1\pm\frac{C_{x2}}{U_2}\cot\beta_2)$$

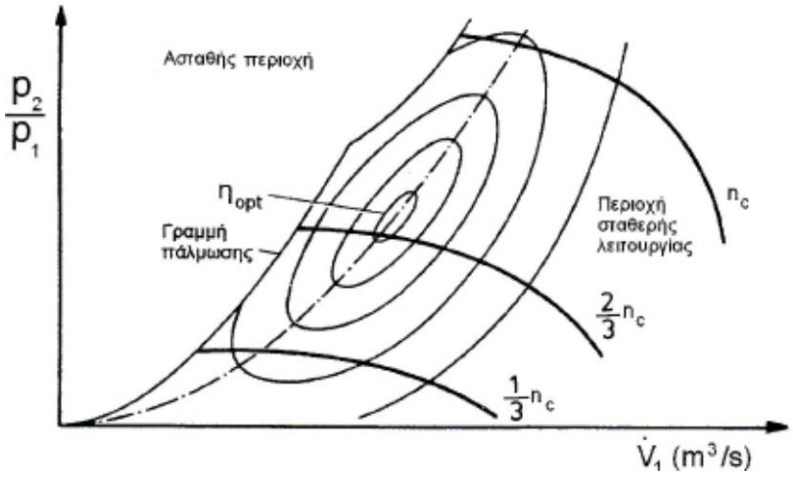
Στην ιδανική περίπτωση (σχήμα 4.3 - διακεκομμένη γραμμή), η γωνία β_2 ταυτίζεται με την γωνία α του πτερυγίου. Στην πραγματικότητα όμως εμφανίζεται ολίσθηση, οπότε η β_2 είναι μικρότερη.

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

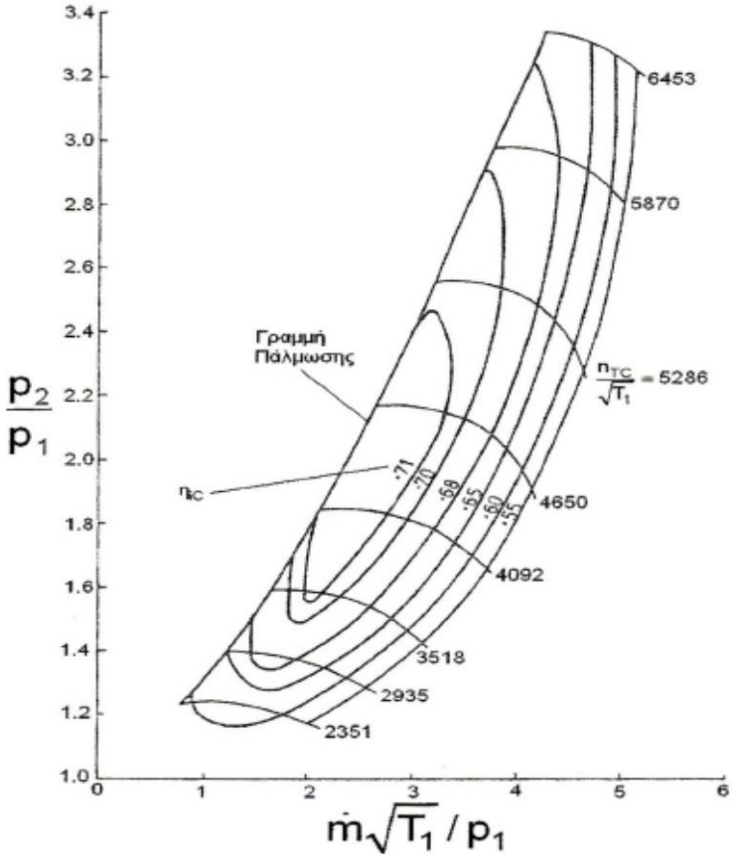
Τέλος, η παροχή ενέργειας (συνεπώς και ο λόγος πιέσεων) είναι ανάλογη του τετραγώνου της περιφερειακής ταχύτητας.

4.3.3 ΧΑΡΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΚΤΙΝΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ

Στα διαγράμματα 4.4 και 4.5 δίνονται χάρτες λειτουργίας τυπικού ακτινικού συμπιεστή, συναρτήσει της παροχής όγκου αέρα (είτε καθαρή είτε σε μορφή αδιαστατοποιημένης μάζας).



Διάγραμμα 4.4 Χάρτης λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή.



Διάγραμμα 4.5 Χάρτης λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή.

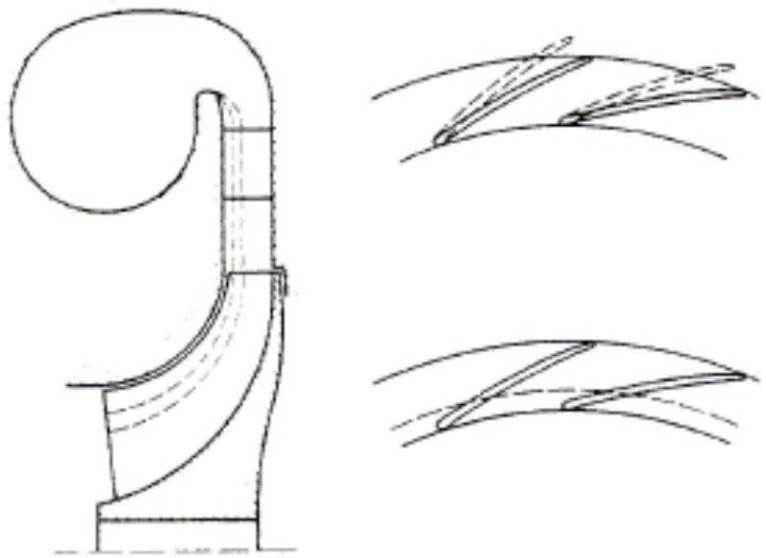
Στους χάρτες αυτούς διακρίνονται δύο περιοχές, μία ευσταθούς και μία ασταθούς λειτουργίας [2]. Οι δύο περιοχές διαχωρίζονται από τη γραμμή πάλμωσης. Όταν το σημείο λειτουργίας του συμπιεστή βρεθεί αριστερά της γραμμής αυτής, εμφανίζονται ανεπιθύμητα φαινόμενα τα οποία διαταράζουν σημαντικά την λειτουργία του (πάλμωση - περιστροφική αποκόλληση). Με άλλα λόγια, δεν γίνεται να επιτευχθεί υψηλός λόγος πίεσης με μικρή παροχή.

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

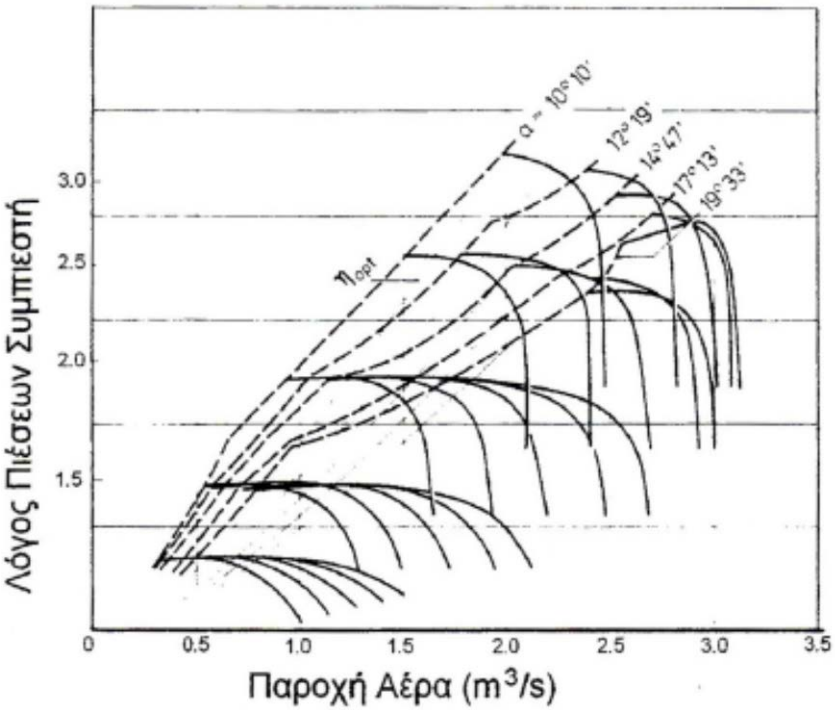
Αντίθετα, για ανοιγμένη παροχή κοντά στη γραμμή πάλμωσης, οι καμπύλες σταθερής ταχύτητας είναι σχεδόν οριζόντιες (κάποιες φορές ανεβαίνουν ελαφρώς), ενώ πέφτουν απότομα καθώς απομακρύνονται από αυτήν.

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

Για δεδομένες διαμέτρους περιβλήματος και πτερωτής, ο χάρτης του συμπιεστή μπορεί να μεταβληθεί από ποικίλους κατασκευαστικούς παράγοντες, όπως είναι η γωνία α των ρυθμιστικών πτερυγίων στην είσοδο του διαχύτη, το διάκενο διαχύτη - πτερωτής, η μορφή του διαχύτη (με ή χωρίς πτερύγια), η γεωμετρία του κ.α. (σχήματα 4.4 , 4.5).

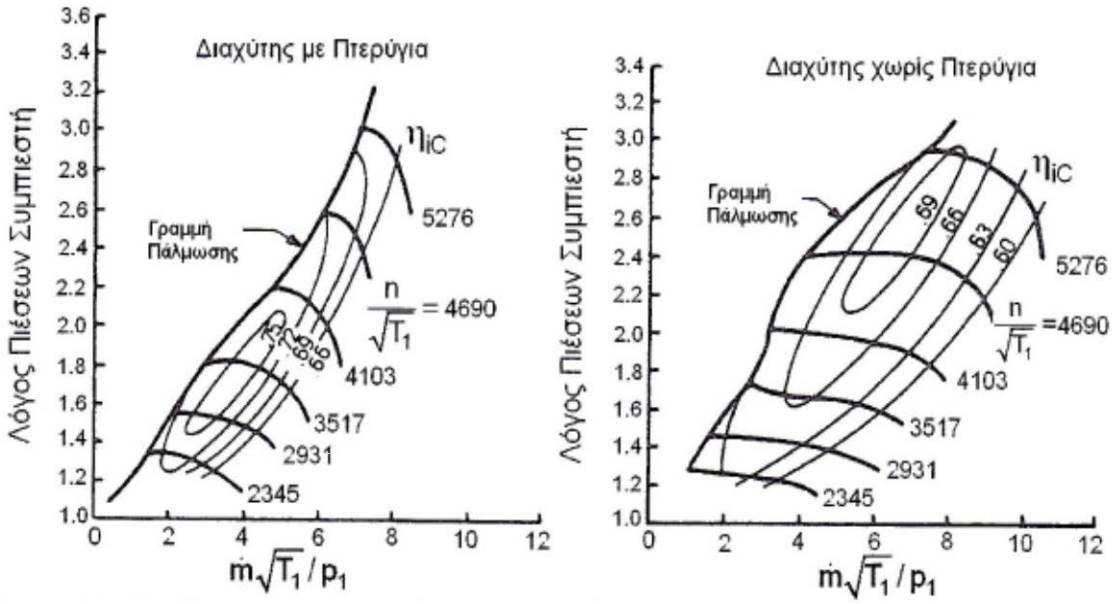


<u>Σχήμα 4.4</u> Ρύθμιση της παροχής του συμπιεστή με μεταβολή της γεωμετρίας πτερωτής – διαχύτη.



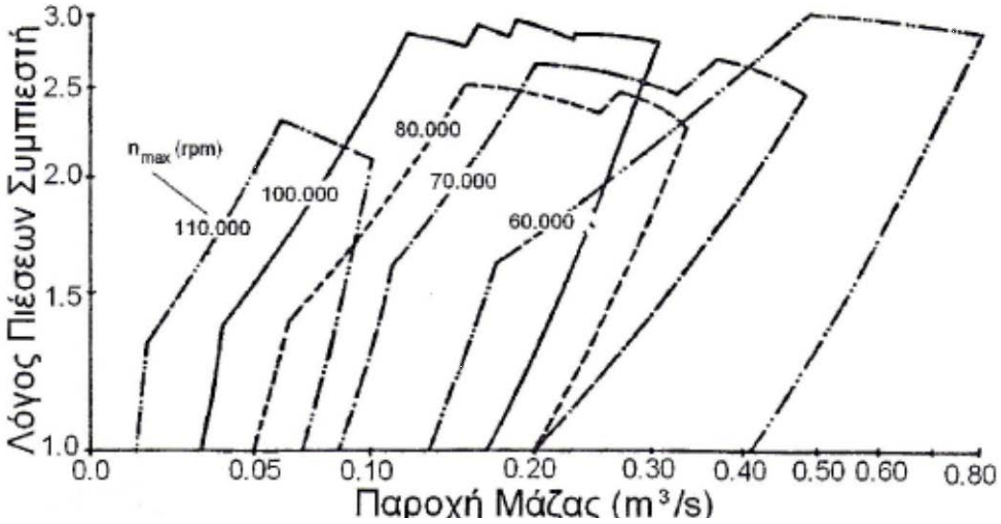
<u>Σχήμα 4.5</u> Επίδραση της γωνίας των πτερυγίων του διαχύτη στο χάρτη του συμπιεστή (όπου η_{opt} ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης).

Στο διάγραμμα 4.6 συγκρίνονται οι χάρτες λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή με διαχύτη, χωρίς και με πτερύγια. Ο διαχύτης χωρίς πτερύγια οδηγεί σε μεγαλύτερο εύρος παροχών αέρα και άρα μεγαλύτερο φάσμα σημείων λειτουργίας στο χάρτη. Για τον λόγο αυτό, εφαρμόζεται σε οχήματα, αν και εμφανίζει ως μειονέκτημα χαμηλότερους βαθμούς απόδοσης.



<u>Διάγραμμα 4.6</u> Χάρτες λειτουργίας ακτινικού συμπιεστή με διαχύτη, με ή χωρίς πτερύγια.

Τέλος, στο διάγραμμα 4.7 απεικονίζεται οικογένεια ακτινικών συμπιεστών και σκιαγραφείται το φάσμα λειτουργίας της κάθε μονάδας.



Διάγραμμα 4.7 Οικογένεια ακτινικών συμπιεστών.

4.4 ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ

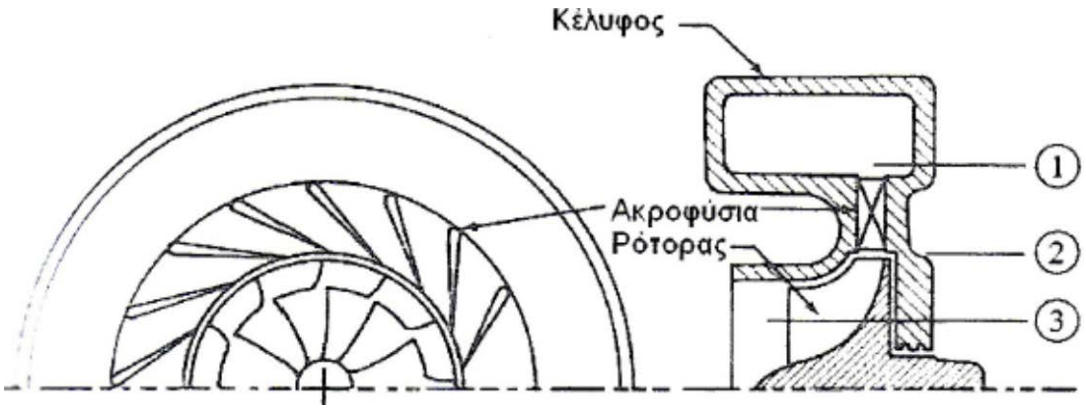
Στις εφαρμογές στροβιλο-υπερπλήρωσης κινητήρων οχημάτων, χρησιμοποιούνται ακτινικοί στρόβιλοι. Οι στρόβιλοι είναι προορισμένοι να λειτουργούν σε σταθερό σημείο λειτουργίας. Συνεπώς, η κατάλληλη σύνδεσή τους στην εξαγωγή κινητήρων που χαρακτηρίζεται από "ιδιαίτερες" συνθήκες, είναι εκ των πραγμάτων δύσκολη. Ωστόσο, η απόδοση του στροβίλου παραμένει ικανοποιητική σε κάθε περίπτωση.

4.4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ

Ο ακτινικός στρόβιλος έχει μορφή φυγοκεντρικού συμπιεστή. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι εδώ η ροή εισέρχεται ακτινικά με κατεύθυνση προς το κέντρο της πτερωτής, ενώ έχουμε την ύπαρξη πτερυγίων ακροφύσιου (αντί διαχύτη) μεταξύ πτερωτής και κελύφους [5].

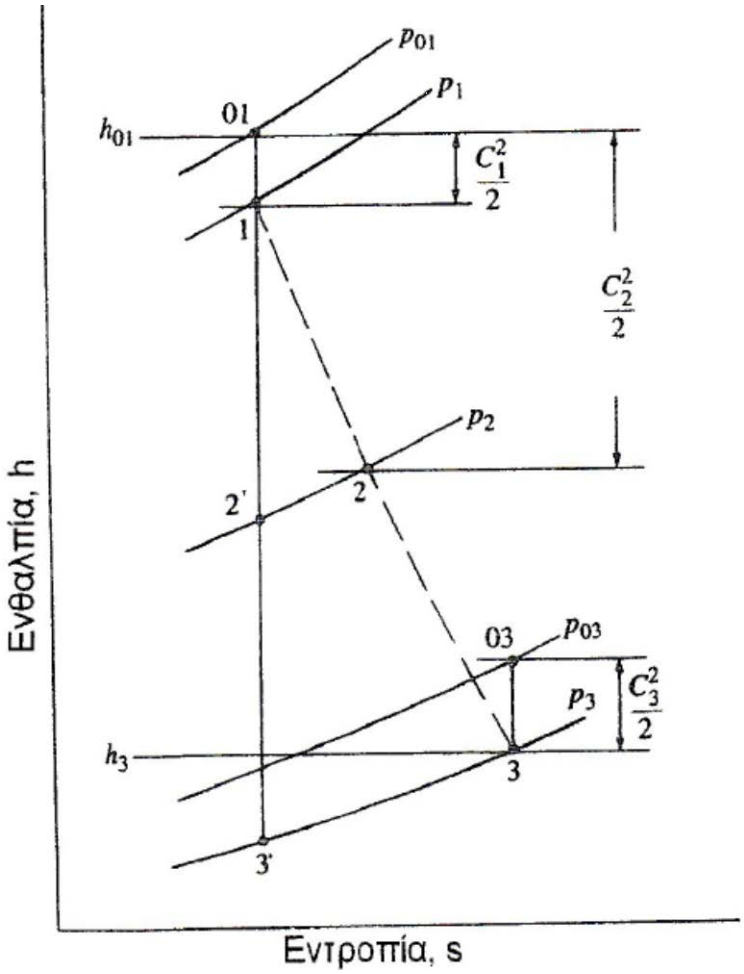
Ο ακτινικός στρόβιλος μπορεί να λειτουργήσει με υψηλούς λόγους αποτόνωσης (έως 4:1) και με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης, καλύπτοντας ευρύ φάσμα εφαρμογών στις ΜΕΚ. Επιπλέον η κατασκευή του είναι ευκολότερη και οικονομικότερη σε σχέση με τον αξονικό στρόβιλο, έχοντας μικρότερες διαστάσεις.

Κύρια μέρη του ακτινικού στροβίλου είναι το κέλυφος, τα ακροφύσια εισόδου και η πτερωτή (σχήμα 4.6). Σε ακτινικούς στροβίλους μικρών διαστάσεων παραλείπονται τα ακροφύσια, για βελτίωση των συνθηκών ροής. Στην περίπτωση αυτή το κόστος κατασκευής μειώνεται, με τίμημα μια μικρή μείωση στο βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 4.6 Τμήματα ακτινικού στροβίλου: 1.κέλυφος, 2.ακροφύσια εισόδου, 3. κινητή πτερύγωση.

Στο διάγραμμα 4.8 παρουσιάζονται οι μεταβολές της ροής των καυσαερίων διαμέσου του στροβίλου σε άξονες h-s. Τα ακροφύσια (μεταβολή 01-2) επιταχύνουν τη ροή με ελάχιστη πτώση ολικής πίεσης. Η μείωση της ολικής ενθαλπίας ανακοπής και η παραγωγή ωφέλιμου έργου, συντελείται σχεδόν αποκλειστικά στην κινητή πτερύγωση (μεταβολή 2-3). Συνεπώς, η πτερωτή κατασκευάζεται ώστε να έχουμε την ελάχιστη κινητική ενέργεια καυσαερίων στην έξοδό της.

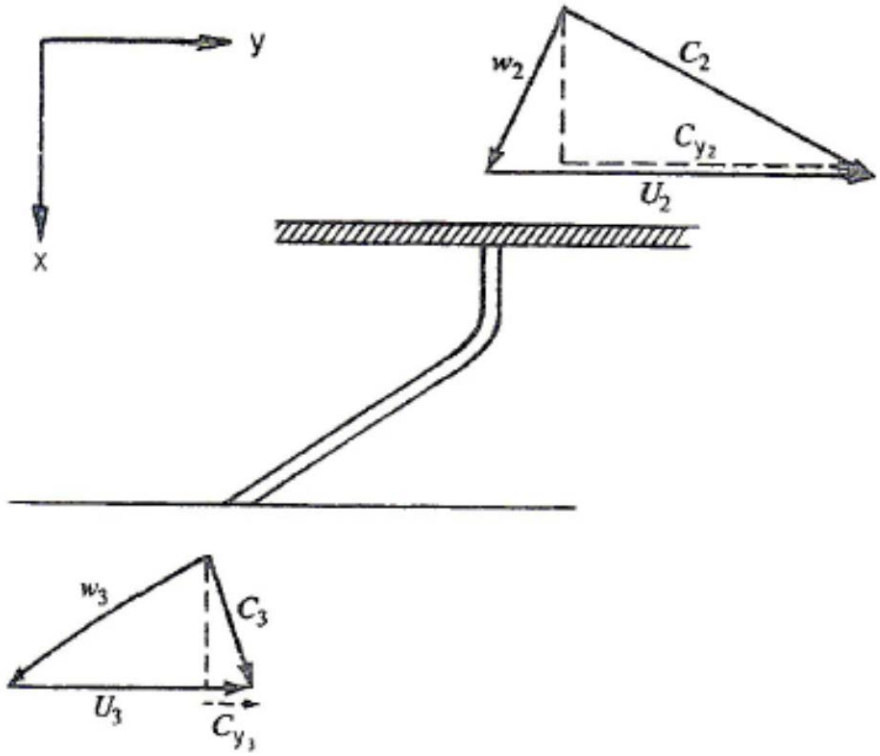


Διάγραμμα 4.8 Μεταβολή ενθαλπίας - εντροπίας ακτινικού στροβίλου.

Από την εξίσωση Euler έχουμε :

$$\dot{W}_T = M\omega_{TC} = \dot{m}\omega_{TC}(r_2C_{y2} - r_3C_{y3}) = \dot{m}(U_2C_{y2} - U_3C_{y3})$$

Όπου M είναι η στρεπτική ροπή του στροβίλου (ίση με την αντίστοιχη του συζευγμένου συμπιεστή σε μόνιμη λειτουργία), ω_{Tc} η γωνιακή ταχύτητα της ατράκτου, C η απόλυτη και U η περιφερειακή ταχύτητα καυσαερίων όπως αυτές παριστάνονται στα τρίγωνα ταχυτήτων (σχήμα 4.7). Το μέγιστο παραγόμενο έργο προκύπτει για αξονική ταχύτητα καυσαερίων στην έξοδο.



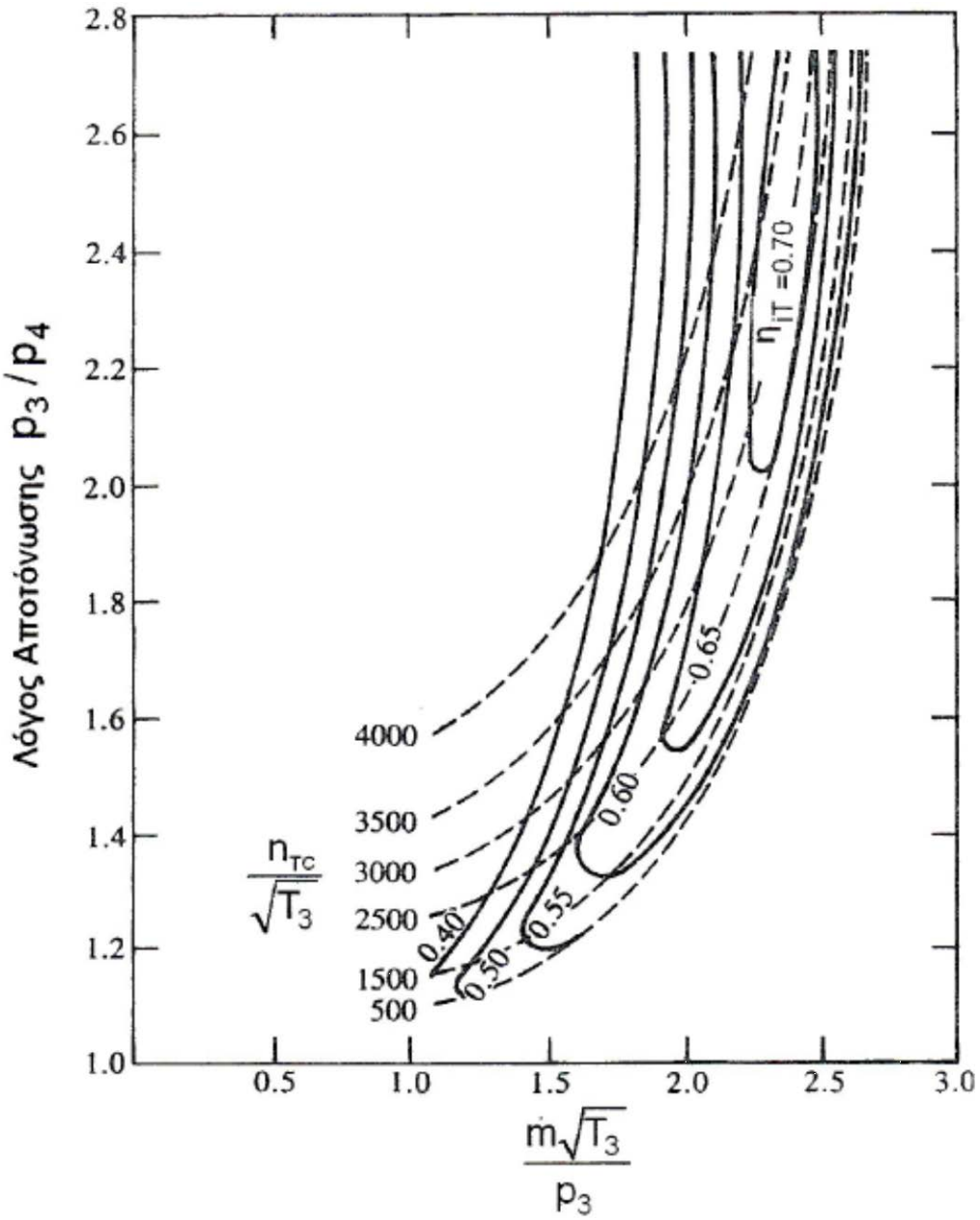
<u>Σχήμα 4.7</u> Τρίγωνα ταχυτήτων ακτινικού στροβίλου στην είσοδο (2) και στην έξοδο (3) της πτερωτής.

Το παραγόμενο έργο είναι :

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

Συνήθως χρησιμοποιούμε αδιάστατες παραμέτρους για τα μεγέθη που αναφέρονται στη λειτουργία του στροβίλου (παροχή, λόγος πιέσεων, ταχύτητα περιστροφής, ισεντροπικός βαθμός απόδοσης, διάμετρος πτερωτής).

Έτσι το πεδίο λειτουργίας ενός ακτινικού στροβίλου, περιγράφεται από καμπύλες ανοιγμένης ταχύτητας περιστροφής και ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της ανοιγμένης παροχής καυσαερίων και του λόγου αποτόνωσης P3/P4 (διάγραμμα 4.9).



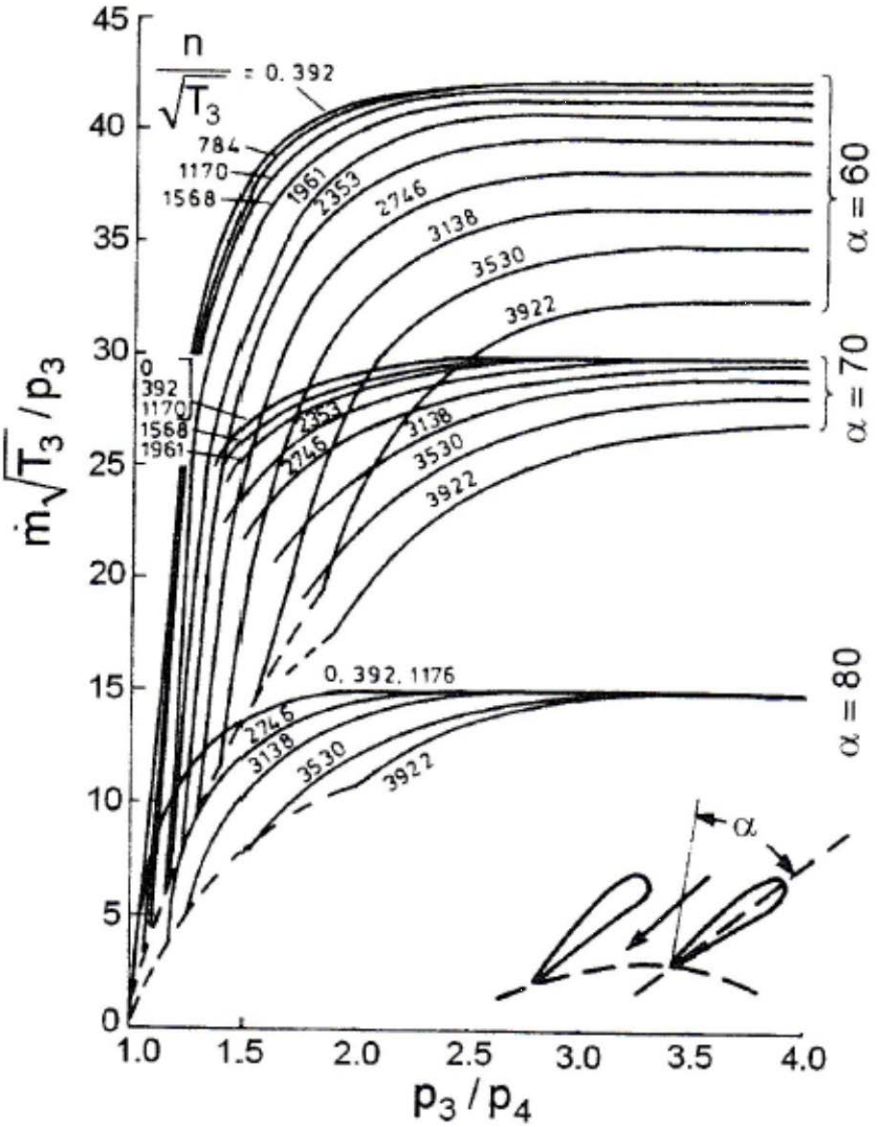
Διάγραμμα 4.9 Χάρτης λειτουργίας ακτινικού στροβίλου.

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

4.4.2 ΡΥΘΜΙΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΩΝ

Λόγω των μεταβαλλόμενων συνθηκών λειτουργίας των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ., επιδιώκουμε να ρυθμίσουμε τη χαρακτηριστική καμπύλη του στροβίλου, ώστε να έχουμε σε κάθε περίπτωση βέλτιστο ταίριασμα με τον συμπιεστή και τον κινητήρα. Αυτό, μπορεί εκτός των άλλων να επιτευχθεί δια της ρύθμισης της γωνίας των ακροφυσίων, κάτι που μεταβάλλει ολόκληρο τον χάρτη λειτουργίας του,

με αποτέλεσμα ευρύ φάσμα συνδυασμών λόγου πίεσης – ανοιγμένης παροχής (διάγραμμα 4.10 για γωνίες ακροφυσίου α=60, 70, 80°).



<u>Διάγραμμα 4.10</u> Χάρτης ακτινικού στροβίλου για διάφορες γωνίες ακροφυσίου α.

4.4.3 ΒΑΘΜΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

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

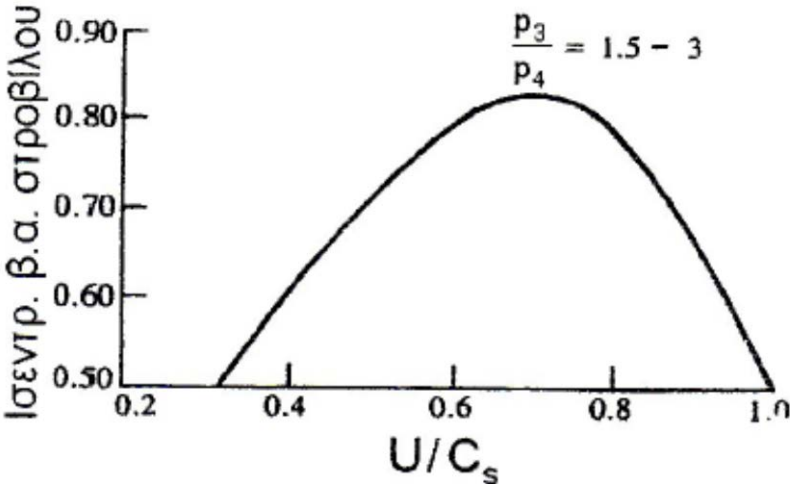
$$\Lambda = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} = \frac{h_2 - h_3}{h_{01} - h_{03}}$$

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

4.4.4 ΙΣΕΝΤΡΟΠΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται από τον τύπο του στροβίλου. Έτσι, σε μεγάλα μεγέθη έχουμε υψηλούς βαθμούς απόδοσης, λόγω αναλογικά μειωμένων απωλειών διακένου μεταξύ πτερυγίων και κελύφους. Σε κάθε περίπτωση, μειουμένου του μεγέθους τους, οι ακτινικοί στρόβιλοι εμφανίζουν λιγότερο δραστική πτώση του βαθμού απόδοσής τους και γι' αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως σε σχέση με τους αξονικούς. Στο διάγραμμα 4.9 προηγούμενης σελίδας, διακρίνονται οι καμπύλες βαθμού απόδοσης στο χάρτη του στροβίλου.

Στους στροβίλους, συνηθίζεται επίσης να παρίσταται γραφικά ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει του λόγου ταχυτήτων πτερυγίου U/C_s (blade speed ratio) και για διάφορους λόγους αποτόνωσης (διάγραμμα 4.11).



Διάγραμμα 4.11 Καμπύλη ισεντροπικού βαθμού απόδοσης στροβίλου συναρτήσει του λόγου ταχυτήτων πτερυγίου.

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

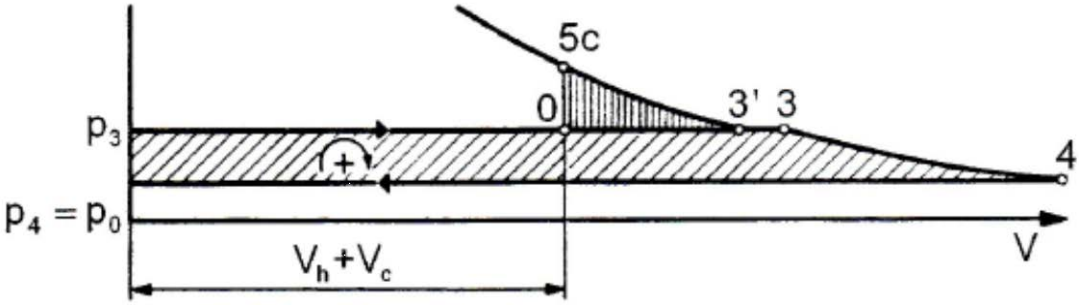
$$C_S=\sqrt{2(h_{03}-h_4')}=\sqrt{2c_pT_{03}(1-(\frac{p_4}{p_{03}})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

Με γνωστά τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο T_3 και το λόγο αποτόνωσης P_3/P_4, προσδιορίζεται η ταχύτητα C_s και επιλέγεται η διάμετρος της πτερωτής (για γνωστή ταχύτητα περιστροφής n), που δίδει το βέλτιστο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη

για το ταίριασμα συμπιεστή – στροβίλου, ώστε ο τελευταίος να λειτουργεί στο **βέλτιστο βαθμό απόδοσης**.

4.4.5 ΙΣΧΥΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Στην στροβιλο-υπερπλήρωση, η πίεση εισόδου του στροβίλου P_3 είναι συνήθως μικρότερη της πίεσης εισόδου του συμπιεστή P_2. Αυτό αποτελεί αναγκαία συνθήκη στους 2-χρονους κινητήρες, ώστε να έχουμε απόπλυση του κυλίνδρου. Στους 4-χρονους κινητήρες η P_3 γίνεται ίση (ή μεγαλύτερη) της P_2 μόνον στα χαμηλά φορτία. Στο διάγραμμα 4.12 έχουμε τη μεταβολή P-V του στροβίλου [5].



<u>Διάγραμμα 4.12</u> Καμπύλη P-V στροβίλου.

Από την εξαγωγή του κυλίνδρου έως την είσοδο του στροβίλου, θεωρούμε ότι ο εκθέτης πολυτροπικής αποτόνωσής του n_T, είναι λίγο μικρότερος από το γ και ισχύει ($1<n_T<\gamma$). Το έργο που αντιστοιχεί στη κατακόρυφα διαγραμμισμένη περιοχή 5c-3-0 στο διάγραμμα 4.12, μετατρέπεται σε μη εκμεταλλεύσιμη θερμότητα. Γι' αυτό η θερμοκρασία T_3 είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία ισεντροπικής αποτόνωσης μέχρι 3'.

Το έργο της ισεντροπικής αποτόνωσης του καυσαερίου είναι :

$$W_{iT}=mc_P(T_3-T_4)=mRT_3\frac{\gamma}{\gamma-1}[1-(\frac{p_4}{p_3})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}]=mc_PT_3[1-(\frac{p_4}{p_3})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}]$$

με $W_{iT}>0$ εφόσον $P_4/P_3<0$.

Το έργο αποτόνωσης δίδεται από τη σχέση :

$$W_T=m\eta_{iT}\Delta h_{iT}$$

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

$$\Delta h_{iT}=c_pT_3[1-(\frac{p_4}{p_3})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}]$$

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

$$P_T=W_T\dot{m}\eta_{iT}\Delta h_{iT}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
ΤΑΙΡΙΑΣΜΑ (MATCHING) ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι εμβολοφόροι κινητήρες λειτουργούν σε ένα ευρύ πεδίο στροφών, με το αντίστοιχο πεδίο παροχών αέρα να είναι επίσης μεγάλο, ιδίως σε κινητήρες με στραγγαλισμό στην εισαγωγή (Otto) [1]. Από την άλλη πλευρά, η απόδοση των υπερπληρωτών εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης του εργαζόμενου μέσου στα κινούμενα πτερύγια. Συνεπώς, μια δεδομένη παροχή αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής, ενώ όσο η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται απομακρυνόμαστε από το βέλτιστο σημείο σχεδιασμού, με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών. Αν και οι υπερπληρωτές δεν είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα παροχών, παρόλα αυτά επιτυγχάνουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης.

Το ταίριασμα (matching) μεταξύ ΜΕΚ και υπερπληρωτή είναι υψίστης σημασίας για την αποδοτική λειτουργία της. Αυτό που πρέπει να επιδιώκεται σε κάθε περίπτωση είναι η επίτευξη βέλτιστου βαθμού απόδοσης λειτουργίας σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο φάσμα στροφών-φορτίων, καθώς και καλή μεταβατική λειτουργία [2]. Με τον όρο μεταβατική λειτουργία εννοούμε την εξαναγκασμένη (και συνήθως απότομη) μεταβολή, είτε παροχής καυσίμου στον κύλινδρο (μεταβολή στροφών), είτε φορτίου, κ.λ.π.

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

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

Για το σωστό ταίριασμα κινητήρα με στροβιλο-υπερπληρωτή απαιτείται κατά πρώτον ο υπολογισμός της

απαιτούμενης παροχής αέρα. Ο λόγος πιέσεων του συμπιεστή υπολογίζεται από την επιθυμητή (μέγιστη) μέση πραγματική πίεση. Ο συμπιεστής επιλέγεται ανάλογα με το εύρος στροφών – φορτίου του κινητήρα. Θα πρέπει κατά την λειτουργία του συστήματος, να επιτυγχάνεται ικανοποιητικός ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή και παράλληλα να έχουμε ασφαλές περιθώριο από τη γραμμή πάλμωσης. Στη συνέχεια, επιλέγεται και ο στρόβιλος, ο οποίος ρυθμίζεται μεταβάλλοντας τη γωνία πρόσπτωσης της ροής στο ακροφύσιο. Η ισχύς του στροβίλου, καθορίζεται από την ενεργό επιφάνεια προσβολής του καυσαερίου, και με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζεται άμεσα και η πίεση του συμπιεστή [3].

5.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΑΤΡΑΚΤΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ

Ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι συζευγμένοι στην ίδια άτρακτο, ενώ σε μόνιμη κατάσταση βρίσκονται σε ισορροπία ισχύος ($P_{eC}=P_{eT}$) [5]. Οπότε έχουμε :

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

Όπου :

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

Δηλαδή : (παροχή συμπιεστή = παροχή αέρα, παροχή στροβίλου = παροχή καυσαερίων = παροχή αέρα + παροχή εγχυμένου καυσίμου).

Και : η_{mC}, η_{mT} οι μηχανικοί βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και στροβίλου αντίστοιχα (τυπικές τιμές γύρω στο 0,95 για μικρών διαστάσεων κινητήρες).

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

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

(Οπότε και γ_A=σταθερό)

Και ότι σε μία μέση θερμοκρασία στροβίλου $(T_3+T_4)/2$ ισχύει :

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

(Οπότε και γ_R=σταθερό)

Τότε τελικά έχουμε ότι :

$$\dot{m}_C c_{PA} \frac{T_2'-T_1}{\eta_{iC}\eta_{mC}} = \dot{m}_R c_{PR} (T_3-T_4)\eta_{iT}\eta_{mT}$$

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

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

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

Και :

$$\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a-1}}-1\right]=\frac{T_3}{T_1}\left[1-\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\gamma_R-1}{\gamma_R}}\right]\eta_{TC}\left(\frac{\dot{m}_A+\dot{m}_B}{\dot{m}_A}\right)\frac{c_{PR}}{c_{PA}}$$

Όπου $P_4=P_1=P_a$ και η_{TC} ο ολικός βαθμός απόδοσης του στροβιλο-υπερπληρωτή.

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει για σταθερές P_2,P_3. Η πίεση εξαγωγής P_3 είναι σταθερή μόνο σε συστήματα σταθερής πίεσης. Αντιθέτως, σε συστήματα παλμών (όπου έχουμε αυξομειώσεις πίεσης ιδιαίτερα κατά τη μεταβατική λειτουργία), στις εξισώσεις χρησιμοποιείται η μέση πίεση εξαγωγής P_3 (κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας).

Από τις εξισώσεις αυτές, συμπεραίνουμε επίσης ότι η αύξηση του βαθμού απόδοσης του στροβιλο-υπερπληρωτή, δίνει αυξημένο λόγο πιέσεων P_2/P_1. Αντίστοιχα, η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου T_3 του στροβίλου (κατά συνέπεια και της T_4) και η αύξηση του λόγου αποτόνωσης P_3/P_4, δίνει αυξημένο λόγο πιέσεων P_2/P_1.

Αν υποθέσουμε για χάριν ευκολίας ότι :

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

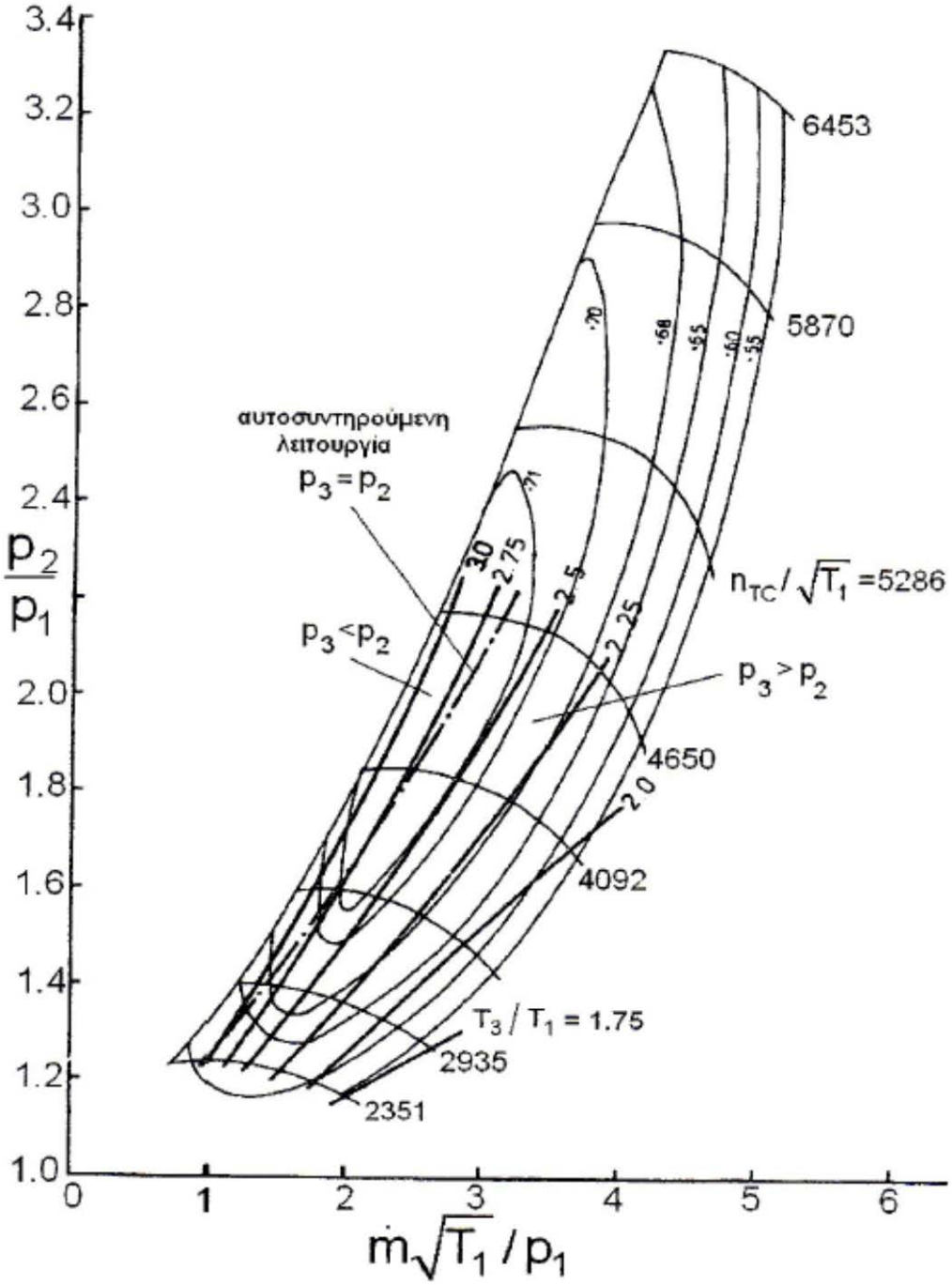
$$\dot{m}_R=\dot{m}_A$$

Κατά προσέγγιση, έχουμε τελικά :

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

5.3 ΧΑΡΤΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ

Συνδυάζοντας τους χάρτες ακτινικού συμπιεστή και ακτινικού στροβίλου, λαμβάνουμε τον χάρτη επιδόσεων του στροβιλο-υπερπληρωτή (διάγραμμα 5.1). Επιπλέον, από την εξίσωση υπολογίζουμε τις καμπύλες ισορροπίας για σταθερό λόγο θερμοκρασιών T_3/T_1 και τις σχεδιάζουμε στο χάρτη του ζεύγους.



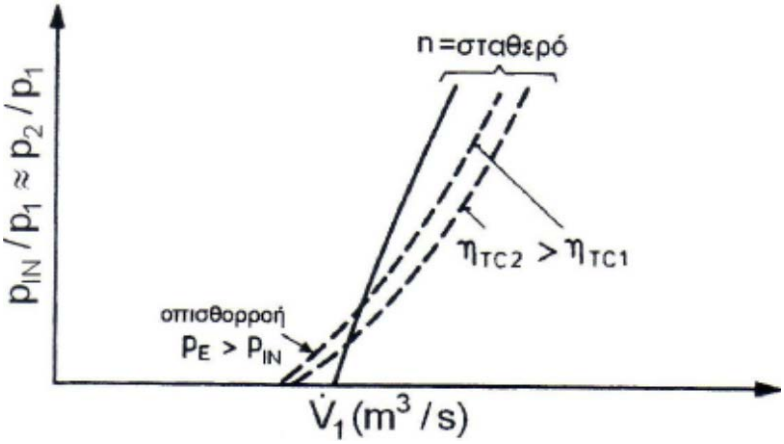
<u>Διάγραμμα 5.1</u> Χάρτης επιδόσεων και χαρακτηριστικές καμπύλες στροβιλο-υπερπληρωτή.

Η αξονική γραμμή που διακρίνεται, αντιστοιχεί στην αυτοσυντηρούμενη λειτουργία του ζεύγους με $P_2=P_3$, κάτι που αντιστοιχεί σε μηδενική πτώση πίεσης στη ΜΕΚ. Η περιοχή αριστερά της αξονικής γραμμής αντιστοιχεί στη λειτουργία με πτώση πίεσης εντός των κυλίνδρων (σύνηθες σε μέσα και υψηλά φορτία), ενώ η περιοχή δεξιά αντιστοιχεί σε λειτουργία με αύξηση της πίεσης του αερίου εντός των κυλίνδρων (περίπτωση χαμηλού φορτίου).

5.4 ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ 4-ΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

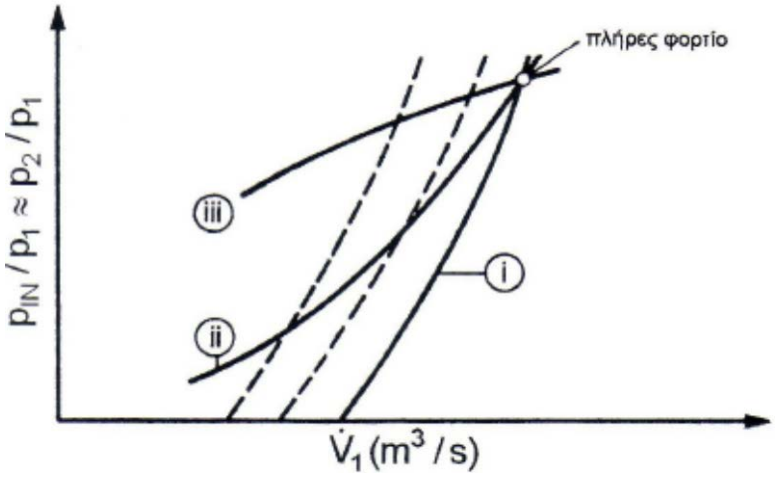
Η παροχή αέρα 4-χρονου στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η πυκνότητα του αέρα στην αρχική φάση συμπίεσης, η ταχύτητα περιστροφής και η διαφορά πίεσης μεταξύ εισαγωγής/εξαγωγής στο διάστημα επικάλυψης των βαλβίδων (overlap) [2].

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



<u>Διάγραμμα 5.2</u> Ογκομετρική παροχή 4-χρονου στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα σε συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής (συνεχής γραμμή: χωρίς επικάλυψη βαλβίδων, διακεκομμένη γραμμή: με επικάλυψη βαλβίδων).

Όσον αφορά το ρόλο της παραγόμενης ροπής κινητήρα, διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις (κατ' αντιστοιχία με το διάγραμμα 5.3) :



<u>Διάγραμμα 5.3</u> Καμπύλες λειτουργίας 4-χρονου στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα.

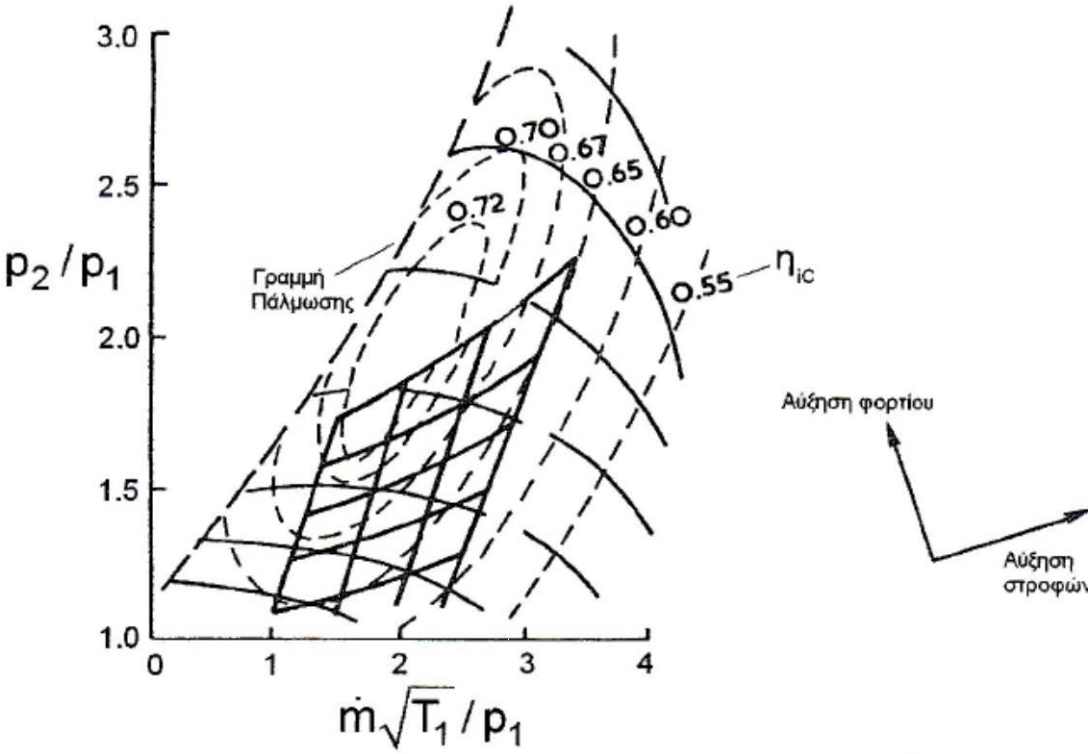
1) σταθερή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (περίπτωση ηλεκτροπαραγωγής, καμπύλη i).
2) νόμος έλικας (καμπύλη ii).
3) αμετάβλητη ροπή (καμπύλη iii).

Στην περίπτωση 1, τα σημεία λειτουργίας βρίσκονται επάνω στη χαρακτηριστική του κινητήρα για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής. Με τη μείωση του φορτίου του κινητήρα, η παροχή ενέργειας προς το στρόβιλο ελαττώνεται και η ισορροπία του υπερπληρωτή μεταβαίνει σε χαμηλότερες πιέσεις. Το επίπεδο της υπερπλήρωσης στην άφορτη λειτουργία (ρελαντί), είναι μόνον ένα κλάσμα του αντίστοιχου επιπέδου στο πλήρες φορτίο. Παράγοντες που επηρεάζουν την κλίση της καμπύλης, αποτελούν τόσο η (ενδεχόμενη) ενδιάμεση ψύξη αέρα, όσο και το μέγεθος του στροβίλου (αυξανομένης της διαμέτρου του). Ειδικότερα για το στρόβιλο, η επιλογή γίνεται έτσι ώστε να βελτιστοποιείται ο βαθμός απόδοσης τόσο του στροβιλο-υπερπληρωτή, όσο και ολόκληρου του συστήματος. Αν ο κινητήρας χρησιμοποιείται ως μονάδα βάσης, τότε το ταίριασμα γίνεται στο αντίστοιχο πλήρες φορτίο, ενώ αν αποτελεί εφεδρική μονάδα λαμβάνονται υπόψη και τα χαμηλότερα φορτία ρυθμίζοντας τα ακροφύσια του στροβίλου.

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

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

Στο διάγραμμα 5.4 παριστάνεται ένα τυπικό ταίριασμα 4-χρονου κινητήρα με στροβιλο-υπερπληρωτή. Οι καμπύλες σταθερών στροφών/σταθερού φορτίου του κινητήρα, απεικονίζονται στο χάρτη του συμπιεστή. Ο συμπιεστής επιλέγεται ώστε να λειτουργεί με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης (σε όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία λειτουργίας του κινητήρα), με ασφαλές περιθώριο από τη γραμμή πάλμωσης και μακριά από τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του [2].



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

Η επιλογή του χάρτη του συμπιεστή (και όχι του στροβίλου) για τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας, γίνεται διότι ο στρόβιλος λειτουργεί με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης σε μεγαλύτερο εύρος παροχών, οπότε δεν αποτελεί το "αδύναμο σημείο" του στροβιλο-υπερπληρωτή, σε αντίθεση με τον συμπιεστή. Επιπλέον, κατά την λειτουργία με σύστημα παλμών (μεταβλητής) πίεσης (συνήθης περίπτωση σε οχήματα), δεν είναι σαφές ποια τιμή της πίεσης θα χρησιμοποιήσουμε στον αντίστοιχο χάρτη. Αν στο διάγραμμα 5.4 αντικαταστήσουμε το γραφικό "πλέγμα" στροφών – φορτίου του κινητήρα με μια μοναδική καμπύλη σταθερών στροφών, μεταπίπτουμε στην περίπτωση χρήσης στην ηλεκτροπαραγωγή.

5.5 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

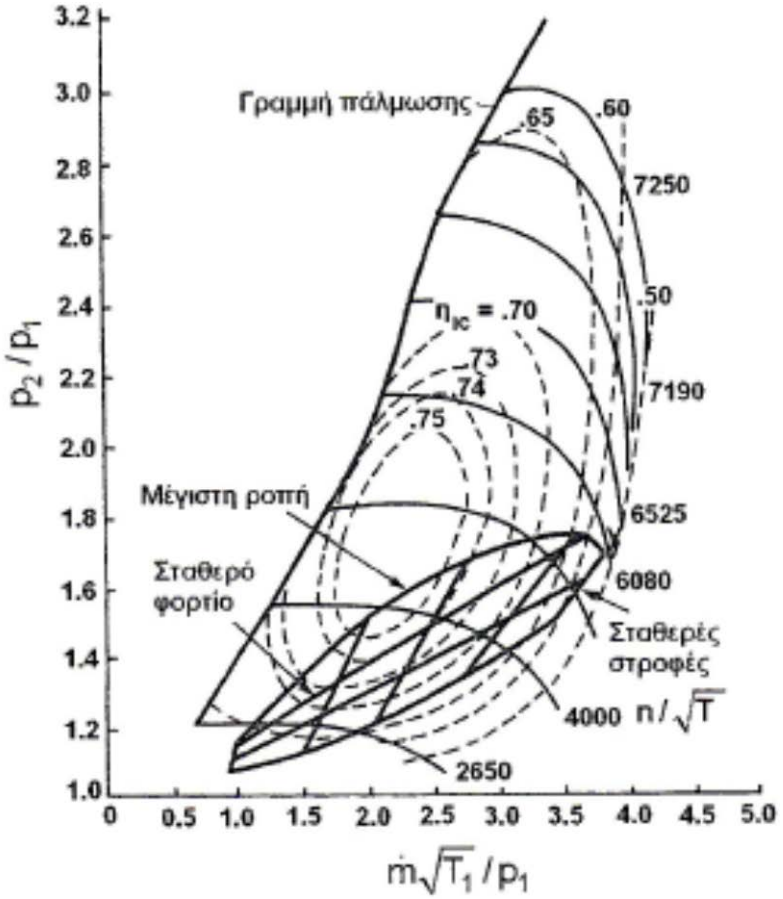
Το ταίριασμα δεν ενδείκνυται να γίνει (τουλάχιστον στα οχήματα) βάσει σημείου λειτουργίας που αναφέρεται σε μέγιστη ισχύ. Αν συμβεί αυτό, τότε ο βαθμός απόδοσης του συστήματος σε χαμηλά φορτία είναι ιδιαίτερα χαμηλός και η απόκρισή του καθίσταται προβληματική. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται εν μέρει με τη χρήση στροβίλου μεταβλητής διατομής (μειώνοντας την ενεργή επιφάνεια του στροβίλου με την πτώση του φορτίου, έχουμε αυξημένες πιέσεις υπερπλήρωσης). Επιπλέον, το ταίριασμα σε σημεία λειτουργίας χαμηλού φορτίου είναι επιθυμητό για κίνηση

οχήματος εντός πόλης, όπου απαιτούνται αποθέματα ροπής και όσο το δυνατόν λιγότερες αλλαγές σχέσης στο κιβώτιο ταχυτήτων.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί στρόβιλος μεταβλητής επιφάνειας, είναι δυνατόν να έχουμε μεγάλες πιέσεις σε υψηλά φορτία και κατά συνέπεια υπέρμετρη αύξηση των στροφών του υπερπληρωτή. Αυτό αντιμετωπίζεται με την χρήση και λειτουργία της βαλβίδας παράκαμψης καυσαερίων (wastegate valve).

Γενικότερα πάντως, η επιλογή του κατάλληλου σημείου λειτουργίας σε χαμηλές στροφές αποτελεί περίπλοκο ζήτημα, καθώς στην προσπάθεια να παράγουμε υψηλή ροπή δυσκολευόμαστε να επιτύχουμε κατάλληλο λόγο αέρα – καυσίμου προς αποφυγήν εκπομπών αιθάλης [5].

Στο διάγραμμα 5.5 απεικονίζεται μία περίπτωση ατυχούς ταιριάσματος 4-χρονου κινητήρα με στροβιλο-υπερπληρωτή. Παρατηρούμε ότι το πεδίο λειτουργίας του κινητήρα αντιστοιχεί ως επί το πλείστον σε χαμηλούς βαθμούς απόδοσης του συμπιεστή [2].



<u>Διάγραμμα 5.5</u> Ατυχής εφαρμογή στροβιλο-υπερπλήρωσης σε 4-χρονο κινητήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ

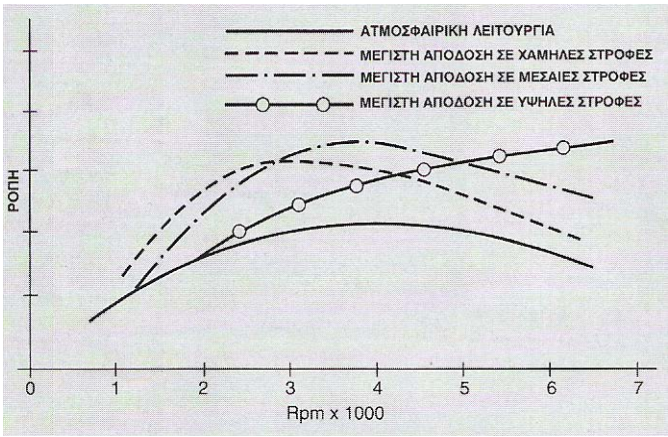
6.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Λόγος Πίεσης: Είναι η συνολική απόλυτη πίεση που παράγεται από το turbo, διαιρούμενη με την ατμοσφαιρική πίεση στη συγκεκριμένη γεωγραφική θέση [10]. Η απόλυτη πίεση είναι η πίεση πάνω από το απόλυτο κενό. Το απόλυτο κενό σημαίνει μηδενική απόλυτη πίεση (0bar), ενώ η ατμοσφαιρική πίεση ισοδυναμεί με 1bar απόλυτης πίεσης στο επίπεδο της θάλασσας. Έτσι για 0,2bar πίεσης υπερπλήρωσης, η απόλυτη πίεση στην εισαγωγή είναι 1,2bar, για 0,5bar πίεσης υπερπλήρωσης είναι 1,5bar, κ.ο.κ. Με άλλα λόγια η απόλυτη πίεση είναι η ένδειξη του μανομέτρου ("μπαρόμετρο") της εισαγωγής + 1bar.

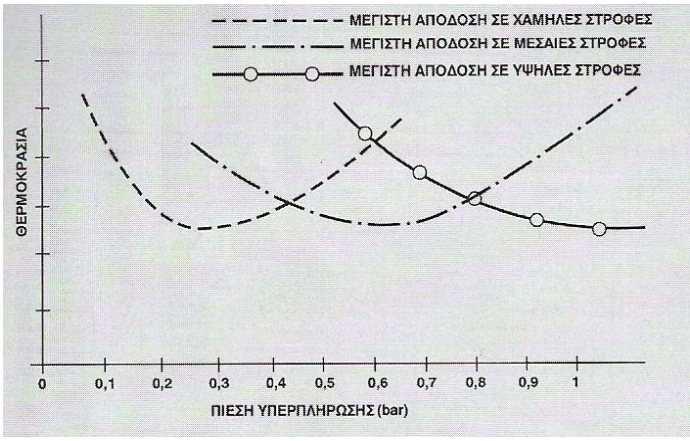
Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι ο λόγος πίεσης είναι το πηλίκο της απόλυτης πίεσης στην έξοδο του turbo, προς την ατμοσφαιρική πίεση του συγκεκριμένου περιβάλλοντος και αντικατοπτρίζει πόσο ανέβηκε η πίεση σε σχέση με την ατμοσφαιρική.

Η άνοδος της πίεσης είναι, εν μέρει, και το μέγεθος που μας δείχνει πόσο περισσότερος αέρας μπαίνει στον κινητήρα με την χρήση του turbo. Έτσι, μια πίεση υπερπλήρωσης του 0,5bar μας δίνει λόγο πίεσης 1,5. Δηλαδή, η πίεση ισοδυναμεί με 1,5 φορά την ατμοσφαιρική πίεση. Άρα, ο κινητήρας προσλαμβάνει 50% παραπάνω αέρα, και θα πρέπει να αποδώσει 50% παραπάνω ισχύ θεωρητικά.

Λόγος πυκνότητας: Η επιπλέον ισχύς που παράγεται με την υπερτροφοδότηση, είναι άμεση συνάρτηση της τελικής πυκνότητας του αέρα που καταναλώνει ο κινητήρας, δηλαδή του αριθμού των μορίων αέρα που είναι "στριμωγμένα" σε κάθε μονάδα όγκου. Η πυκνότητα του αέρα είναι το πιο πολύπαθο φυσικό μέγεθος σε ένα σύστημα turbo. Καθώς ο συμπιεστής φέρνει τα μόρια του αέρα πιο κοντά το ένα στο άλλο, η πυκνότητα του αέρα δεν ανεβαίνει στον ίδιο βαθμό με την θερμοκρασία και την πίεσή του. Πολλοί παράγοντες ευθύνονται γι' αυτό το φαινόμενο και κυρίως ο λόγος απόδοσης του συμπιεστή. Ωστόσο η χρήση intercooler, αποδοτικών συμπιεστών και εξεζητημένων κελυφών, σε συνδυασμό με κατάλληλα επιλεγμένες τουρμπίνες και λόγους A/R, τείνει να ταυτίσει το λόγο πυκνότητας με το λόγο πίεσης, χωρίς φυσικά να το καταφέρνει ποτέ.



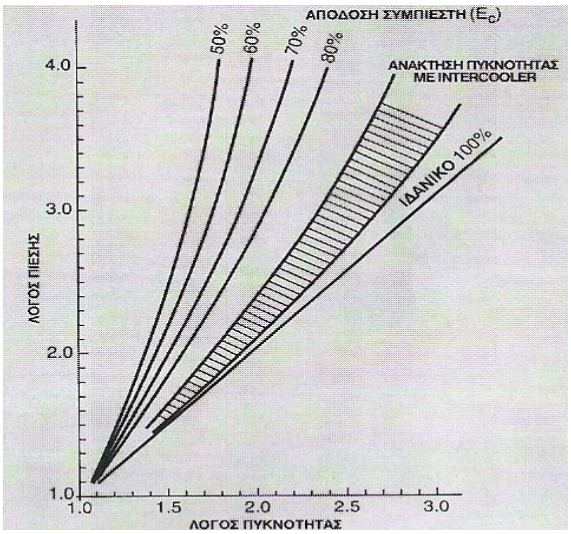
Διάγραμμα 6.1 *Σε όσο υψηλότερους ρυθμούς περιστροφής του κινητήρα εμφανίζεται το σημείο της μέγιστης απόδοσης του συμπιεστή, τόσο χαμηλότερες θερμοκρασίες παρουσιάζονται στον συμπιεσμένο αέρα. Ο ψυχρός αέρας είναι πυκνότερος και συντελεί στην κορύφωση της ροπής στους υψηλούς ρυθμούς περιστροφής.*



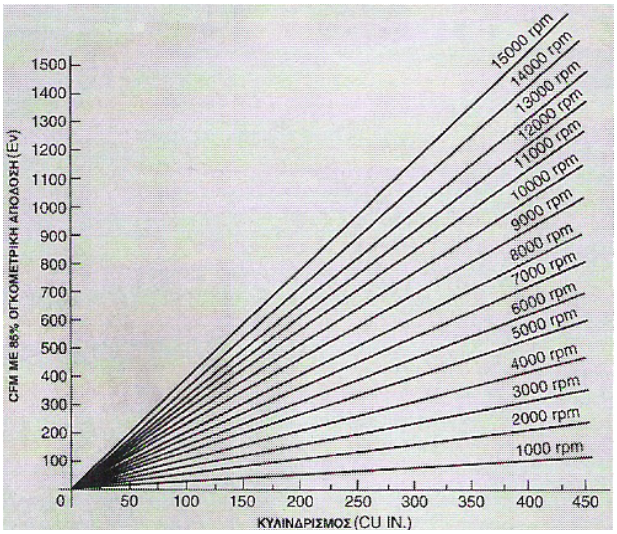
Διάγραμμα 6.2 *Με μικρό turbo, η μέγιστη απόδοση κορυφώνεται νωρίς στην κλίμακα των στροφών του κινητήρα, και η θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής ανεβαίνει υπερβολικά όσο πλησιάζουμε στα "κόκκινα". Έτσι, για την επίτευξη μεγάλων ιπποδυνάμεων χωρίς υψηλά θερμικά φορτία στην εισαγωγή, η επιλογή ενός μεγάλου turbo αποτελεί τη μόνη λύση.*

Ροή Αέρα: Η ροή του αέρα μέσα από έναν κινητήρα, αναφέρεται συνήθως ως κυβικά πόδια ανά λεπτό (cfm) στην ατμοσφαιρική πίεση. Ο τεχνικά σωστός όρος (αλλά σπάνια χρησιμοποιούμενος), είναι η μέτρηση της μάζας του αέρα και όχι του όγκου του, σε λίμπρες ανά λεπτό [1].

Για να υπολογίσει κανείς την κατανάλωση αέρα ενός κινητήρα που λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση (δηλαδή χωρίς turbo ή με το turbo να μη παράγει πίεση), αρκεί να υπολογίσει το γινόμενο του συνολικού κυλινδρισμού του κινητήρα σε κυβικές ίντσες (in^3) επί το μέγιστο ρυθμό περιστροφής του (rpm) επί την ογκομετρική του απόδοση επί 0,5 (επειδή οι τετράχρονοι κινητήρες γεμίζουν τους κυλίνδρους τους κάθε δεύτερη περιστροφή του στροφαλοφόρου) και να διαιρέσει όλο αυτό το γινόμενο προς 1,728, το οποίο μετατρέπει τις κυβικές ίντσες σε κυβικά πόδια. Μια κυβική ίντσα είναι περίπου 16,39 κυβικά εκατοστά.



<u>Διάγραμμα 6.3</u> Γραφική παράσταση της πυκνότητας του αέρα προς την πίεσή του. Η πυκνότητα ελαττώνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας, γι' αυτό και η άνοδος της ισχύος του κινητήρα δεν είναι απολύτως ανάλογη της ανόδου της πίεσης.



<u>Διάγραμμα 6.4</u> Το παραπάνω γράφημα θα σας βοηθήσει να υπολογίσετε εύκολα τη βασική κατανάλωση του κινητήρα σας σε αέρα, αρκεί να μετατρέψετε την χωρητικότητά του σε κυβικές ίντσες.

Έχοντας προσδιορίσει τη βασική κατανάλωση αέρα του κινητήρα μας (ακόμα και σε cfm), μπορούμε να υπολογίσουμε την απαιτούμενη ροή από το turbo, βάσει της πίεσης υπερπλήρωσης με την οποία θα λειτουργήσει το μοτέρ μας. Αυτό γίνεται πολύ απλά, αν (αγνοώντας τον παράγοντα της ογκομετρικής απόδοσης του μοτέρ μας) πολλαπλασιάσουμε τη βασική κατανάλωση επί τον επιθυμητό λόγο πίεσης.

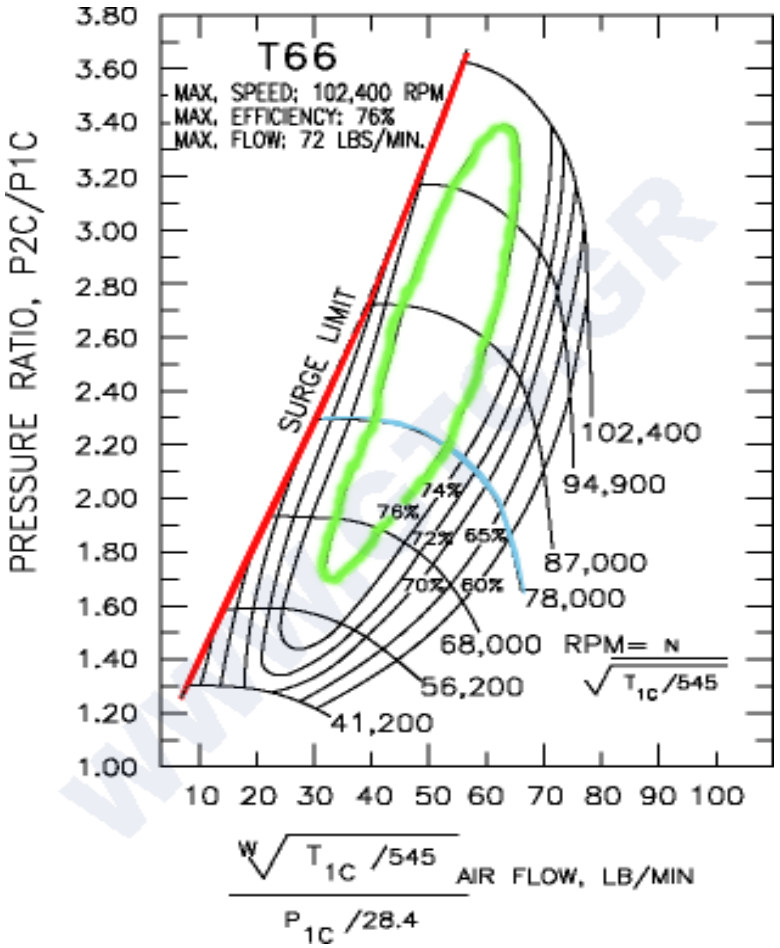
Για παράδειγμα, αν έχουμε ένα μοτέρ το οποίο έχει βασική κατανάλωση 250cfm και θέλουμε να το μετατρέψουμε σε turbo με πίεση 0,8bar, ο λόγος πίεσης θα είναι 1,8 και η τελική κατανάλωση θα είναι 250x1,8=450cfm.

6.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΕ ΧΑΡΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

<u>ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1</u>

Η επιλογή του κατάλληλου στροβιλο-υπερπληρωτή για κάθε εφαρμογή, είναι μια διαδικασία που περνά μέσα από την μελέτη του compressor map, ενός χάρτη που δείχνει την απόδοση του turbo σε συνάρτηση με την πίεση (pressure ratio) και την ροή του αέρα (flow rate). Στο παράδειγμα αυτό, θα δούμε πως υπολογίζουμε τα δύο αυτά βασικά μεγέθη για την δική μας περίπτωση και πως με αυτά διαθέσιμα και μελετώντας τον χάρτη απόδοσης του turbo, μπορούμε να δούμε εάν κάνει για την εφαρμογή μας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα [16] συγκρίνουμε δύο

γνωστές τουρμπίνες (**KKK K03** και **GARETT GT28R**) για τοποθέτηση στον κινητήρα μας **VAG 1.8t 20v**.



Διάγραμμα 6.5 Χάρτης απόδοσης της τουρμπίνας T66.

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ένα παράδειγμα από compressor map. Στον άξονα των X έχουμε το flow rate σε lbs/min και στον άξονα των Y το pressure ratio. Η κόκκινη καμπύλη λέγεται surge limit - γραμμή πάλμωσης, και η περιοχή αριστερά από αυτή χαρακτηρίζεται από ασταθή λειτουργία του συμπιεστή. Ποτέ δεν διαλέγουμε έναν στροβιλο-υπερπληρωτή του οποίου ο compressor map και οι συνθήκες λειτουργίας του, δείχνουν ότι θα δουλεύει σε αυτή την περιοχή. Σε υψηλές στροφές περιστροφής, υπάρχει μεγάλος κίνδυνος ακόμη και καταστροφής του turbo.

Οι καμπύλες του χάρτη με μπλέ χρώμα, είναι αυτές που δείχνουν τις στροφές λειτουργίας του turbo για κάθε pressure ratio και flow rate, και θα πρέπει να προσέξουμε να είναι κάτω απο το μέγιστο όριο λειτουργίας που θέτει ο κατασκευαστής.

Οι νησίδες με πράσινο χρώμα, δείχνουν το efficient rate για κάθε περιοχή λειτουργίας. Όσο ξεφεύγουμε από το

μέγιστο της απόδοσης (76% εδώ), τόσο η θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής είναι μεγαλύτερη (μικρότερη πυκνότητα), και σαν συνέπειες έχουμε την μειωμένη ιπποδύναμη, καθώς και τον κίνδυνο καταστροφής του turbo από υπερθέρμανση (oil cooking).

Υπολογισμοί

Σαν **pressure ratio (PR)** ορίζεται ο λόγος :

PR = P1 + P2 + ICpd / P2

όπου : P1 = Επιθυμητή πίεση σε psi

P2 = Ατμοσφαιρική πίεση σε psi = 14,5 psi

ICpd = Πτώση πίεσης λόγω του intercooler (εδώ 1,5 psi είναι ρεαλιστικό)

Έτσι στο παράδειγμά μας για τον 1.8T κινητήρα μια πίεση 1 bar (14,5 psi) οδηγεί σε pressure ratio :

PR = 14,5 + 14,5 + 1,5 / 14,5 = 2,1

Σημείωση : Για ευκολία στους υπολογισμούς υποθέτουμε σταθερή πίεση σε όλη την κλίμακα στροφών. Στην πράξη, για να κρατήσουμε την τουρμπίνα σε καλές τιμές efficiency μεταβάλουμε την πίεση με τις στροφές.

Ο υπολογισμός του **flow rate** του κινητήρα μας, είναι λιγάκι πιο σύνθετος και στις εξισώσεις μπαίνουν παράγοντες όπως : intake air density, compressor inlet temperature και corrected compressor inlet pressure. Όμως, για ευκολία στους υπολογισμούς, χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση, χωρίς να έχει μεγάλη απόκλιση από την αναλυτική :

CFM = (L * RPM * VE * PR) / 5660

όπου : CFM = κυβικά πόδια ανά λεπτό

L = κυλινδρισμός σε λίτρα

RPM = μέγιστος αριθμός στροφών

VE*= volumetric efficiency (ογκομετρική απόδοση)

PR = pressure ratio (που υπολογίσαμε παραπάνω)

* Τιμές VE : 2 βάλβιδος κινητήρας = 83%
4 βάλβιδος κινητήρας = 88%
5 βάλβιδος κινητήρας = 90%
Modified street = 93%
Racing κινητήρας = 105%

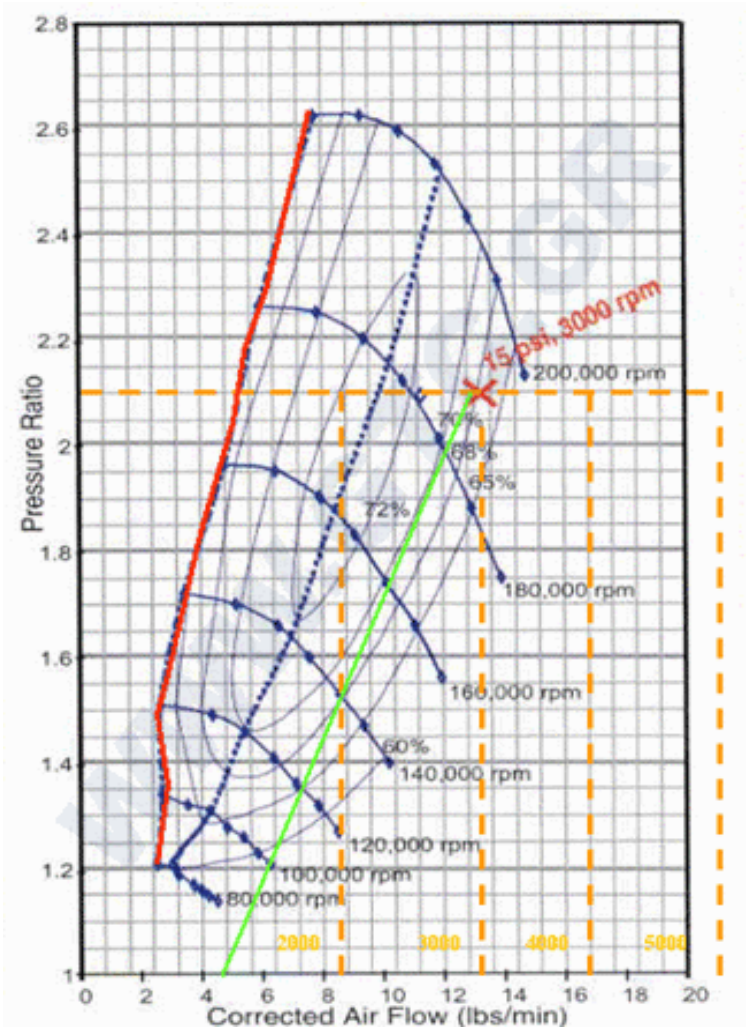
Πίσω στο παράδειγμά μας λοιπόν του 1.8t 20v κινητήρα μας έχουμε :

CFM = (1,781 * 6000 * 90 * 2,1) / 5660 = 357 ft^3/min

Αυτή είναι η μέγιστη ροή στις 6000 rpm. Για να έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα πάνω στον χάρτη του turbo, υπολογίζουμε την ροή ανά 1000 rpm, από τις 2000 έως τις 6000 rpm.

Επειδή συνήθως στους χάρτες των κατασκευαστών η ροή δίνεται σε lbs/min ή m^3/sec, μετατρέπουμε τα ft^3/min σε lbs/min πολλαπλασιάζοντας με το 0,069 ή σε m^3/sec πολλαπλασιάζοντας με το 0,0004719. Έτσι έχουμε :

RPM	CFM ft^3/min	CFM m^3/sec	CFM lbs/min
2000	119	0,056	8,22
3000	179	0,084	12,32
4000	238	0,112	16,43
5000	298	0,140	20,54
6000	357	0,169	24,65



Διάγραμμα 6.6 Χάρτης απόδοσης της τουρμπίνας KKK K03.

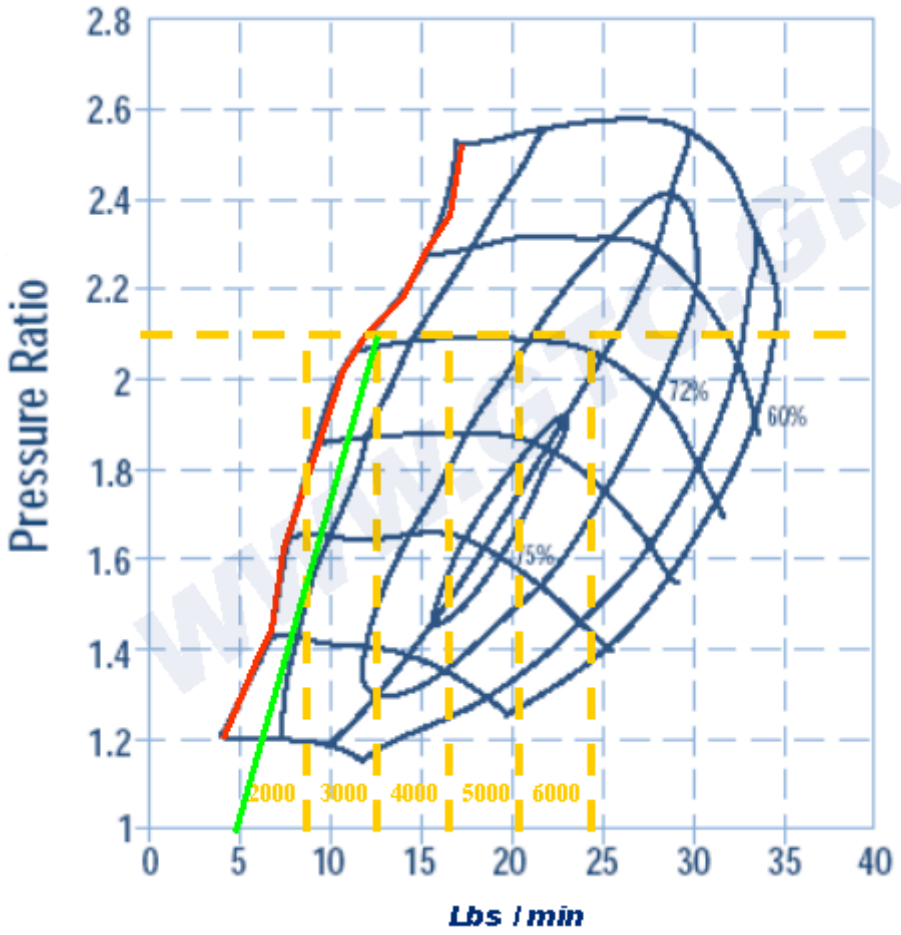
Έχουμε λοιπόν στα χέρια μας το pressure ratio και τις τιμές του flow rate σε lbs/min. Πάμε στο χάρτη και σημειώνουμε τις συντεταγμένες.

Βλέπουμε στο διπλανό διάγραμμα τον χάρτη της Borg Warner K03 με τα σημεία πάνω του. Φαίνεται ότι με πίεση 1 bar ο συμπιεστής έχει καλό efficiency rate μόνο μέχρι τις 3000 rpm περίπου. Γι' αυτό και συνήθως οι βελτιωτές ρίχνουν σταδιακά την πίεση μετά τις 3000 έως τις 6000 rpm.

Το να δουλέψουμε το turbo από εκεί και πάνω σε μικρότερα efficiency rates, θα σήμαινε ότι θα παρήγαγε υπερβολική θερμότητα. Πράγμα που σημαίνει

ότι ακόμη και εάν παρέμενε μέσα στο όριο στροφών λειτουργίας του, το κέρδος σε ιπποδύναμη θα ήταν ελάχιστο (εάν όχι και αρνητικό), καθώς πέραν της μικρότερης πυκνότητας του αέρα εισαγωγής, θα έπρεπε να αντισταθμίσουμε με λιγότερο αβάνς (κίνδυνος προανάφλεξης) και ίσως πιο πλούσιο μείγμα (μικρότερη θερμοκρασία καυσαερίων).

Στο παρακάτω διάγραμμα, έχουμε τον αντίστοιχο χάρτη της Garett GT28R, όπου φαίνεται ότι δεν έχουμε κανένα πρόβλημα να κρατήσουμε το 1 bar μέχρι τις 6000 (και παραπάνω) rpm.



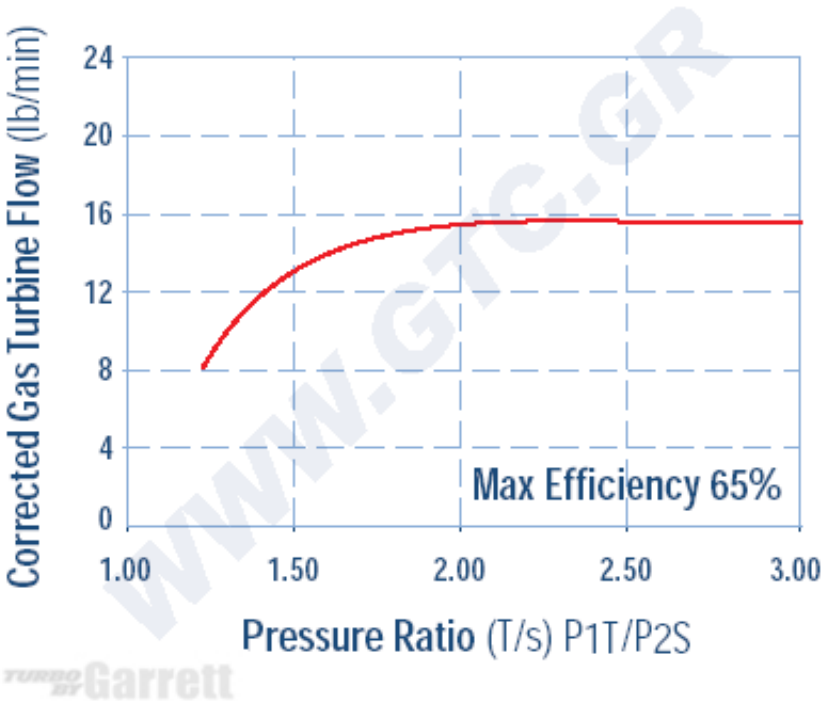
Διάγραμμα 6.7 Χάρτης απόδοσης της τουρμπίνας Garett GT28R.

Απ' ότι φαίνεται, στις χαμηλές στροφές, το turbo είναι εκτός της σωστής περιοχής του χάρτη, αλλά σε αυτές τις στροφές έτσι και αλλιώς δεν μπορεί να "σηκώσει" την επιθυμητή πίεση του 1 bar. Οι περισσότερες εφαρμογές turbo, αποδίδουν το μέγιστο boost στο 50% των maximum στροφών του κινητήρα. Ένας καλός πρακτικός τρόπος να σιγουρευτούμε ότι ο συμπιεστής δεν θα δουλέψει εκτός του surge limit (κόκκινη γραμμή), είναι να σημειώσουμε πάνω στο χάρτη αυτό το σημείο (3000 rpm / 2,1 PR) και μετά

πάνω στον άξονα του flow rate να σημειώσουμε το σημείο που έχουμε 20% του μέγιστου flow (24,65*0,20=4,93).

Στην συνέχεια, τραβάμε μια γραμμή που ενώνει αυτά τα σημεία (πράσινη γραμμή), η οποία πρέπει να είναι ολόκληρη δεξιά από το surge limit (κόκκινη γραμμή).

Ο χάρτης που δείχνει την δυνατότητα του turbo να ανεβάσει πίεση σε σχέση με την ροή των καυσαερίων, είναι άλλος (βλέπε διάγραμμα 6.8) και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε σχέση με τον κυβισμό του αυτοκινήτου.



<u>Διάγραμμα 6.8</u> Απεικόνιση της πίεσης σε σχέση με την ροή των καυσαερίων της τουρμπίνας GT28R.

Τι χάνουμε με την αύξηση της θερμοκρασίας αέρα εισαγωγής;

Είδαμε ότι οι χάρτες του turbo δίνουν τα efficiency rates για διάφορες περιοχές λειτουργίας.

Τι όμως σημαίνει στην πράξη το efficiency rate και τι αποτέλεσμα έχει στην αύξηση της ιπποδύναμης που περιμένουμε ως συνέπεια της αύξησης της πίεσης εισαγωγής;

Ο τύπος που δίνει την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα στην εξαγωγή του συμπιεστή είναι ο εξής :

$$\mathbf{To = F * (At + 273) * 100 / E}$$

όπου : F = σταθερά σε συνάρτηση με το pressure ratio απο τον παρακάτω πίνακα

At = η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε °C

E = το compressor efficiency

Στο παράδειγμά μας λοιπόν για την K03 στις 4000 rpm (έστω ότι την δουλεύαμε εκεί) έχουμε :

Pr = Pressure Ratio F = παράγοντας για τον υπολογισμό της αύξησης θερμοκρασίας εξαγωγής

Pr	F	Pr	F	Pr	F
1.35	0.089	2.25	0.258	3.3	0.402
1.4	0.100	2.3	0.266	3.4	0.414
1.45	0.110	2.35	0.274	3.5	0.426
1.50	0.120	2.4	0.281	3.6	0.437
1.55	0.130	2.45	0.289	3.7	0.448
1.6	0.142	2.5	0.296	3.8	0.459
1.65	0.152	2.55	0.303	3.9	0.470
1.7	0.162	2.6	0.311	4.0	0.480
1.75	0.172	2.65	0.318	4.2	0.501
1.8	0.181	2.7	0.325	4.4	0.521
1.85	0.192	2.75	0.331	4.6	0.540
1.9	0.199	2.8	0.338	4.8	0.559
1.95	0.208	2.85	0.345	5.0	0.577
2.0	0.217	2.9	0.352	5.3	0.603
2.05	0.225	2.95	0.358	5.6	0.628
2.1	0.234	3.0	0.365	5.9	0.653
2.15	0.242	3.1	0.377	6.4	0.691
2.2	0.250	3.2	0.390	7.0	0.735

Πίνακας 6.1 Πίνακας για τον υπολογισμό του παράγοντα F σε σχέση με το Pressure Ratio.

Για PR=2,1 το F είναι 0,234 , At έστω 20 °C και E=51%. Άρα To=134,5 °C αύξηση θερμοκρασίας.

Εάν το E ήταν 70%, τότε θα είχαμε αύξηση θερμοκρασίας κατά 98 °C. Δηλαδή 36,5 °C λιγότερο!

Για να έχουμε την πραγματική θερμοκρασία αέρα στην εξαγωγή του συμπιεστή (compressor), προσθέτουμε την αύξηση της θερμοκρασίας στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι έχουμε 134,5 + 20 = 154,5 °C.

Βλέπουμε, ότι με πίεση 1 bar (διπλασιασμό δηλαδή του όγκου του αέρα που εισέρχεται στην μονάδα του χρόνου), έχουμε θερμοκρασία αέρα 154,5 °C. Λογικά, ο διπλασιασμός αυτός θα οδηγούσε σε αντίστοιχη αύξηση της ιπποδύναμης, αλλά υπάρχει και ο παράγων πυκνότητα του αέρα, ο οποίος με την άνοδο της θερμοκρασίας μειώνεται. Ας δούμε λοιπόν τι σημαίνει αυτό το ποσοστό μείωσης της πυκνότητας :

$$\mathbf{D = (At + 273) * PR / (To + 273)}$$

όπου : D = το ποσοστό μείωσης της πυκνότητας
At = η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε °C
PR = pressure ratio

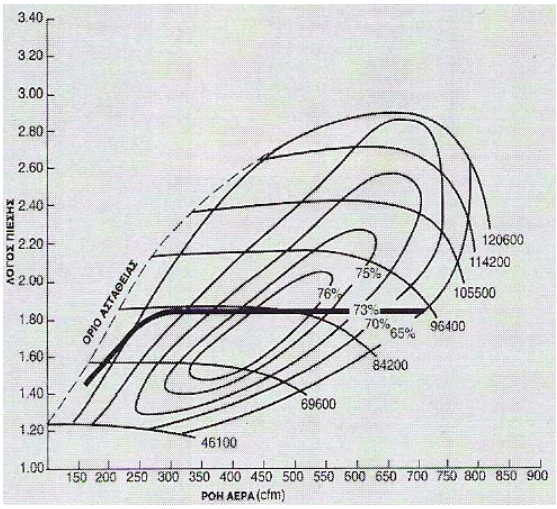
Πίσω στο παράδειγμα, έχουμε At=20 °C και PR=2,1. Οπότε D=1,44. Δηλαδή, ενώ διπλασιάσαμε τον όγκο του αέρα που μπαίνει στον κινητήρα μας, η αύξησή του σε μάζα ειναι μόνο 44%. Άρα, σε έναν ατμοσφαιρικό κινητήρα, αυτό θα οδηγούσε σε προσδοκώμενη αύξηση ισχύος κατά 44%, με την προϋπόθεση ότι μπορούσε να το αντέξει και ότι υπήρχε το κατάλληλο καύσιμο και ρυθμίσεις. Βλέπουμε λοιπόν την σημασία που έχει το **efficiency rate** του

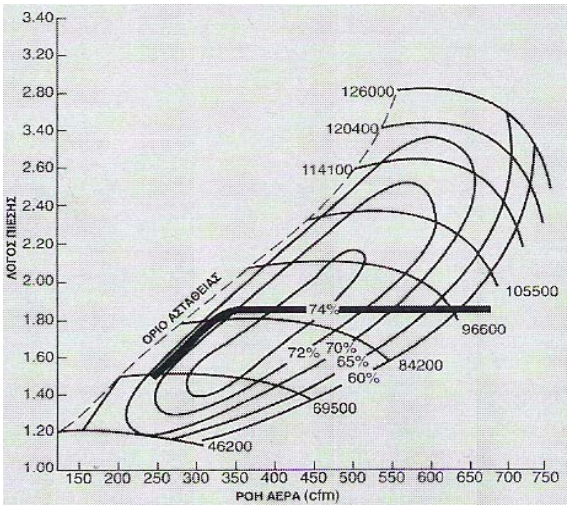
συμπιεστή.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

Στους χάρτες που παραθέτουμε, έχουμε διαγράψει μια υποθετική καμπύλη που αναφέρεται στο ακόλουθο παράδειγμα [10] :

Έχουμε έναν κινητήρα που καταναλώνει 743 cfm στις 5500 rpm, με λόγο πίεσης 1,8. Θέλουμε η ελάχιστη απόδοση του συμπιεστή να είναι της τάξης του 60%, και έχουμε στη διάθεσή μας δύο διαφορετικούς συμπιεστές που θέλουμε να συγκρίνουμε, ώστε να αποφανθούμε ποιος είναι ο καταλληλότερος.





Διάγραμμα 6.9 *Διάγραμμα 6.10*

Ο αριστερός χάρτης απόδοσης αναφέρεται στο συμπιεστή Turbonetics 60-1 και δεξιός στον H-3. Βλέπουμε καθαρά πως για τις ανάγκες μας, σύμφωνα με την γραμμή που έχουμε χαράξει, ο 60-1 είναι ο καταλληλότερος με ελάχιστη απόδοση περίπου 65%.

Σε κάθε καμπύλη μαρκάρουμε το ένα σημείο που αντιστοιχεί σε λόγο πίεσης 1,8 και το σημείο αυτό αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ροή του συμπιεστή σε αυτό το λόγο πίεσης και την αντίστοιχη απόδοσή του. Στο πρώτο διάγραμμα ενός συμπιεστή Turbonetics 60-1, η γραμμή φτάνει στην καμπύλη με απόδοση 65%, ενώ στο δεύτερο ενός Turbonetics H-3, ξεπερνά κατά πολύ την καμπύλη του 60% και φτάνει σε ένα σημείο με απόδοση ίσως χαμηλότερη από 55%. Καταλαβαίνουμε λοιπόν πως ο Turbonetics 60-1 είναι πολύ προτιμότερος για την εφαρμογή μας, εφόσον μας ενδιαφέρει η υψηλή απόδοση σε όλο το φάσμα των στροφών. Ωστόσο πρέπει να εξετασθούν και τα χαρακτηριστικά ασταθούς λειτουργίας του συμπιεστή, προτού κατασταλάξουμε σε κάποια επιλογή.

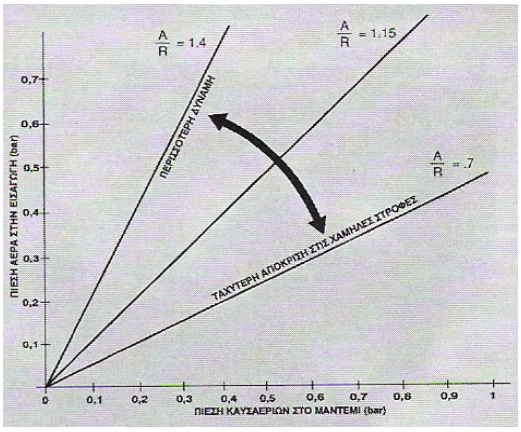
Η μέθοδος που ακολουθείται είναι σχετικά απλή. Αποφασίζουμε σε πόσες στροφές θέλουμε να

επιτυγχάνουμε τον μέγιστο λόγο πίεσης και υπολογίζουμε τα ανάλογα cfm, τα οποία και τα σημειώνουμε στο χάρτη. Για το παράδειγμά μας, αν θέσουμε ως στροφές μέγιστης πίεσης το μέσο του πεδίου των στροφών μέγιστης λειτουργίας, δηλαδή τις 2750rpm, θα έχουμε μια ροή 371cfm σε λόγο πίεσης 1,8. Από αυτό το σημείο διαγράφουμε μία γραμμή μέχρι το 20% της μέγιστης ροής του κινητήρα (149cfm στο παράδειγμά μας) με λόγο πίεσης 1. Η γραμμή αυτή πρέπει οπωσδήποτε να βρίσκεται δεξιότερα της γραμμής ασταθούς λειτουργίας. Ορισμένοι χάρτες δεν αναφέρουν το surge limit, οπότε σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούμε να θεωρήσουμε ως όριο την αριστερή γραμμή. Στο παράδειγμά μας, και στις δύο περιπτώσεις κινούμαστε δεξιότερα του ορίου ασταθούς λειτουργίας, οπότε και παραμένουμε στην επιλογή του Turbonetics 60-1.

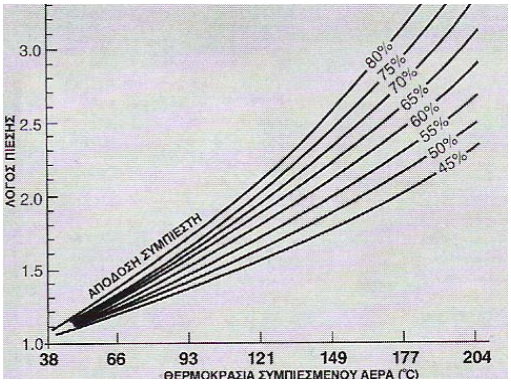
6.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ TURBO

Τα κριτήρια για την επιλογή ενός turbo είναι η απόκριση του κινητήρα, η αναμενόμενη δύναμη - ισχύς και το ωφέλιμο πεδίο στροφών του. Συνήθως είναι εύκολο να συνδυάσουμε τη δύναμη στις χαμηλές και μεσαίες στροφές, ή τις μεσαίες και υψηλές, χωρίς πολλές θυσίες από πλευράς “turbo lag”, αντίστασης στη ροή των καυσαερίων και ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών. Το πράγμα όμως δυσκολεύει αισθητά όταν θέλουμε να τα συνδυάσουμε όλα, και μάλιστα με ένα turbo [8].

Οι παράγοντες προς επιλογή είναι η διάμετρος της εξόδου του κελύφους εξαγωγής και οι διαθέσιμες επιλογές A/R.



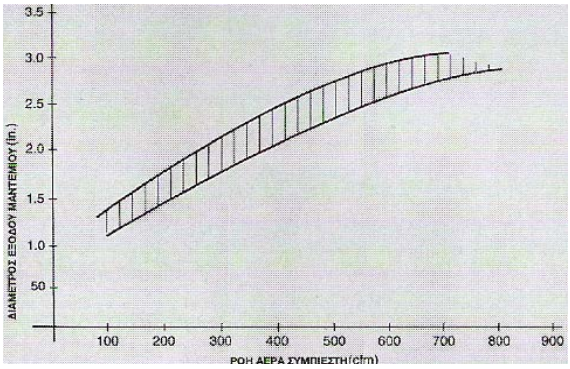
Διάγραμμα 6.11 Η επίδραση των διαφόρων τιμών A/R, όταν οι υπόλοιπες παράμετροι του κινητήρα παραμένουν σταθερές.



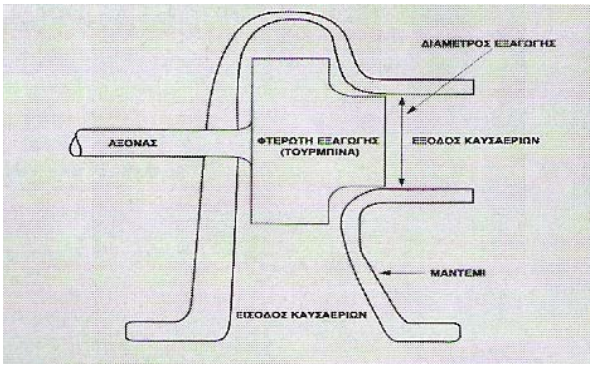
Διάγραμμα 6.12 Σύγκριση του λόγου απόδοσης του συμπιεστή και της παραγόμενης θερμοκρασίας προς τον λόγο πίεσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση, τόσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα για τον δεδομένο λόγο πίεσης.

Ο βασικός κανόνας είναι ότι όσο μικρότερη είναι η τουρμπίνα, τόσο πιο γρήγορα σηκώνει πίεση και τόσο μικρότερο “lag” παρουσιάζει. Αν θέλει κανείς να περιορίσει περαιτέρω το “lag”, καταφεύγει στην επιλογή μικρού A/R. Ωστόσο, υπάρχει ο κίνδυνος το μικρό κέλυφος να “πνίγει” τον κινητήρα. Ο χρυσός κανόνας για γρήγορη απόκριση και άνετη λειτουργία του μοτέρ, είναι η μέγιστη πίεση στο κέλυφος να είναι μικρότερη της διπλάσιας της μέγιστης πίεσης στην εισαγωγή του κινητήρα.

Επίσης, υπάρχουν άλλες δύο παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη : τα πεδία θερμοκρασίας και στροφών λειτουργίας, που προδιαγράφει ο κατασκευαστής για το turbo της επιλογής μας. Υπάρχει περίπτωση ο κινητήρας μας να αναπτύξει θερμοκρασίες πέρα από την αντοχή του turbo ή να το περιστρέψει τόσο γρήγορα, που να το καταστρέψει. Υπάρχει φυσικά και το ενδεχόμενο να μην μπορεί να το περιστρέψει αρκετά γρήγορα για να αποδώσει τα αναμενόμενα. Σε κάθε περίπτωση, οι κατασκευαστές turbo διαθέτουν πίνακες που μας κατατοπίζουν ως προς αυτά τα χαρακτηριστικά.



Διάγραμμα 6.13 Έτσι θα υπολογίσετε “χοντρικά” την απαιτούμενη διάμετρο στο κέλυφος, για να κινήσετε τον συμπιεστή της παροχής που χρειάζεστε.



Σχήμα 6.1 Στο παραπάνω σχήμα βλέπετε για ποια ακριβώς διάμετρο μιλάμε (διάμετρος εξαγωγής).

Σε “κανονικές” συνθήκες, δηλαδή όπου οι πιέσεις υπερπλήρωσης δεν ξεπερνούν το 1,5 bar (απόλυτη πίεση 2,5 bar), δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιήσει κανείς μικρά κελύφη εξαγωγής με μεγάλους συμπιεστές. Μια σωστή επιλογή τουρμπίνας και συμπιεστή θα προσφέρει ικανοποιητική απόκριση στο γκάζι, επαρκή δύναμη σε όλο το φάσμα των στροφών και σωστή αναλογία πιέσεων.

Το πρόβλημα υφίσταται, όταν από σχετικά μικρούς κινητήρες ζητάμε ιπποδυνάμεις της τάξης των 200+ Ps/lt, χωρίς να είμαστε διατεθειμένοι το turbo να αρχίσει να λειτουργεί στις 4.000+ rpm, επειδή πιο χαμηλά δεν παράγει αρκετά καυσαέρια για να κινήσει την τουρμπίνα σε επαρκείς ρυθμούς περιστροφής. Τότε καταφεύγουμε στο

συνδυασμό μικρής τουρμπίνας με μεγάλο συμπιεστή, ώστε η αδράνεια του στροφείου να είναι μικρή, το κέλυφος εξαγωγής να είναι σχετικά στενό, ώστε να διατηρείται υψηλή η πίεση των καυσαερίων στο εσωτερικό του, και από την άλλη ο (δυσανάλογα μεγάλος για τον δεδομένο κυβισμό) συμπιεστής, να μπορεί να κινείται αρκετά γρήγορα, ώστε να εξασφαλίζει υψηλά επίπεδα ροής και απόδοσης.

6.3.1 ΜΙΚΡΟ TURBO

Ένα μικρό turbo μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση του συνόλου κινητήρας - turbo (σε σχέση πάντα με το σωστά επιλεγμένο turbo), με τους εξής τρόπους [15] :

1. Διαθέτοντας ***ανεπαρκή συμπιεστή***, ο οποίος δεν μπορεί να δώσει την ανάλογη παροχή μάζας αέρα που χρειάζεται ο κινητήρας σε πολύ υψηλές στροφές περιστροφής. Έτσι ο κινητήρας τείνει να δουλέψει σαν ατμοσφαιρικός στις υψηλές στροφές (rpm) του κινητήρα (από πλευράς απόδοσης), υπερθερμαίνοντας παράλληλα τον εισερχόμενο υπό πίεση αέρα και διευκολύνοντας έτσι την προανάφλεξη. Εκτός από την αναπόφευκτη πτώση της θερμοδυναμικής απόδοσης που προκύπτει.

2. Αν διαθέτει πολύ ***μικρό στρόβιλο*** "περιορίζοντας" έτσι τα καυσαέρια, ειδικά στις υψηλές στροφές και φέρνοντας αντίθετα αποτελέσματα από τα αναμενόμενα, υπερθερμαίνοντας επιπρόσθετα βαλβίδες, θαλάμους καύσης και πολλαπλή εξαγωγής. Έτσι ευνοείται για μια ακόμη φορά η προανάφλεξη. Στην περίπτωση αυτή η πίεση που έχουμε στην εισαγωγή είναι "εικονική", καθώς τα καυσαέρια "εγκλωβίζονται" από το μικρό στρόβιλο, με αποτέλεσμα η τελική μάζα του εισερχόμενου αέρα (ή καλύτερα του μείγματος) να είναι μικρότερη από αυτήν που μπορεί να "φιλοξενήσει" ροϊκά ο κινητήρας μας κάτω από την δεδομένη πίεση υπερπλήρωσης.

Έτσι τα μειονεκτήματα που μπορούμε να έχουμε επιλέγοντας ένα μικρό turbo είναι :

α)Μειωμένη απόδοση κινητήρα στις υψηλές στροφές.

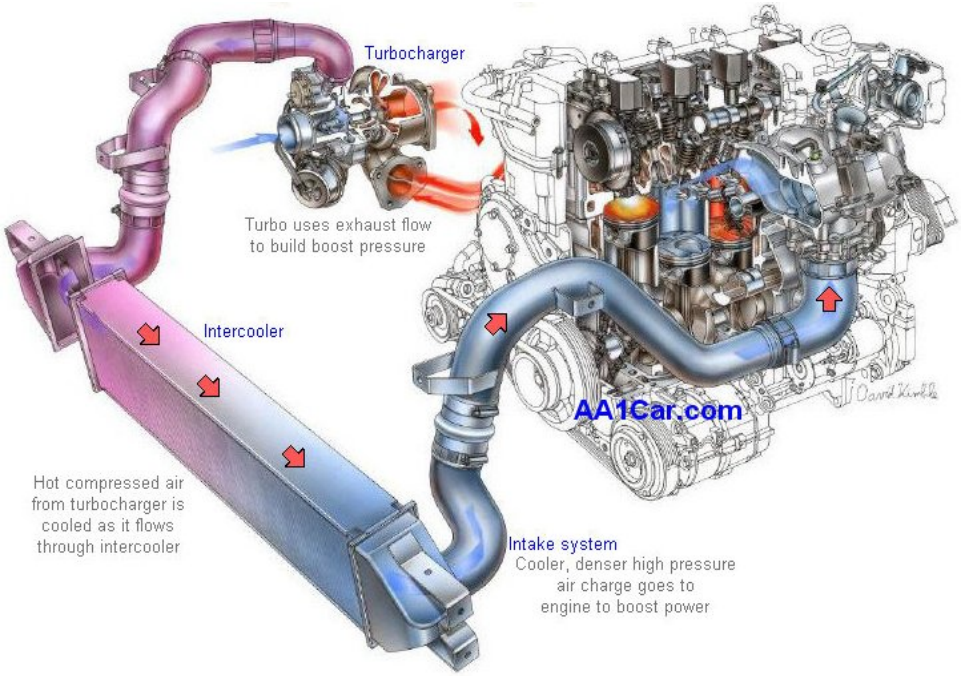
β)Υπερβολικές θερμοκρασίες σε εισαγωγή (μείγμα) και εξαγωγή (καυσαέρια).

γ)Ραγίσματα στο κέλυφος του turbo και στη πολλαπλή εξαγωγής από τις υπερβολικές θερμοκρασίες.

δ)Πιθανό "κάψιμο" των βαλβίδων εξαγωγής.

ε)Διευκόλυνση της προανάφλεξης, λόγω των αυξημένων θερμοκρασιών.

στ)Απαίτηση για μεγάλο intercooler, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών εισαγόμενου αέρα (charge temperatures).



Σχήμα 6.2 Διάταξη στροβιλο-υπερπληρούμενου κινητήρα [22].

6.3.2 ΜΕΓΑΛΟ TURBO

Ανάλογα με την λανθασμένη επιλογή ενός πολύ μικρού turbo, έχουμε και την περίπτωση της επιλογής ενός πολύ μεγάλου turbo για τον κυβισμό και τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα. Στην περίπτωση αυτή έχουμε εξίσου αρνητικά αποτελέσματα, όπως είναι το υπερβολικό "turbo lag" (καθυστέρηση απόκρισης) και οι υψηλές θερμοκρασίες στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του turbo. Παράλληλα, η υπερβολική πτώση απόδοσης του turbo στις χαμηλές και μεσαίες στροφές, αφαιρούν το "δικαίωμα" να μιλάμε για όποια "κέρδη" στις υψηλές στροφές. Μιλώντας για μεγάλο turbo θα μπορούσαμε να συνοψίσουμε σε δύο περιπτώσεις [15] :

1. ***Turbo με μεγάλο συμπιεστή:*** Στην περίπτωση αυτή έχουμε την πτερωτή εισαγωγής να προσπαθεί να κινηθεί στις στροφές του στροβίλου, (ο οποίος έχει θεωρητικά σωστό μέγεθος). Και λέμε ότι προσπαθεί, διότι το υπερβολικό μέγεθος της πτερωτής εισαγωγής υποχρεωτικά "φρενάρει" την πολύ ευαίσθητη (και μικρή) πτερωτή εξαγωγής, με αποτέλεσμα να έχουμε μεν αρκετή παροχή εισερχόμενου αέρα παρά τις λίγες στροφές του άξονα του turbo, αλλά δε τα καυσαέρια να φρενάρουν επάνω στον "αργό" από πλευράς στροφών στρόβιλο, (ο οποίος παρουσιάζει μειωμένη παροχή για τα καυσαέρια, στις λίγες στροφές που εξαναγκάζεται να κινείται). Στην περίπτωση αυτή έχουμε τα εξής συμπτώματα :

α)Υπερβολικές θερμοκρασίες στην εξαγωγή του turbo με όλα τα αρνητικά επακόλουθα που αναφέραμε πριν.

β)Αξονικές τάσεις (thrust forces) οι οποίες τείνουν να καταστρέψουν - ειδικά σε υψηλές πιέσεις υπερπλήρωσης το κουζινέτο εγκάρσιας στήριξης (thrust bearing). Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι οι αντίθετες αξονικές δυνάμεις που ασκούνται σε εισαγωγή και εξαγωγή ενός turbo, δεν εξισορροπούν λόγω της διαφοράς μετωπικής επιφάνειας και πιέσεων στις δύο πτερωτές.

γ)Στρεπτικές τάσεις στον άξονα του turbo, ο οποίος πολλές φορές σπάει με καταστροφικά αποτελέσματα.

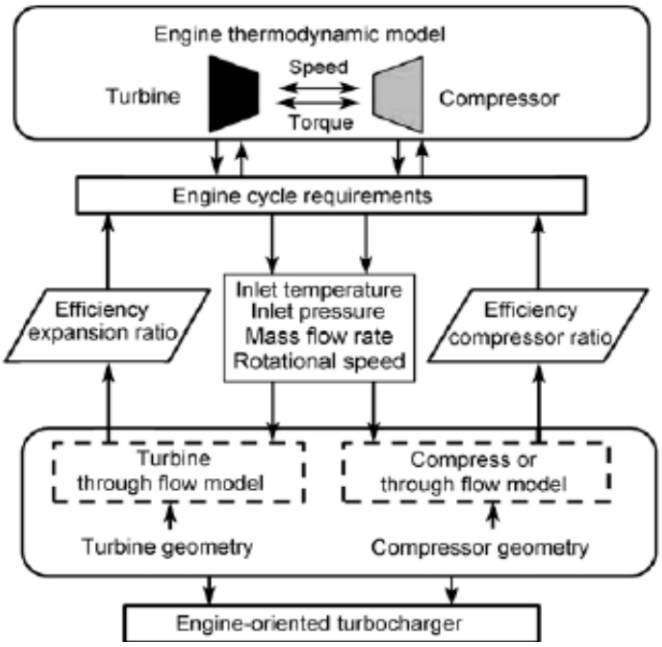
δ)Πολύ καλή απόδοση στις μεσαίες στροφές του κινητήρα, αλλά αρνητική συμπεριφορά στις χαμηλές και τις υψηλές στροφές.

ε)Αυξημένο (χωρίς λόγο) "turbo lag".

2. ***Turbo με μεγάλο στρόβιλο:*** Από μία πλευρά αυτή η "λογική" ηχεί πιο ρεαλιστική από την προηγούμενη, διότι είναι σωστότερος στην πράξη ο συνδυασμός ελαφρώς μεγαλύτερου στροβίλου με λίγο μικρότερο συμπιεστή. Όμως και σε αυτή την περίπτωση αν οι διαφορές μεγέθους και "ικανότητας παροχής" τους είναι σημαντικές, είναι ικανές να δημιουργήσουν φαινόμενα, τα οποία θα έχουν άμεσο αντίκτυπο στην απόδοση του κινητήρα :

α)Η μεγάλη εξαγωγή σημαίνει αυτόματα και μεγάλη καθυστέρηση απόκρισης, διότι είναι "αναίσθητη" σε συγκεκριμένες παροχές καυσαερίων, λόγω μεγέθους και βάρους.

β)Η μικρή αντίστοιχα εισαγωγή είναι ανίκανη να διατηρήσει τα σωστά επίπεδα παροχής, η οποία κανονικά θα πρέπει να αυξάνεται αναλογικά με τις στροφές του κινητήρα. Επιπρόσθετα μία μεγάλη πτερωτή εισαγωγής παίρνει λιγότερες στροφές από μία αντίστοιχα μικρότερη, (σε δεδομένη παροχή), με αποτέλεσμα να "δυσχεραίνεται" το έργο της μικρής πτερωτής εισαγωγής.



Σχήμα 6.3 Μεθοδολογία σχεδιασμού για κατασκευή στροβιλο-υπερπληρωτή [9].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΟΥΜΕΝΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

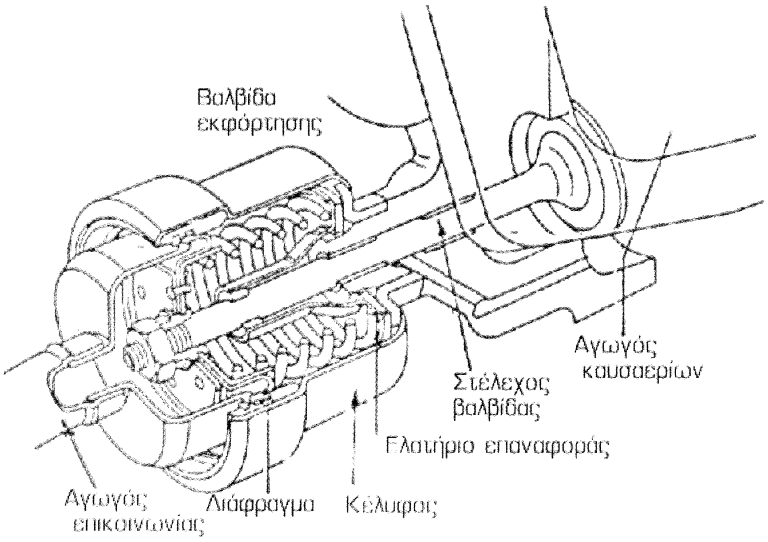
7.1 ΒΑΛΒΙΔΑ ΑΝΑΚΟΥΦΙΣΗΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ (WASTEGATE)

Όταν μιλάει κανείς για "σύστημα turbo", σίγουρα περικλείει και την περίφημη βαλβίδα ανακούφισης του στροβίλου στο σύνολο [3].

Σχήμα 7.1 Τα εξαρτήματα μιας βαλβίδας ανακούφισης στροβίλου.

Στις υψηλές στροφές του κινητήρα, παρουσιάζεται πολλές φορές το φαινόμενο, ο αέρας που "στέλνει" ο συμπιεστής του turbo στον κινητήρα να είναι πολύ περισσότερος απ' αυτόν που χρειάζεται. Τότε η μέση πίεση μέσα στους κυλίνδρους συνεχώς αυξάνει, οπότε υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του κινητήρα από υπερθέρμανση και υπερπίεση, ή θα πρέπει να δουλεύει μονίμως σ' ένα ορισμένο ή μικρό εύρος στροφών. Το τελευταίο βέβαια είναι αδύνατο.

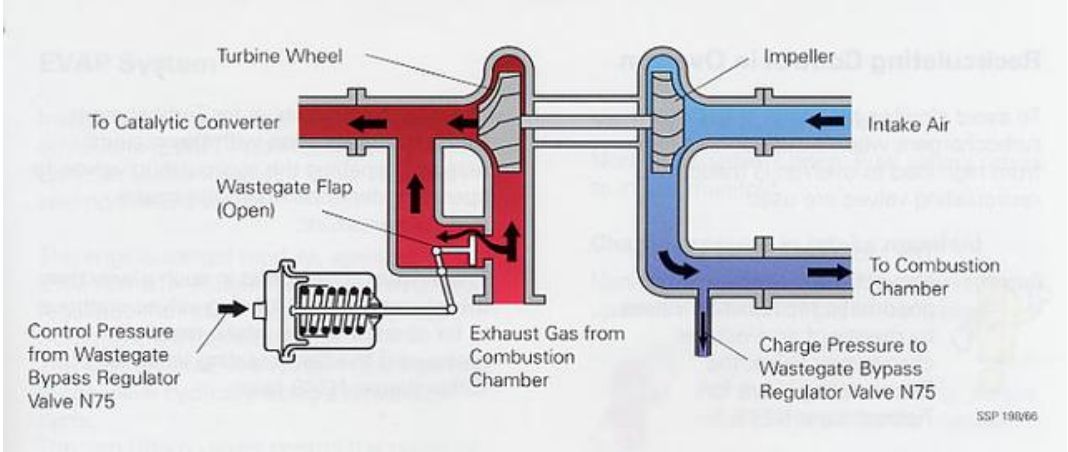
Για να αποφύγουμε ένα τόσο δυσάρεστο αποτέλεσμα, κατασκευάζουμε και τοποθετούμε στο turbo τη διάταξη που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 7.2 Τομή της διάταξης ελέγχου wastegate.

Η διάταξη αυτή ελέγχει πλήρως τη σωστή λειτουργία του turbo κατά τον ακόλουθο τρόπο. Καθώς αυξάνεται η πίεση στην εισαγωγή πλησιάζοντας "επικίνδυνα όρια", ο σωλήνας ο οποίος συνδέει την εισαγωγή (για ακρίβεια την εξαγωγή του συμπιεστή, που αποτελεί την αρχή του αυλού εισαγωγής υψηλής πίεσης) με την ασφαλιστική βαλβίδα, μεταφέρει την επικίνδυνα υψηλή πίεση στο χώρο όπου υπάρχει το διάφραγμα, πάνω στο οποίο προσαρμόζεται το στέλεχος της ασφαλιστικής βαλβίδας. Η πίεση αυτή υπερνικά την αντίσταση του ελατηρίου επαναφοράς που βρίσκεται κάτω από το διάφραγμα, το διάφραγμα υποχωρεί και έτσι ανοίγει η δίοδος μέσα στην οποία η περίσσεια των καυσαερίων πηγαίνει κατευθείαν στην εξαγωγή, χωρίς να περάσει από τον στρόβιλο του turbo.

Έτσι οι στροφές του στροβίλου επανέρχονται σε λογικά επίπεδα, με άμεση συνέπεια την πτώση και των στροφών του συμπιεστή, οπότε και η πίεση στην εισαγωγή φτάνει σε λογικά επίπεδα λειτουργίας αποφεύγοντας την καταστροφή.

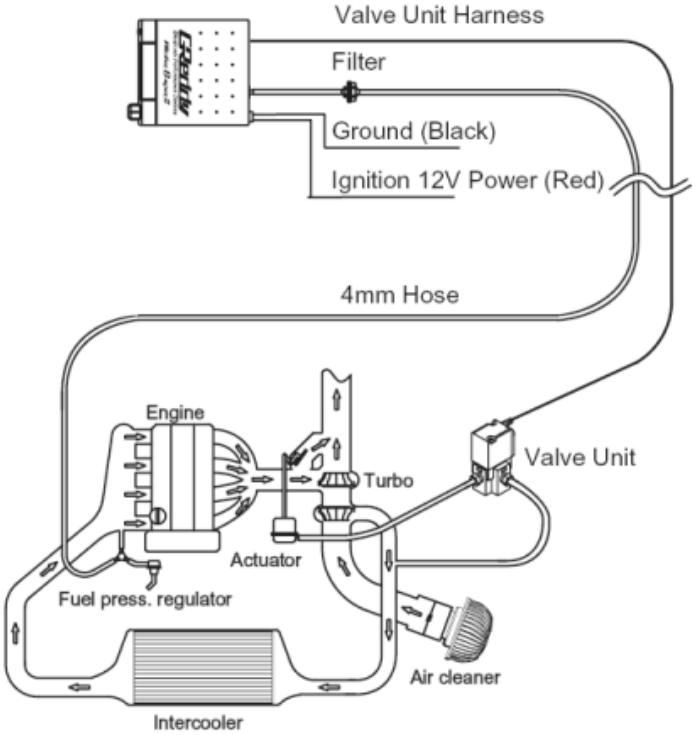


Σχήμα 7.3 Η βαλβίδα ανακούφισης του στροβίλου αποτελεί τη δικλείδα ασφαλείας του turbo, προστατεύοντας τον κινητήρα από την αυτοκαταστροφή.

Σε περίπτωση που η βαλβίδα αυτή πάθει κάποια βλάβη και δεν λειτουργήσει, υπάρχει συνήθως αυτόματη διάταξη μέσω του εγκεφάλου του κινητήρα που τον "βάζει" σε πρόγραμμα ασφαλούς λειτουργίας (safe mode), και έτσι αποφεύγεται η καταστροφή του.

Επίσης, πρέπει να αναφέρουμε ότι υπάρχει και σύστημα παγίδευσης της βαλβίδας ανακούφισης για πολύ λίγο χρονικό διάστημα σε ορισμένους κινητήρες αγώνων, ώστε η ιπποδύναμη για μόνο λίγα δευτερόλεπτα να μπορεί να ανέβει σε πολύ υψηλά επίπεδα για την συγκεκριμένη εφαρμογή και έτσι να επιτύχουμε την ικανοποίηση κάποιας στιγμιαίας ανάγκης, π.χ. προσπέρασμα, χωρίς φυσικά να καταστραφεί ο κινητήρας.

Για παράδειγμα, σε κάποιο αυτοκίνητο αγώνων η κανονική ιπποδύναμη με στροβιλο-υπερπληρωτή σε κανονική λειτουργία έφτανε τους 1200 ίππους. Όταν με ειδική διάταξη "παγιδευόταν" η βαλβίδα ανακούφισης, η ιπποδύναμη έφτανε στιγμιαία τους 1500 ίππους, πράγμα που μας δείχνει το μέγεθος της σοβαρότητας της σωστής λειτουργίας της βαλβίδας αυτής και των παρόμοιων διατάξεων.



Σχήμα 7.4 Λειτουργία της wastegate.

Φαίνεται πολύ απλό και μερικές φορές πράγματι είναι, να κερδίσει κανείς περισσότερη ισχύ ανεβάζοντας την υπερπίεση, μέσω της λειτουργίας της βαλβίδας wastegate. Στις περισσότερες, όμως, περιπτώσεις (αυτοκίνητα δρόμου) τα συστήματα αυτά λειτουργούν σε οριακές σχεδόν συνθήκες, λόγω κόστους βέβαια, και το να αυξήσει κανείς την υπερπίεση καταλήγει στο να αυξηθεί πολύ η

θερμοκρασία της εισαγωγής (του μείγματος δηλαδή), οπότε και η ισχύς μειώνεται παρά την αυξημένη υπερπίεση.

7.2 ΒΑΛΒΙΔΑ ΑΝΑΚΟΥΦΙΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ (ΣΧΑΣΤΡΑ)

Με τον όρο σχάστρα, καλείται η βαλβίδα ανακούφισης που τοποθετείται στο κύκλωμα του turbo, μεταξύ συμπιεστή και πεταλούδας εισαγωγής [10]. Η βαλβίδα αυτού του τύπου δεν είναι κάτι καινούργιο. Πρόκειται για ένα εξάρτημα, που χρησιμοποιείται σαν δικλίδα ασφαλείας σε κάθε κύκλωμα όπου κυκλοφορεί κάποιο αέριο (ή και υγρό) υπό πίεση, όπως για παράδειγμα το κύκλωμα του φυσικού αερίου ή του καλοριφέρ στο σπίτι μας. Είναι αναπόσπαστο κομμάτι κάθε κινητήρα με υπερσυμπιεστή turbo. Η παρουσία της παλαιότερα δεν ήταν εμφανής, διότι στα εργοστασιακά αυτοκίνητα οι σχάστρες, είναι στο σύνολό τους κλειστού κυκλώματος και δεν "ακούγονται" όταν λειτουργούν.

Η χρήση της, επιβάλλεται σε κινητήρες turbo που δουλεύουν με πίεση υπερπλήρωσης από 0,3 bar και πάνω. Ο ρόλος ύπαρξής της, είναι να εκτονώνει την πίεση που αναπτύσσεται στιγμιαία στους σωλήνες και το intercooler πριν από την πεταλούδα της εισαγωγής, όταν αυτή είναι κλειστή και το turbo λόγω αδράνειας εξακολουθεί να περιστρέφεται με υψηλούς ρυθμούς περιστροφής. Όταν αφήνουμε το πόδι μας απ' το γκάζι, ουσιαστικά δίνουμε εντολή στην πεταλούδα να "φράξει" την εισαγωγή του κινητήρα. Ο συμπιεστής του turbo όμως, συνεχίζει να περιστρέφεται και να τροφοδοτεί την εισαγωγή του κινητήρα με αέρα υπό πίεση.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει σχάστρα, η αυξημένη πίεση επιστρέφει στο συμπιεστή του turbo, με αποτέλεσμα το βίαιο φρενάρισμα της πτερωτής του. Αυτό μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες, εκ των οποίων δύο είναι οι σημαντικότερες :

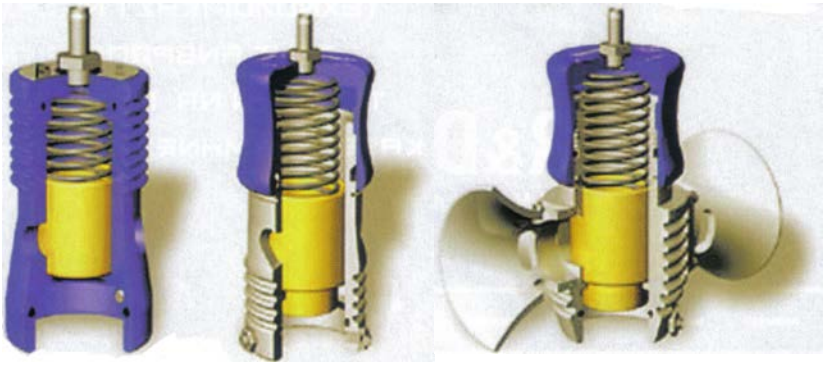
1.Το φρενάρισμα του άξονα κάνει την τουρμπίνα να αργεί να "ξαναστροφάρει" άμεσα, κάνοντας το φαινόμενο της υστέρησης (turbo lag) πιο έντονο.

2.Οι αντίθετες δυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω στη πτερωτή του συμπιεστή και τη φρενάρουν απότομα, επιφέρουν αυξημένη φθορά στα κουζινέτα του άξονά της και στα κουζινέτα εγκάρσιας τριβής (θρος ή thrust bearing).

Όπως είπαμε παραπάνω, η σχάστρα είναι μια βαλβίδα εκτόνωσης του παραπανίσιου αέρα και αποτελείται από τα εξής μέρη :

►**Ελαστική μεμβράνη**. Χρησιμοποιούνται διάφορα πλαστικά υλικά και ο ρόλος της είναι να στεγανοποιεί. Σε ιδιαίτερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και Kevlar.

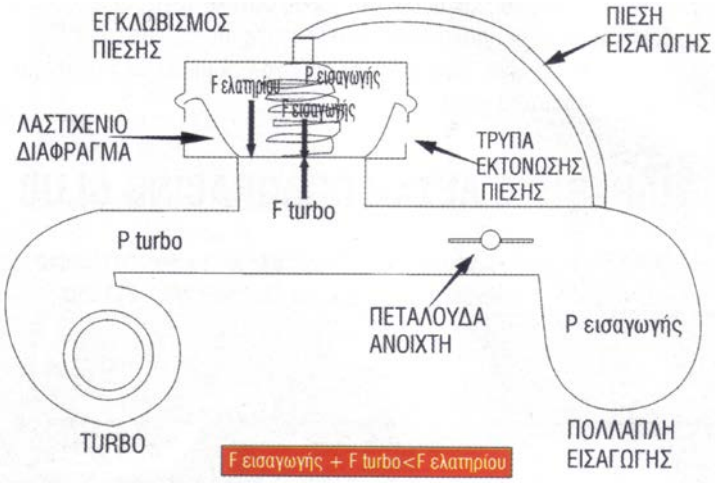
►**Έμβολο**. Μπορεί να είναι πλαστικό ή μεταλλικό. Η επιλογή του υλικού, εξαρτάται από τη χρήση για την οποία προορίζεται και από την ποιότητα της κατασκευής.
►**Ελατήριο**. Είναι μεταλλικό και είναι αυτό που πιέζει το έμβολο, το οποίο στη συνέχεια πιέζει τη μεμβράνη, για να στεγανοποιήσει όταν δεν υπάρχουν ασκούμενες πιέσεις από το κύκλωμα.
►**Κέλυφος**. Εμπεριέχει όλα τα παραπάνω εξαρτήματα και έχει μια μεγάλη είσοδο, στην οποία ασκούνται οι πιέσεις που προέρχονται από τον πεπιεσμένο αέρα που κατευθύνεται στην εισαγωγή. Υπάρχει ακόμα μια είσοδος, αυτή της υποπίεσης (πίσω από το διάφραγμα), και τέλος οι οπές εκτόνωσης της πίεσης.



Σχήμα 7.5 Σχάστρες σε τομή.

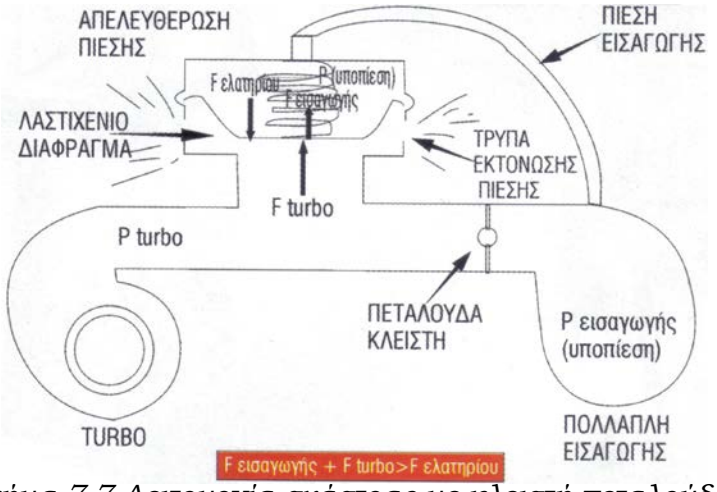
7.2.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΧΑΣΤΡΑΣ

Όταν πατάμε το γκάζι για να επιταχύνουμε, δηλαδή όταν η πεταλούδα είναι ανοιχτή, η πίεση στην εισαγωγή και η πίεση του κυκλώματος του turbo είναι περίπου ίσες (**$F_{εισαγ.}=F_{turbo}$**). Άρα, η μόνη δύναμη που εξασκείται στη σχάστρα είναι αυτή του ελατηρίου (**$F_{ελατ.}$**). Το λαστιχένιο διάφραγμα μένει κλειστό και επομένως η σχάστρα παραμένει κλειστή και δεν αφήνει την πίεση του turbo να διαρρεύσει (σχήμα 7.6).



Σχήμα 7.6 Λειτουργία σχάστρας με ανοιχτή πεταλούδα (τέρμα γκάζι).

Όταν αφήνουμε το πόδι μας απ' το γκάζι, δηλαδή όταν η πεταλούδα κλείνει, τότε τα πράγματα αλλάζουν. Σε αυτή την περίπτωση, η πίεση στο κύκλωμα της τουρμπίνας ανεβαίνει στιγμιαία πέρα από τα προκαθορισμένα επίπεδα, ενώ πίσω από την πεταλούδα (δηλαδή στην πολλαπλή εισαγωγής) δημιουργείται υποπίεση. Στην ουσία η $\mathbf{F_{εισάγ.}}$ αφού κλείσει η πεταλούδα, αποκτά φορά ίδια με της $\mathbf{F_{turbo}}$, βοηθώντας να υποχωρήσει το διάφραγμα. Αυτό συμβαίνει, λόγω του ότι τότε έχουμε υποπίεση (και όχι πίεση), με αποτέλεσμα την αναστροφή της εξασκούμενης δύναμης $\mathbf{F_{εισ.}}$. Ο συνδυασμός των δύο αυτών φαινομένων υπερνικά τη δύναμη του ελατηρίου της σχάστρας, το διάφραγμα υποχωρεί και η πίεση εκτονώνεται (σχήμα 7.7).



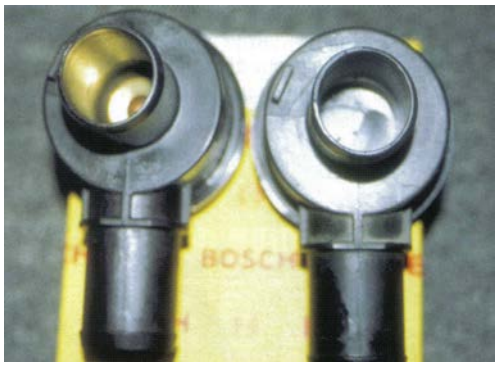
Σχήμα 7.7 Λειτουργία σχάστρας με κλειστή πεταλούδα.

7.2.2 ΕΙΔΗ ΣΧΑΣΤΡΑΣ ΠΟΥ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

1.Σχάστρες "ανακύκλωσης" (recycling blow-off valves) ή κλειστού κυκλώματος: Είναι οι σχάστρες οι οποίες επιστρέφουν την μάζα αέρα που εκτονώνεται, είτε στο "φιλτροκούτι", είτε στο air-flow meter (αισθητήρας μέτρησης παροχής μάζας αέρα). Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους :

α)Να μην κάνει θόρυβο ο εξερχόμενος αέρας (σε αυτοκίνητα παραγωγής).

β)Να μην δημιουργούνται οι γνωστές δυσλειτουργίες από την εκτόνωση του "παραπανίσιου" αέρα στο περιβάλλον, τη στιγμή που έχει μετρηθεί σαν εισερχόμενος από το air-flow meter. Τα αυτοκίνητα με air-flow meter, πρέπει να επιστρέφουν τον αέρα εκτόνωσης, έτσι ώστε όση ποσότητα αέρα έχει αυτό μετρήσει, να εισέρχεται κάποια στιγμή στην εισαγωγή (έστω με μία μικρή καθυστέρηση).

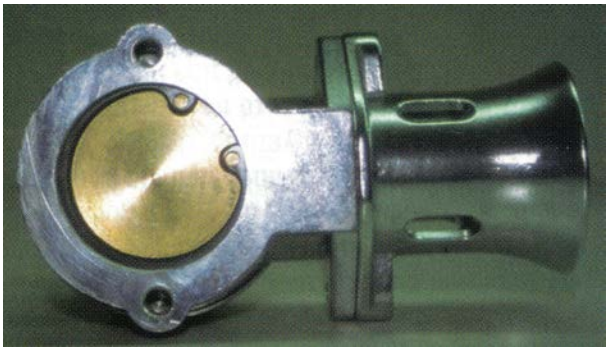


Σχήμα 7.8 Σχάστρα κλειστού τύπου (ανακύκλωσης).

Σχήμα 7.9 Κλασική σχάστρα σε διαστολή.

2.Σχάστρες εκτόνωσης στο περιβάλλον (Blow-off ή Dump valves) ή ανοικτού κυκλώματος: Πρόκειται για τις συνηθισμένες σχάστρες με "λαστιχένιο" διάφραγμα, ή κατασκευασμένο από kevlar σε πιο σύγχρονα μοντέλα. Αυτές οι σχάστρες αποτελούν το 60-70% της αγοράς, αλλά δημιουργούν πολλά προβλήματα σε αυτοκίνητα με air-flow meter (σβήσιμο του κινητήρα, κακή καύση κ.τ.λ.), τα οποία δεν λύνονται όπως πολλοί νομίζουν με ανεπίστροφες βαλβίδες και "ταφ", διότι έτσι το μόνο που καταφέρνουμε είναι να μην δουλεύει σωστά η σχάστρα μας.

3.Σχάστρες εκτόνωσης στο περιβάλλον με μεταλλικό έμβολο, χωρίς "λαστιχένιο" διάφραγμα: Παρόλο που είναι λίγο ακριβές, έχουν αποδειχτεί ιδιαίτερα αξιόπιστες, χωρίς προβλήματα από κατεστραμμένα διαφράγματα. Πρέπει όμως προληπτικά να ελέγχεται η στεγανότητά τους όταν δεν εκτονώνουν αέρα. Υπάρχουν και σε εκδόσεις κλειστού κυκλώματος.



Σχήμα 7.10 Σχάστρα με μεταλλικό έμβολο.

4.Σχάστρες με διπλό έμβολο (Double piston blow off valves): Ο σκοπός που κατασκευάστηκαν αυτές οι σχάστρες, είναι για να λειτουργούν και να "συμβιώνουν" με air-flow meters, εκτονώνοντας παράλληλα τον "παραπανίσιο" αέρα στο περιβάλλον, κάνοντας τον πολυπόθητο "θόρυβο". Οι σχάστρες αυτές, λειτουργούν με δύο έμβολα τα

οποία δεν επιτρέπουν στην υποπίεση να ανοίγει το δεύτερο και κρίσιμο εμβολάκι και να "ρουφάει" έτσι ο κινητήρας απ' ευθείας αέρα από τη σχάστρα και όχι μέσω του air-flow meter (σε κατάσταση υποπίεσης στην εισαγωγή χρησιμοποιώντας λίγο "γκάζι" και όχι πίεση turbo). Έτσι, το δεύτερο έμβολο εκτονώνει πεπιεσμένο αέρα μόνο όταν πρέπει (στιγμιαία) και δεν έχει προβλήματα "ανάγνωσης" το air-flow meter.

Σχήμα 7.11 Σχάστρα διπλού εμβόλου σε διάσταση.

7.2.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕ ΤΙΣ ΣΧΑΣΤΡΕΣ

Συχνά υπάρχουν περιπτώσεις όπου η σχάστρα δεν δουλεύει σωστά. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο βασικούς λόγους :

1.Ανεπαρκής υποπίεση. Μπορεί να προκαλέσει κακή λειτουργία της σχάστρας κι έτσι να υπάρχει απώλεια πίεσης σε λάθος χρόνο. Πρέπει να επιλέγουμε ένα σωστό σημείο τοποθέτησης και να παίρνουμε "καλή" υποπίεση από την εισαγωγή, χρησιμοποιώντας πάντα καλής ποιότητας σωληνάκια.

2.Τρύπιο ή σκισμένο διάφραγμα. Αυτό μπορεί να είναι υπεύθυνο για πτώση στην πίεση και την απόδοση. Σε σχάστρες ανακύκλωσης είναι επικίνδυνο, διότι το πιθανό "αποκολλούμενο" κομμάτι από την μεμβράνη μπορεί να χτυπήσει την ευαίσθητη φτερωτή εισαγωγής, καταστρέφοντάς την (όταν γυρνάει με πάνω από 100.000rpm).

ΠΡΟΣΟΧΗ

Οι σχάστρες με ένα διάφραγμα (ειδικά αυτές που διαθέτουν μαλακά ελατήρια), τείνουν να μείνουν ανοιχτές κατά την διάρκεια που έχουμε σημαντική υποπίεση στην εισαγωγή. Αυτό μπορεί να έχει σαν αρνητικό επακόλουθο την αναρρόφηση, από τις τρύπες που διαθέτουν, τυχόν ξένων σωματιδίων από το περιβάλλον (σκόνες κ.τ.λ.).

Σχήμα 7.12 Σχάστρα "ανοιχτού κυκλώματος" με ενσωματωμένο φίλτρο αέρα.

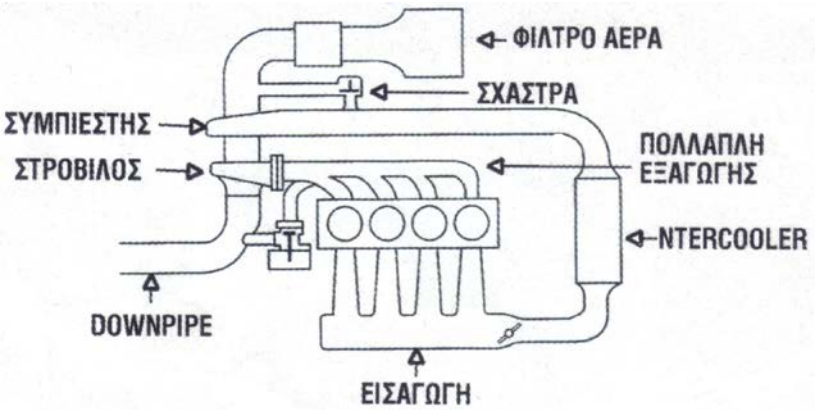
Αυτός είναι και ένας λόγος για τον οποίον οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν σχάστρες "ανακύκλωσης", οι οποίες τραβούν σε καταστάσεις υποπίεσης αέρα από το φιλτροκούτι, και όχι αυτές με τις κλασσικές τρύπες (αυτές δηλαδή που βγάζουν στο περιβάλλον την "αχρείαστη πίεση").

Επίσης για τον ίδιο λόγο υπάρχουν σχάστρες "ανοιχτού κυκλώματος" με ενσωματωμένο φίλτρο αέρα, οι οποίες αποτρέπουν την εισαγωγή ξένων σωματιδίων.

7.3 ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (INTERCOOLER)

Εναλλάκτης θερμότητας είναι το μέσο (ψυγείο), με το οποίο διαφοροποιούμε την θερμοκρασία (προσθέτουμε ή αφαιρούμε ποσά θερμότητας) σε κάποιο ρευστό (υγρό ή αέριο), αντλώντας την ή απορροφώντας την με κάποιο δεύτερο ρευστό. Με απλά λόγια intercooler ονομάζουμε το ειδικό ψυγείο, το οποίο ψύχει τον πεπιεσμένο εισερχόμενο αέρα σε κάποιον turbo κινητήρα, με τη χρήση ως ψυκτικού μέσου του εξωτερικού αέρα ή κάποιου άλλου υγρού (υδρόψυκτα intercooler) [10].

Συνήθως, είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο, καθώς είναι αρκετά υψηλή η θερμική αγωγιμότητά του και βοηθάει έτσι, στην ταχεία μεταφορά της θερμότητας από τον ζεστό εισερχόμενο αέρα του κινητήρα στον κρύο ατμοσφαιρικό αέρα. Βέβαια, μπορούμε να συναντήσουμε intercooler κατασκευασμένα από πληθώρα άλλων υλικών, συνήθως κραμάτων, που άλλα έχουν ως στόχο την μείωση του κόστους κατασκευής και άλλα την αύξηση της αντοχής της όλης κατασκευής.



Σχήμα 7.13 Διάταξη κινητήρα turbo.

7.3.1 ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ INTERCOOLER

Το intercooler, όπως είπαμε, αναλαμβάνει τον "ανιαρό" ρόλο της ψύξης του πεπιεσμένου και συνεπώς ζεστού εισερχόμενου αέρα. Η χρησιμότητά του λοιπόν, έχει να κάνει με την μείωση της θερμοκρασίας και κατά συνέπεια με την αύξηση της πυκνότητας (density) του εισερχόμενου αέρα. Είναι γνωστό από την φυσική, ότι στον ίδιο όγκο χωράει μεγαλύτερη ποσότητα μάζας αερίου (αέρα), όταν η πυκνότητά του είναι μεγαλύτερη. Μεγαλύτερη ποσότητα αέρα σημαίνει δυνατότητα για δημιουργία περισσότερου μείγματος (αέρα - βενζίνης), και κατά συνέπεια ισχυρότερη και αποδοτικότερη καύση στον θάλαμο καύσης του κινητήρα.

Έτσι λοιπόν, κατανοούμε πως όσο ψύχουμε αποτελεσματικότερα τον εισερχόμενο αέρα, καταφέρνουμε να "χωρέσουμε" και να εκμεταλλευτούμε στην καύση περισσότερο σε μάζα φρέσκο μείγμα. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος για την αύξηση της απόδοσης του κινητήρα.

Η αξία ενός intercooler λοιπόν, χαρακτηρίζεται κυρίως από το πόσο μπορεί να μειώσει την θερμοκρασία του πεπιεσμένου αέρα και συνεπώς να αυξήσει την πυκνότητά του. Αυτό είναι κάτι το μετρήσιμο. Μπορούμε να υπολογίσουμε την μεταβολή της πυκνότητας (άρα στο περίπου και της απόδοσης), λόγω της προσθήκης ενός intercooler ή της αλλαγής του με ένα αποδοτικότερο, γνωρίζοντας τις θερμοκρασίες στην εισαγωγή του κινητήρα πριν και μετά την βελτίωση.

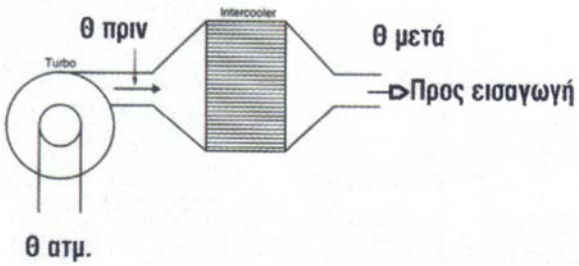
Έστω θ πριν=150°C και θ μετά=80°C (ανεξάρτητα αν έγινε αντικατάσταση ή πρώτη τοποθέτηση intercooler). Τότε:

$$\text{Μεταβολή Πυκνότητας εισερχόμενου αέρα} = \frac{\text{Αρχική απόλυτη Θερμ.}}{\text{Τελική απόλυτη Θερμ.}} - 1 \Rightarrow$$

$$\text{Μετ. Πυκν.} = \frac{\theta\ \text{πρίν} = 150^{o}C + 273^{o}C}{\theta\ \text{μετά} = 80^{o}C + 273^{o}C} - 1 \Rightarrow \text{Μετ. Πυκν.} = \frac{423}{353} - 1 = 0.2 \text{ ή } 20\%$$

7.3.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Ένα intercooler, χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή απόδοσής του (efficiency) και επιλέγεται για την κάθε περίπτωση με βάση αυτόν.



Σχήμα 7.14 Μέτρηση θερμοκρασίας στην είσοδο και έξοδο του intercooler.

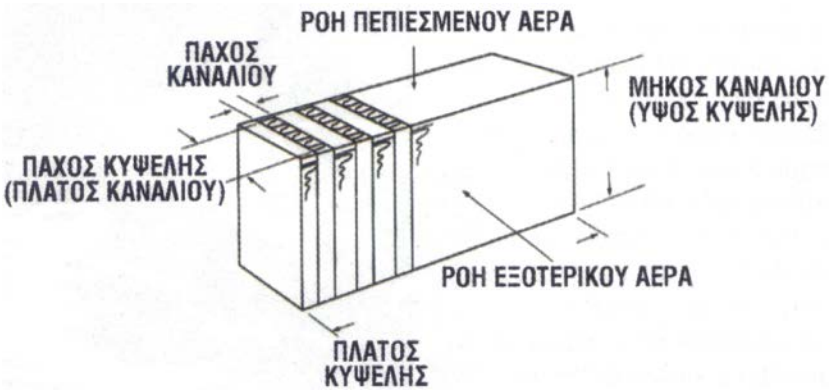
Αν έχουμε λοιπόν, θερμοκρασία εισαγωγής στο intercooler (πριν την ψύξη) θ πριν π.χ. 120°C και θερμοκρασία εξαγωγής (μετά την ψύξη) θ μετά π.χ. 60°C, τότε ο συντελεστής απόδοσης του intercooler Ε με βάση την εξωτερική θερμοκρασία θ ατμ π.χ. 20°C θα είναι :

$$E_{\text{από.}} = \frac{\theta\ \text{πρίν} - \theta\ \text{μετά}}{\theta\ \text{πρίν} - \theta\ \text{ατμ.}} \Rightarrow E = \frac{120 - 60}{120 - 20} = \frac{60}{100} = 60\%$$

Έτσι λοιπόν για να βρει κανείς πειραματικά και σε δεδομένες συνθήκες (πίεσης turbo, εξωτερικής θερμοκρασίας, υγρασίας, ταχύτητας αέρα που διαπερνά το intercooler κ.τ.λ.) τον συντελεστή απόδοσης ενός intercooler που λειτουργεί σε συγκεκριμένο κινητήρα, δεν έχει παρά να χρησιμοποιήσει 3 διαφορετικά θερμόμετρα : στην εισαγωγή του turbo, μετά το turbo (πριν το intercooler) και μετά το intercooler.

7.3.3 ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ (TURBO LAG)

Κάνοντας κανείς πειράματα με διάφορα μεγέθη intercooler, θα διαπιστώσει ότι τα μεγαλύτερα σε εσωτερικά ωφέλιμο όγκο (συνολικός εσωτερικός όγκος κυψέλης), αποδίδουν καλύτερα, έχοντας μεγαλύτερο τον συντελεστή απόδοσής τους.



Σχήμα 7.15 Επεξήγηση των τμημάτων του intercooler.

Όμως, υπάρχουν άλλες παράμετροι, οι οποίες μας περιορίζουν από το να χρησιμοποιούμε τα μεγαλύτερα intercooler που θα βρούμε μπροστά μας. **Το turbo lag ή αλλιώς καθυστέρηση απόκρισης του turbo, είναι ο χρόνος που χρειάζεται κάποιο turbo για να "πληρώσει" με αέρα τον κινητήρα στον οποίο δουλεύει και αυτός να φτάσει στο επίπεδο πίεσης που έχει προρυθμιστεί (με ανοιχτή πεταλούδα γκαζιού) στις συγκεκριμένες στροφές λειτουργίας**. Το turbo lag μπορεί να υπολογιστεί με ένα απλό χρονόμετρο. Όμως, η μεταβολή στο turbo lag που θα προσδώσει η προσθήκη ενός intercooler με δεδομένο όγκο π.χ. 5000cc, μπορεί να υπολογιστεί με μία απλή σχέση, αρκεί να γνωρίζουμε την

ροή (παροχή) του εισερχόμενου αέρα (flow rate), π.χ. 6000lt/min στις δεδομένες στροφές (π.χ. 4000rpm) λειτουργίας του κινητήρα. Ας θεωρήσουμε επίσης, ότι θέλουμε να μετρήσουμε το "lag" μέχρι η πίεση στην εισαγωγή να φτάσει στο 1 bar (λόγος πίεσης - pressure ratio = 2).

$$\text{Χρόνος turbo lag} = \frac{\text{Κυβισμός κινητήρα}}{\text{Ροή εισερχόμενου αέρα ανά μονάδα χρόνου}} \times \text{λόγο πίεσης} \Rightarrow$$

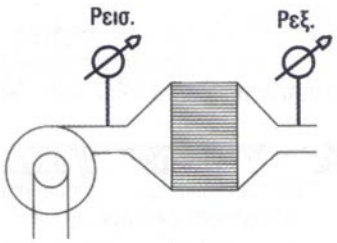
$$\Rightarrow \text{turbo lag} = \frac{5.000\ cc}{2.000_{Lt/min}} \times 2 \Rightarrow \text{turbo lag} = \frac{5.000\ cc}{2.000_{Lt/min}} \times \frac{60\ sec/min}{353\ cc/Lt} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{turbo lag} = 0.15sec$$

Προσοχή: Αυτό δεν είναι το συνολικό turbo lag, αλλά η επιπρόσθετη καθυστέρηση που παρουσιάζει το turbo, για να πληρώσει τον extra όγκο των 5000cc που έχει εσωτερικά το intercooler μαζί με τους σωλήνες σύνδεσης.

7.3.4 ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ

Ενώ με την προσθήκη ενός intercooler σε έναν turbo κινητήρα θα περίμενε κανείς βελτίωση στην ιπποδύναμη (ανάλογα με το αποτέλεσμα της πρώτης σχέσης παραπάνω), υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την τελική απόδοση ενός κινητήρα, όπως είναι η πτώση πίεσης κατά μήκος του intercooler.



Σχήμα 7.16
Μέτρηση πίεσης στην είσοδο και έξοδο του intercooler.

Έστω λοιπόν, ότι έχουμε πίεση υπερπλήρωσης 0,82 bar στην εισαγωγή ενός intercooler που τοποθετούμε σε έναν turbo κινητήρα (που πριν δεν είχε καθόλου) και 0,77 bar πίεση στην εξαγωγή του. Έστω επίσης ότι εκείνη την μέρα η βαρομετρική πίεση ήταν 0,97 bar, πράγμα που σημαίνει ότι έχουμε απόλυτη πίεση στην εισαγωγή του intercooler Ρεισ=0,97+0,82 και απόλυτη πίεση στην εξαγωγή Ρεξ=0,97+0,77. Τότε η απώλειά μας θα είναι :

$$\text{Απώλεια\%} = 1 - \frac{\text{Απόλυτη πίεση στην εξαγωγή}}{\text{Απόλυτη πίεση στην εισαγωγή}} \Rightarrow$$

$$\text{Απώλεια} = 1 - \frac{0.97+0.77}{0.97+0.82} = 1 - \frac{1.74}{1.79} = 0.03 \text{ ή } 3\%$$

Αντίστροφα όμως, όταν τοποθετήσουμε ένα καλύτερο ροϊκά intercooler έχουμε βελτίωση και το ποσοστό είναι αρνητικό. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να υπολογίσουμε πόσο θα βελτιωθεί η απόδοσή μας με την αλλαγή ενός intercooler με ένα ροϊκά καλύτερο, τότε θα πρέπει να γνωρίζουμε δύο πράγματα : την απόλυτη πίεση στην εξαγωγή των δύο intercooler κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Έστω ότι intercooler 1 : Απόλυτη πίεση 1= 1,74

& intercooler 2 : Απόλυτη πίεση 2= 1,77

Τότε: $\text{Βελτίωση\%} = 1 - \frac{\text{Απόλυτη πίεση στην εξαγωγή του 1}}{\text{Απόλυτη πίεση στην εξαγωγή του 2}} \Rightarrow$

$\Rightarrow \text{Βελτίωση\%} = 1 - \frac{1.74}{1.77} = 0{,}02$ ή 2% βελτίωση

λόγω αύξησης της **απόλυτης πίεσης** κατά 2%.

Έτσι, κατανοούμε πόσο σημαντική είναι η σχεδίαση ενός intercooler στον τελικό συντελεστή απόδοσης που θα προσδώσει (θετικό ή αρνητικό), για την λειτουργία του υπερτροφοδοτούμενου κινητήρα μας.

7.3.5 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΟΝ ΘΑΛΑΜΟ ΚΑΥΣΗΣ

Ένας από τους βασικότερους έμμεσους λόγους, που τοποθετούμε ένα intercooler σε έναν κινητήρα που δεν διαθέτει ή που αλλάζουμε το παλιό με ένα μεγαλύτερο, είναι τα αρνητικά φαινόμενα που δημιουργούνται στον θάλαμο καύσης, όταν οι θερμοκρασίες του εισερχόμενου μείγματος είναι πολύ υψηλές. Φυσικά, δεν εννοούμε τίποτε άλλο από την επικίνδυνη προανάφλεξη (και αυτανάφλεξη), η οποία είναι γνωστή ως πειράκια [7].

Η προανάφλεξη έχει αρνητικές συνέπειες και είναι ο κύριος λόγος για να καταστραφεί ένας turbo κινητήρας. Όταν λοιπόν έχουμε υπερβολικές θερμοκρασίες στον θάλαμο καύσης πριν την ανάφλεξη του μείγματος, είναι πολύ εύκολο να παρουσιαστεί η λεγόμενη αυτανάφλεξη, η οποία αποτελεί “υποσύνολο” της προανάφλεξης, αφού αυτή πάντα συμβαίνει πριν το προκαθορισμένο χρονικό σημείο που το μπουζί θα δώσει την “εντολή” για σπινθήρα.

Έτσι λοιπόν, θα πρέπει να είναι κανείς πολύ προσεκτικός με την επιλογή του intercooler, καθώς το φαινόμενο της αυτανάφλεξης λόγω υπερβολικών θερμοκρασιών δεν μπορεί να “μπαλωθεί” με κανέναν τρόπο (π.χ. ρύθμιση στο αβάνς ή το μείγμα). Όλα αυτά βέβαια, ισχύουν με την προϋπόθεση ότι έχουμε ρυθμίσει πολύ καλά τον κινητήρα μας από πλευράς χρονισμών και καυσίμου, καθώς και ότι έχει επαρκή “εξαγωγή” (εξάτμιση).

7.3.6 ΤΥΠΟΙ INTERCOOLER

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι intercooler σε επίπεδο αυτοκινήτων παραγωγής, αλλά και στο χώρο του after market (βελτιώσεις) [10] :

1) Τα πιο διαδεδομένα είναι τα ***intercooler αέρος - αέρος*** ή αλλιώς ***εναλλάκτες θερμότητας αέρος - αέρος.*** Είναι αυτά που κυρίως αναφερόμαστε στην ανάλυσή μας,

μέχρι τώρα. Βέβαια το κομμάτι της φυσικής που αναφέραμε, ανταποκρίνεται σε όλους τους τύπους εναλλάκτη που υπάρχουν.

Σχήμα 7.17 Intercooler αέρος - αέρος.

Τα intercooler αέρος-αέρος λοιπόν, είναι πολύ απλά στην κατασκευή και δεν απαιτούν καθόλου σχεδόν συντήρηση εκτός από έναν περιοδικό έλεγχο για "οπές" και απώλεια πίεσης, ή κάποιο ενδεχόμενο εσωτερικό αλλά και εξωτερικό καθάρισμα (από υπολείμματα λαδιού εσωτερικά και διάφορα σωματίδια που εμποδίζουν την ροή του αέρα εξωτερικά και κατ' επέκταση την απόδοση του intercooler).

Αντίθετα, το βασικό πρόβλημα που παρουσιάζεται με την χρήση τους, είναι ότι για να έχουν αρκετή "θερμοαπαγωγική" ικανότητα, θα πρέπει να είναι μεγάλα σε διαστάσεις και κατά συνέπεια απαιτούν αρκετό χώρο, σε σημείο του αυτοκινήτου που να περνά ο εξωτερικός αέρας σχεδόν με την ταχύτητα κίνησης του οχήματος.

Σχήμα 7.18 Μονόπλευρο intercooler αέρος-αέρος τοποθετημένο στην μετώπη του αυτοκινήτου.

Σχήμα 7.19 Δίπλευρο intercooler αέρος-αέρος τοποθετημένο στην μετώπη του αυτοκινήτου.

Η μοναδική θέση που μπορεί να πληρεί αυτήν την προδιαγραφή, είναι η "μετωπική" τοποθέτηση πίσω ακριβώς από την οπή του προφυλακτήρα και της μάσκας και μπροστά από τα ψυγεία ψυκτικού υγρού κινητήρα και air condition.

Με βάση όμως το γεγονός ότι το πάχος στα intercooler αέρος - αέρος είναι σεβαστό (5cm και πλέον) και θα πρέπει να έχουμε και χώρο για "διόδους" των σωληνώσεων εισαγωγής και εξαγωγής, συμπεραίνουμε ότι δεν είναι πολύ προσιτή και εύκολη αυτού του είδους η τοποθέτηση σε μερικά "στενάχωρα" εμπρός (στον προφυλακτήρα) αυτο-κίνητα.

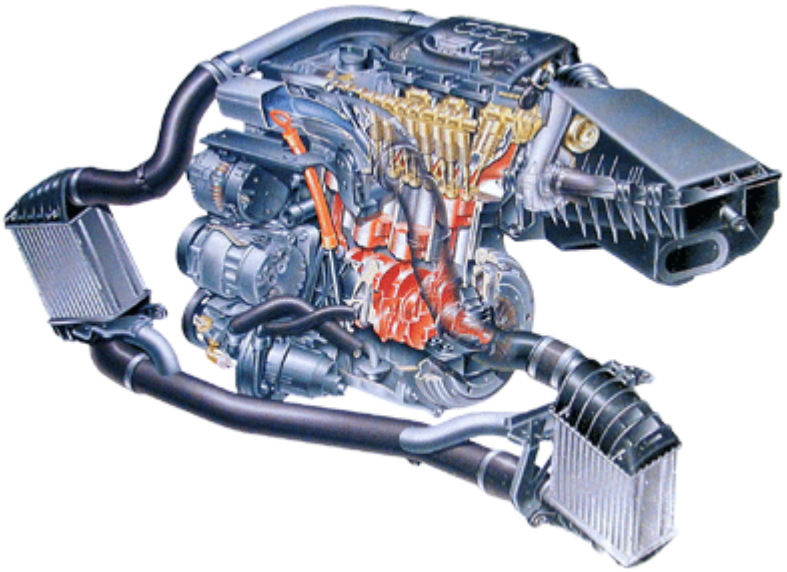
Επιπρόσθετα, η τοποθέτηση στην θέση αυτή, αν και ιδανική για την θερμοαπαγωγή του intercooler, δημιουργεί πρόβλημα απόδοσης (πολλές φορές) στα πίσω ψυγεία (νερού και A/C). Θέλει λοιπόν, πολύ μεγάλη προσοχή, μελέτη και σωστό προγραμματισμό πριν καταλήξουμε στην κατάληλη θέση. Επιπλέον, θα πρέπει να προσεχθεί και το συνολικό μήκος των σωληνώσεων, καθώς και ο εσωτερικός όγκος, διότι όσο αυτός μεγαλώνει, τόσο μεγαλώνει (όπως προαναφέραμε βάση υπολογισμών) το turbo lag.

Μία άλλη πιθανή και διαδεδομένη θέση για τοποθέτηση του intercooler, είναι μέσα από το καπό και σε συνεργασία με ειδικό αεραγωγό. Αυτή η λύση είναι πολύ δημοφιλής στην Ιαπωνία, καθώς πολλά αυτοκίνητα Ιαπωνικής προέλευσης διαθέτουν τέτοιου είδους intercooler (Subaru Impreza, RX-7 II, Toyota Starlet). Αν και η θέση αυτή δεν κρίνεται η καταλληλότερη και η ιδανικότερη, έχουμε παρατηρήσει μεγάλες αποκλίσεις ως προς την αποτελεσματικότητα τέτοιων intercooler.

Για παράδειγμα, ενώ στο Toyota Starlet η απόδοση του intercooler κυμαίνεται σε χαμηλό επίπεδο, στο Subaru Impreza έχουμε παρά πολύ καλή θερμοαπαγωγή και συντελεστή απόδοσης. Ειδικά τα τελευταία μοντέλα που είναι εξοπλισμένα με ειδικό μπεκ ψεκασμού νερού ή μείγματος νερού - οινοπνεύματος στην εξωτερική πλευρά του intercooler, έχουν πολύ καλή απόδοση, λόγω της εξαέρωσης του υγρού (νερού κ.τ.λ.) και την παραγωγή "ψύχους" (ή σωστότερα την extra απαγωγή θερμότητας από το intercooler, λόγω εξαέρωσης του ψεκαζόμενου υγρού).

Έτσι, βλέπουμε ότι μπορούμε να "ενισχύσουμε" την λειτουργία ενός intercooler αέρος - αέρος με την μέθοδο αυτή του εξωτερικού ψεκασμού, αυξάνοντας στιγμιαία και όσο διαρκεί η εξαέρωση τον συντελεστή απόδοσης του intercooler.

Τέλος, υπάρχουν και διάφορες εναλλακτικές θέσεις για τοποθέτηση intercooler, οι οποίες επιλέγονται κατόπιν αδυναμίας επιλογής της ιδανικής θέσης. Τέτοιες θέσεις είναι αυτές που συναντάει κανείς σε αυτοκίνητα όπως το Audi A4 ή το Audi S3 20vt. Οι θέσεις αυτές, αποτελούν "ημίμετρες λύσεις" και απαιτούν μελέτη για βελτίωση, ειδικά εάν πρόκειται να αναβαθμίσει κανείς τους κινητήρες των αυτοκινήτων αυτών.



Σχήμα 7.20 Το Audi S3 διαθέτει από το εργοστάσιο δυο intercooler αέρος, τα οποία όμως δεν είναι τοποθετημένα στην ιδανική θέση (μετώπη).

2)Υδρόψυκτοι εναλλάκτες θερμότητας ή ***εναλλάκτες αέρος - νερού***, ή ***intercooler νερού*** ή ***chargecooler***.

Σχήμα 7.21 Intercooler νερού.

Είναι πραγματικά πολλά τα ονόματα που χρησιμοποιούμε στην τεχνική ορολογία, για να περιγράψουμε ένα υδρόψυκτο intercooler. Ένα υδρόψυκτο intercooler αποτελείται από 4 βασικά εξαρτήματα :

α.*Το κυρίως intercooler*, το οποίο ψύχει τον εισερχόμενο αέρα μεταφέροντας ποσά θερμότητας από αυτό προς το ψυκτικό μέσο (νερό).

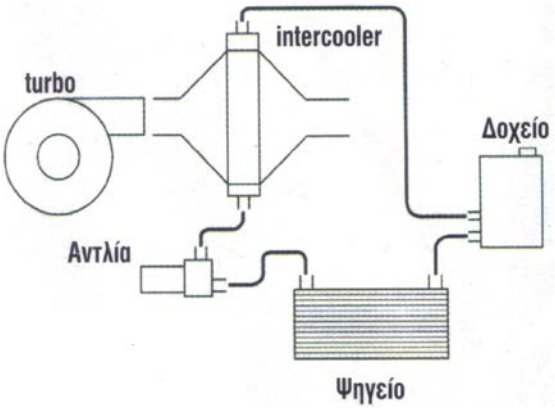
β.*Το ψυγείο νερού*, το οποίο μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή, αρκεί να τοποθετείται σε σωστή ροϊκά θέση και να διαθέτει αρκετή μετωπική επιφάνεια. Λόγω του ότι τα ψυγεία νερού μπορούν να κατασκευαστούν με 1,5 cm ελάχιστο πάχος, εύκολα καταλαβαίνουμε ότι μπορεί να τοποθετηθεί (εμπρός από όλα τα ψυγεία και την κεντρική οπή - αεραγωγό του μπροστινού προφυλακτήρα), ακόμα και αν το αυτοκίνητο διαθέτει κινητήρα στο πίσω μέρος. Το ψυγείο νερού αναλαμβάνει να "παγώσει" το ήδη ζεστό ψυκτικό μέσο (νερό), το οποίο επιστρέφει κρύο πια στο κυρίως intercooler. Έτσι, το νερό διαγράφει κύκλους και η όλη διαδικασία θυμίζει τις διαφορές αερόψυκτων και υδρόψυκτων κινητήρων.

γ.*Αντλία νερού (κυκλοφορητής)*, η οποία κυκλοφορεί το ψυκτικό μέσο (νερό). Η αντλία αυτή θα πρέπει να έχει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά "παροχής", ενώ μας είναι αδιάφορη η δυνατότητα να "ανεβάσει πίεση" στο κύκλωμα. Αν η παροχή της είναι ανεπαρκής, τότε το σύστημα (intercooler) δεν θα έχει ικανοποιητικό συντελεστή απόδοσης, ανεξάρτητα από το μέγεθος του ψυγείου και του intercooler.

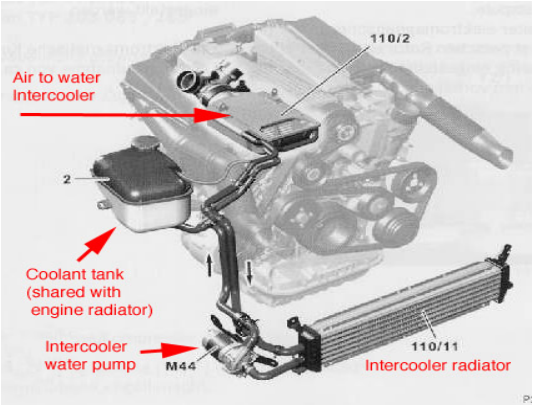
Προσοχή, η αντλία νερού θα πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένη να λειτουργεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα, μεταφέροντας νερό. Συνεπώς θα πρέπει να μην υπερθερμαίνεται από την συνεχή χρήση και να είναι απομονωμένο τελείως το ηλεκτρικό μοτέρ της από τον στρόβιλο που κινεί το νερό. Η αντλία μπορεί να δουλεύει με θερμοστάτη στο intercooler ή στον αέρα εισαγωγής ή συνέχεια, εφόσον ο κινητήρας είναι σε λειτουργία.

δ.*Δοχείο ψυκτικού μέσου*. Το δοχείο αυτό αναλαμβάνει την εξαέρωση και την αποθήκευση του ψυκτικού μέσου.

Προσοχή πρέπει να δοθεί στην συνδεσμολογία του όλου συστήματος. Τα τέσσερα αυτά εξαρτήματα, θα πρέπει να έχουν συγκεκριμένη σειρά και το δοχείο να βρίσκεται απαραίτητα στο ψηλότερο σημείο.



Σχήμα 7.22 Διάταξη σύνδεσης κυκλώματος για intercooler νερού.



Σχήμα 7.23 Κινητήρας turbo που διαθέτει intercooler νερού.

Το ψυκτικό μέσο είναι το υγρό, το οποίο λειτουργεί καλύτερα το καλοκαίρι (θερμοαπαγωγή) ή το αντιψυκτικό τον χειμώνα (ή όλο τον χρόνο), και χρησιμοποιείται το κατάλληλο, για να αποφύγουμε δυσάρεστες εκπλήξεις αν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 0°C (πάγωμα - διαστολή).

Οι βασικότεροι λόγοι ύπαρξης τέτοιων intercooler είναι:

♦Η ανυπαρξία χώρου, για ένα σωστό σε μέγεθος intercooler αέρος - αέρος στην σωστή "μετωπική" θέση.

♦Η αδυναμία για "πέρασμα σωλήνων" ικανών σε διατομή (τουλάχιστον 42 mm), για να μεταφέρουν τον πεπιεσμένο αέρα.

♦Η τοποθέτηση του κινητήρα στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου, όπου τα πράγματα είναι “δύσκολα” από πλευράς ροής του εξωτερικού αέρα.

♦Η απαίτηση για αυξημένη “θερμική αδράνεια” από την λειτουργία του intercooler.

Και στις τρεις πρώτες περιπτώσεις, το γεγονός ότι το υδρόψυκτο intercooler μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε μέσα στο χώρο του κινητήρα, καθώς καταλαμβάνει σαφώς μικρότερο χώρο από το απλό intercooler, “λύνει” τα χέρια μας. Έτσι αν αναλογιστούμε ότι κερδίζουμε και σε turbo lag (λόγω μικρότερων σε μήκος σωληνώσεων), τότε κατανοούμε το βασικό κίνητρο για να το επιλέξουμε.

Περιπτώσεις εργοστασιακών αυτοκινήτων όπως η Lotus Esprit turbo, η οποία έχει κινητήρα τοποθετημένο πίσω, αποδεικνύουν την χρησιμότητά του, αλλά και την ευκολία που προσφέρει. Μπορεί να είναι πιο πολύπλοκο σαν εφαρμογή, αλλά από το να μεταφέρεις τον εισερχόμενο αέρα στο εμπρός μέρος του αυτοκινήτου και πάλι πίσω (περίπου 7 - 8 m σωληνώσεων) είναι σαφώς προτιμότερο.

Ο τέταρτος λόγος ύπαρξης που αφορά την θερμική αδράνεια, είναι και η αιτία που χρησιμοποιείται ευρέως σε “Dragracing καταστάσεις”. Είναι εύκολα κατανοητό ότι ένα αλουμινένιο intercooler αέρος - αέρος, εάν του “στερήσεις” την παροχή του εξωτερικού αέρα, σε ελάχιστα δευτερόλεπτα, θα είναι σαν να μην υπάρχει intercooler από πλευράς θερμοκρασιών. Ενώ, το υδρόψυκτο intercooler, ακόμα και με το αυτοκίνητο σε στάση (από πλευράς ροής αέρα), έχει μεγάλα αποθέματα “θερμικής αδράνειας”, χάρη στο ψυκτικό μέσο, το οποίο όσο περισσότερο σε μάζα είναι, τόσο το καλύτερο. Επίσης, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ αλουμινίου και νερού (ή άλλου ψυκτικού μέσου), είναι 14 φορές μεγαλύτερος από αυτόν μεταξύ αλουμινίου και αέρα [1]. Έτσι, είναι εύκολα κατανοητό γιατί πολλοί βελτιωτές σε Ευρώπη και Αμερική χρησιμοποιούν (ειδικά σε αγώνες Dragster) τέτοιου είδους συστήματα.

Προσοχή: Ενώ σε intercooler αέρος - αέρος δεν παίζει πολύ αρνητικό ρόλο για την αξιοπιστία του κινητήρα μία μικρή διαρροή, στα υδρόψυκτα κάτι τέτοιο μπορεί να συντελέσει την “απόλυτη καταστροφή”.

Επίσης, με την χρήση υδρόψυκτου intercooler, μπορεί κανείς (βλέπε Dragster) να χρησιμοποιήσει αντί για ψυγείο νερού, δοχείο με πάγο και να έχει συντελεστή απόδοσης του intercooler πάνω από 100%, καθώς ο εισερχόμενος αέρας μπορεί να γίνει ψυχρότερος από τον ατμοσφαιρικό. Τέλος, μέθοδο intercooling αποτελεί το “water injection” (σύστημα ψεκασμού νερού στην εισαγωγή του κινητήρα μέσω management - ηλεκτρονικός εγκέφαλος, ο οποίος ρυθμίζει την ποσότητα του νερού που θα ψεκαστεί βάση παραμέτρων, όπως πίεση turbo ή θερμοκρασία καυσαερίων).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8
ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

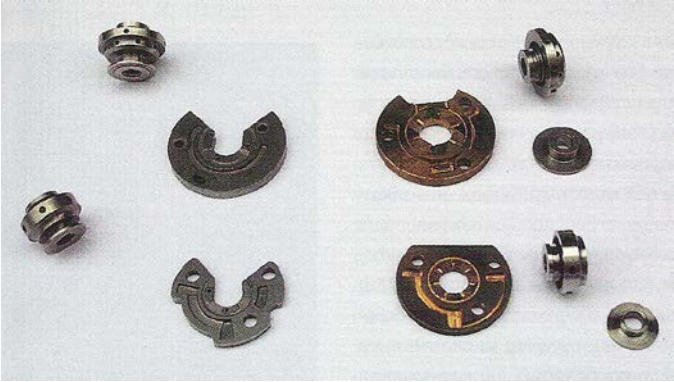
Η επισκευή - ανακατασκευή ενός turbo, προσφέρει μια εξαιρετική ευκαιρία για βελτιωτικές παρεμβάσεις στο εσωτερικό του. Στόχος είναι η αύξηση της αντοχής, της αξιοπιστίας και της ροϊκής και ογκομετρικής - θερμοδυναμικής του απόδοσης. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα δούμε μια σειρά από βελτιωτικές παρεμβάσεις που μπορούμε να κάνουμε σε έναν στροβιλο-υπερπληρωτή.

8.2 ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΘΡΟΣ

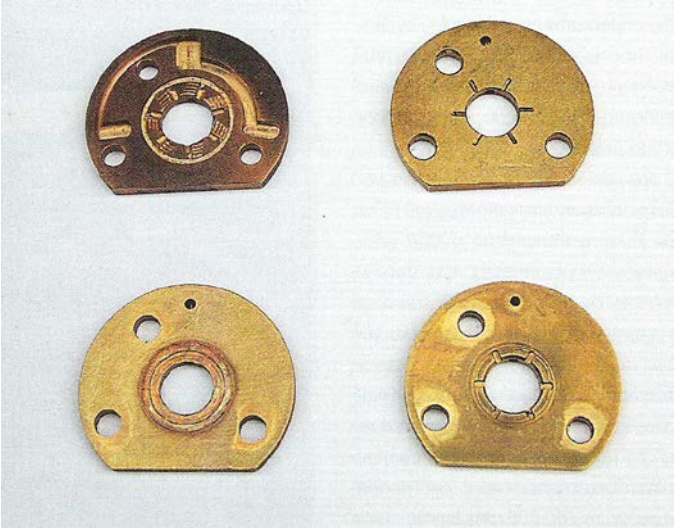
Η αναβάθμιση στο θρος, έγκειται στην τοποθέτηση ενός θρος "360 μοιρών" [11]. Τα εργοστασιακά θρος στα περισσότερα turbo, είναι ένας δίσκος από τον οποίο λείπει μια εγκάρσια κομμένη "φέτα". Αυτό το κενό, προσφέρει μεγάλη κατασκευαστική ευκολία και δραματική μείωση του κόστους, επειδή διευκολύνει την συναρμολόγηση και επιτρέπει την χρήση μονοκόμματου φλίνγκερ που ενσωματώνει και τις δύο επιφάνειες τριβής στο ίδιο εξάρτημα.

Ένα θρος "360 μοιρών" δεν έχει κενό στην επιφάνειά του, η οποία αυτομάτως γίνεται μεγαλύτερη και υπόκειται σε μικρότερες καταπονήσεις, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη αντοχή, μακροζωία και αξιοπιστία. Παρόλα αυτά, απαιτεί την τροποποίηση ή την εκ νέου κατασκευή του φλίνγκερ, το οποίο πλέον είναι διαιρούμενο για να μπορεί να συναρμολογηθεί και να λειτουργήσει. Τα κιτ θρος "360 μοιρών" περιλαμβάνουν θρος και φλίνγκερ.

Η χρήση αναβαθμισμένου θρος, επιτρέπει στο turbo να λειτουργήσει αξιόπιστα σε μεγαλύτερους λόγους πίεσης, χωρίς τον κίνδυνο να υποχωρήσει το "φιλμ" λαδιού και να έλθει σε άμεση επαφή το θρος με το φλίνγκερ. Ακόμα και σε "στάνταρ" εφαρμογές, το αναβαθμισμένο θρος αποτελεί μια επιπλέον εξασφάλιση της διάρκειας ζωής του turbo και αξίζει την επένδυση, αφού οι ζημιές που προκαλεί η προχωρημένη φθορά του θρος, δεν γίνονται αντιληπτές εύκολα και άμεσα.



Σχήμα 8.1 Αριστερά φαίνονται τα "συμβατικά" θρός και φλίνγκερ, ενώ δεξιά τα αναβαθμισμένα.



Σχήμα 8.2 Επάνω αριστερά φαίνεται ένα καινούριο και κορυφαίας ποιότητας θρος για T2/T25.

Σχήμα 8.3 Το αριστερό θρος είναι εγχώριας προέλευσης, ενώ το δεξί Αγγλικής. Οι διαφορές στην ποιότητα και την κατεργασία είναι προφανείς.

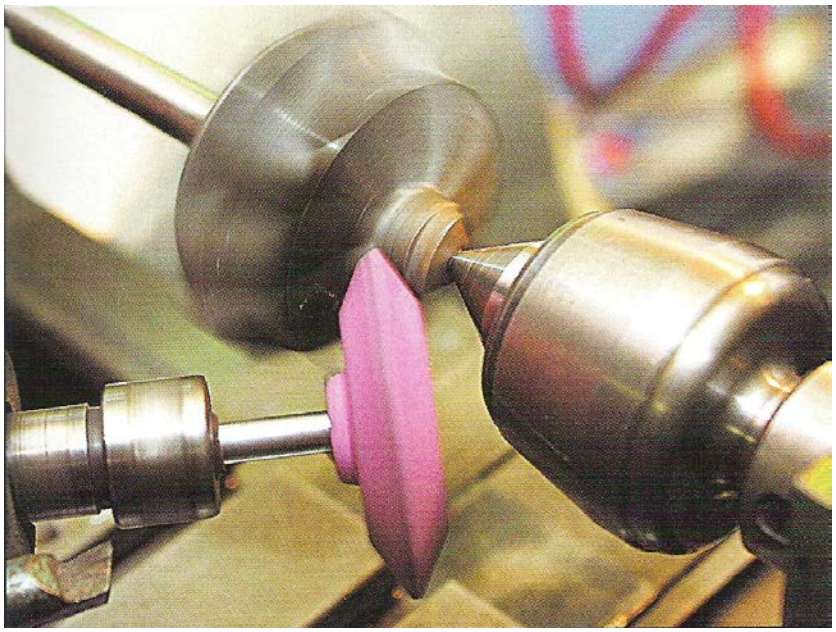
Στα turbo, που από κατασκευής τους είναι εξοπλισμένα με θρος "360 μοιρών", η αναβάθμιση έγκειται στη χρήση ειδικά σχεδιασμένου σετ aftermarket θρος και φλίνγκερ, ώστε η επιφάνεια τριβής να είναι και πάλι μεγαλύτερη. Οι διαμορφώσεις λίπανσης στο σώμα του, πρέπει να βελτιστοποιούν τη ροή του λιπαντικού και να ευνοούν τη διατήρηση ενός ανθεκτικού "φίλμ".

8.3 "ΞΥΡΑΦΙΑΣΜΑ" ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ

Το κοινώς γνωστό "ξυράφιασμα" του άξονα, είναι η αφαίρεση μετάλλου από τις άκρες των πτερυγίων της πτερωτής εξαγωγής στον άξονα του turbo [10]. Το μέγεθος της επέμβασης μετριέται σε μοίρες, οι οποίες εκφράζουν την γωνία που έχει το νέο επίπεδο που σχηματίζουν οι αναδιαμορφωμένες άκρες των πτερυγίων, σε σχέση με το αρχικό.

Με το “cutback”, αυξάνεται το διάκενο ανάμεσα στις άκρες των πτερυγίων, απ' όπου περνούν τα καυσαέρια οδηγούμενα προς την έξοδο του κελύφους. Είναι απαραίτητη διαδικασία όταν θέλουμε να αυξήσουμε την ισχύ του turbo κινητήρα μας, ή όταν τοποθετούμε εκ των υστέρων ένα turbo σε ένα μοτέρ που θα αποδώσει μεγαλύτερη ισχύ από εκείνη για την οποία είχε σχεδιαστεί το χρησιμοποιούμενο turbo. Αυτό συμβαίνει, επειδή η μεγαλύτερη ισχύς συνεπάγεται μεγαλύτερη ποσότητα παραγόμενων καυσαερίων, δεδομένης της μεγαλύτερης ποσότητας καταναλισκόμενου καυσίμου μείγματος.

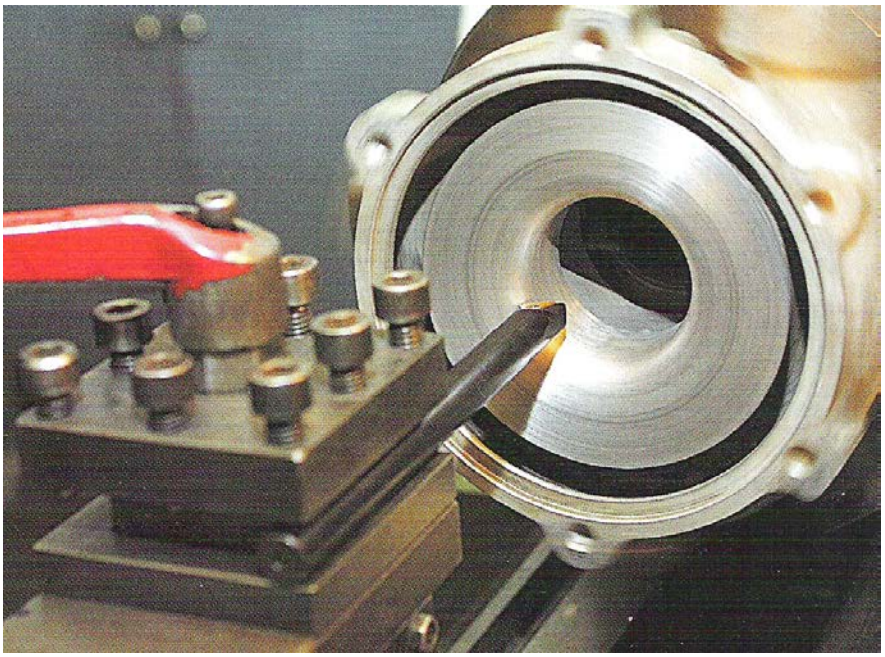
Αν τα πτερύγια του στροβίλου εμπόδιζαν τη ροή των επιπλέον καυσαερίων, η τουρμπίνα θα “φρενάριζε”, κι επίσης θα ανέβαινε το “backpressure” πριν το turbo, με δυσμενείς (πτώση της απόδοσης) έως και καταστροφικές συνέπειες.



Σχήμα 8.4 “Ξυράφιασμα” του άξονα με σμυριδοτροχό.

8.4 ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Το “reprofiling” είναι η μηχανουργική κατεργασία του αλουμινίου (κελύφους συμπίεσης), για την αναδιαμόρφωσή του και την απελευθέρωση της ροής του εισερχόμενου συμπιεσμένου αέρα [10]. Ακόμη, βρίσκει εφαρμογή στα “μεγαλωμένα” turbo, δηλαδή όπου αντικαθίσταται ο συμπιεστής με μεγαλύτερο.

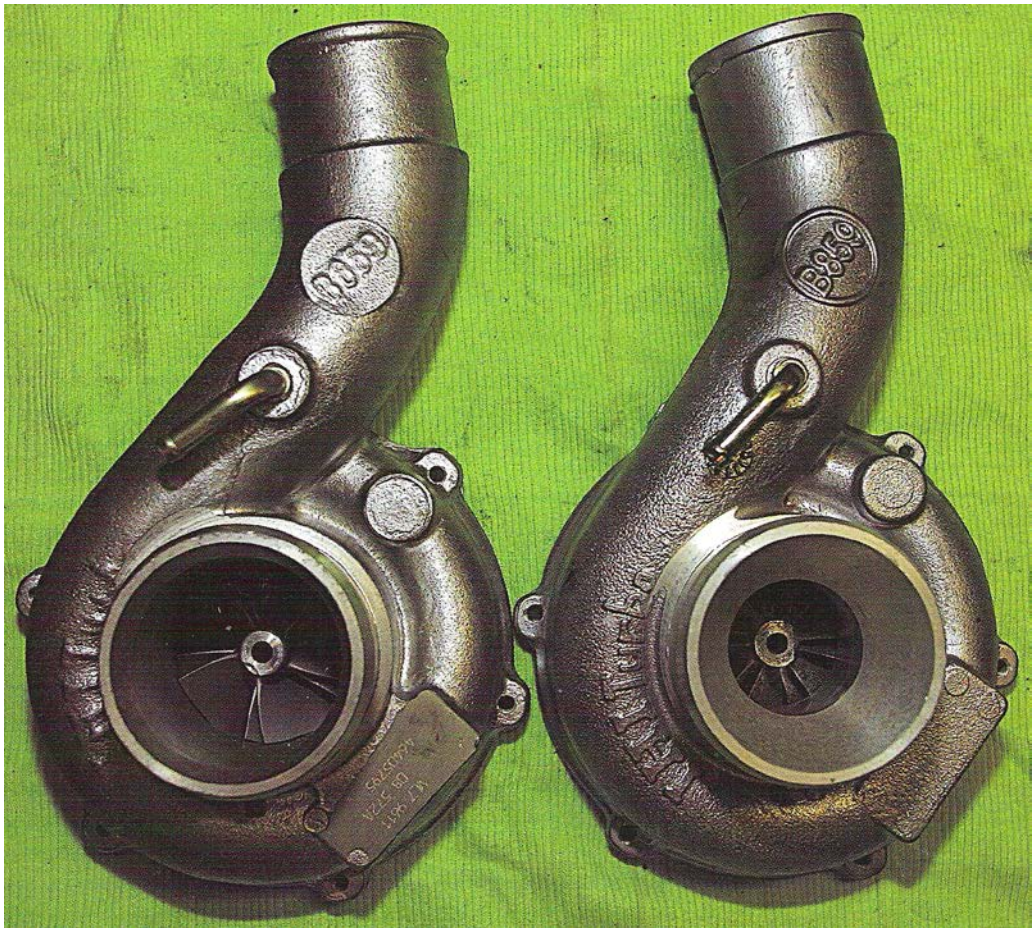


Σχήμα 8.5 Το reprofiling απαιτεί λεπτομερή εκτέλεση, μεγάλη γνώση και εμπειρία.

Στο "reprofiling" του αλουμινίου, διανοίγεται η είσοδος και η έξοδος του αέρα, αναδιαμορφώνονται οι διάφορες γωνίες και γυαλίζονται τα περάσματα του αέρα στον διασπορέα (όπου αυτό είναι δυνατόν).

Σε πολλές περιπτώσεις το αλουμίνιο προσφέρεται για εκτεταμένη αφαίρεση μετάλλου, ώστε να μπορέσει το turbo να φιλοξενήσει ένα μεγαλύτερο trim συμπιεστή, ή ένα trim μεγαλύτερης διαμέτρου. Αυτή η αλλαγή είναι απλή στην διεκπεραίωση, αλλά για να γίνει σωστά και για να αποδώσει με επιτυχία, πρέπει να τηρηθεί μια εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία. Κι αυτό, επειδή δεν αρκεί απλώς να τοποθετηθεί ένας μεγαλύτερος συμπιεστής.

Το ακριβές "πάντρεμα" διάστασης και trim, σε συνδυασμό με τη σωστή επιλογή A/R αλουμινίου, θα προσφέρει άνετο και άμεσο "στροφάρισμα" του turbo, και θα διασφαλίσει την ικανοποίηση των απαιτήσεών μας για πίεση και ροή.



Σχήμα 8.6 Το αποτέλεσμα του "reprofiling": δεξιά το turbo με συμπιεστή 34mm και αριστερά ένα "δίδυμό" του μεγαλωμένο στα 48mm.

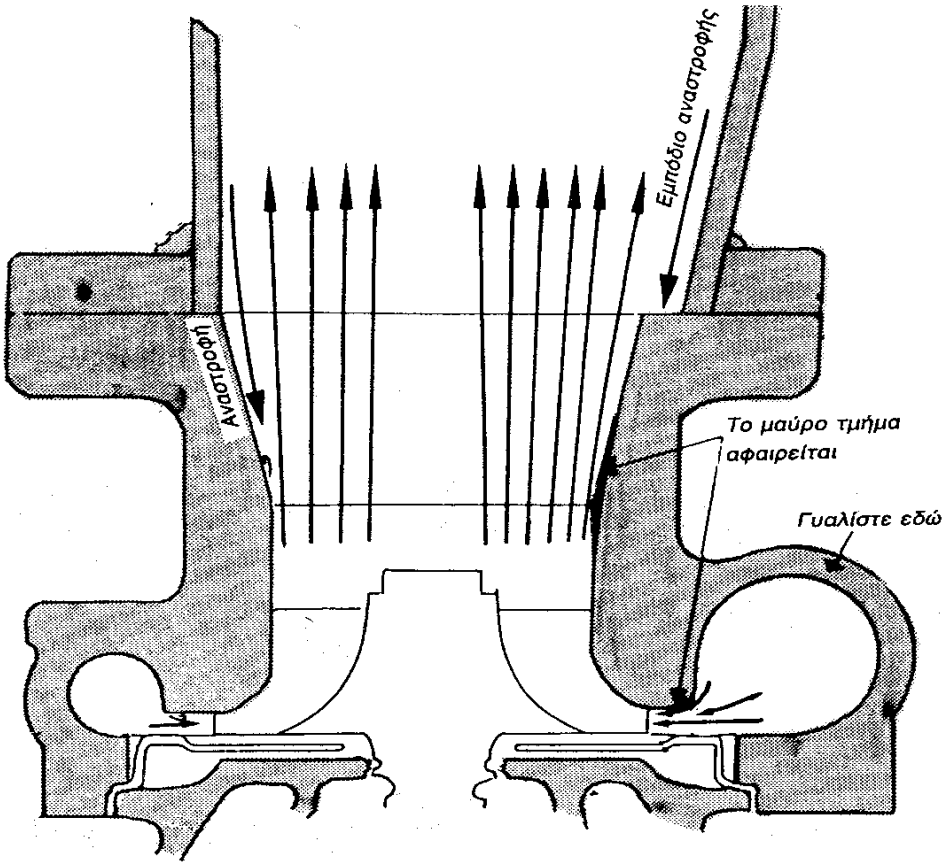
Πρόσφατα, εμφανίστηκαν προγράμματα υπολογιστή, που εξομοιώνουν τους διάφορους συνδυασμούς που θα ορίσουμε, δίνοντάς μας χρήσιμες και σχετικά αξιόπιστες θεωρητικές πληροφορίες. Η επιβεβαίωσή τους στην πράξη, έρχεται με την οδήγηση του αυτοκινήτου μας ή όπου αυτό είναι εφικτό, με τη χρήση ειδικού ροομέτρου που αποτελεί εξάρτημα ορισμένων μηχανημάτων VSR(Vibration Sorting-μηχανήματα δυναμικής ζυγοστάθμισης). Το ροόμετρο, μας δίνει με ακρίβεια το αποτέλεσμα κάθε "μεγαλώματος" κατά την διαδικασία της ζυγοστάθμισης, κατά την οποία εξομοιώνεται η λειτουργία του turbo σε "πραγματικές" συνθήκες.

8.5 ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΜΕΡΗ ΤΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ

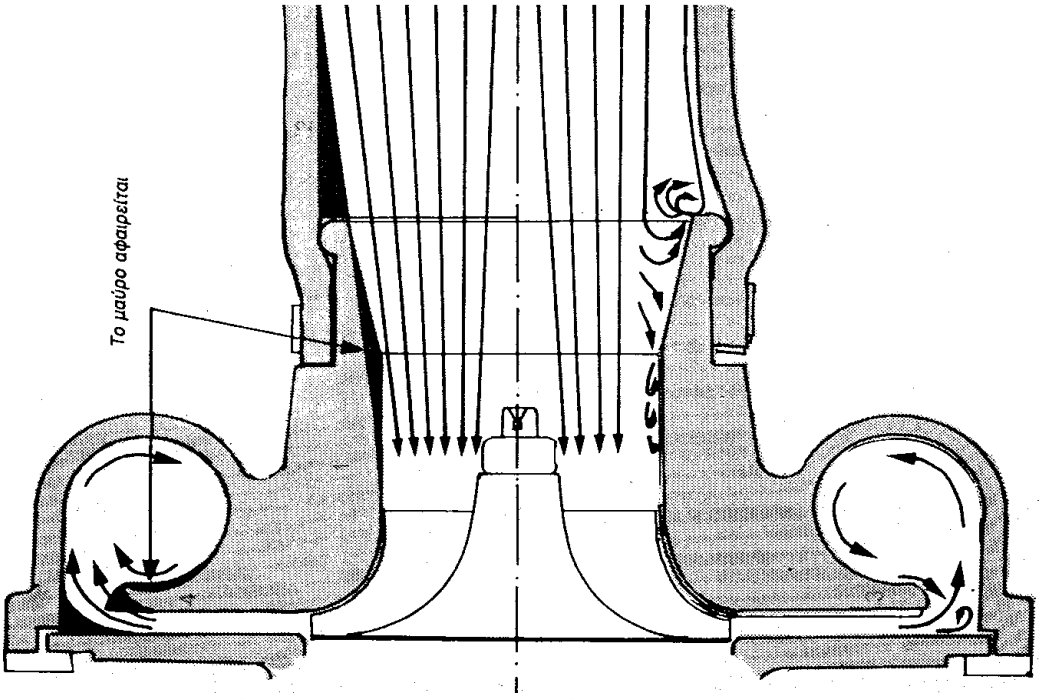
Το κέλυφος του στροβίλου είναι από χυτοσίδηρο για να αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες της εξαγωγής, ενώ το αντίστοιχο του συμπιεστή είναι από αλουμίνιο.

Τα σχέδια που ακολουθούν, θα σας δείξουν που μπορείτε να επέμβετε ευεργετικά, αφαιρώντας υλικό ή προσθέτοντας υλικό με ένα πάντα στόχο : **την εξομάλυνση**

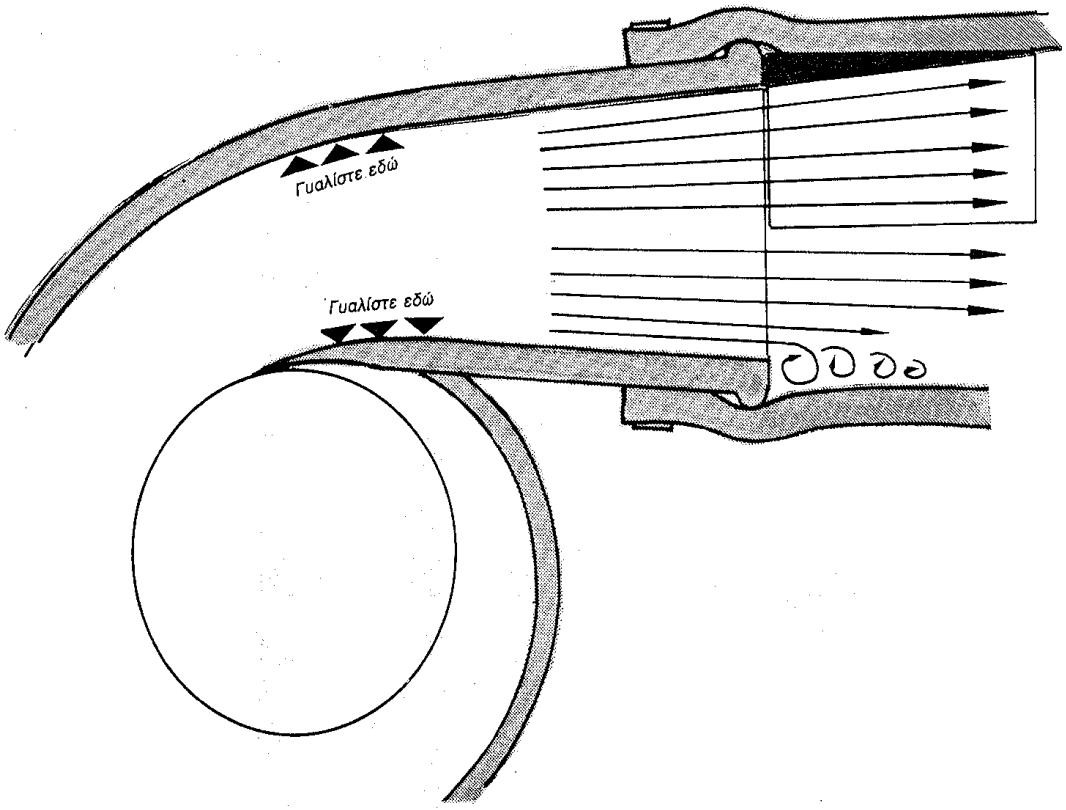
της ροής. Όπου μπορείτε, καλό είναι να γυαλίζετε μεθοδικά τις επιφάνειες, γιατί "διευκολύνεται" έτσι περισσότερο η ροή [8].



Σχήμα 8.7 Επεξεργασία στο κομμάτι εξόδου του στροβίλου.



Σχήμα 8.8 Βελτίωση της ροής, με λίγη και προσεκτική εργασία, στην είσοδο του συμπιεστή.

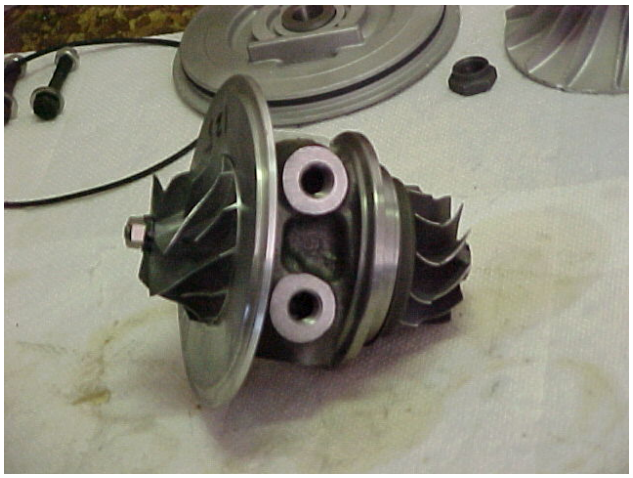


<u>Σχήμα 8.9</u> Εξομάλυνση της ροής εξόδου του συμπιεστή με προσθήκη κώνου (μαύρο).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9
ΛΙΠΑΝΣΗ - ΑΙΤΙΕΣ ΦΘΟΡΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΩΝ

9.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΙΠΑΝΣΗΣ

Η λίπανση ενός υπερτροφοδοτούμενου κινητήρα, δεν διαφέρει ουσιαστικά στις απαιτήσεις από αυτή ενός ατμοσφαιρικού κινητήρα, εκτός από ένα "ζωτικό" σημείο : την επαρκή και αναγκαιότατη λίπανση του άξονα του turbo. Πρέπει να τονίσουμε, ότι χρειάζεται μεγάλη προσοχή ώστε να μη μείνει ούτε για ένα δέκατο του δευτερολέπτου χωρίς παροχή λαδιού, διότι κινδυνεύει από άμεση καταστροφή.



Σχήμα 9.1 Cartridge turbo. Είσοδος λαδιού για λίπανση του turbo.

Η διατήρηση της θερμοκρασίας του λαδιού σε αποδοτικό (για τη λιπαντική ικανότητα) επίπεδο, είναι βασική για τη μακροζωία του ίδιου του turbo. Όταν το λάδι είναι κρύο, το υψηλό ιξώδες δεν επιτρέπει τη γρήγορη περιστροφή της πτερωτής και δε λιπαίνει επαρκώς τα "μικρά" έδρανα του άξονα. Για να φτάσει το λάδι όσο πιο γρήγορα γίνεται στην κανονική του θερμοκρασία, συνιστάται η τοποθέτηση μεταξύ φίλτρου και "μπλοκ" ενός εναλλάκτη θερμότητας. Το εξάρτημα αυτό, βοηθά στο να αυξηθεί η θερμοκρασία του λαδιού, φέροντάς το πολύ κοντά στο νερό που κυκλοφορεί στο σύστημα ψύξης. Το νερό θερμαίνεται πολύ πιο γρήγορα από το λάδι, κι έτσι το εξάρτημα αυτό "μεταφέρει" μέρος από τη θερμοκρασία του στο κρύο λάδι.

Όταν όμως, η θερμοκρασία του λαδιού φτάσει στο κανονικό επίπεδο λειτουργίας της, θα χρειαστεί οπωσδήποτε και το γνωστό μας σύστημα ψύξης του λαδιού (ψυγείο λαδιού). Αυτό που επιδιώκουμε, δηλαδή, είναι να ανεβάσουμε γρήγορα τη θερμοκρασία του λαδιού στο κανονικό επίπεδο (γύρω στους 95-100 βαθμούς), και να την κρατήσουμε εκεί πλέον σταθερή.

Σχήμα 9.2 Δεξιά από το intercooler αέρος – αέρος στην μετώπη του αυτοκινήτου, φαίνεται το ψυγείο λαδιού, απαραίτητο εξάρτημα για κάθε κινητήρα turbo για τη διατήρηση της θερμοκρασίας λαδιού σε κανονικά επίπεδα.

Η πίεση του λαδιού που πάει στον άξονα του turbo, είναι η πίεση που επικρατεί στο κάρτερ ενός καινούργιου αυτοκινήτου. Αναλυτικότερα, πρέπει στο ρελαντί να έχει πίεση περίπου 0,7 κιλά ανά τετραγωνικό εκατοστό πάνω από την ατμοσφαιρική, και στο μέγιστο φορτίο περίπου 2,1 κιλά ανά τετραγωνικό εκατοστό.

Επικίνδυνη αύξηση της πίεσης όμως στο κάρτερ του κινητήρα, μπορεί να δημιουργήσει και το ίδιο το turbo, γιατί μέσω του αγωγού λιπάνσεως επικοινωνεί με αυτό. Σ' αυτή την περίπτωση, η αύξηση της πίεσης θα γίνει αν καυσαέρια από το στρόβιλο εισχωρήσουν μέσω του άξονα στο κάρτερ, ή αν ο συμπιεσμένος αέρας από το συμπιεστή εισχωρήσει πάλι μέσω του άξονα στο κάρτερ. Οι στεγανοποιητικοί δακτύλιοι (ελατήρια) που διαθέτει το turbo, παρεμποδίζουν τα καυσαέρια και τον αέρα να εισχωρήσουν στο κύκλωμα του λαδιού.

Το πρόβλημα της αποτελεσματικής λίπανσης του άξονα του turbo, έχει γίνει αντικείμενο σοβαρών μελετών και πειραματισμών εκ μέρους των κατασκευαστών, οι οποίοι αναγνωρίζοντας ότι είναι ο ασθενέστερος κρίκος του συστήματος υπερτροφοδότησης, προσπαθούν με κάθε τρόπο να αυξήσουν την αξιοπιστία της “ανάρτησης” του άξονα αυτού.

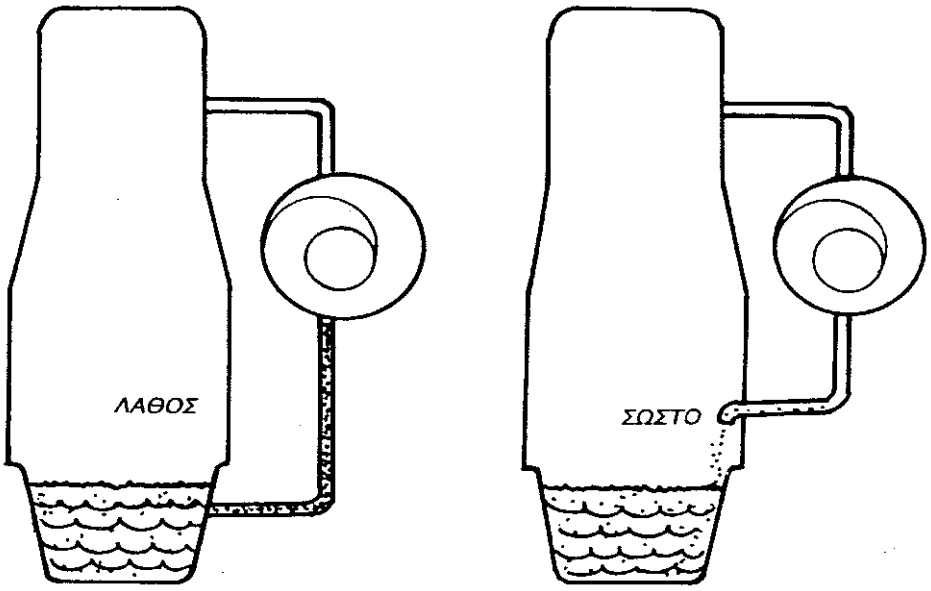
Η δυσκολία, έγκειται κυρίως στη μεγάλη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον άξονα, λόγω της επαφής του με τη πτερωτή που κινείται από καυσαέρια των 900°C και πάνω. Η θερμοκρασία αυτή σε συνδυασμό με τη μεγάλη ταχύτητα περιστροφής, μέχρι και 180000 στροφές ανά λεπτό, αποτελούν μια πολύ δύσκολη "αποστολή" για το λάδι του κινητήρα.

Ένα σχετικό σημείο που πρέπει να προσέχουν πάντα οι κάτοχοι αυτοκινήτων turbo, είναι να **μη σβήνουν ποτέ τον κινητήρα αμέσως μετά το τέλος μιας "γρήγορης" διαδρομής**, όπου το turbo λειτούργησε πλήρως. Οι λόγοι για κάτι τέτοιο, είναι αρκετοί και βέβαια έχουν όλοι να κάνουν με τη θερμοκρασία της τουρμπίνας. Σημειώστε εδώ, ότι σε μια τέτοια περίπτωση, **η πτερωτή συνεχίζει να γυρίζει για κάποια δευτερόλεπτα, ακόμα και με σβηστό κινητήρα**.

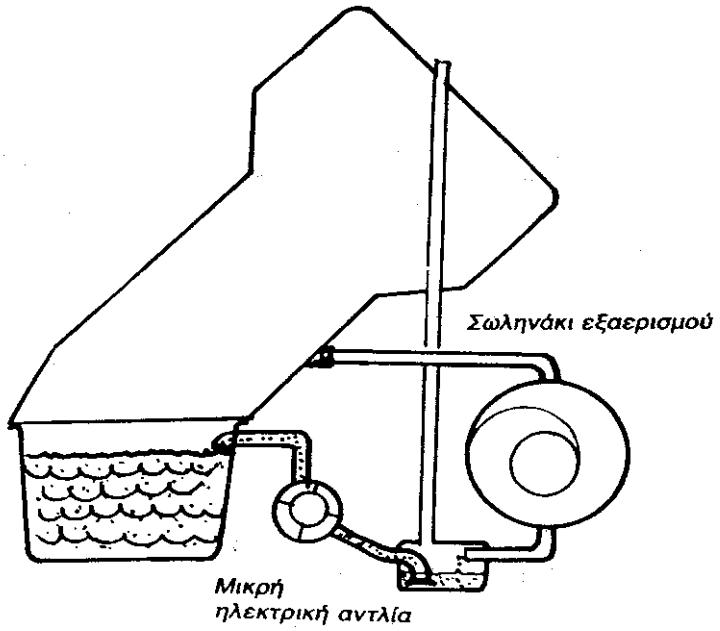
Έχουμε, λοιπόν έτσι, μια τουρμπίνα που βρίσκεται στους 700-800°C, που κινείται χωρίς ροή αέρα πλέον στην πλευρά του συμπιεστή και χωρίς εξωτερική ψύξη, λόγω του ακίνητου αυτοκινήτου. Το αποτέλεσμα είναι, ότι το λίγο λάδι που έχει μείνει στο κουζινέτο του άξονα, δεν μπορεί να λιπάνει σωστά τα "θερμότατα" αυτά μέρη και λόγω της υψηλής ακριβώς θερμοκρασίας, καταστρέφεται και το ίδιο καίγεται ("καρβουνιάζει"). Τα κατάλοιπα αυτά του λαδιού, καταστρέφουν σιγά - σιγά το κουζινέτο και τον άξονα, με αποτέλεσμα την πρόωρη φθορά του στροβιλο-υπερπληρωτή.

Μετά τη λίπανση του turbo, το λάδι έχει 40 βαθμούς περίπου υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή της εισόδου του στο turbo. Αν υποθέσουμε, ότι στον κινητήρα λειτουργεί με 100-110°C (σε περίοδο "σκληρής" οδήγησης), οι 150°C (τελικοί στην έξοδο του turbo) βρίσκονται στα όρια της λιπαντικής του ικανότητας. Συνίσταται λοιπόν, η χρήση μόνο λαδιού άριστης ποιότητας (100% συνθετικού), πράγμα που ισχύει όχι μόνο για τα turbo αυτοκίνητα.

Το πιο κοινό σύστημα λίπανσης του άξονα της τουρμπίνας, είναι αυτό που ενώ το λάδι φτάνει υπό πίεση στο turbo, επιστρέφει μετά τη λίπανση στο κάρτερ με τη βαρύτητα, μόνο του. **Το σωληνάκι επιστροφής είναι σημαντικό να είναι πάνω από τη στάθμη του λαδιού**, για να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη συνεχής ροή προς τα κάτω [8]. Στα παρακάτω σχήματα 9.3 και 9.4, φαίνεται ακριβώς αυτό που περιγράψαμε.



Σχήμα 9.3 Η έξοδος του λαδιού, πρέπει οπωσδήποτε να γίνεται ψηλότερα από την στάθμη του κάρτερ.

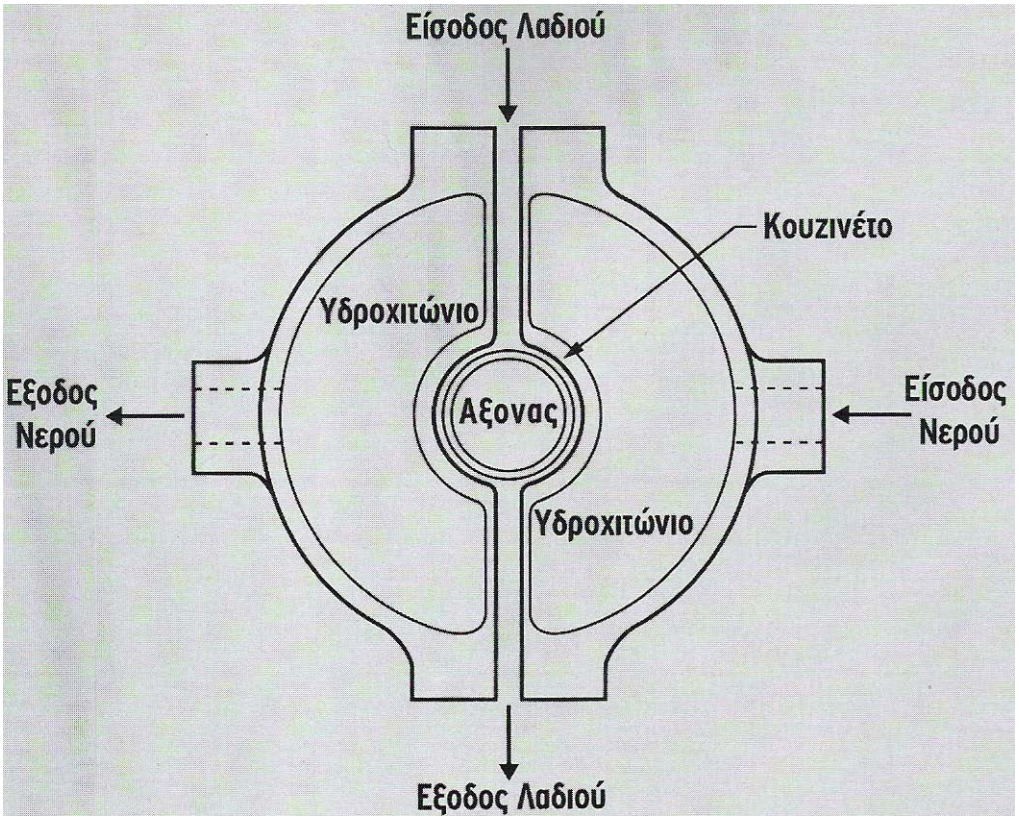


Σχήμα 9.4 Ιδανικός τρόπος λίπανσης του turbo.

Για να αποφύγουν πιθανά προβλήματα στο turbo, μερικοί "βελτιωτές", τοποθετούν μια μικρή ηλεκτρική αντλία λαδιού πριν από την τουρμπίνα, η οποία λειτουργεί για μερικά λεπτά, αφού σβήσει ο κινητήρας, οπότε κλείνει και αυτή αυτόματα, επιτυγχάνοντας έτσι την καλύτερη δυνατή λίπανση του άξονα και του κουζινέτου.

Τελειώνοντας, ελπίζουμε να καταλάβατε τη σημασία της σωστής λίπανσης του turbo και κυρίως, κάτι που πολλοί δεν υπολογίζουν, ότι πρόκειται για ένα ενεργό εξάρτημα και όχι κάτι παθητικό που αλλάζεται φτηνά και

εύκολα. Με την ανάλογη προσοχή, πρέπει να "κρατήσει" για πολλές δεκάδες χιλιάδες χιλιόμετρα.



Σχήμα 9.5 Τομή ενός υγρόψυκτου cartridge: Το ενσωματωμένο υδροχιτώνιο είναι συνδεδεμένο με το κύκλωμα ψύξης, ώστε να απάγει το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που μεταφέρεται από την "θερμή" πλευρά του turbo στα κουζινέτα. Έτσι το λιπαντικό προφυλάσσεται από την υπερθέρμανση και την αποκρυστάλλωσή του ("καρβούνιασμα").

9.2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ – ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ

Ο στροβιλο-υπερπληρωτής, καταπονείται από ανομοιομορφία θερμοκρασιών μεταξύ στροβίλου και συμπιεστή, και από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω των πολύ υψηλών ρυθμών περιστροφής του. Πράγματι, ενώ τα καυσαέρια που μπαίνουν στον στρόβιλο έχουν θερμοκρασίες γύρω στους 800°C ή και παραπάνω, ο αέρας που εισέρχεται στο συμπιεστή έχει θερμοκρασία περιβάλλοντος και μόνο μετά τη συμπίεσή του θα ανεβεί στους 150°C περίπου.

Όσον αφορά τους ρυθμούς περιστροφής, ένα turbo περιστρέφεται με γύρω στις 150000 στροφές το λεπτό, που σημαίνει περίπου 2500 στροφές το δευτερόλεπτο. Αυτό βέβαια, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν και πιο αργόστροφοι ή και πιο ταχύστροφοι στροβιλο-υπερπληρωτές. Φυσικά,

αυτό συμβαίνει στους μικρούς στροβιλο-υπερπληρωτές, γιατί οι μεγάλοι περιστρέφονται με σημαντικά μικρότερες γωνιακές ταχύτητες.

Όπως είναι ευνόητο, έχουμε να κάνουμε με ένα πολύ λεπτής κατασκευής μηχανισμό, ο οποίος κατά συνέπεια έχει μεγάλες απαιτήσεις αντοχής, αξιοπιστίας και σωστής λίπανσης.

9.3 ΑΙΤΙΕΣ ΦΘΟΡΩΝ ΤΟΥ TURBO

Υπάρχουν αρκετές βασικές αιτίες φθορών ενός υπερσυμπιεστή turbo [14] :

- Έλλειψη λαδιού
- Καθυστέρηση λαδιού
- Είσοδος ακαθαρσιών
- Εισαγωγή ξένων αντικειμένων
- Υπερθέρμανση
- Μη ζυγοστάθμιση
- Υψηλός λόγος πίεσης
- Υπερβολική άνοδος στροφών
- Υψηλή θερμοκρασία και πίεση καυσαερίων
- Προχωρημένη φθορά – "Όριο ηλικίας"
- Κακή λειτουργία περιφερειακών συστημάτων
- Κακή χρήση
- Διαδικασία συναρμογής ("μοντάρισμα")
- Λανθασμένα εξαρτήματα ("ανταλλακτικά")

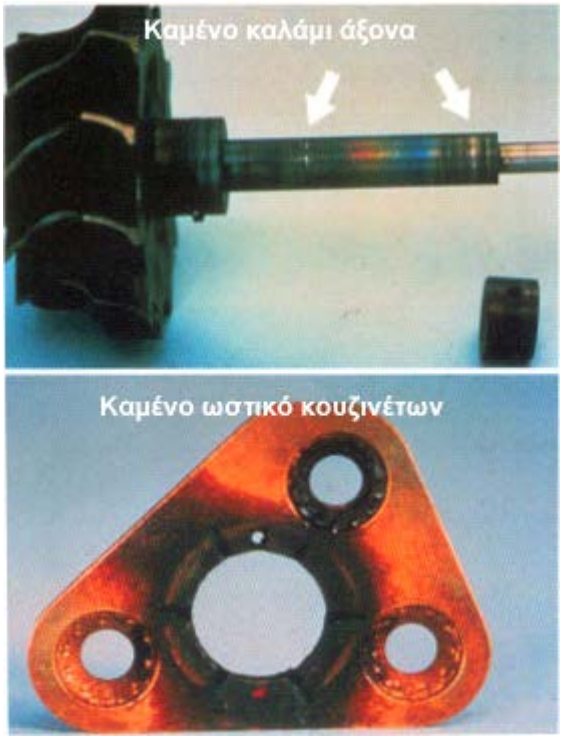
Οι δύο τελευταίες, απλά αναφέρονται στα όχι σωστά ανταλλακτικά τα οποία χρησιμοποιούνται και στη μη σωστή διαδικασία συναρμογής του turbo.

9.3.1 ΒΛΑΒΕΣ ΑΠΟ ΔΙΑΡΡΟΕΣ ΛΑΔΙΟΥ

Αν στην εισαγωγή, λόγω στραγγαλισμών, έχουμε υπερβολική υποπίεση, τότε θα εμφανιστούν μέσα στο turbo αφροί από το λάδι που θα έχουν μπει μέσα. Αν φράξει η εξαγωγή του λαδιού από το turbo, λόγω ακαθαρσιών, τότε επειδή θα αυξηθεί η πίεση του λαδιού, θα περάσει πάλι μέσα από τα ελατήρια εμβόλου του άξονα και θα μπει στην τουρμπίνα. Τότε παρουσιάζονται "κάπνες" στην εξαγωγή. Το ίδιο μπορεί να συμβεί, αν η πίεση στο κάρτερ του κινητήρα ανέβει εξαιτίας φθαρμένων ελατηρίων των εμβόλων του κινητήρα ή βουλωμένου "αναπνευστήρα", τότε το λάδι δεν θα μπορεί να γυρίσει με φυσική ροή μέσα στο κάρτερ, με αποτέλεσμα να περνά στο turbo. Αν ο κινητήρας δουλεύει πολύ ώρα στο ρελαντί και στο μεταξύ το φίλτρο του αέρος είναι φραγμένο, τότε δημιουργείται υποπίεση πίσω από το δρομέα του συμπιεστή, πράγμα που μπορεί να φέρει λάδι μέσα στο turbo.

Εκτός απ' όλα αυτά, μπορεί να έχουμε φθαρμένα κουζινέτα, οπότε και πάλι θα δημιουργηθεί πρόβλημα διαρροής λαδιού. Μετά απ' όσα αναφέραμε, δε θα πρέπει κάθε φορά που έχουμε λάδια στα καυσαέρια, να "ζητάμε" την αιτία στο turbo, γιατί μπορεί να φταίει ο κυρίως κινητήρας.

9.3.2 ΕΛΛΕΙΨΗ Ή ΣΤΕΡΗΣΗ ΛΑΔΙΟΥ



Σχήμα 9.6 Φθορές λόγω έλλειψης ή στέρησης λαδιού.

Έλλειψη λαδιού, εννοούμε την αντικανονική τροφοδοσία του turbo με λάδι (φραγμένος σωλήνας τροφοδοσίας, λίγο λάδι στο κάρτερ του κινητήρα, άδειος σωλήνας τροφοδοσίας λαδιού μετά από αλλαγή φίλτρου).

Ενώ στέρηση λαδιού, εννοούμε το να μην πηγαίνει η σωστή ποσότητα λαδιού στο turbo. Η εμφάνιση (εσωτερική) που παρουσιάζει ένα turbo κατεστραμμένο από έλλειψη λαδιού είναι η εξής : όλα τα κουζινέτα είναι γυαλισμένα από την τριβή στην εξωτερική διάμετρο, στην εσωτερική και στις πλευρές. Επίσης υπάρχουν σημάδια υπερθέρμανσης.

Τα αξονικά κουζινέτα είναι γυαλισμένα, φαγωμένα και αποχρωματισμένα. Ο άξονας έχει εμποτιστεί από ορείχαλκο, είναι γυαλισμένος στα σημεία έδρασης και αποχρωματισμένος. Σε ακόμη πιο προχωρημένη κατάσταση, ο άξονας μπορεί να στραβώσει ή και να σπάσει. Ο τροχός του στροβίλου μπορεί να έχει "ξυσίματα", καθώς επίσης και ο τροχός του συμπιεστή. Το σώμα των εδράνων είναι γυαλισμένο, εμποτισμένο με ορείχαλκο και η διάμετρος στο μέρος που βρίσκονται τα ελατήρια του εμβόλου του άξονα, πιθανόν να είναι φθαρμένη ("σκαμμένη") από τα ελατήρια.

Μπορεί επίσης, να έχουμε ζημιά και με τη στέρηση λαδιού. Αυτό θα συμβεί, αν ξεκινήσουμε απότομα τον κινητήρα, ή αν υπάρχει χαλασμένη αντλία λαδιού, ή αν γενικά υπάρχει χαμηλή πίεση λαδιού. Σ' αυτήν την περίπτωση, τα σημάδια είναι τα ίδια μ' αυτά που είπαμε προηγουμένως, αλλά λιγότερο έντονα, ιδίως στα αξονικά ωστικά κουζινέτα.

9.3.3 ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΛΑΔΙΟΥ

Καθυστέρηση παροχής λαδιού μετά την τοποθέτηση του υπερσυμπιεστή ή μετά την αλλαγή του φίλτρου λαδιού

Σχήμα 9.7 Φθορές λόγω καθυστέρησης λαδιού.

Όταν επισκευάζεται ένας υπερσυμπιεστής turbo και ξανατοποθετείται στον κινητήρα, είναι απαραίτητο να υπάρχει κάποια συγκεκριμένη ποσότητα λαδιού σ' αυτόν. Ο αέρας όμως, πηγαίνει στον υπερσυμπιεστή πιο γρήγορα από το λάδι, που σημαίνει ότι αν δεν υπάρχει κάποια ποσότητα λαδιού στον υπερσυμπιεστή θα αρχίσει η περιστροφή του ρότορα και κατά συνέπεια των επιμέρους εξαρτημάτων, τα οποία όμως θα είναι "στεγνά" προκαλώντας έτσι μεγάλη ζημιά.

Όταν μια μηχανή τίθεται σε λειτουργία, θα πρέπει να δουλέψει για κάποιο χρονικό διάστημα με μικρό φορτίο, καθώς υπερβολικά "μαρσαρίσματα" θα προκαλέσουν ζημιά, λόγω της καθυστέρησης παροχής λαδιού. Αυτή η διαδικασία είναι σημαντική, όταν η μηχανή έχει αρκετό καιρό να τεθεί σε λειτουργία, ή όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι πολύ χαμηλή.

Όχι σωστή λειτουργία της αντλίας λαδιού

Αν η αντλία λαδιού δεν λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, τότε η παροχή λαδιού δεν θα είναι η αναμενόμενη, προκαλώντας προβλήματα στο σύστημα λίπανσης.

Το φαινόμενο της καθυστέρησης παροχής λαδιού στα κουζινέτα, παρατηρείται με το φάγωμα στην εξωτερική τους διάμετρο και σε μερικές περιπτώσεις και στις άκρες αυτών. Στο θρος, τα φαινόμενα είναι ακριβώς τα ίδια.

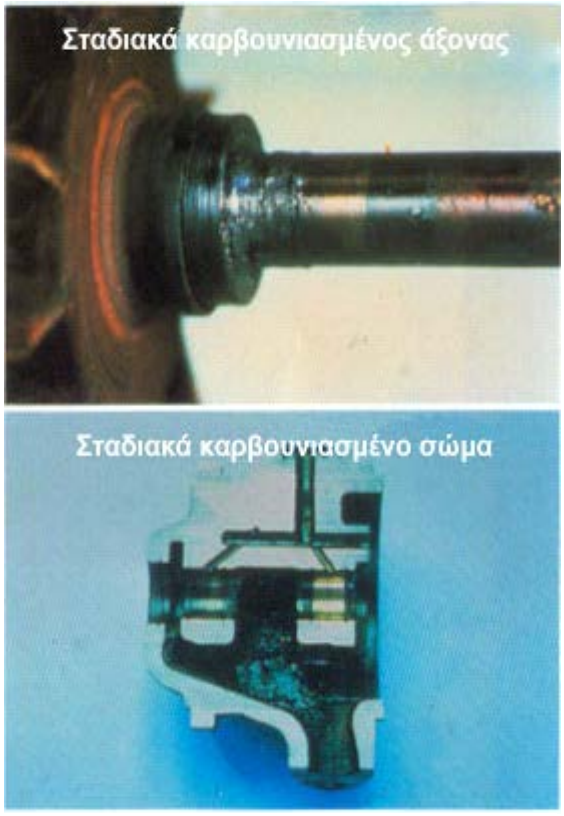
Τα αποτελέσματα της καθυστέρησης στην παροχή λαδιού, είναι περίπου τα ίδια με αυτά της έλλειψης λαδιού, με λιγότερο όμως εμφανή τα σημάδια του ξεθωριάσματος στα εξαρτήματα.

9.3.4 ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗ

Υπερθέρμανση, έχουμε όταν σβήσουμε απότομα τον κινητήρα, χωρίς να τον αφήσουμε λίγο να δουλέψει στο ρελαντί για να "κρυώσει" το turbo. Επίσης, όταν ο στροβιλο-υπερπληρωτής δεχτεί πολύ θερμά καυσαέρια, λόγω κακής ρύθμισης του κινητήρα, διαρροών καυσαερίων και αέρα ή περιορισμού στην ελεύθερη ροή τους και τέλος από φραγμένο φίλτρο αέρα.

Στην πρώτη περίπτωση, μόλις σβήσει ο κινητήρας, μεγάλο ποσό θερμότητας πηγαίνει στο turbo και κυρίως στον άξονά του. Εκεί, υπερθερμαίνεται το λάδι που ακουμπά επάνω του, και δημιουργούνται "εξανθρακώματα". Έτσι, όταν βάλουμε μπροστά τον κινητήρα, καταστρέφονται τα κουζινέτα.

Στη δεύτερη περίπτωση, από την υπερθέρμανση, παρουσιάζονται ρήγματα στο σώμα του στροβίλου, φθορά στα κουζινέτα και στα ελατήρια του εμβόλου του άξονα.



Σχήμα 9.8 Φθορές λόγω υπερθέρμασνης.

Λεπτομερέστερα, τα κουζινέτα αποχρωματίζονται, μαυρίζουν στην εξωτερική διάμετρο, στην οπή, χωρίς να αποκλείεται και η περίπτωση ύπαρξης χαραγών. Αυτά, σε μεγαλύτερο βαθμό, συμβαίνουν στα κουζινέτα του στροβίλου. Το αξονικό κουζινέτο, συνήθως παρουσιάζει πολύ μικρότερες ζημιές.

Ο άξονας παθαίνει αποχρωματισμό, καταστρέφονται τα ελατήρια του εμβόλου από τη μεριά του στροβίλου, με άμεσο επακόλουθο την καταστροφή των αυλακιών των ελατηρίων και υπερβολική φθορά στο κυρίως σώμα των εδράνων στο αντίστοιχο σημείο.

Όσον αφορά τον τροχό του στροβίλου, αυτός δεν παρουσιάζει σχεδόν καμία ζημιά, εκτός από την περίπτωση παρουσίασης κάπνας στα πτερύγια, πράγμα που γίνεται σε ακραίες περιπτώσεις. Στο σώμα του στροβίλου, παρουσιάζονται "ξεφλουδίσματα" από την υπερθέρμανση, ρήγματα και μπορεί να "καεί" το μπροστινό τμήμα της προεξοχής που συγκρατεί τη φλάντζα της εισαγωγής του

στροβίλου, με αποτέλεσμα τη στρέβλωση και καταστροφή της φλάντζας.

Ο συμπιεστής και το καπάκι του, επειδή σ' όλες τις περιπτώσεις δέχεται μικρότερες θερμοκρασίες (λόγω της ψύξης που δημιουργεί ο εισερχόμενος αέρας), δεν παρουσιάζει σχεδόν καμία ζημιά.

9.3.5 ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗ ΚΟΥΖΙΝΕΤΩΝ ΑΠΟ "ΒΡΩΜΙΚΟ" ΛΑΔΙ

Ας δούμε τι θα συμβεί, αν εισχωρήσει "βρωμιά" με το λάδι λίπανσης μέσα στο turbo. Όπως είναι φυσικό, η "βρωμιά" έχει κάποια μάζα και έτσι από τη φυγόκεντρη δύναμη, θα εκτοξευτεί στην εξωτερική επιφάνεια του περιστρεφόμενου κουζινέτου όπου και θα προκαλέσει ζημιές.

Τα κουζινέτα, περιστρέφονται με το 1/3 της γωνιακής ταχύτητας του άξονα. Πάντα, η σοβαρότερη ζημιά γίνεται στα έδρανα προς τη μεριά του στροβίλου, επειδή τα 2/3 του λαδιού που μπαίνουν στο turbo, πηγαίνουν σ' αυτή τη μεριά για λίπανση και ψύξη (λόγω υψηλών θερμοκρασιών).

Σχήμα 9.9 Φθορές από είσοδο ακαθαρσιών.

Το λάδι, μπορεί να "βρωμίσει" από ρινίσματα σιδήρου και ακαθαρσίες που παρέμειναν στο turbo κατά τη διάρκεια κάποιου "service", ή από λάδι που υπέστη ανθράκωση. Εκτός από αυτά, μπορεί να ευθύνεται και ο ίδιος ο κινητήρας με κάποιο ακάθαρτο φίλτρο ή ρινίσματα.

Αν για οποιοδήποτε λόγο μπουν "βρωμιές" στο λάδι, τότε παρατηρούνται βαθιά σημάδια γραμμώσεων στην εξωτερική διάμετρο των κουζινέτων και μεγάλη φθορά (γραμμώσεις - γυάλισμα) στα ωστικά κουζινέτα. Ο άξονας είναι συνήθως ανέπαφος, χωρίς όμως να αποκλείεται η παρουσία γραμμώσεων στα σημεία εδράσεως. Στο σώμα των κουζινέτων, θα έχουμε βαθιές γραμμώσεις και υπάρχει περίπτωση να έχουμε ζημιά στα ελατήρια του εμβόλου. Τέλος, οι τροχοί του συμπιεστή και του στροβίλου μπορεί να είναι φαγωμένοι, με αντίστοιχες φθορές στα κελύφη.

9.3.6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΞΕΝΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ

✵*Εισαγωγή ξένων αντικειμένων από την εισαγωγή του υπερσυμπιεστή (πτερωτή συμπιεστή)*

Σχήμα 9.10 Κατεστραμμένες πτερωτές από την εισαγωγή ξένων αντικειμένων.

Εάν χρησιμοποιούνται λανθασμένα ή φραγμένα φίλτρα αέρος, τότε αυτά μπορούν να επιτρέψουν την είσοδο ξένων αντικειμένων στην εισαγωγή, προκαλώντας ζημιά στην πτερωτή εισαγωγής. Επίσης, τα σωληνάκια εισαγωγής δεν θα πρέπει να είναι τρυπημένα ή κομμένα, γιατί και αυτό μπορεί να προκαλέσει την ίδια ζημιά.

✵*Εισαγωγή ξένων αντικειμένων από την μηχανή προς την εξαγωγή του υπερσυμπιεστή (πτερωτή στροβίλου)*

Σχήμα 9.11 Πτερύγια που έχουν γίνει κυρτά, λόγω εισαγωγής ξένων αντικειμένων.

Εάν κάποιο πρόβλημα παρουσιαστεί στην μηχανή και κάποιο κομμάτι σπάσει, είναι πολύ εύκολο αυτό να εισέλθει στον υπερσυμπιεστή από την πολλαπλή εξαγωγής. Αν κάποιο κομμάτι περάσει στον υπερσυμπιεστή από την πλευρά της εισαγωγής αέρα, τα πτερύγια της πτερωτής θα φαγωθούν ή ακόμα και θα σπάσουν. Αντίθετα, τα πτερύγια του άξονα, μάλλον θα λυγίσουν παρά θα σπάσουν, και αυτό λόγω της υψηλής αντοχής του υλικού από το οποίο κατασκευάζεται ο άξονας.

9.3.7 ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Μια βλάβη, η οποία οφείλεται στην φθορά ή στο κακό σφίξιμο των φλαντζών μεταξύ turbo και μηχανής, είναι η διαρροή καυσαερίων διαμέσου των ενώσεων.

Αυτό, επισημαίνεται με την αύξηση του θορύβου. Η μόνη λύση, είναι να αποσυναρμολογήσουμε το turbo, να του αλλάξουμε φλάντζες και να το ξανασυναρμολογήσουμε. Δεν πρέπει να ξεχνάμε, ότι η διαρροή καυσαερίων μπορεί να συμβαίνει στα σημεία που ενώνεται η πολλαπλή εισαγωγής ή εξαγωγής με το turbo, οπότε πλέον το turbo δεν ευθύνεται για τις απώλειες.

9.3.8 ΚΡΟΥΣΗ ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ

Αν έχουμε φθαρμένα κουζινέτα, επειδή οι ανοχές μεγαλώνουν και ο άξονας δεν κρατιέται στην σωστή θέση, καθώς περιστρέφεται θα παλινδρομεί, με αποτέλεσμα οι ρότορες να ακουμπούν πάνω στα κελύφη. Αυτό, εκτός από τον μεταλλικό θόρυβο που παράγει και τις φθορές που δημιουργεί, φρενάρει τον άξονα (όταν ακουμπά στο κέλυφος), με αποτέλεσμα να μην υπερτροφοδοτείται σωστά ο κινητήρας. Αυτό, έχει σαν συνέπεια να μην αποδίδει την επιθυμητή ιπποδύναμη. Αν η φθορά των κουζινέτων είναι προχωρημένη, τότε μπορεί να καταστραφούν και τα ελατήρια.

Εδώ, διαφαίνεται η μεγάλη σημασία που έχει η σωστή σχεδίαση και κατασκευή των κουζινέτων, τα οποία καθορίζουν την ακρίβεια των ανοχών και την τήρησή τους στις σωστές διαστάσεις.

Για να δούμε αν συμβαίνει σε ένα turbo αυτή η βλάβη, το απελευθερώνουμε από την εισαγωγή και εξαγωγή του κινητήρα και το περιστρέφουμε με το χέρι, προσέχοντας να ακούσουμε αν υπάρχει ο μεταλλικός αυτός θόρυβος.

9.3.9 ΜΗ ΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΣΗ

✵*Ζημιά στον άξονα, στην πτερωτή ή στο σώμα*

Εάν κάποια κομμάτια από την μηχανή περάσουν στον υπερσυμπιεστή, τότε θα δημιουργήσουν ζημιά στον άξονα ή στην πτερωτή αντίστοιχα. Σαν αποτέλεσμα αυτού, θα είναι ο ρότορας να βγει εκτός ζυγοστάθμισης. Στην καλύτερη περίπτωση το κουζινέτο θα αρχίσει να “φαγώνεται” προκαλώντας στη συνέχεια ζημιά, ενώ στη χειρότερη ο ρότορας θα βγει τόσο πολύ εκτός ζυγοστάθμισης που θα προκαλέσει άμεση καταστροφή του άξονα και της πτερωτής. Επίσης, η κακή ζυγοστάθμιση του ρότορα προκαλεί κραδασμούς στο σώμα. Οι κραδασμοί, επιβαρύνουν τα κουζινέτα με κρουστικά φορτία και προκαλούν την “βίαιη” επαφή τους με τις φωλιές τους, διασπώντας το λιπαντικό “φιλμ”.

✵*Σημάδια στην ζυγοστάθμιση*

Είναι σημαντικό, όταν ζυγοσταθμίζεται ένας ρότορας να σημαδεύονται στις σωστές θέσεις τα αντίστοιχα εξαρτήματα, καθώς και να τοποθετούνται σ' αυτές όταν συναρμολογείται ο υπερσυμπιεστής. Όταν αυτό δεν γίνεται, ο ρότορας θα φύγει από την ζυγοστάθμιση και πολύ γρήγορα θα προκαλέσει ζημιά στον υπερσυμπιεστή.

✵Αντικατάσταση ανταλλακτικών του ρότορα χωρίς ζυγοστάθμιση

Εάν κάποια από τα ανταλλακτικά του ρότορα πρέπει να αντικατασταθούν, τότε επιβάλλεται η ζυγοστάθμιση. Εάν αυτό δεν γίνει, λόγω της μεγάλης ταχύτητας με την οποία περιστρέφεται ο ρότορας, η πίεση – "βάρος" που θα δημιουργηθεί στα κουζινέτα θα είναι τεράστια, με αποτέλεσμα την αναπόφευκτη ζημιά του υπερσυμπιεστή.

Τα αποτελέσματα στα κουζινέτα από την μη ζυγοστάθμιση του ρότορα, φαίνονται όταν αυτά φαγώνονται ανόμοια εξωτερικά. Αν παρατηρήσουμε ένα θρος ή ένα φλίνγκερ, θα δούμε ότι και αυτά θα παρουσιάσουν πρόβλημα σ' ένα τους σημείο μόνο.

Όσον αφορά την πτερωτή εισαγωγής, τα πτερύγιά της θα έρθουν σε επαφή με το κέλυφος εισαγωγής, με αποτέλεσμα να φαγωθούν και έτσι θα επέλθει μείωση της απόδοσης του υπερσυμπιεστή. Σε περίπτωση που ο ρότορας βγει εκτός ζυγοστάθμισης, το κάτω μέρος της πτερωτής θα φαγωθεί μόνο σ' ένα σημείο.

Η ζυγοστάθμιση του άξονα και της πτερωτής είναι απαραίτητη, προκειμένου να επιβιώσει το εσωτερικό σύστημα λειτουργίας του υπερσυμπιεστή στις μεγάλες ταχύτητες περιστροφής του ρότορα. Σε μια κλίμακα από 0 έως 140000 rpm, ο ρότορας δεν μπορεί να θεωρηθεί ως άκαμπτος - "τέλειος". Μέσα σε αυτήν την κλίμακα, δημιουργούνται μία ή περισσότερες καίριες ταχύτητες, κατά τις οποίες ο άξονας "δονείται" στην φυσική του ταχύτητα (συντονισμός).

Αν ο άξονας δεν έχει ζυγοσταθμιστεί σωστά, η ζημιά η οποία θα επέλθει στον υπερσυμπιεστή από την δύναμη που θα ασκηθεί στα εσωτερικά ανταλλακτικά, θα είναι μεγάλη. Αυτή η δύναμη, είναι γνωστή από την φυσική ως κεντρομόλος δύναμη :

$$\mathbf{F = 4\,\pi^2 * \nu^2 * m * R}$$

όπου : π = 3,14
ν = στροφές ανά sec
m = μάζα σε Kg
R = ακτίνα σε m

Αν υποθέσουμε, ότι σε ένα ρότορα έχουμε απόκλιση ζυγοστάθμισης 1,5 χιλιοστό του γραμμαρίου, με ταχύτητα περιστροφής 2500 στροφές ανά sec και ακτίνα απόκλισης ζυγοστάθμισης 2,5 cm από τον νοητό άξονα του ρότορα, τότε η δύναμη που ασκείται είναι ίση με 0,94 kg!

9.3.10 ΥΨΗΛΟΣ ΛΟΓΟΣ ΠΙΕΣΗΣ

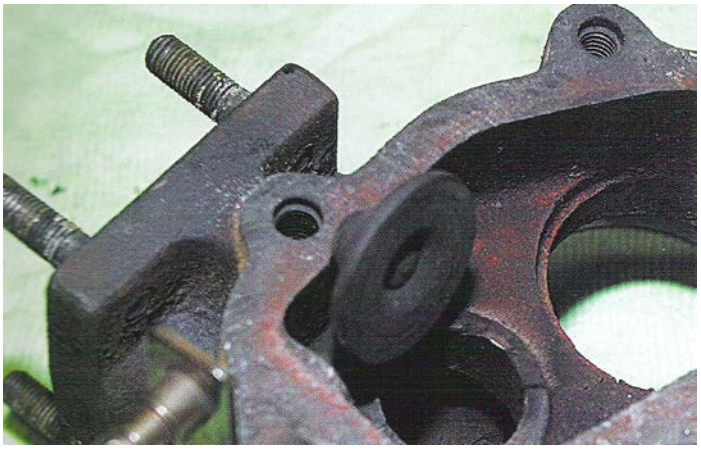
Ξέχωρα από τις γνωστές συνέπειες που έχει για ένα κινητήρα turbo η αλόγιστη άνοδος του λόγου πίεσης, το πρώτο "θύμα" αυτής της πρόχειρης μεθόδου για άντληση ισχύος, είναι φυσικά το ίδιο το turbo. Κυρίως, υποφέρει το θρος, ειδικά αν δεν είναι προορισμένο για τις πιέσεις που δουλεύει ο κινητήρας. Συνάμα, η αυξημένη ποσότητα και θερμοκρασία των καυσαερίων, μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές στον άξονα.

Η εκτός προδιαγραφών άνοδος της ταχύτητας περιστροφής του (που μπορεί να προκληθεί και από τη χρήση μικρού turbo σε κινητήρα μεγάλου κυβισμού), φθείρει πρόωρα τα κουζινέτα και φέρνει στην επιφάνεια τυχόν ατέλειες στη ζυγοστάθμιση του ρότορα, οι οποίες "υπό κανονικές συνθήκες" δεν θα δημιουργούσαν ιδιαίτερο πρόβλημα.

9.3.11 ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Η άνοδος της θερμοκρασίας των καυσαερίων, οφείλεται σε έλλειψη καυσίμου, ή πιο απλά σε φτωχό καύσιμο μείγμα. Υπάρχουν πολλοί λόγοι που μπορεί να προκαλέσουν αυτό το "στέγνωμα" του κινητήρα από καύσιμο, οι οποίοι στη συντριπτική τους πλειοψηφία δεν είναι ανιχνεύσιμοι από τη θέση του οδηγού. Από κάποιο "βουλωμένο" μπεκ ή κάποιον αισθητήρα που δεν λειτουργεί σωστά, μέχρι προβληματική αντλία βενζίνης, "κολλημένο" wastegate ή λανθασμένη χαρτογράφηση του εγκεφάλου του κινητήρα. Λίγες είναι οι περιπτώσεις που θα σας προειδοποιήσουν έγκαιρα με πτώση της απόδοσης του κινητήρα, πριν να έχει ήδη προκληθεί κάποια ζημιά (που κι αυτή μπορεί να μην εκδηλωθεί αμέσως).

Σε πρώτη φάση, οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν τη διάσπαση του λιπαντικού "φιλμ" στα κουζινέτα της "θερμής" πλευράς του turbo. Η θερμοκρασία των καυσαερίων μεταδίδεται σε ολόκληρο το ρότορα και φυσικά στο λιπαντικό, που από ένα σημείο και μετά λεπταίνει υπερβολικά και χάνει τις λιπαντικές του ιδιότητες. Επίσης, οι υψηλές θερμοκρασίες καταπονούν τα μέταλλα του turbo, προκαλώντας ρωγμές σε κέλυφος εξαγωγής και στρόβιλο, ή μειώνουν την αντοχή του άξονα. Σε ακραίες περιπτώσεις υπερβολικών θερμοκρασιών, επιφέρουν ακόμη και τήξη των εξαρτημάτων (για να μη μιλήσουμε για "οπές" σε έμβολα, ρωγμές σε κυλινδροκεφαλές κ.λ.π.).



Σχήμα 9.12
Ραγισμένη έδρα του wastegate, με συνέπεια απώλεια των καυσαερίων.

Σχήμα 9.13
Κομπρέσορες κατεστραμμένοι από επαφή με αλουμίνιο ή ξένα σώματα.

Σχήμα 9.14
Κατεστραμμένοι άξονες από υπερθέρμανση και κακή λίπανση. Κομμένοι άξονες λόγω απότομου "φρεναρίσματος" της τουρμπίνας.

Όλοι οι κινητήρες turbo, πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με ένα "πυρόμετρο" (της πολλαπλής εξαγωγής). Ένα αξιόπιστο και σωστά τοποθετημένο "πυρόμετρο", μας πληροφορεί ανά πάσα στιγμή για την θερμοκρασία των καυσαερίων μας, από την οποία προκύπτει πλήθος πληροφοριών για την κατάσταση και λειτουργία του κινητήρα. Σε περίπτωση που ο αισθητήρας του "πυρομέτρου" είναι τοποθετημένος πριν το turbo (πράγμα που είναι απόλυτα σωστό), δεν πρέπει με τίποτα να αφήνουμε την θερμοκρασία των καυσαερίων να ξεπερνά τους 1000 °C. Αν η σωστή τοποθέτηση του "πυρομέτρου" είναι αδύνατη και ο αισθητήρας βρίσκεται μετά το turbo, αφαιρούμε περίπου 100 °C από το όριο αυτό.

9.3.12 ΚΑΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Όταν δυσλειτουργούν τα περιφερειακά συστήματα του turbo, ευθύνονται για πολλές βλάβες. Το wastegate μπορεί, είτε να ανοίγει πρόωρα μειώνοντας την πίεση υπερπλήρωσης και συνεπώς την απόδοση του κινητήρα, ή μπορεί να ανοίγει από καθυστερημένα έως καθόλου αυξάνοντας υπερβολικά την πίεση και προκαλώντας αυτά που αναφέραμε παραπάνω.

Οι απώλειες πίεσης, αναγκάζουν το turbo να δουλεύει "υπερωρίες", αφού πρέπει να αναπληρώνει τον αέρα που διαφεύγει από το σύστημα της εισαγωγής. Συνήθεις ύποπτοι για διαρροές είναι φθαρμένες ή κολλημένες σκάστρες (βαλβίδες ανακούφισης συμπιεστή), "γερασμένα" κολάρα και μη στεγανά intercooler. Οι απώλειες πίεσης, συχνά, δεν ανιχνεύονται δια της "ακουστικής" μεθόδου και πολύτιμος σύμμαχός μας σε αυτήν την αναζήτηση, μπορεί να αποδειχθεί ένα "μπαρόμετρο" και ένας αναλυτής λόγου "λ" (αναλυτής αέρα - καυσίμου).

Η παρεμπόδιση της ροής του αέρα προς την εισαγωγή του turbo, προκαλεί το ειδεχθές "πατινάρισμα", δηλαδή την προσέγγιση του surge Iimit του συμπιεστή. Η μεγάλη υποπίεση που προκαλούν δαιδαλώδεις ή ανεπαρκούς διατομής σωληνώσεις πριν το turbo, καθώς και "φραγμένα" φίλτρα αέρα, αναγκάζουν ουσιαστικά την λειτουργία του turbo σε "κενό αέρος", με επακόλουθη κατακόρυφη αύξηση του ρυθμού περιστροφής του.

Από την άλλη πλευρά, η εξάτμιση μπορεί να καταστρέψει εύκολα ένα turbo. Η μικρή διατομή της εξάτμισης δημιουργεί περιττό backpressure στην εξαγωγή, καταπονώντας το θρος και "φρενάροντας" την πτερωτή. Επίσης, συντελεί στην άνοδο της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Απεναντίας, η πολύ μεγάλη εξάτμιση εξαλείφει το backpressure, το οποίο (σε λογικές τιμές) είναι απαραίτητο για τη στεγανοποίηση του turbo. Όταν πάψει να υπάρχει backpressure (κυρίως στο ρελαντί), σημειώνονται απώλειες λαδιού στην εξαγωγή.

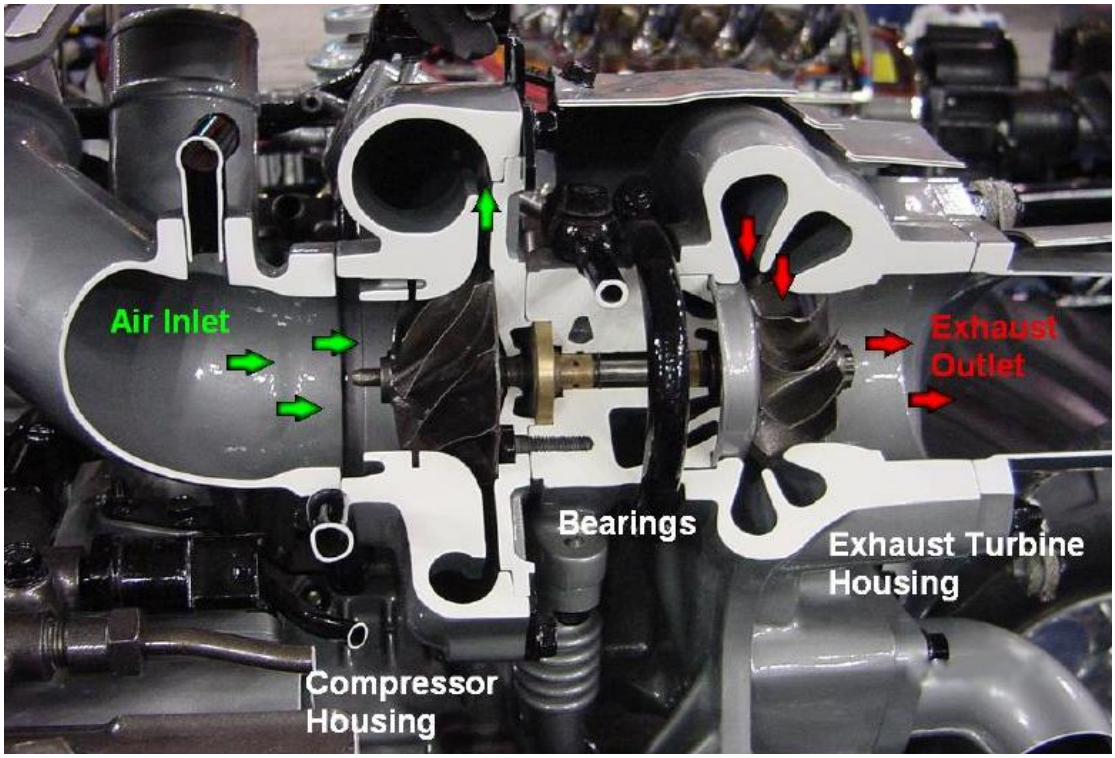
9.4 ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Οι περισσότερες βλάβες και ζημιές που παρουσιάζουν τα turbo, οφείλονται σε σφάλματα του χρήστη ή του τεχνικού, αφού ο εξονυχιστικός τεχνικός και ποιοτικός έλεγχος που περνούν τα turbo σε κάθε στάδιο της παραγωγής τους, καθώς και οι πολύ μεγάλες κατασκευαστικές ακρίβειές τους, δεν αφήνουν περιθώρια κατασκευαστικού λάθους [22]. Αυτός, είναι εξάλλου και ο λόγος της

υψηλής τιμής ενός κατά τα άλλα απλού μηχανισμού, όπως το turbo.

Για να αποφύγουμε σοβαρές φθορές, θα πρέπει να τηρούμε ορισμένες συμβουλές που μας δίνει ο κατασκευαστής, σχετικά με την συντήρηση και την συναρμολόγηση του turbo και της μηχανής. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να αλλάζουμε συχνά φίλτρα λαδιού και αέρα του κινητήρα. Οι αγωγοί του, πρέπει να είναι καθαροί και ποτέ τσακισμένοι. Πρέπει επίσης περιοδικά, να συντηρούμε με την ίδια προσοχή και τα υπόλοιπα εξαρτήματα της εγκατάστασης, όπως είναι η βαλβίδα ανακουφίσεως του στροβίλου, η βαλβίδα ανακούφισης του συμπιεστή και το ψυγείο ψύξεως του συμπιεσμένου αέρα.

Όταν αλλάζουμε κάποιο εξάρτημα, θα πρέπει να φροντίζουμε να τοποθετηθεί το γνήσιο ανταλλακτικό του κατασκευαστή και όχι άλλα, διότι οι προδιαγραφές διαφέρουν και η φθορά θα είναι σύντομη. Πριν τοποθετήσουμε τον στροβιλο-υπερπληρωτή πάνω στην μηχανή, τον γεμίζουμε με λάδι και τον περιστρέφουμε ώστε το λάδι να πάει παντού.



Σχήμα 9.15 Τομή στροβιλο-υπερπληρωτή, τοποθετημένου πάνω σε κινητήρα.

Όταν θέλουμε να σβήσουμε τον κινητήρα, θα πρέπει πρώτα να τον αφήσουμε δύο-τρία λεπτά στο ρελαντί, για να "κρυώσει" το turbo και κατόπιν να τον σβήσουμε. Αυτό παίζει σπουδαίο ρόλο, όταν ο κινητήρας έχει λειτουργήσει για πολύ χρονικό διάστημα με μεγάλο φορτίο.

Αν το φιλοσοφήσετε, το “αίμα” του μοτέρ είναι το λιπαντικό. Οποιοδήποτε λάθος στην ποσότητα, ποιότητα ή καθαρότητά του, ισοδυναμεί με “μηχανικό θάνατο”. Οι πολύ μικρές λειτουργικές ανοχές του turbo, σε συνδυασμό με τις μεγάλες θερμοκρασίες, ταχύτητες και πιέσεις λειτουργίας, καθιστούν ζωτική την ύπαρξη ενός συνεχούς και ανθεκτικού “φιλμ” λιπαντικού με ιδανικές ιδιότητες, ανάμεσα στις τριβόμενες επιφάνειες. Γι' αυτό, το πρώτο πράγμα που θα πρέπει να φροντίζουμε στους κινητήρες turbo, είναι η χρήση κορυφαίας ποιότητας συνθετικών λαδιών (τα οποία προσφέρουν υψηλή σταθερότητα και προστασία σε ακραίες συνθήκες). Η συχνή αλλαγή τους και η επαρκής ποσότητά τους στο κάρτερ, επιβάλλεται.

Σε περίπτωση πτώσης της πίεσης λαδιού σε κάποια στροφή, εξαιτίας κακού σχεδιασμού του κάρτερ ή χαμηλής στάθμης του λαδιού, μπορεί να μην ανάψει καν το λαμπάκι στο ταμπλό. Ενδέχεται όμως, να “ανάψουν” τα κουζινέτα του turbo. Το ίδιο ισχύει και για μια φθαρμένη αντλία λαδιού που αργεί να σηκώσει πίεση στην εκκίνηση του κινητήρα, ή για ακατάλληλο λιπαντικό που είναι πολύ παχύρρευστο στις χαμηλές θερμοκρασίες (ή γίνεται “νερό” στις υψηλές), αφήνοντας “απροστάτευτο” το turbo.

Το παράξενο της υπόθεσης, είναι οι αναθυμιάσεις του κάρτερ. Σε περίπτωση που η πίεσή του ανεβαίνει υπερβολικά, είτε επειδή τα ελατήρια των εμβόλων δεν στεγανοποιούν επαρκώς τους θαλάμους καύσης, είτε επειδή ο σωλήνας των αναθυμιάσεων είναι φραγμένος, οι αναθυμιάσεις θα προσπαθούν να ξεφύγουν από το κάρτερ μέσω του σωλήνα επιστροφής λαδιού του turbo. Έτσι τα αέρια θα διασπούν το “φιλμ” λαδιού στα κουζινέτα του turbo, με ανάλογες συνέπειες.

Η κακή στεγανότητα των υδροχιτωνίων σε μοτέρ με αλουμινένια μπλοκ, η κακή στεγανότητα και το “κάψιμο” της φλάντζας της κυλινδροκεφαλής, ή η εμφάνιση ρηγμάτων στην κυλινδροκεφαλή, επιτρέπουν την εισροή ψυκτικού υγρού στο λάδι, με αποτέλεσμα την “δηλητηρίασή” του και τις δυσμενείς επιπτώσεις που αυτό επιφέρει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.

ΤΑΙΡΙΑΣΜΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟ-ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΗ.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

10.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα προηγούμενα κεφάλαια, πραγματοποιήθηκε πλήρης ανάλυση της θεωρίας περί στροβιλο-υπερπληρωτών και πως πραγματοποιείται η αντιστοίχιση - ταίριασμά τους με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Σκοπός μας τώρα, είναι να γίνει το "matching" αυτό στην πράξη και να ληφθούν συγκεκριμένες μετρήσεις, που θα μας οδηγήσουν σε κάποια συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, έχουμε στη διάθεσή μας ένα Audi A4 1800cc 20v, το οποίο διαθέτει εργοστασιακά στροβιλο-υπερπληρωτή. Στον συγκεκριμένο βενζινοκινητήρα, θα "ταιριάξουμε" δύο μεγαλύτερους στροβιλο-υπερπληρωτές, με τις ανάλογες περιφερειακές επεμβάσεις που χρειάζεται να γίνουν σε κάθε περίπτωση. Και στις δύο περιπτώσεις, θα ληφθούν οι ίδιες μετρήσεις και θα γίνουν οι εκάστοτε συγκρίσεις, σε σχέση με το εργοστασιακό setup.

Οι μετρήσεις, θα ληφθούν πάνω σε δυναμόμετρο με επιλεγμένη σχέση μετάδοσης την 4η ταχύτητα και είναι οι εξής:

►Διάγραμμα κατανομής της **ροπής ($M_{κιν.}$)** του κινητήρα, σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του.

►Διάγραμμα κατανομής της **ισχύος ($P_{κιν.}$)** του κινητήρα, σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του.

►Μέτρηση της **πίεσης του αέρα εισαγωγής-turbo (P_{turbo})**, σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα.

►Μέτρηση της **παροχής μάζας του εισερχόμενου αέρα (MAF)** στους κυλίνδρους του κινητήρα, σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του.

►Μέτρηση της **θερμοκρασίας του αέρα εισαγωγής ($T_{εισ.}$)**, σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα.

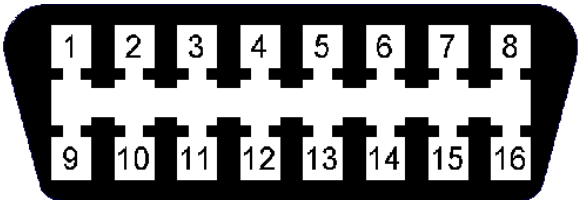
►Μέτρηση της **θερμοκρασίας των καυσαερίων ($T_{καυσ.}$) – πυρόμετρο**, σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα.

►Μέτρηση της **γωνίας αβάνς (I_{BTDC})** (προπορεία ανάφλεξης - advance), συναρτήσει των στροφών του κινητήρα.
►Μέτρηση για τυχών ύπαρξη **κρουστικής καύσης (K_S - πειράκια - knocks)**, σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα.

Όλες αυτές οι μετρήσεις, θα πραγματοποιηθούν στην εταιρία Microchips Tuning [18] του κ. Γεώργιου Κούτση. Η συγκεκριμένη εταιρία, διαθέτει ιδιόκτητο δυναμόμετρο της Dimsport 4 WD με φρένα, που προσομοιώνει πραγματικές συνθήκες δρόμου. Η Dimsport, παράγει δυναμόμετρα κυλιόμενου δρόμου (rolling road). Σε αυτά, υπολογίζονται οι απώλειες από τον στρόφαλο στον τροχό, αφήνοντας το όχημα να φρενάρει μόνο του τα ράουλα, μετά το πέρας της δυναμομέτρησης. Η ισχύς των απωλειών, προστίθενται στην ισχύ που μετρήθηκε στα ράουλα κι έτσι έχουμε μια αρκετά προσεγγιστική μέτρηση της ισχύος στο στρόφαλο.

Σχήμα 10.1 Δυναμόμετρο 4WD Dimsport της Microchips Tuning.

Επίσης, θα χρησιμοποιηθεί διαγνωστικό μηχάνημα (φορητό laptop) με λογισμικό VCDS, για την λήψη κάποιων εκ των παραπάνω μετρήσεων [17]. Το VCDS (VAG - COM Diagnostic System), είναι ένα εξειδικευμένο διαγνωστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για μετρήσεις, βλάβες και ελέγχους σε όλους τους κινητήρες, μέσω σύνδεσής του στη θύρα OBD II που διαθέτει το όχημα.



Σχήμα 10.2 Απεικόνιση θύρας OBD-II. Ανάλυση υποδοχών: Pin 1 Signal, Pin 2 J1850 Bus+, Pin 4 Chassis Ground, Pin 5 Signal Ground, Pin 6 CAN High (J-2284), Pin 7 ISO 9141-2 K Line, Pin 10 J1850 Bus, Pin 14 CAN Low (J-2284), Pin 15 ISO 9141-2 L Line, Pin 16 Battery Power.

Σχήμα 10.3 Διαγνωστικό μηχάνημα (φορητό laptop) με λογισμικό VCDS.

Ανακεφαλαιώνοντας, οι μετρήσεις $\mathbf{M_{κιν.}}$ και $\mathbf{P_{κιν.}}$ θα ληφθούν από το δυναμόμετρο Dimsport, οι μετρήσεις $\mathbf{P_{turbo}}$, **MAF**, $\mathbf{T_{εισ.}}$, $\mathbf{I_{BTDC}}$ και $\mathbf{K_S}$ θα ληφθούν από το διαγνωστικό μηχάνημα μέσω του λογισμικού VCDS και η μέτρηση $\mathbf{T_{καυσ.}}$ θα ληφθεί προσεγγιστικά, μέσω αναλογικού πυρομέτρου που θα συνδεθεί στην εξάτμιση (~20cm στην έξοδο των καυσαερίων μετά το turbo), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 10.4 Σύνδεση πυρομέτρου για την μέτρηση $T_{καυσ.}$

10.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε για το πειραματικό μας μέρος, είναι ο 4-κύλινδρος σε σειρά βενζινοκινητήρας της Audi, χωρητικότητας 1781cc και 20-βάλβιδος (5 βαλβίδες ανά κύλινδρο - 3 εισαγωγής και 2 εξαγωγής). Η κάθε βαλβίδα εισαγωγής έχει διάμετρο 26,9mm, ενώ η κάθε βαλβίδα εξαγωγής έχει διάμετρο 29,9mm και αυτό λόγω της 5-βάλβιδης σχεδίασης ανά κύλινδρο.

Η διάμετρος του κάθε κυλίνδρου είναι D=81mm και η διαδρομή του εμβόλου s=86,4mm (δομή σχεδίασης

υποτετράγωνη, δηλαδή διάμετρος<διαδρομή). Ο λόγος συμπίεσης του κινητήρα είναι ε=9,5.

Σχήμα 10.5 Κινητήρας της Audi 1,8 20υt με λυμένο το "ψευτοκάπακο".

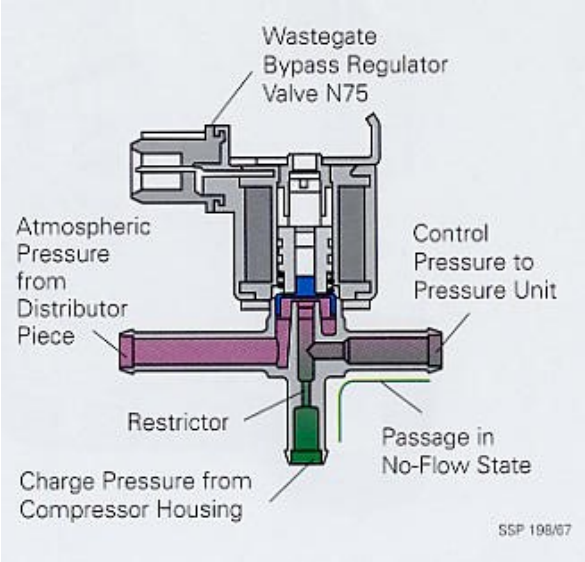
Ο κινητήρας αυτός, διαθέτει εργοστασιακά τον στροβιλο-υπερπληρωτή της BorgWarner (KKK) με κωδικό K03-029 [20].

Σχήμα 10.6 Turbo KKK K03-029 εργοστασιακό του οχήματός μας.

Ο στροβιλο-υπερπληρωτής KKK K03-029 έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

•Compressor Size: 36/50mm
•Turbine Size: 40/45mm

Ο εγκέφαλος διαχείρισης του κινητήρα, διαθέτει management τέτοιο, που η λειτουργία της wastegate ελέγχεται ηλεκτρονικά μέσω μιας μαγνητικής βαλβίδας (N75). Επομένως, η πίεση εισαγωγής (turbo), ρυθμίζεται μέσω του management από τη μαγνητική βαλβίδα N75, η οποία φαίνεται σε τομή στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 10.7 Μαγνητική βαλβίδα N75, για τον έλεγχο της πίεσης υπερπλήρωσης.

Τα μπέκ ψεκασμού βενζίνης, έχουν παροχή 300cc/min. Ο MAF (αισθητήρας παροχής μάζας αέρα) είναι διαμέτρου 70mm. Τέλος, ο κινητήρας διαθέτει μεταβλητό χρονισμό των βαλβίδων εισαγωγής, γεγονός που βοηθά ακόμα περισσότερο την γραμμική λειτουργία του.

Σχήμα 10.8 MAF sensor διαμέτρου 70mm (εργοστασιακό), για τη μέτρηση της παροχής μάζας εισερχόμενου αέρα.

10.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑΚΟ SETUP TURBO KKK K03-029

Οι μετρήσεις που ακολουθούν, πραγματοποιήθηκαν με εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος 15,7°C.

Workshop/tuner:Microchips Tuning
Address: Dimitsanas 6 Internet: www.microchips-tuning.com
Phone: 210 4838357 Fax: E-mail: info@microchips-tuning.com

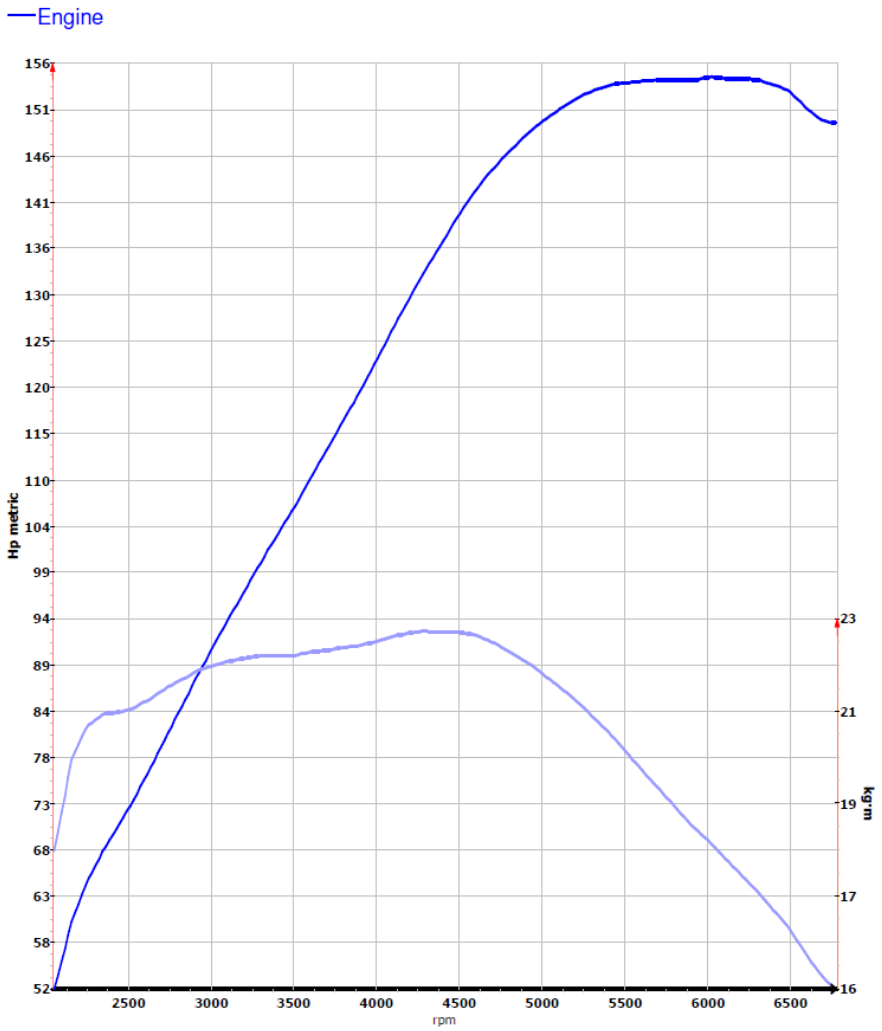
MICROCHIPS TUNING

Client name:
Model: A4

Vehicle plate:
Type: 1.8L TURBO

Manufacturer: AUDI

K03
Engine Power: 154.8Hp metric@6022rpm
Engine Torque: 22.7kg·m@4277rpm



<u>Διάγραμμα 10.1</u> Καμπύλες ισχύος ($P_{κιν.}$) και ροπής ($M_{κιν.}$) κινητήρα εργοστασιακού setup, συναρτήσει των στροφών λειτουργίας του (n).

Παρατηρούμε, ότι με τον εργοστασιακό στροβιλο-υπερπληρωτή της BorgWarner K03-029, ο κινητήρας αποδίδει ήδη από τις 2300rpm 21kg·m ροπή στον στρόφαλο, ενώ μετά τις 5000rpm ξεκινάει η απότομη πτώση της μέχρι τον κόφτη του κινητήρα (7000rpm). Επίσης, βλέπουμε ότι η μέγιστη ισχύς του κινητήρα, παρατηρείται στο φάσμα 5500 με 6400rpm.

Στον πίνακα της επόμενης σελίδας, παρουσιάζονται οι υπόλοιπες μετρήσεις που περιγράψαμε στην ενότητα 10.1.

n (rpm)	$T_{εισ.}$ (°C)	P_{turbo} (mbar)	MAF (g/sec)	$T_{καυσ.}$ (°C)	I_{BTDC} (°)	K_S (°) Cylind. 1	K_S (°) Cylind. 2	K_S (°) Cylind. 3	K_S (°) Cylind. 4
1000	33.0	1000	3.12	450	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0
1250	34.0	1150	9.81	460	9.2	0.0	0.0	0.0	0.0
1500	34.0	1350	15.61	480	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0
1750	35.0	1650	25.72	490	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	36.0	1740	44.69	500	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0
2250	36.0	1820	47.91	550	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0
2500	36.0	1840	52.39	590	13.2	0.0	0.0	0.0	0.0
2750	37.0	1840	71.44	610	13.9	0.0	0.0	0.0	0.0
3000	37.0	1840	81.83	620	13.9	0.0	0.0	0.0	0.0
3250	38.0	1840	87.09	630	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0
3500	38.0	1830	91.97	640	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0
3750	39.0	1830	96.46	650	15.6	0.0	0.0	0.0	0.0
4000	39.0	1830	104.11	650	16.2	0.0	0.0	0.0	0.0
4250	40.0	1820	112.78	660	16.5	0.0	0.0	0.0	0.0
4500	40.0	1800	123.75	670	16.8	0.0	0.0	0.0	0.0
4750	42.0	1730	132.28	680	17.6	0.0	0.0	0.0	0.0
5000	42.0	1680	135.87	690	18.5	0.0	0.0	0.0	0.0
5250	44.0	1580	136.59	690	19.1	0.0	0.0	0.0	0.0
5500	44.0	1500	137.22	700	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5750	45.0	1480	138.15	710	21.3	0.0	0.0	0.0	0.0
6000	47.0	1470	138.54	730	22.3	0.0	0.0	0.0	0.0
6250	47.0	1450	138.96	740	23.1	0.0	0.8	0.0	0.0
6500	50.0	1440	139.12	750	23.8	0.0	1.0	0.9	0.0
6750	51.0	1440	139.76	760	24.2	0.0	2.1	1.8	0.0
7000	51.0	1410	139.85	770	24.2	1.1	3.0	2.2	1.8

Στον παραπάνω πίνακα, η πίεση του αέρα εισαγωγής (P_{turbo}) εκφράζεται σαν απόλυτη πίεση. Για παράδειγμα, στις 4500rpm που έχουμε P_{turbo}=1800mbar=1,8bar, η πίεση υπερπλήρωσης είναι 1,8-1=0,8bar.

Η θερμοκρασία των καυσαερίων ($T_{καυσ.}$) στην έξοδο του στροβιλο-υπερπληρωτή, μετρήθηκε μέσω πυρομέτρου, του οποίου ο αισθητήρας όπως φαίνεται στο σχήμα 10.4 είναι συνδεδεμένος 20cm μετά από την έξοδο του στροβίλου στην εξάτμιση (downpipe). Επομένως, υπάρχει μια απόκλιση στην $T_{καυσ.}$ της τάξεως των 100°C περίπου λιγότερη από την πραγματική, λόγω αυτής της απόστασης.

Η γωνία αβάνς (I_{BTDC}), δηλώνει την γωνία που πρέπει να γυρίσει ο στροφαλοφόρος άξονας, από τη στιγμή που δώσει σπινθήρα το μπουζί έως ότου το έμβολο φτάσει στο Άνω Νεκρό Σημείο. Εκφράζεται σε μοίρες στροφάλου - Ignition Timing Before Top Dead Center.

Η μέτρηση για τυχών ύπαρξη κρουστικής καύσης (K_S), μετριέται ξεχωριστά για κάθε κύλινδρο μέσω knock sensor. Σε περίπτωση που υπάρξουν "πειράκια" σε κάποιο κύλινδρο, ο εγκέφαλος "κόβει" - μειώνει όσες μοίρες χρειάζεται κάθε φορά από την γωνία αβάνς I_{BTDC}. Αυτές οι μοίρες, είναι τα λεγόμενα "retards" που έχουμε και εκφράζονται σε μοίρες στροφάλου. Για παράδειγμα στις 6500rpm στον κύλινδρο 2, παρατηρείται το φαινόμενο της κρουστικής καύσης. Ο εγκέφαλος, μέσω του knock sensor μειώνει κατά 1° την γωνία αβάνς στον κύλινδρο 2. Δηλαδή I_{BTDC}=23.8°-1°=22.8°. **Όταν τα "retards" είναι μέχρι 2-3° δεν συντρέχει λόγος ανησυχίας. Από τις 5-6° και πάνω όμως υπάρχει πρόβλημα, ιδίως για συνεχόμενη έντονη χρήση του κινητήρα υπό πλήρες φορτίο.**

10.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ SETUP TURBO KKK K04-023

Το πρώτο matching στροβιλο-υπερπληρωτή που κάναμε, ήταν χρησιμοποιώντας το turbo της BorgWarner (KKK) με κωδικό K04-023 [20].

Σχήμα 10.9 1ο matching, χρησιμοποιώντας το turbo KKK K04-023.

Ο συγκεκριμένος στροβιλο-υπερπληρωτής (K04-023), είναι λίγο μεγαλύτερος του εργοστασιακού (K03-029) και έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

•Compressor Size: 42/56mm
•Turbine Size: 42/55mm

Για να εφαρμόσει στον κινητήρα μας, αλλάχτηκε η πολλαπλή εξαγωγής ενώ χρησιμοποιήθηκαν οι κατάλληλες σωληνώσεις νερού – λαδιού για την ψύξη – λίπανση του turbo [19]. Τοποθετήθηκε εξάτμιση εσωτερικής διαμέτρου 63mm από την έξοδο του turbo μέχρι και το τελικό σιλανσιέ, διατηρώντας τον εργοστασιακό καταλύτη.

Αντικαταστήσαμε το σύστημα εισαγωγής αέρα με πιο εξελιγμένο, επιλέγοντας φιλτροχοάνη της HKS και αλλάζοντας επίσης τον MAF (αισθητήρας παροχής μάζας αέρα) με άλλον διαμέτρου 80mm (από Audi S3).

Για μπέκ ψεκασμού βενζίνης επιλέξαμε της Bosch με παροχή 440cc/min και τοποθετήθηκε αντλία βενζίνης από Audi S3, για να καλύψει τις απαιτήσεις παροχής καυσίμου.

Αντικαταστήσαμε την εργοστασιακή σχάστρα με άλλη aftermarket της Forge (FMDVSPLTR). Η μοναδική αυτή σχάστρα, έχει μελετηθεί και κατασκευαστεί ειδικά για τους κινητήρες VAG 1.8 turbo 20v, έτσι ώστε να προσφέρει σταθερή πίεση, χωρίς “σκαμπανεβάσματα”.

Το setup ολοκληρώθηκε, με την τοποθέτηση intercooler αέρος - αέρος της Hercules parts στην μετώπη του αυτοκινήτου, μαζί με τις σωληνώσεις του (για καλύτερη ψύξη του πεπιεσμένου ζεστού εισερχόμενου αέρα).

Σχήμα 10.10 Τοποθέτηση του intercooler της Hercules parts.

Ακολούθησε ο επαναπρογραμματισμός του ηλεκτρονικού εγκεφάλου (ECU Remapping), για να ρυθμιστεί η χαρτογράφηση του νέου setup. Η δυναμομέτρηση που ακολουθεί, πραγματοποιήθηκε με εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος 14,4°C.

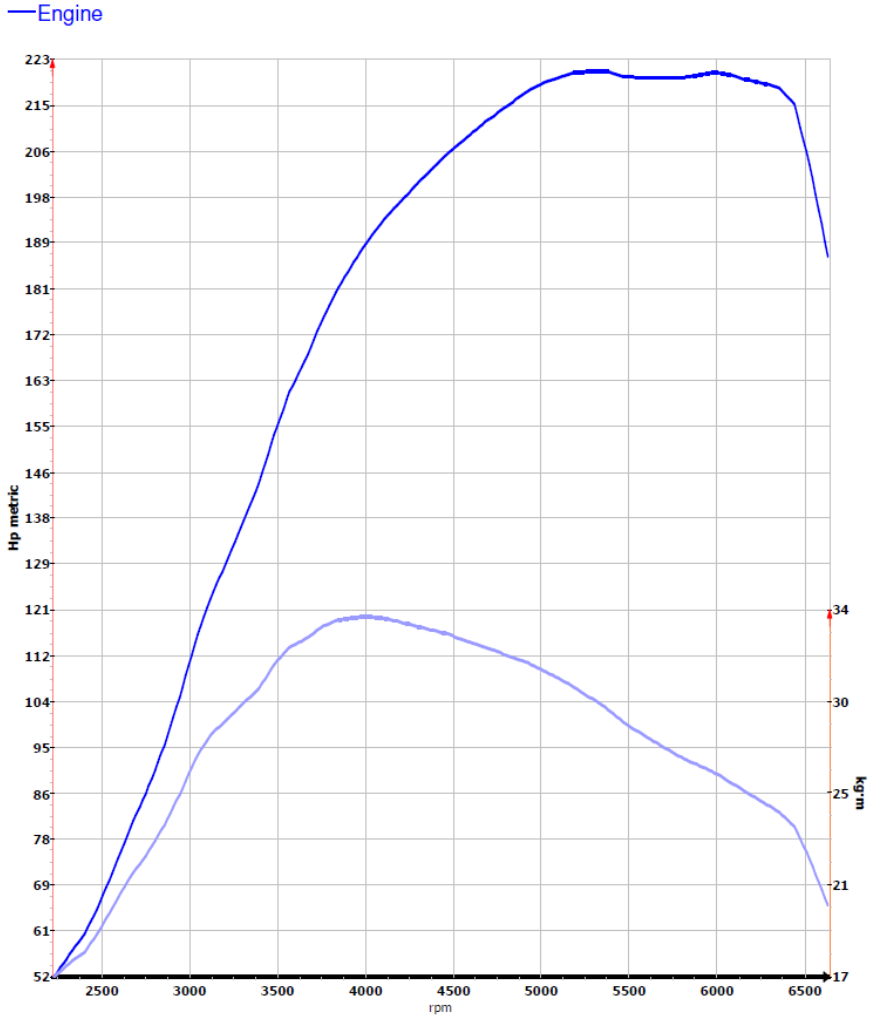
Workshop/tuner:Microchips Tuning
Address: Dimitsanas 6 Internet: www.microchips-tuning.com
Phone: 210 4838357 Fax: E-mail: info@microchips-tuning.com

Client name:
Model: A4

Vehicle plate:
Type: 1.8L TURBO

Manufacturer: AUDI

K04
Engine Power: 221.2Hp metric@5361rpm
Engine Torque: 33.8kg·m@4020rpm



Διάγραμμα 10.2 Καμπύλες ισχύος ($P_{κιν.}$) και ροπής ($M_{κιν.}$) κινητήρα για setup KKK K04-023, συναρτήσει των στροφών λειτουργίας του (n).

Παρατηρούμε, ότι με τον στροβιλο-υπερπληρωτή της BorgWarner K04-023, ο κινητήρας αποδίδει πάνω από 30kg·m ροπή από τις 3300rpm μέχρι τις 5300rpm. Μετά τις 6000rpm, έχουμε την μεγάλη πτώση της ροπής μέχρι τον κόφτη του κινητήρα. Επίσης, βλέπουμε ότι η μέγιστη ισχύς του κινητήρα παρατηρείται στο φάσμα 5000 με 6400rpm.

Στον πίνακα της επόμενης σελίδας, παρουσιάζονται και οι υπόλοιπες μετρήσεις που λάβαμε, όπως είδαμε και πριν στο εργοστασιακό setup.

n (rpm)	$T_{εισ.}$ (°C)	P_{turbo} (mbar)	MAF (g/sec)	$T_{καυσ.}$ (°C)	I_{BTDC} (°)	K_S (°) Cylind. 1	K_S (°) Cylind. 2	K_S (°) Cylind. 3	K_S (°) Cylind. 4
1000	27.0	1000	3.19	400	7.9	0.0	0.0	0.0	0.0
1250	27.0	1100	8.75	410	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0
1500	28.0	1150	14.79	410	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0
1750	28.0	1220	22.31	420	10.2	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	29.0	1300	35.96	430	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2250	29.0	1490	46.82	440	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0
2500	30.0	1610	57.81	450	12.1	0.0	0.0	0.0	0.0
2750	31.0	1820	73.91	460	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3000	31.0	2010	94.72	470	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3250	31.0	2150	110.42	480	13.1	0.0	0.0	0.0	0.0
3500	32.0	2260	121.91	500	13.7	0.0	0.0	0.0	0.0
3750	33.0	2300	132.46	520	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0
4000	34.0	2330	142.89	540	15.2	0.0	0.0	0.0	0.0
4250	34.0	2330	153.67	560	15.2	0.0	0.0	0.0	0.0
4500	35.0	2330	164.31	580	15.8	0.0	0.0	0.0	0.0
4750	35.0	2300	172.28	600	16.8	0.0	0.0	0.0	0.0
5000	36.0	2240	177.50	620	17.5	0.0	0.0	0.0	0.0
5250	37.0	2160	181.56	640	18.1	0.0	0.0	0.0	0.0
5500	38.0	2070	183.73	660	19.2	0.0	0.0	0.0	0.0
5750	38.0	1940	185.45	680	20.7	0.0	0.0	0.0	0.0
6000	38.0	1870	187.10	700	21.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6250	39.0	1830	188.19	710	21.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6500	39.0	1800	188.98	720	21.8	0.0	0.0	0.0	0.0
6750	40.0	1780	189.08	730	22.5	0.0	0.0	0.0	0.0
7000	40.0	1760	189.85	740	22.5	0.0	0.0	0.0	0.0

Παρατηρούμε, ότι το setup με τον στροβιλο-υπερπληρωτή KKK K04-023 έχει πολύ καλές μετρήσεις, χωρίς καθόλου "πειράκια" και "retards". Αποδίδει 221.2HP στις 5361rpm και μέγιστη ροπή στροφάλου 33.8kg·m στις 4020rpm.

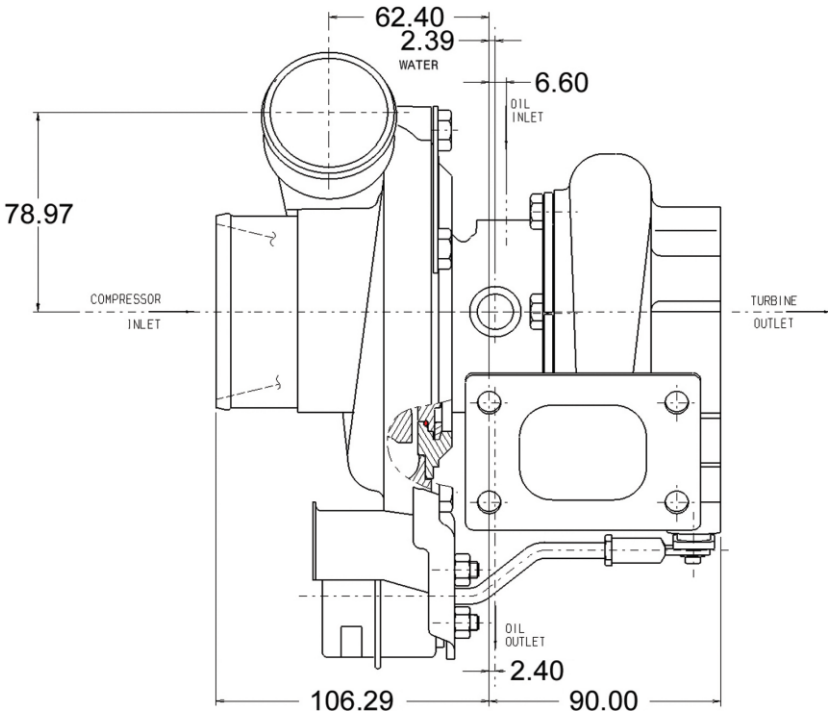
10.5 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ BIG TURBO SETUP GARRETT GT2871R

Το δεύτερο matching στροβιλο-υπερπληρωτή που κάναμε στον 1.8 20vt κινητήρα μας, ήταν χρησιμοποιώντας το turbo της Garrett GT2871R [21]. Το συγκεκριμένο ταίριασμα, αποτελεί μια big turbo εφαρμογή, καθώς από 1800cc θα έχουμε στο στρόφαλο περίπου 360HP, όπως θα δούμε παρακάτω, χρησιμοποιώντας πάντα τα ανάλογα περιφερειακά.

Σχήμα 10.11 2ο matching, χρησιμοποιώντας το turbo Garrett GT2871R.

Ο συγκεκριμένος στροβιλο-υπερπληρωτής (Garrett GT2871R), είναι κατά πολύ μεγαλύτερος του εργοστασιακού (K03-029), καθώς και του K04-023 (πρώτο matching) και έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

- **Compressor Specs**
  Wheel Size: 49/71mm
  Trim: 48
  A/R: 0.60
- **Turbine Specs**
  Wheel Size: 47/54mm
  Trim: 76
  A/R: 0.64



Σχήμα 10.12 Διαστάσεις της Garrett GT2871R.

Σχήμα 10.13 Σύγκριση μεγέθους Garrett GT2871R με KKK K04-023.

Η Garrett GT2871R, θα μας αποδώσει περίπου 45kg·m ροπή στο στρόφαλο. Εδώ αντιμετωπίζουμε ένα πρόβλημα, καθώς οι εργοστασιακοί διωστήρες αντέχουν μέχρι 39kg·m. Για τον λόγο αυτό, ο κινητήρας λύθηκε και έγινε αντικατάσταση των διωστήρων με σφυρήλατους της Integrated Engineering, χρησιμοποιώντας 20mm πείρο εμβόλου.

Σχήμα 10.14 Διωστήρες της Integrated Engineering.

Σχήμα 10.15 Η κυλινδροκεφαλή του κινητήρα μας, κατόπιν ρεκτιφιέ.

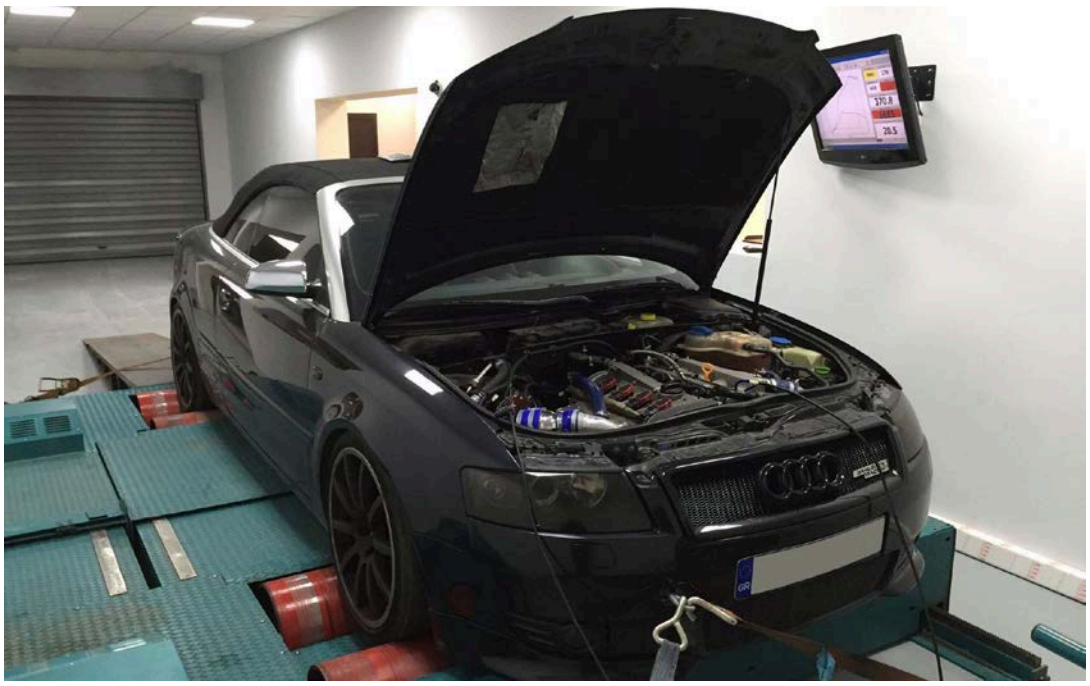
Τα έμβολα παρέμειναν τα εργοστασιακά, λόγω του ότι αντέχουν μέχρι τα συγκεκριμένα επίπεδα φορτίων. Στην κυλινδροκεφαλή, πραγματοποιήθηκε ένα απλό ρεκτιφιέ και χρησιμοποιήθηκε καινούργια εργοστασιακή φλάντζα κεφαλής, διατηρώντας τον λόγο συμπίεσης του κινητήρα στο 9,5. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν κουζινέτα διωστήρων και στροφάλου τριμεταλλικά της ACL και βίδες κυλινδροκεφαλής και διωστήρων της ARP. Με αυτές τις αλλαγές στον κινητήρα μας, είμαστε βέβαιοι ότι θα "αντέξει" στα φορτία και δεν θα υπάρξει πρόβλημα αξιοπιστίας του.

Για να εφαρμόσει στον κινητήρα μας η Garrett GT2871R, αλλάχτηκε η πολλαπλή εξαγωγής με άλλη της ATP και χρησιμοποιήθηκαν οι κατάλληλες σωληνώσεις νερού – λαδιού για την ψύξη – λίπανση του turbo. Τοποθετήθηκε εξάτμιση εσωτερικής διαμέτρου 76mm από την έξοδο του turbo μέχρι και το τελικό σιλανσιέ, χρησιμοποιώντας αγωνιστικό καταλύτη της HJS 100cpsi.

Επίσης, αντικαταστάθηκαν οι σωλήνες εισόδου και εξόδου αέρα του συμπιεστή του turbo με άλλες (της εταιρίας Hercules parts). Το σύστημα εισαγωγής αέρα, ο MAF, η σχάστρα και το intercooler, παρέμειναν ως έχει (από το τελευταίο setup K04-023).

Για μπέκ ψεκασμού βενζίνης επιλέξαμε της RC, παροχής 550cc/min και τοποθετήθηκε αντλία βενζίνης από Audi TTRS, για να καλύψει τις απαιτήσεις παροχής καυσίμου. Τα μπουζί αλλάχτηκαν με πιο "ψυχρά" της Bosch (F5DPOR). Τέλος, τοποθετήθηκαν πολλαπλασιαστές από Audi R8 (κόκκινοι ενισχυμένοι).

Ακολούθησε ο επαναπρογραμματισμός του ηλεκτρονικού εγκεφάλου, για να ρυθμιστεί το νέο big turbo setup.



Σχήμα 10.16 Το όχημά μας πάνω στο δυναμόμετρο της Dimsport.

Η δυναμομέτρηση που ακολουθεί, πραγματοποιήθηκε με εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος 18,2°C.

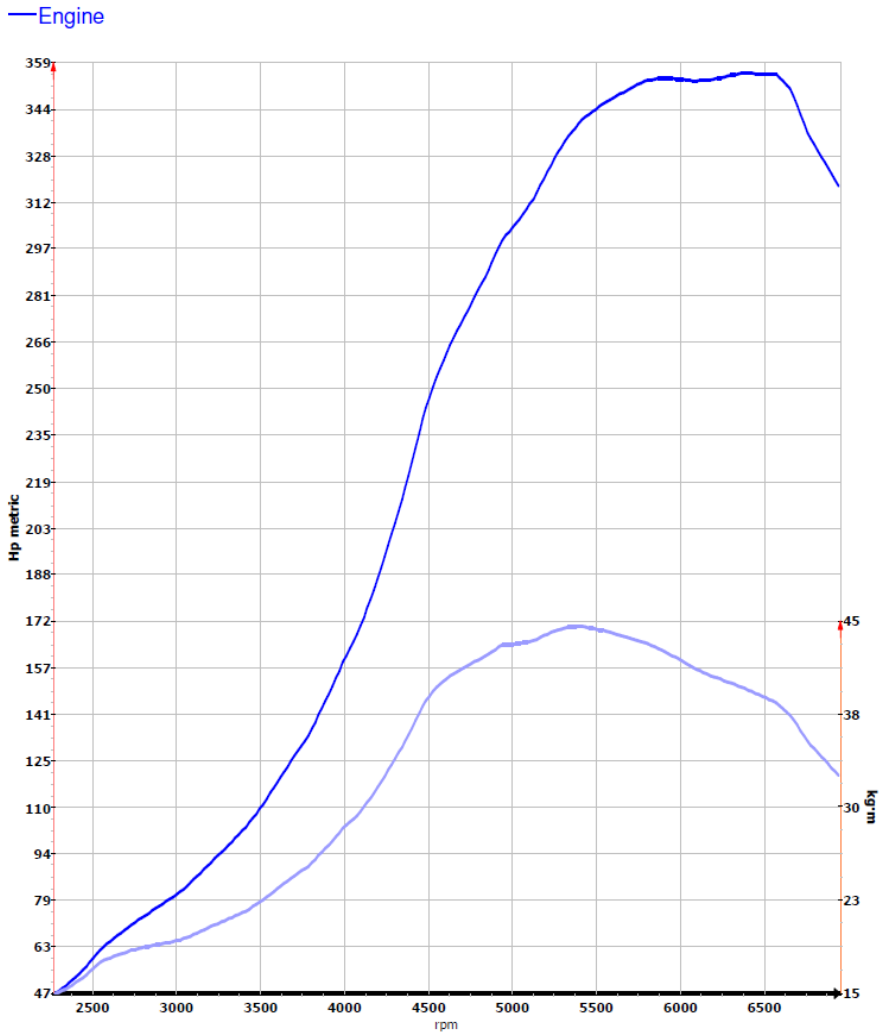
Workshop/tuner:Microchips Tuning
Address: Dimitsanas 6 Internet: www.microchips-tuning.com
Phone: 210 4838357 Fax: E-mail: info@microchips-tuning.com

Client name:
Model: A4

Vehicle plate:
Type: 1.8L TURBO

Manufacturer: AUDI

Big Turbo
Engine Power: 355.7Hp metric@6384rpm
Engine Torque: 44.7kg·m@5414rpm



<u>Διάγραμμα 10.3</u> Καμπύλες ισχύος ($P_{κιν.}$) και ροπής ($M_{κιν.}$) κινητήρα για το big turbo setup Garrett GT2871R, συναρτήσει των στροφών λειτουργίας του (n).

Παρατηρούμε, ότι με τον στροβιλο-υπερπληρωτή της Garrett GT2871R, ο κινητήρας αποδίδει πάνω από 38kg·m ροπή από τις 4500rpm μέχρι τις 6500rpm. Στις χαμηλές στροφές λειτουργίας, παρουσιάζει σαφώς μειωμένη ροπή σε σχέση με τις υψηλές. Επίσης, βλέπουμε ότι η μέγιστη ισχύς του κινητήρα, παρατηρείται στο φάσμα 5700 με 6600rpm.

Στον πίνακα της επόμενης σελίδας, παρουσιάζονται και οι υπόλοιπες μετρήσεις που λάβαμε, όπως είδαμε και στα δύο προηγούμενα setup.

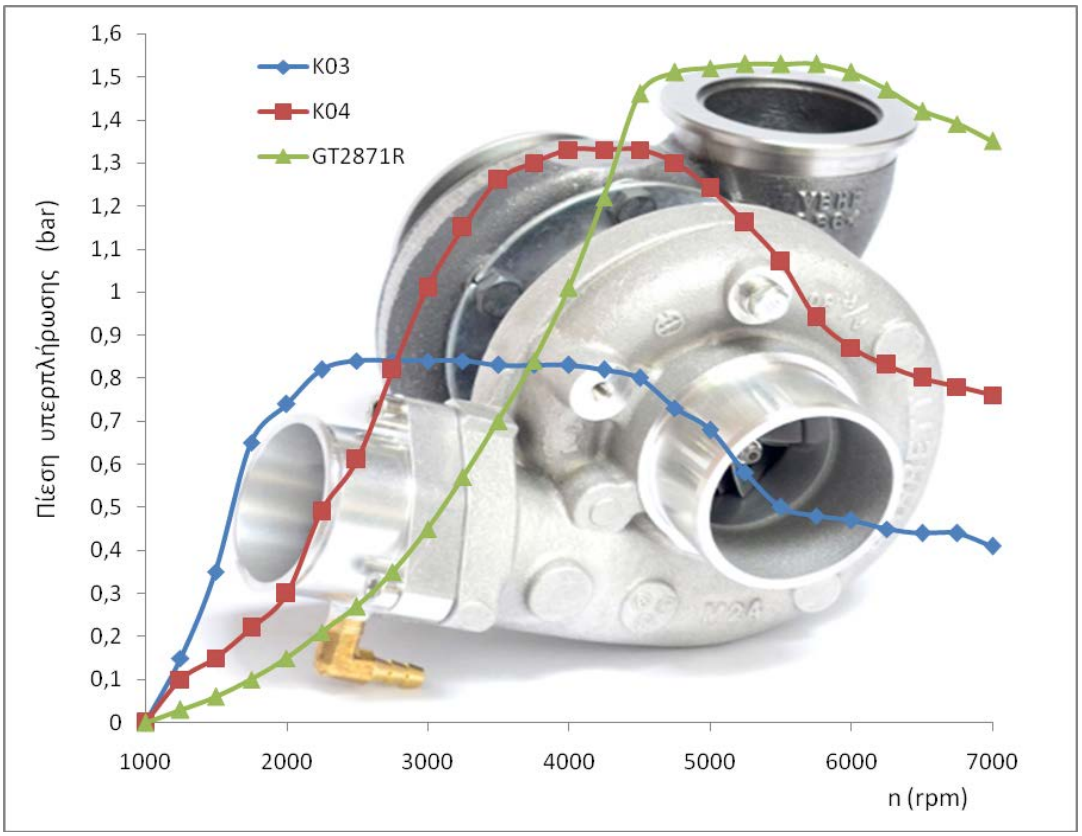
n (rpm)	$T_{εισ.}$ (°C)	P_{turbo} (mbar)	MAF (g/sec)	$T_{καυσ.}$ (°C)	I_{BTDC} (°)	K_S (°) Cylind. 1	K_S (°) Cylind. 2	K_S (°) Cylind. 3	K_S (°) Cylind. 4
1000	34.0	1000	3.17	450	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0
1250	34.0	1030	7.29	450	8.9	0.0	0.0	0.0	0.0
1500	35.0	1060	12.42	460	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0
1750	36.0	1100	18.86	470	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	36.0	1150	25.11	480	10.8	0.0	0.0	0.0	0.0
2250	36.0	1210	33.90	490	11.4	0.0	0.0	0.0	0.0
2500	37.0	1270	43.23	510	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2750	38.0	1350	54.54	540	12.7	0.0	0.0	0.0	0.0
3000	38.0	1450	67.89	570	13.2	0.0	0.0	0.0	0.0
3250	39.0	1570	79.24	590	13.8	0.0	0.0	0.0	0.0
3500	40.0	1700	95.33	620	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3750	42.0	1840	110.91	640	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0
4000	43.0	2010	133.80	660	14.9	0.0	0.0	0.0	0.0
4250	45.0	2220	169.12	680	15.3	0.0	0.0	0.0	0.0
4500	46.0	2460	201.68	700	15.8	0.9	1.2	1.1	0.0
4750	48.0	2510	231.81	720	16.5	2.0	3.1	2.8	1.2
5000	49.0	2520	250.42	730	17.1	2.2	3.4	2.9	1.5
5250	50.0	2530	275.97	740	17.6	2.4	3.9	3.2	1.7
5500	51.0	2530	282.19	760	18.2	3.0	4.3	3.5	2.4
5750	53.0	2530	287.52	770	18.5	3.2	4.4	3.7	2.9
6000	54.0	2510	291.10	780	18.7	3.6	4.7	4.1	3.3
6250	54.0	2470	293.25	790	19.0	4.2	5.2	4.5	3.9
6500	56.0	2420	294.07	800	19.4	4.7	5.7	5.1	4.2
6750	57.0	2390	295.56	810	20.1	4.9	5.9	5.8	4.7
7000	58.0	2350	296.18	820	20.8	5.5	6.1	6.0	5.1

Παρατηρούμε, ότι το setup με τον στροβιλο-υπερπληρωτή Garrett GT2871R, παρουσιάζει αρκετά πειράκια και "retards" στις μεσαίες και κυρίως στις υψηλές στροφές λειτουργίας, ενώ στο ίδιο φάσμα στροφών έχει υψηλή θερμοκρασία αέρα εισαγωγής και καυσαερίων. Αποδίδει 355.7HP στις 6384rpm και μέγιστη ροπή στροφάλου 44.7kg·m στις 5414rpm.

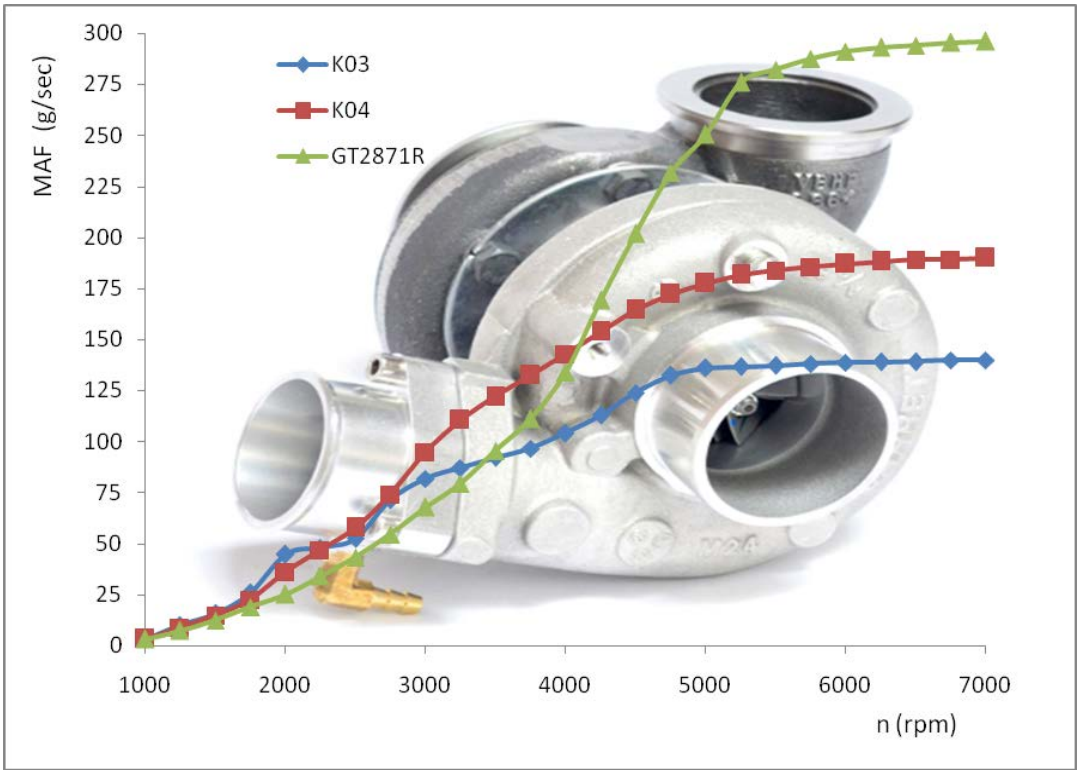
10.6 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων				
Setup Turbo	$P_{κιν.max}$ **(HP)**	**n (rpm)**	$M_{κιν.max}$ **(kg·m)**	**n (rpm)**
Εργοστασιακό KKK K03-029	154.8	6022	22.7	4277
KKK K04-023	221.2	5361	33.8	4020
Garrett GT2871R	355.7	6384	44.7	5414

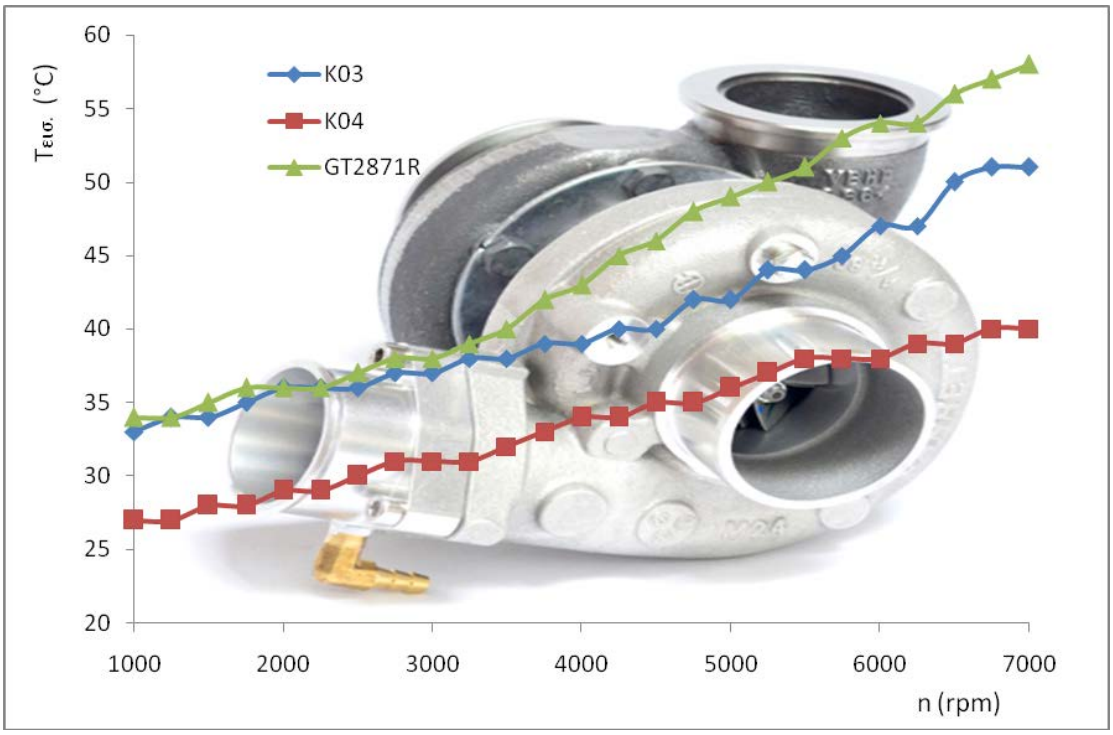
Ακολουθούν έξι συγκριτικά διαγράμματα [9] βάση των μετρήσεών μας, για τα τρία setup turbo.



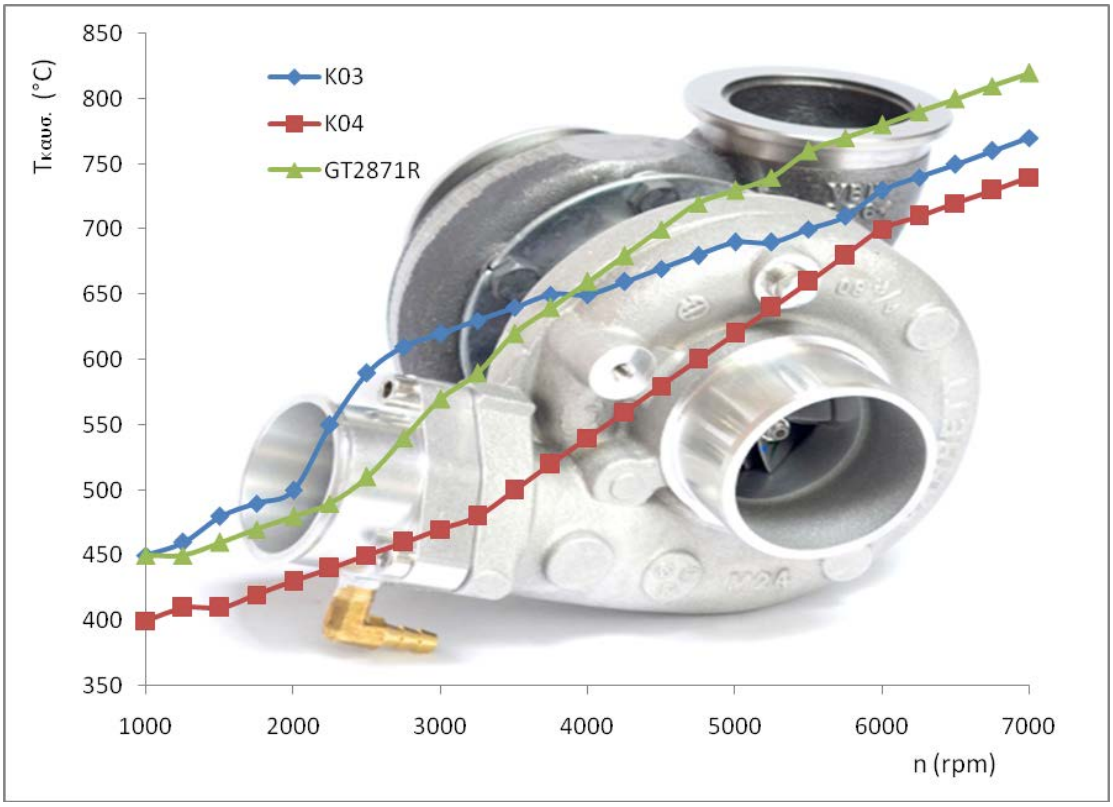
<u>Διάγραμμα 10.4</u> Σύγκριση της πίεσης υπερπλήρωσης των τριών setup turbo, συναρτήσει των στροφών λειτουργίας του κινητήρα.



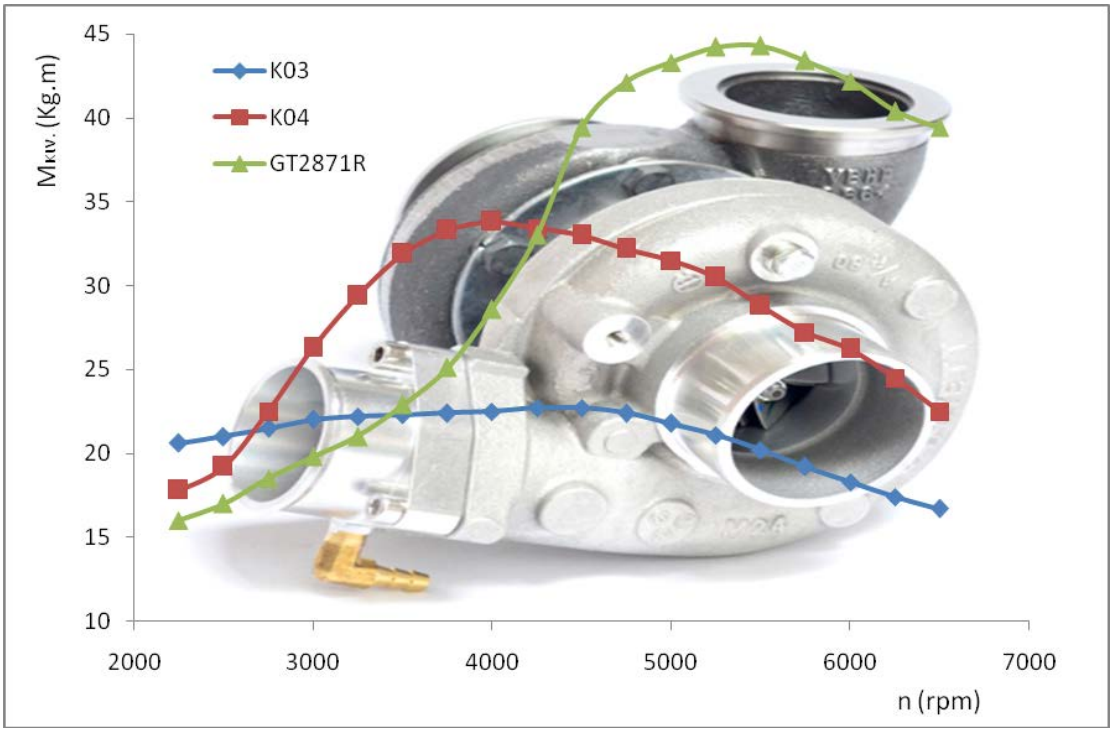
<u>Διάγραμμα 10.5</u> Σύγκριση της παροχής μάζας του εισερχόμενου αέρα των τριών setup turbo, συναρτήσει των στροφών λειτουργίας του κινητήρα.



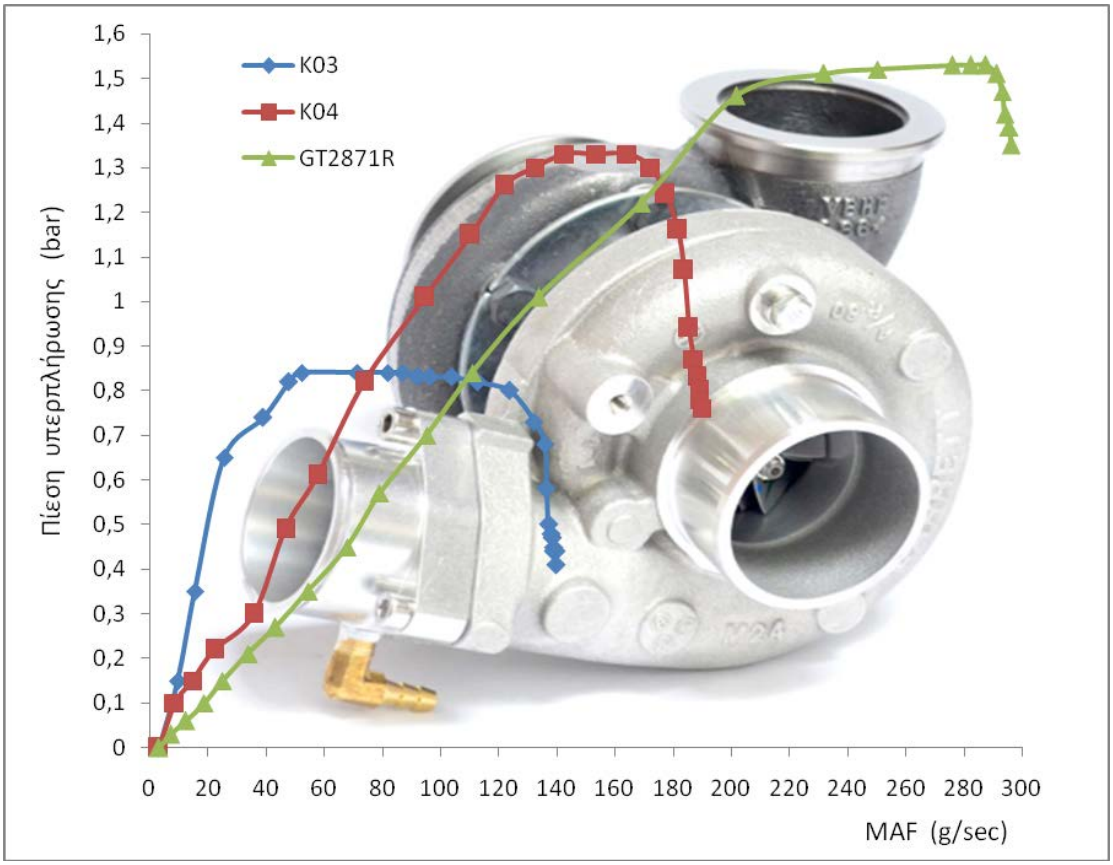
<u>Διάγραμμα 10.6</u> Σύγκριση της θερμοκρασίας του αέρα εισαγωγής των τριών setup turbo, συναρτήσει των στροφών λειτουργίας του κινητήρα.



<u>Διάγραμμα 10.7</u> Σύγκριση της θερμοκρασίας καυσαερίων των τριών setup turbo, συναρτήσει των στροφών λειτουργίας του κινητήρα.



<u>Διάγραμμα 10.8</u> Σύγκριση της ροπής κινητήρα (στροφάλου) των τριών setup turbo, συναρτήσει των στροφών λειτουργίας του κινητήρα.



<u>Διάγραμμα 10.9</u> Σύγκριση της πίεσης υπερπλήρωσης των τριών setup turbo, συναρτήσει της παροχής μάζας του εισερχόμενου αέρα του κινητήρα.

Η παροχή μάζας του εισερχόμενου αέρα (MAF), είναι ανάλογη της ισχύος στροφάλου του κινητήρα ($P_{κιν.}$). Επαληθεύεται ένας προσεγγιστικός υπολογισμός [15] της ισχύος στροφάλου, που λέει ότι ισούται με τη μέτρηση του MAF δια 0,82. Δηλαδή: HP=MAF(g/sec)/0,82.

Το εργοστασιακό setup (KKK K03-029), παρουσιάζει υψηλή θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής (51°C στις υψηλές στροφές λειτουργίας), για την πίεση υπερπλήρωσης που λειτουργεί το turbo. Αυτό οφείλεται, στην μη σωστή ψύξη του πεπιεσμένου ζεστού εισερχόμενου αέρα, λόγω της τοποθέτησης του intercooler από τον κατασκευαστή σε λάθος θέση (μπροστά από το θόλο του δεξιού τροχού), με αποτέλεσμα να μην έχει άμεση επαφή με τον εξωτερικό αέρα. Για τον λόγο αυτό, στις υψηλές στροφές λειτουργίας έχουμε "retards", λόγω της ύπαρξης κρουστικής καύσης.

Στο 1ο matching στροβιλο-υπερπληρωτή που κάναμε (setup KKK K04-023), λόγω της σωστής επιλογής περιφερειακών, η θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής παραμένει σε πολύ καλά επίπεδα σε όλο το φάσμα στροφών (max 40°C). Για τον λόγο αυτό, η θερμοκρασία των καυσαερίων διατηρείται και αυτή σε σωστά επίπεδα και δεν έχουμε καθόλου πειράκια και "retards".

Στο 2ο matching (setup Garrett GT2871R), παρατηρούνται οι υψηλότερες θερμοκρασίες αέρα εισαγωγής (max 58°C) και καυσαερίων (max 820°C). Με βάση το advance που έχει δοθεί και λόγω της υψηλής πίεσης υπερπλήρωσης, από τη στιγμή που το turbo "σηκώσει" maximum πίεση και μέχρι τον κόφτη, παρουσιάζονται πειράκια και "retards" σε όλους τους κυλίνδρους. Αυτό το φαινόμενο στο big turbo setup, θα μπορούσε να μειωθεί χρησιμοποιώντας σύστημα "water injection" (ψεκασμός νερού στην εισαγωγή του κινητήρα), για να μειώσουμε την θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα και να εξαλείψουμε την καταστροφική προανάφλεξη. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται συχνά σε big turbo setup, καθώς αυτά "πάσχουν" από τις υψηλές θερμοκρασίες. Το πλεονέκτημα που υπάρχει με τον ψεκασμό νερού, είναι το μεγάλο ποσό θερμικής ενέργειας, το οποίο δεσμεύει το νερό όταν περνάει από την μία κατάσταση (υγρό) στην άλλη (αέριο) [1]. Κατά την εξαέρωση λοιπόν, το νερό δεσμεύει 2256Kjoule θερμικής ενέργειας ανά κιλό νερού που εξαερώνεται. Επομένως, με αυτό το σύστημα, θα μειωθούν οι θερμοκρασίες του αέρα εισαγωγής και κατ' επέκταση των καυσαερίων, ενώ θα εξαλειφθούν τα πειράκια και τα "retards".

Τελειώνοντας και συγκρίνοντας τα δύο matching, θεωρούμε πιο λειτουργικό και αποδοτικό το setup KKK K04-023, διότι είναι πιο γραμμικό σε λειτουργία σε όλο το φάσμα στροφών (1000-7000rpm) και όλα τα αποτελέσματα μετρήσεών του είναι ιδανικά, χωρίς το παραμικρό πρόβλημα.

ΓΛΩΣΣΑΡΙ

Μηχανικός υπερπληρωτής: Ο συμπιεστής υπερπληρώσεως, παίρνει κίνηση από τον στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα (απορροφώντας πολύτιμο μηχανικό έργο). Έτσι έχουμε την μηχανική υπερπλήρωση.

Στροβιλο-υπερπληρωτής: Σύστημα με υπερπλήρωση δια του καυσαερίου, χρησιμοποιώντας ζεύγος στροβίλου-συμπιεστή. Ο συμπιεστής κινείται από ένα στρόβιλο, ο οποίος παράγει ισχύ εκμεταλλευόμενος τα υψηλά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των καυσαερίων στην έξοδο από τους κυλίνδρους του κινητήρα. Δεν υπάρχει καμμία μηχανική σύνδεση με τον κινητήρα.

Μονοβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση: Σύστημα με υπερπλήρωση, χρησιμοποιώντας έναν στροβιλο-υπερπληρωτή.

Διβάθμια στροβιλο-υπερπλήρωση: Σύστημα με υπερπλήρωση, χρησιμοποιώντας δύο στροβιλο-υπερπληρωτές διαφορετικών μεγεθών σε σειρά, λόγω της διαφοράς των επιπέδων πίεσης και των ρυθμών της ογκομετρικής ροής που λειτουργούν.

Άξονας στροβιλο-υπερπληρωτή: Φέρει τις πτερωτές του στροβίλου και του συμπιεστή, αποτελώντας την “καρδιά” του στροβιλο-υπερπληρωτή.

Κουζινέτα ή bearings: Εδράζουν τον άξονα, του επιτρέπουν να περιστρέφεται σε πολύ υψηλές ταχύτητες και αποτρέπουν τις εγκάρσιες μετακινήσεις του.

Πτερωτή στροβίλου: Βρίσκεται μέσα στο κέλυφος του στροβίλου και μετατρέπει την ενέργεια των καυσαερίων σε περιστροφή του άξονα.

Πτερωτή συμπιεστή: Βρίσκεται μέσα στο κέλυφος του συμπιεστή και στηρίζεται στην άλλη μεριά του άξονα του στροβιλο-υπερπληρωτή. Δουλειά της είναι να συμπιέζει τον αέρα προς την εισαγωγή του κινητήρα.

Κέλυφος στροβίλου: Επιταχύνει τη ροή των καυσαερίων, τα οποία προσκρούουν στη πτερωτή του στροβίλου για να κινήσουν τον άξονα.

Κέλυφος συμπιεστή: Οδηγεί τον αέρα εισαγωγής στην πτερωτή του συμπιεστή, ο οποίος κατά την περιστροφή του επιταχύνει τον αέρα και τον συμπιέζει.

Σώμα ή cartridge: Περιέχει τα κουζινέτα του άξονα, που τον στηρίζουν κατά την περιστροφή του. Επίσης, περιλαμβάνει τους αγωγούς και τις κοιλότητες λίπανσης και ψύξης του στροβιλο-υπερπληρωτή, και στηρίζει τα κελύφη εισαγωγής και εξαγωγής.

Trim: Παράγοντας ο οποίος έχει να κάνει με τη γεωμετρία της πτερωτής εισαγωγής. Είναι ένας αριθμός, ο οποίος προκύπτει από την ύψωση στο τετράγωνο του πηλίκου της μικρής διαμέτρου της πτερωτής προς τη μεγάλη, και τον πολ-λαπλασιασμό του πηλίκου αυτού επί 100.

Διασπορέας ή diffuser: Εξάρτημα ενσωματωμένο στο κέλυφος του συμπιεστή, το οποίο μετατρέπει την αυξημένη κινητική ενέργεια του αέρα σε ωφέλιμη άνοδο της πίεσής του, προτού αυτός διοχετευτεί στον κινητήρα.

Λόγος A/R: Παράγοντας, ο οποίος έχει να κάνει με το μέγεθος του στροβιλο-υπερπληρωτή. Είναι ένας αριθμός, ο οποίος μας δείχνει τη χρήση για την οποία είναι πιο κατάλληλος ο στροβιλο-υπερπληρωτής. Όταν ο λόγος A/R είναι μικρός π.χ. μικρότερος του 0,5 έχουμε υψηλές στροφές λειτουργίας του στροβιλο-υπερπληρωτή, ενώ όταν ο λόγος μεγαλώνει και πλησιάζει το 1 ο στροβιλο-υπερπληρωτής γυρίζει πιο αργά επιτρέποντας τη χρήση μεγάλων ανάλογα στροφών στον κινητήρα.

Θρος ή thrust bearing: Πρόκειται για ένα έδρανο - τριβέα (κουζινέτο) που σταθεροποιεί αξονικά το ρότορα, έτσι ώστε να μην κινδυνεύουν οι πτερωτές να έρθουν σε επαφή με τα κελύφη τους.

Φλίνγκερ ή f1inger: Πρόκειται για έναν ειδικά διαμορ-φωμένο δακτύλιο που τοποθετείται στον άξονα. Περικλείει τις παράλληλες επιφάνειες τριβής του θρος και κοντράρει πάνω τους, ώστε να μη μετακινείται αξονικά ο ρότορας υπό την πίεση των καυσαερίων και του συμπιεσμένου αέρα. Επίσης, το φλίνγκερ είναι το εξάρτημα που είναι αρμόδιο για τη δυναμική στεγανοποίηση του λαδιού του στροβιλο-υπερπληρωτή.

Backpressure: Λέγοντας backpressure, εννοούμε την πίεση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του σωλήνα της εξαγωγής (εξάτμισης), πριν και μετά από τον στρόβιλο. Μια μικρή διατομή της εξάτμισης δημιουργεί περιττό backpressure στην εξαγωγή, καταπονώντας το θρος και "φρενάροντας" τη πτερωτή του στροβίλου. Επίσης, συντελεί στην άνοδο της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Απεναντίας, η πολύ μεγάλη εξάτμιση εξαλείφει το backpressure, το οποίο σε λογικές

τιμές είναι απαραίτητο για την στεγανοποίηση του στροβιλο-υπερπληρωτή.

Compressor map: Χάρτης που δείχνει την απόδοση του στροβιλο-υπερπληρωτή σε συνάρτηση με την πίεση (pressure ratio) και την ροή του αέρα (flow rate).

Γραμμή πάλμωσης ή surge limit: Καμπύλη του compressor map, αριστερά της οποίας χαρακτηρίζεται η περιοχή από ασταθή λειτουργία του συμπιεστή. Ποτέ μην διαλέξετε στροβιλο-υπερπληρωτή, του οποίου ο compressor map και οι συνθήκες λειτουργίας του, δείχνουν ότι θα δουλεύει σε αυτή την περιοχή.

VSR ή Vibration Sorting: Πρόκειται για ένα μηχάνημα δυναμικής ζυγοστάθμισης του cartridge. Προσφέρει ζυγοστάθμιση μεγάλης ακρίβειας, περιστρέφοντας τον στροβιλο-υπερπληρωτή σε ταχύτητες από 100000-200000 rpm, ανάλογα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

Intercooler: Είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας (ειδικό ψυγείο), ο οποίος ψύχει τον πεπιεσμένο εισερχόμενο αέρα σε κάποιο στροβιλο-υπερπληρούμενο κινητήρα, με την χρήση ως ψυκτικού μέσου του εξωτερικού αέρα (intercooler αέρος - αέρος) ή νερού (intercooler αέρος - νερού). Τοποθετείται μετά τον συμπιεστή και πριν την πολλαπλή εισαγωγής του κινητήρα.

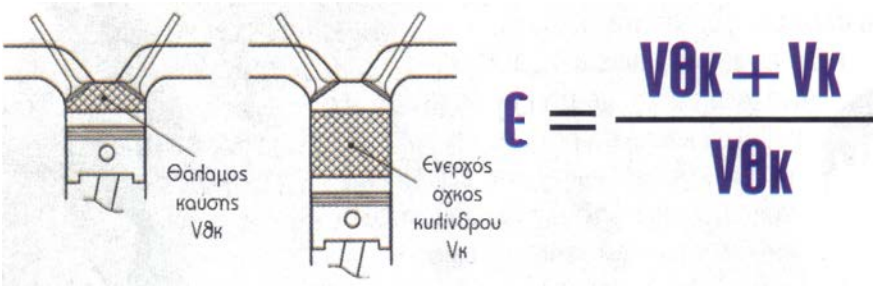
Turbo lag: Το turbo lag ή αλλιώς καθυστέρηση απόκρισης του στροβιλο-υπερπληρωτή, είναι ο χρόνος που χρειάζεται κάποιος στροβιλο-υπερπληρωτής για να "πληρώσει" με αέρα τον κινητήρα στον οποίο δουλεύει, και αυτός να φτάσει στο επίπεδο πίεσης που έχει προρυθμιστεί (με ανοιχτή πεταλούδα γκαζιού) στις συγκεκριμένες στροφές λειτουργίας.

Βαλβίδα ανακούφισης συμπιεστή ή σχάστρα: Πρόκειται για ένα εξάρτημα, που χρησιμοποιείται σαν δικλίδα ασφαλείας σε στροβιλο-υπερπληρούμενους κινητήρες, οι οποίοι δουλεύουν με πίεση υπερπλήρωσης από 0,3 bar και πάνω. Εκτονώνει την πίεση που αναπτύσσεται στιγμιαία στους σωλήνες και το intercooler πριν από την "πεταλούδα" της εισαγωγής, όταν αυτή είναι κλειστή και ο στροβιλο-υπερπληρωτής λόγω αδράνειας, εξακολουθεί να περιστρέφεται με υψηλούς ρυθμούς περιστροφής.

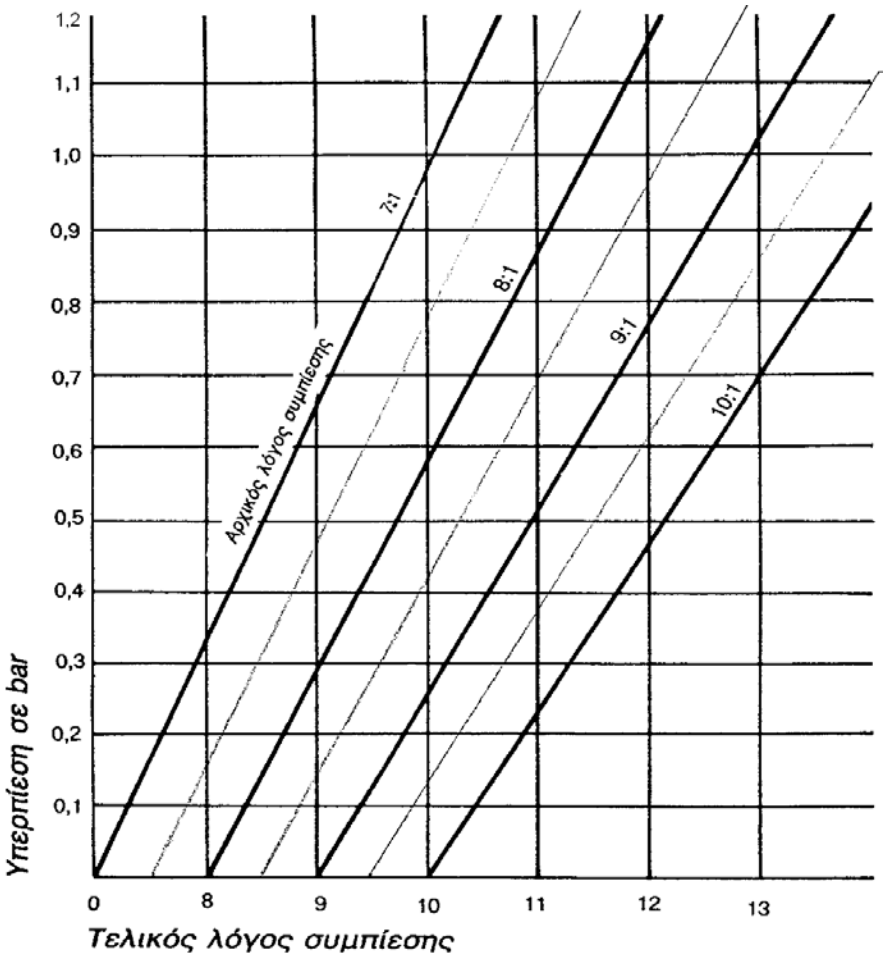
Βαλβίδα ανακούφισης στροβίλου ή wastegate: Πρόκειται για ένα εξάρτημα, που αποτελεί την δικλίδα ασφαλείας του στροβιλο-υπερπληρωτή, προστατεύοντας τον κινητήρα από

την αυτοκαταστροφή. Τοποθετείται πριν από το στρόβιλο, και βάσει της πίεσης που αναπτύσσεται στην εισαγωγή, επιτρέπει τη διαφυγή (προς την εξάτμιση) μέρους των καυσαερίων, που θα ανέβαζαν αλλιώς σε καταστροφικά επίπεδα τις στροφές του στροβιλο-υπερπληρωτή και την ακόλουθη υπερπίεση.

Λόγος συμπίεσης (ε): Είναι ένα καθαρά γεωμετρικό μέγεθος και ορίζεται ως το άθροισμα των όγκων του θαλάμου καύσης συν τον κυβισμό του κυλίνδρου, προς τον όγκο του θαλάμου καύσης. Αυτό ισχύει για τους ατμοσφαιρικούς κινητήρες.



Στους υπερτροφοδοτούμενους κινητήρες όμως, ο τελικός λόγος συμπίεσης [8] προκύπτει, βάσει της πίεσης υπερπλήρωσης που λειτουργεί ο στροβιλο-υπερπληρωτής και του αρχικού λόγου συμπίεσης του κινητήρα.



Λόγος πίεσης στροβιλο-υπερπληρωτή: Είναι η συνολική απόλυτη πίεση που παράγεται από τον στροβιλο-υπερπληρωτή, διαιρούμενη με την ατμοσφαιρική πίεση στη συγκεκριμένη γεωγραφική θέση.

Βαλβίδα N75: Μαγνητική βαλβίδα, μέσω της οποίας ελέγχεται ηλεκτρονικά η λειτουργία της wastegate και ρυθμίζεται η πίεση υπερπλήρωσης στα επιθυμητά επίπεδα, μέσω του management του εγκεφάλου κινητήρα (ECU).

Αισθητήρας "λάμδα": Ο αισθητήρας "λάμδα" [7] βρίσκεται τοποθετημένος στην εξάτμιση του κινητήρα σε σημείο τέτοιο, ώστε να υπάρχει η απαραίτητη θερμοκρασία για τη λειτουργία του, σε όλο το φάσμα λειτουργίας του κινητήρα. Σκοπός του είναι να μεταφέρει στην ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου ένα ηλεκτρικό σήμα για τη σύνθεση του μείγματος, ανά πάσα στιγμή. Έτσι είναι δυνατή η ρύθμιση του μείγματος σε λ=1. Η αρχή ρύθμισης, στηρίζεται στη μέτρηση του υπολοίπου οξυγόνου στα καυσαέρια. Ο αισθητήρας "λάμδα" δίνει πληροφορίες αν το μείγμα είναι φτωχό ή πλούσιο. Σε περίπτωση απόκλισης από αυτή την τιμή, δημιουργείται στο σώμα εξόδου του αισθητήρα μια τάση την οποία αξιολογεί το κύκλωμα ρύθμισης. Έτσι, υψηλή τάση αισθητήρα σημαίνει πλούσιο μείγμα (περίπου 800mV), ενώ χαμηλή τάση αισθητήρα σημαίνει φτωχό μείγμα (περίπου 200mV). Κάθε μεταβολή από πλούσιο σε φτωχό και αντίθετα, προκαλεί τη μεταβολή του σήματος του αισθητήρα "λάμδα".

Γωνία αβάνς ή προπορεία ανάφλεξης (advance): Είναι η γωνία που πρέπει να γυρίσει ο στροφαλοφόρος άξονας, από τη στιγμή που δίνει σπινθήρα το μπουζί έως ότου το έμβολο φτάσει στο Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ) [7]. Ο λόγος που ο σπινθήρας της ανάφλεξης δίνεται πριν το ΑΝΣ (προπορεία), είναι γιατί η καύση απαιτεί έναν ορισμένο χρόνο για να ολοκληρωθεί, έτσι ώστε η μέγιστη πίεση στο θάλαμο καύσης να αναπτυχθεί λίγο μετά το ΑΝΣ, οπότε έχουμε και τη μέγιστη απόδοση του κινητήρα. Για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, η γωνία αβάνς μεταβάλλεται συνεχώς, ανάλογα με τις στροφές του κινητήρα, το φορτίο του (άνοιγμα γκαζιού) και άλλες παραμέτρους.

"Προανάφλεξη - κρουστική καύση" ή "πειράκια": Η ακαριαία καύση εκρηκτικής μορφής (που συνοδεύεται από βίαια κρουστικά κύματα) τμήματος του καυσίμου, που κατά κανόνα βρίσκεται μακριά από το μπουζί, κατά την φάση της συμπίεσης και πριν δοθεί ο σπινθήρας ανάφλεξης [8]. Προέρχεται συνήθως από καύσιμο κακής ποιότητας, σε συνδυασμό με υψηλή συμπίεση ή κακό χρονισμό του

κινητήρα. Φαινόμενο επικίνδυνο, καθώς προκαλεί μεγάλη φθορά στον κινητήρα και ειδικά στα έμβολα. Υπάρχει μάλιστα περίπτωση, σε ακραίες συνθήκες, να οδηγήσει σε τρύπημα του εμβόλου.

Αισθητήρας κρουστικής καύσης: Ο αισθητήρας κρουστικής καύσης (knock sensor) [11], πληροφορεί τον εγκέφαλο του κινητήρα (ECU) για την ύπαρξη κρουστικής καύσης (πειράκια). Είναι στερεωμένος με κοχλία στο σώμα του κινητήρα, συμμετρικά, ανάμεσα στους κυλίνδρους. Στις τετρακύλινδρες μηχανές, συνήθως υπάρχει ένας αισθητήρας ανάμεσα στους κυλίνδρους 2 και 3. Περιέχει ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, το οποίο σε περίπτωση δόνησης παράγει ένα σήμα τάσης (παλμό). Το πλάτος του παλμού αυξάνεται με την ισχύ της δόνησης. Όταν υπάρχει κρουστική καύση, αυτή παράγει δονήσεις, οι οποίες μεταφέρονται μέσω του σώματος του κινητήρα στον αισθητήρα. Οι δονήσεις αυτές έχουν συχνότητα περίπου 7KHz. Όταν η ECU λαμβάνει σήμα 7KHz από τον αισθητήρα και το μέγεθος της τάσης του σήματος είναι πάνω από ένα όριο, τότε αναγνωρίζει κρουστική καύση. Στην περίπτωση αυτή, μειώνεται η γωνία αβάνς κατά ένα βήμα. Αν οι κτύποι συνεχιστούν, τότε η μείωση του αβάνς συνεχίζεται έως το σταμάτημα των κτύπων. Ταυτόχρονα με την μείωση του αβάνς, γίνεται και κάποιος εμπλουτισμός του μίγματος για να αποφευχθεί υπερθέρμανση των καυσαερίων, που θα μπορούσε να δημιουργήσει προβλήματα. Στην συνέχεια, το αβάνς αρχίζει να αυξάνεται, έτσι ώστε να λειτουργεί στο όριο κτυπήματος ο κινητήρας, για να αποκτήσει πάλι μέγιστη απόδοση.

"Retards": Είναι η μείωση της γωνίας αβάνς, λόγω του ότι ο knock sensor αντιλαμβάνεται την ύπαρξη κρουστικής καύσης. Η αργοπορεία αυτή στην ανάφλεξη που προκύπτει (δηλαδή ανάφλεξη πιο κοντά στο Άνω Νεκρό Σημείο), είναι τόση έτσι ώστε να σταματήσει να χτυπάει πειράκια ο κινητήρας. Εκφράζεται σε μοίρες στροφάλου. Το πόσο "retards" θα έχουμε (σε μοίρες), προκύπτει από την συνεργασία του knock sensor με τον εγκέφαλο του κινητήρα (ECU) [11].

Αισθητήρας μέτρησης μάζας αέρα (MAF): Ο αισθητήρας μάζας αέρα [13], πληροφορεί τον εγκέφαλο του κινητήρα (ECU), για την μάζα του εισερχόμενου αέρα. Ο αισθητήρας αυτός, μετατρέπει την μάζα του εισερχόμενου αέρα σε ένα σήμα τάσης. Το σήμα αυτό στους περισσότερους MAF είναι αναλογικό, αλλά υπάρχουν και κάποιες σχεδιάσεις που παράγουν ψηφιακό σήμα. Βρίσκεται στον αγωγό εισαγωγής αέρα, αμέσως μετά το φίλτρο αέρος. Βοηθάει συμπλη-

ρωματικά για την ρύθμιση του μείγματος, βάση της μέτρησης που μεταφέρει στην ECU. Μέσα στον αισθητήρα, είναι συνήθως ενσωματωμένος και ένας ξεχωριστός αισθητήρας θερμοκρασίας αέρα (θερμίστορ NTC), που πληροφορεί με ξεχωριστούς ακροδέκτες την ECU για την θερμοκρασία του αέρα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΑ

- [1] P.P. Walsh - P. Fletcher, (2004), *"Gas Turbine Performance"*, Second edition, Blackwell Science.
- [2] N. Watson - M.S. Janota, (1982), *"Turbocharging the Internal Combustion Engine"*, Macmillan Press.
- [3] Nicholas C. Baines, (2005), *"Fundamentals of Turbocharging"*, Concepts NREC.
- [4] Κ.Δ. Ρακόπουλος, (2000), *"Εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης ΙΙ. Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία"*, Εκδόσεις Γρηγ. Φούντας.
- [5] Κ.Δ. Ρακόπουλος - Ε.Γ. Γιακουμής, (2006), "*Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ"*, Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [6] Κ.Δ. Ρακόπουλος, (1988), *"Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή - Λειτουργία - Θερμοδυναμική"*, Εκδόσεις Γρηγ. Φούντας.
- [7] Κορρές - Κώστας Π. Καραπάνος - Χαράλαμπος Α., (1999), *"Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (Συστήματα ψεκασμού, Καταλυτική τεχνολογία, Αρχές παθητικής ασφάλειας αυτοκινήτων)"*, Εκδόσεις Ίων.
- [8] Δ. Καρταλαμάκης, (1961), *"Μετατροπές για επιδόσεις και οικονομία"*, Εκδόσεις Γαλαίος.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [9] Zhang Y.J. - Chen T. - Zhuge W.L., (2010), *"An integrated Turbocharger design approach to improve engine performance"*, Science China Technological Sciences.

ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

- [10] Power Techniques (Τεύχη:4, 5, 6, 20, 33, 34, 35, 70)
- [11] Power Bikes (Turbo Nitro Book)
- [12] Drive (Τεύχος 104)
- [13] Drive Faster (Τεύχος 5)

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- [14] www.turbohellas.gr
- [15] www.powermag.gr
- [16] www.gtc.gr
- [17] www.ross-tech.com
- [18] www.microchips-tuning.com
- [19] www.airpowersystems.com
- [20] www.turbos.borgwarner.com
- [21] www.turbobygarrett.com
- [22] www.aa1car.com