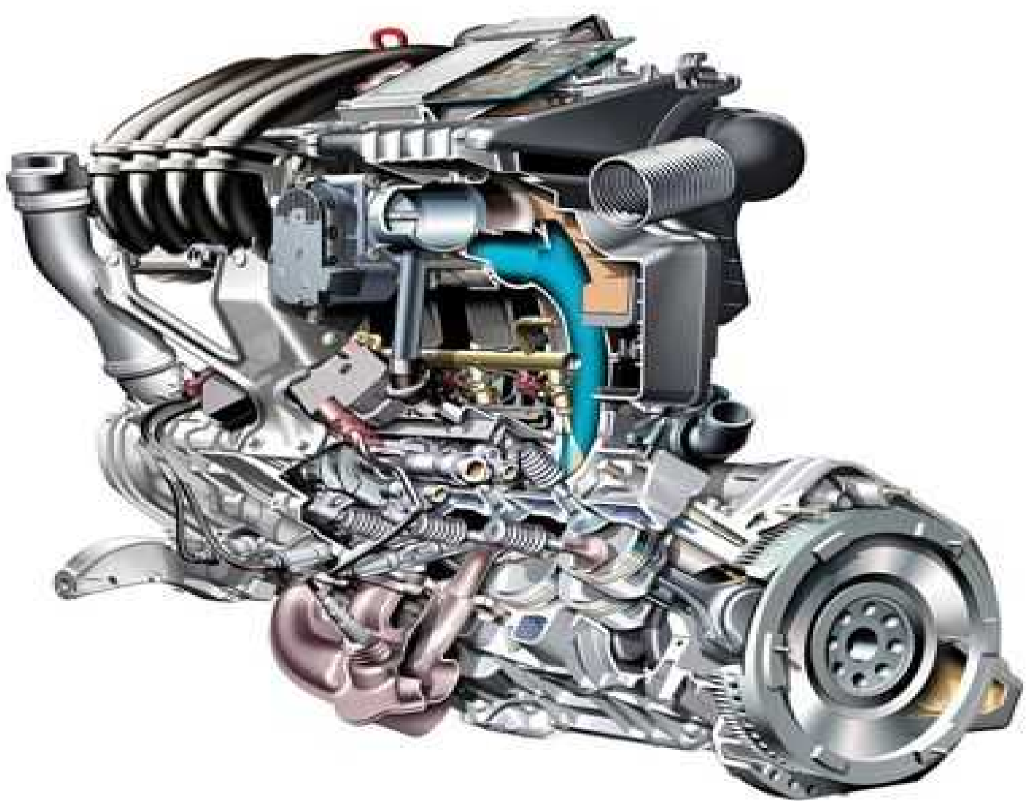
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΕΡΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ



ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΓΓΕΛΟΣ Α.Μ 5568
ΜΕΓΑΓΙΑΝΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ Α.Μ 5641

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΒΟΥΡΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ (Π.Υ)

ΙΟΥΛΙΟΣ
ΠΑΤΡΑ 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και πραγματοποιεί Μελέτη Συστήματος Υπερτροφοδότησης Κινητήρων Μηχανών Εσωτερικής Καύσης.

Αφορμή για την παρούσα πτυχιακή εργασία αποτέλεσε η πρόθεση μας να ασχοληθούμε με την αυτοκινητοβιομηχανία και συγκεκριμένα με την συντήρηση και την επισκευή μηχανών εσωτερικής καύσης με υπερτροφοδότηση του κινητήρα. Στο παρόν τεύχος θα περιγραφούν οι κινητήρες υπερτροφοδότησης (turbo) ενώ θα αναλυθούν και τρόποι μετατροπής ατμοσφαιρικών κινητήρων ώστε να βελτιωθεί η ωφέλιμη ισχύς τους. Παράλληλα θα αναφερθούν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών, καθώς και η μεθοδολογία για την προστασία και τη συντήρησή τους. Ελπίζουμε ότι στο μέλλον θα δοθεί η δυνατότητα πραγματοποίηση μετατροπής ατμοσφαιρικού κινητήρα σε κινητήρα με υπερτροφοδότητη στο χώρο του Τμήματος των Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας

Από τη θέση αυτή θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμότερες ευχαριστίες μας στον Επιβλέποντα Παν/κό Υπότροφο κ.Βούρο Α., υπεύθυνο καθηγητή μας, για τις πολύτιμες συμβουλές του και την αμέριστη συμπαράστασή του κατά την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την οικογένεια μας για την υπομονή και στήριξη που μας παρείχαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας αλλά και συνολικά κατά τη διάρκεια των σπουδών μας.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.
Οι σπουδαστές

(Ονοματεπώνυμο)	(Ονοματεπώνυμο)
……………………	……………………
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σκοπό την μελέτη και την θερμοδυναμική ανάλυση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης με στόχο την ανάδειξη του τρόπου βελτίωσης της ισχύς των κινητήρων.

Στο 1^{O} Κεφάλαιο πραγματοποιείται ανάλυση των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ). Αρχικά κατηγοριοποιούνται οι εμβολοφόροι κινητήρες και στην συνέχεια διαχωρίζονται σύμφωνα με τις εσωτερικές και εξωτερικές λειτουργιές σους. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στον τρόπο ρύθμισης της ισχύος και στην δομή και τα υλικά μέρη ενός κινητήρα.

Στο 2^{o} Κεφάλαιο πραγματοποιείται η θερμοδυναμική ανάλυση των κινητήρων. Αρχικά περιγράφονται οι συνθήκες λειτουργίας και ακολουθούν οι απαραίτητες μαθηματικές εξισώσεις που υπολογίζεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης, η ισχύς ο πραγματικός βαθμός απόδοσης καθώς και η απαραίτητη πίεση του εμβόλου.

Στο 3^{o} Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των υπερτροφοδοτόυμενων κινητήρων δίνοντας έμφαση στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προσφέρουν . Στην συνέχεια πραγματοποιείται μια σύντομη ιστορική αναδρομή των Turbo φθάνοντας στον σημερνό σκοπό που κατασκευάζονται. Επιπλέον, περιγράφεται η ανατομία αυτών των συστημάτων και ο τρόπος επιλογής τους

Στο 4^{o} Κεφάλαιο πραγματοποιείται η θερμοδυναμική ανάλυση των κινητήρων με υπερτροφοδότηση και δίνονται τα απαραίτητα διαγράμματα και χάρτες δεδομένων για την υλοποίηση αυτής. Ακόμα περιγράφεται η διαδικασία του «ταιριάσματος» του συμπιεστή της μηχανής και του στροβίλου καθώς και το κύριο όφελος του υπερτροφοδότη.

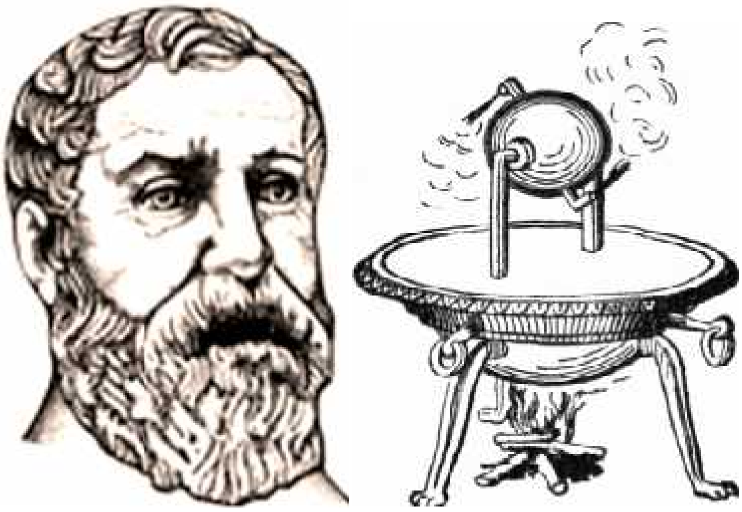
Στο 5^{o} Κεφάλαιο περιγράφεται η πώς μπορεί να πραγματοποιηθεί η συντήρηση ενός συστήματος με υπερτροφοδότηση καθώς και ποία είναι τα μέτρα για την προστασία. Επιπλέον, δίνονται δύο προτάσεις για την βελτίωση αυτών των συστημάτων, χωρίς ωστόσο να υπάρχει κάποια εφαρμογή μέχρι σήμερα.

Τέλος, παραθέτονται τα συμπεράσματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας καθώς και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την υλοποίηση της.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πραγματοποιώντας μια βιβλιογραφική ανασκόπηση καταλήγουμε στο γεγονός ότι η πρώτη θερμική μηχανή που αναπτύχθηκε από έναν Έλληνα μαθηματικό, τον Ήρων, ο οποίος είχε καταγωγή από την Αλεξάνδρεια. Το όνομα της οφείλεται στο σχήμα της και στον κατασκευαστή της και είναι «Η Σφαίρα του Ήρωνος».

Η σφαίρα του Ήρωνος στην ουσία είναι μια σφαίρα η οποία έχει την δυνατότητα να περιστρέφεται γύρω από τον οριζόντιο άξονα, ο οποίος διέρχεται από το κέντρο της. Στο κέντρο της σφαίρας υπάρχουν δύο αντιδιαμετρικούς ακτινικά τοποθετημένους σωλήνες, το ελεύθερο άκρο των οποίων είναι στραμμένο κατά ορθή γωνία, στο ίδιο επίπεδο, αλλά με αντίθετη φορά. Γεμίζοντας τη σφαίρα με νερό και αυξάνοντας την θερμοκρασία προκαλείται εξάτμιση του νερού και παραγωγή ατμού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πίεση στο εσωτερικό της. Ο ατμός εκτονώνεται μέσω των σωλήνων, εξερχόμενος με κάποια ταχύτητα, η οποία τελικά εξαναγκάζει τη σφαίρα σε περιστροφή.



Εικόνα 1: Ο Ήρωνος και η σφαίρα του [1]

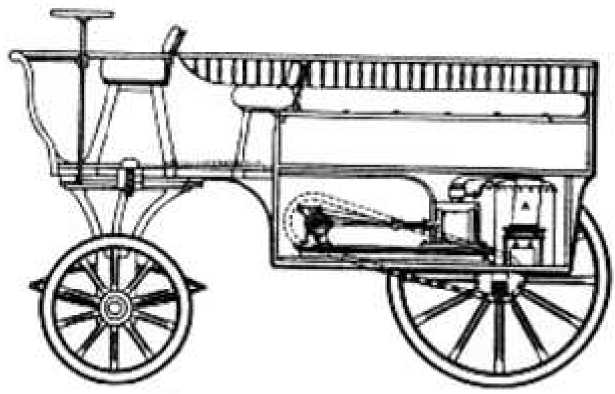
Θεωρείται θερμική μηχανή διότι η χημική ενέργεια της καύσιμης ύλης που τοποθετείται κάτω από τη σφαίρα μετατρέπεται σε θερμική, προσδίδεται στο εργαζόμενο σώμα, που είναι το νερό στο εσωτερικό της σφαίρας, η εκτόνωση του οποίου μέσω των σωλήνων εξαναγκάζει τη σφαίρα σε περιστροφή, παράγοντας μηχανικό έργο. Ο θάλαμος καύσης αυτής της θερμικής μηχανής είναι η σχάρα, πάνω στην οποία γίνεται καύση, και είναι εντελώς ανεξάρτητος από την ίδια τη θερμική μηχανή. Οι μηχανές αυτού του τύπου, εκείνες δηλαδή όπου ο θάλαμος καύσης είναι ανεξάρτητος από την διάταξη στην οποία γίνεται η παραγωγή μηχανικού έργου και οι οποίες χρησιμοποιούν κάποιο εργαζόμενο σώμα διαφορετικό από το καυσαέριο που παράγεται από την καύση για την μεταφορά της θερμικής ενέργειας, ονομάζονται μηχανές εξωτερικής καύσης.

Στα πρώτα χρόνια της βιομηχανικής εποχής, το σύνολο πρακτικά των μηχανών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μηχανές εξωτερικής καύσης. Η ατμομηχανή είναι αυτή που κυριαρχεί τα πρώτα χρόνια. Στον αντίποδα των μηχανών εξωτερικής καύσης βρίσκονται οι μηχανές εσωτερικής καύσης. Οι διαφορές αυτών με τις εξωτερικής καύσης είναι η χωροταξία αφού ο θάλαμος καύσης αποτελεί ενναιία μονάδα με την διάταξη μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο και η απουσία εργαζόμενου σώματος.

Η πρώτη ιστορικά μηχανή εσωτερικής καύσης αποδίδεται στον Christian Huygens. Συγκεκριμένα ο Huygens το 1678 πρότεινε μια διάταξη που θα χρησιμοποιούσε ως καύσιμο την πυρίτιδα και θα μπορούσε να θεωρηθεί ως πρόδρομος των σημερινών μηχανών εσωτερικής καύσης. Η πρόταση αυτή όμως ποτέ δεν υλοποιήθηκε. Μέχρι το 1860 που χρησιμοποιήθηκε η μηχανή εσωτερικής καύσης για πρώτη φορά σε όχημα, η κίνηση των οχημάτων γινόταν με ατμομηχανές. Το πρώτο ατμοκίνητο όχημα ήταν του μηχανικού Nicholas Cugnot, το 1769. Το όχημα αυτό ήταν τρίκυκλο με ένα τεράστιο καζάνι εμπρός από τον εμπρόσθιο τροχό του (Εικόνα 2). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο Cugnot τότε υποστήριζε ότι είχε κατασκευάσει το πρώτο αυτοπροωθούμενο μηχανικό όχημα, το οποίο ήταν ικανό να μεταφέρει επιβάτες και κινούνταν με περίπου 3,2 km/h.

Εικόνα 2:Το πρώτο ατμοκίνητο όχημα [1]

Ο Jean-Joseph-Etienne Lenoir ήταν ο πρώτος ο οποίος κατασκεύασε την πρώτη μηχανή εσωτερικής καύσης, η οποία παρουσίαζε ικανοποιητική λειτουργία. Η μηχανή αυτή έκανε χρήση ενός μίγματος από κάρβουνα, φωταέριο και αέρα, τα οποία τα χρησιμοποιούσε ως καύσιμο. Το 1860, ο Lenoir τοποθέτησε μια τέτοια μηχανή σε όχημα το οποίο μετατράπηκε από μια άμαξα σε ένα όχημα χωρίς άλογα. Ωστόσο, εκείνη την εποχή υπήρχαν οχήματα τα οποία κινούνταν με ατμό, αλλά το όχημα του Lenoir ήταν πιο μικρό και είχε καλύτερη οδική συμπεριφορά. Σημαντικό μειονέκτημα της μηχανής εσωτερικής καύση του Lenoir ήταν η χαμηλή απόδοση.

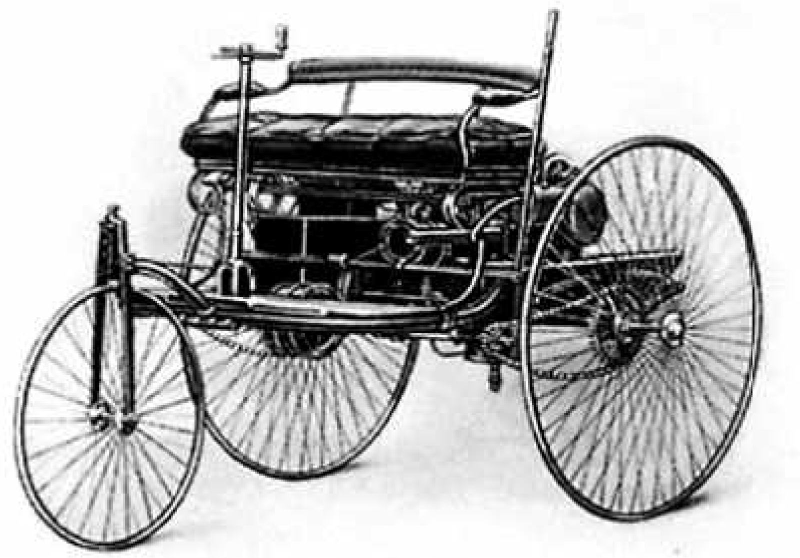


Εικόνα 3: Το όχημα του Lenoir [1]

Οι ερευνητές θέλησαν να βελτιώσουν την απόδοση της μηχανής αυτής και έτσι ο Beau de Rochas (1815-1893) το 1862, δημοσίευσε μια κριτική της μηχανής του Lenoir, στην οποία για πρώτη φορά αναφέρετε η δυνατότητα διαχωρισμού του κύκλου λειτουργίας σε ανεξάρτητες φάσεις. Η αναφορά έγινε στην αρχή λειτουργίας του «γνωστού» τετράχρονου κινητήρα. Επίσης, έδωσε έμφαση στην αυξημένη κατανάλωση καυσίμου της συγκεκριμένης μηχανής, την απέδωσε στην απουσία συμπίεσης του μίγματος πριν από την καύση. Επιπλέον, προώθησε μια νέα ιδέα, η όποια αφορούσε τον όγκο του κυλίνδρου, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της ψυχομένης επιφάνειας αυτού, σε μια προσπάθεια μείωσης των απωλειών θερμότητας του κυλίνδρου. Ο Αυστριακός Siegfried Marcus έκανε πειράματα με μηχανές που χρησιμοποιούσαν ως καύσιμο τη βενζίνη. Ο Marcus τοποθέτησε μια μηχανή πάνω σε μια χειράμαξα το 1864 και η κατασκευή αυτή θα πρέπει να θεωρηθεί ως το πρώτο βενζινοκίνητο αυτοκίνητο.

Μέσα στα επόμενα δέκα χρόνια εμφανίζεται η πρώτη μηχανή με βενζίνη η οποία παρουσίαζε αρκετά καλή απόδοση κάνοντας την ελκυστική. Ο Γερμανός μηχανικός Nikolaus August Otto (1832-1891), κατασκεύασε μια τροποποιημένη μορφή κινητήρα, στην οποία το έμβολο προκαλούσε την κίνηση. Η δημιουργία της τετράχρονης μηχανής πραγματοποιήθηκε από τον Otto το 1876, έχοντας βελτιωμένη αλλά όχι ικανοποιητική απόδοση, τα όνομα της το πήρε από τον ίδιο τον κατασκευαστή, και αποτελούσε μια μοναδική μηχανή με τεράστιες βελτιώσεις συγκρινόμενη με τη μηχανή του Lenoir. Η διάδοση της μηχανής Otto πραγματοποιήθηκε με απίστευτους γρήγορους ρυθμούς, με συνέπεια η χρήση της να απομακρύνει τα μέχρι τότε οχήματα από την αγορά.

Όσο αφορά την σχεδίαση και την φιλοσοφία του κινητήρα Otto είναι η βάση των σημερινών εξελιγμένων μηχανών εσωτερικής καύσης. Με την πάροδο των χρόνων, ο Γερμανός μηχανολόγος μηχανικός Carl Friedrich Benz (1844-1929) κατασκεύασε τον πρώτο πραγματικά αποδοτικό βενζινοκινητήρα εσωτερικής καύσης, τον οποίο τοποθέτησε σε ένα όχημα δικής του κατασκευής. Το όχημα αυτό του Benz ήταν το πρώτο εύχρηστο αυτοκίνητο με βενζινοκίνητη μηχανή εσωτερικής καύσης και είχε τρεις τροχούς, όμοιους με εκείνους του ποδηλάτου, ενώ ανέπτυσσε ανώτατη ταχύτητα 15 km/h και αποτέλεσε τον προάγγελο των μετέπειτα εξελίξεων (Εικόνα 3).



Εικόνα 3:Τρίτροχο αυτοκίνητο του Benz [3]

Ωστόσο, το 1892 ο Dr. Rudolf Diesel κάνει την επάνάσταση στις μηχανές υγρού καυσίμου όπου θέτει βάσεις για έναν σύγχρονο πετρελαιοκινητήρα υψηλής απόδοσης, που πρακτικά λειτουργεί μέχρι σήμερα. Ο τετράχρονος αυτός κινητήρας είναι μοκοκύλινδρος και λειτούργει πραγματοποιώντας κατακόρυφη κίνηση. Ο εξοπλισμός που τον αποτελούσε ήταν μία μικρή αντλία αέρα και αντλίες καυσίμου. Η πίεση αέρα ήταν της τάξης των 35-50 bar, γεγονός που οδηγούσε σε ικανοποιητικό διασκορπισμό του καυσίμου. Η ρύθμιση φορτίου του κινητήρα γίνονταν είτε με διαφοροποίηση της διάρκειας έγχυσης καυσίμου είτε με διαφοροποίηση της πίεσης αέρα. Ο κινητήρας αυτός κυριάρχησε γρήγορα στην αγορά της εποχής, ενώ αναπτύχθηκαν και διάφορες παραλλαγές του όπως είναι ο δίχρονος, ο υπερπληρούμενος και ο τετράχρονος διπλής δράσης.

Οι μηχανές καύσης γίνονται αποδεκτές από το ευρύ κοινό με συνέπεια να γίνεται απαραίτητη η διάθεση πόρων για την ανάπτυξη τους. Ο τρόπος κατασκευής και σχεδίασης έπρεπε να πραγματοποιείται με στόχο την απαλλαγή από την οποιαδήποτε επίδραση των ατμομηχανών. Ο χρόνος και η ανάπτυξη της τεχνολογίας είναι οι παράγοντες που ωθούν στην επικράτηση των μηχανών εσωτερικής καύση έχοντας όμως το βασικό μειονέκτημα του κόστους. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι η κατοχή οχήματος ήταν τα πρώτα χρόνια της διάδοσης του ήταν προνόμιο των πλουσίων. Όμως ο Αμερικανός βιομήχανος Henry Ford (1863-1947), αλλάζει τα δεδομένα του υπερβολικού κόστους κατασκευής και το 1983 κατασκευάζεται το πρώτο «οικονομικό όχημα». Το 1899 ο Henry Ford ίδρυει τη γνωστή δική του εταιρία κατασκευής αυτοκινήτων τυποποιώντας την παραγωγή του.

Επίσης, θα πρέπει να τονιστεί ότι η ουσιαστική αλλαγή της αρχικής κατασκευής του Rudolf Diesel έγινε μόλις στο δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1990, με την εισαγωγή των ηλεκτρικών και της ανάπτυξης των εξελιγμένων συστημάτων έγχυσης καυσίμου. Μέχρι τότε οι διαφοροποιήσεις από την κατασκευή του Rudolf Diesel θα πρέπει να θεωρηθούν ως βελτιώσεις μικρής σχετικά έκτασης (Καπετζώνης Ν., 2011).

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ (ΜΕΚ)

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι θερμικές μηχανές πραγματοποιούν την παραγωγή μηχανικού έργου από την θερμική ενέργεια, η οποία τους προσφέρεται από την καύση, αξιοποιώντας με αυτό τον τρόπο την αποταμιευμένη στα καύσιμα χημική ενέργεια.

Ο διαχωρισμός των θερμικών μηχανών πραγματοποιείται σε εσωτερικής και εξωτερικής καύσης. Κάθε κατηγορία παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά καθώς και τρόπο λειτουργίας. Στην περίπτωση των μηχανών εξωτερικής καύσης τα προϊόντα της καύσης του καυσίμου και του αέρα, μεταφέρουν τη θερμότητα τους σε ένα ρευστό, μέσω κάποιας επιφάνειας συναλλαγής, το οποίο αποτελεί το εργαζόμενο μέσο για την παραγωγή μηχανικής ισχύος. Στην περίπτωση των μηχανών εσωτερικής καύση ο αέρας, το καύσιμο και τα προϊόντα του αποτελούν άμεσα το εργαζόμενο μέσω για την παραγωγή του μηχανικού έργου. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι εμβολοφόροι κινητήρες, οι αεριοστρόβιλοι, οι στροβιλοαντιδραστήρες, οι περιστροφικές (rotary) και οι στατοίθερμοαντιδραστήρες (Ρακόπουλος, 1988).

Από τις προαναφερόμενες ΜΕΚ η εμβολοφόρος θεωρείται ως την πιο διαδεδομένη μορφή κινητήριας μηχανής. Αυτό οφείλεται στην κατασκευή καθώς και στις δυνατότητες που προσφέρει, όπου χρησιμοποιεί εργαζόμενο μέσο σε υψηλές θερμοκρασίες, υψηλή συγκέντρωση ισχύος, καθώς και αξιόλογο βαθμό απόδοσης. Η συγκεκριμένη ΜΕΚ χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τις μεταφορές πλοίων, τρένων, αυτοκινήτων και σε αεροπλάνα χαμηλής ταχύτητας.

Σε όλες τις εμβολοφόρες ΜΕΚ, το εργαζόμενο μέσο μπορεί να είναι είτε αέρας με καύσιμο, είτε αέρας μόνο, ο οποίος αναρροφάται από την και συμπιέζεται μέχρι μια ορισμένη πίεση. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η αύξηση της θερμοκρασίας η οποία δέχεται περαιτέρω αύξηση όταν προσδίδεται θερμική ενέργεια που προέρχεται από την καύση του καυσίμου. Κατά την εκτόνωση που ακολουθεί παράγεται το μηχανικό έργο. Ωστόσο, το μηχανικό έργο που παράγεται δεν είναι το καθαρό ωφέλιμο έργο αφού ένα μεγάλο μέρος τους καταναλώνεται κατά την διαδικασία της συμπίεσης και των τριβών που υπάρχουν. Οι βασικές φάσεις μιας εμβολοφόρου ΜΕΚ είναι η συμπίεση, η καύση και η εκτώνοση, όμως δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη λειτουργία του κινητήρα έχουν και οι φάσεις εναλλαγής των αερίων. Δηλαδή της κένωσης του κυλίνδρου από το καυσαέριο κατά το τέλος της εκτόνωσης και της εκ νέου πλήρωσής του με νέα γόμωση (μείγμα αέρα- καυσίμου) για την εκτέλεση νέου κύκλου (Λουράντος, 2014).

1.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ ΜΕΚ

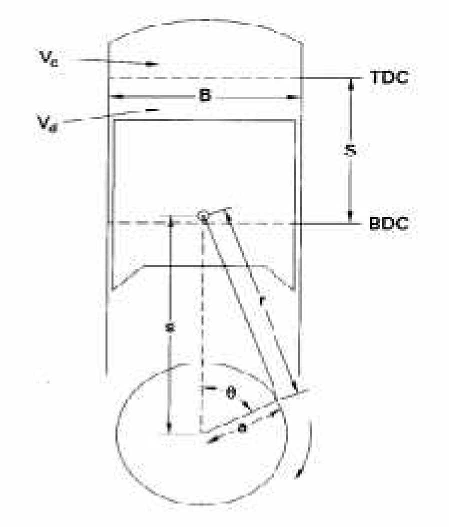
Η κατηγοριοποίηση των εμβολοφόρων παλιδρομικών μηχανών μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Ωστόσο, στον Πίνακα 1.1.παρουσιάζεται ο διαχωρισμός που πραγματοποιείται από τους Κλιάνης και συν. (2002).

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες εμβολοφόρων παλιδρομικών μηχανών (Κλιάνης και συν., 2002).

Κατηγορία	Υποκατηγορίες
Τρόπο εναύσεως (αναφλέξεως)	• Μηχανές εναύσεως με σπινθήρα ή βενζινομηχανές ή κινητήρες Otto (spark ignition engines) • Μηχανές εναύσεως με συμπίεση ή πετρελαιομηχανές ή κινητήρες Diesel (compression ignition engines) • Μηχανές Semi-Diesel
Αριθμό των διαδρομών του εμβόλου για την ολοκλήρωση του κύκλου λειτουργίας:	• 2-χρονες μηχανές (two-stroke engines) • 4-χρονες μηχανές (four-stroke engines)
Είδος του καυσίμου	• Μηχανές βαρέως πετρελαίου (μαζούτ) • Μηχανές ελαφρών καυσίμων (Diesel, βενζίνη) • Μηχανές αερίων καυσίμων
Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα	• Αργόστροφες έως 350 rpm (μηχανές πλοίων) • Μεσόστροφες έως 1500 rpm (μηχανές πλοίων, τρένων και ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη) • Πολύστροφες έως 5000 rpm (μηχανές τροχοφόρων) • Ταχύστροφες με ταχύτητα περιστροφής άνω των 5000 rpm (αυτοκίνητα νέας τεχνολογίας, αγωνιστικά αυτοκίνητα, δίτροχα μεγάλου κυβισμού)
Αριθμό των κυλίνδρων	• Μονοκύλινδρες • Πολυκύλινδρες
Διάταξη των κυλίνδρων	• Κατακόρυφες ή εν σειρά • Τύπου V, W, H, Δ, X • Οριζόντιες (boxer) • Αστεροειδείς (κινητήρες ελικοφόρων αεροσκαφών) • Σταυροειδείς, πολυγωνικές, διπλών εμβόλων κτλ
Τρόπο ψύξεως των κυλίνδρων	• Αερόψυκτες • Υδρόψυκτες
Τρόπο σύνδεσης εμβόλου – διωστήρα	• Με βάκτρο και ζύγωμα • Χωρίς βάκτρο και ζύγωμα
Πίεση και ποσότητα αέρα που εισάγεται στον κύλινδρο	• Ατμοσφαιρικές μηχανές ή μηχανές φυσικής αναπνοής (atmospheric-induction engines) • Υπερπληρωμένες (supercharged)
Τρόπο εγκαταστάσεως	• Μηχανές σταθερής ή μόνιμης βάσεως • Μηχανές κινούμενου φορέα (κινητές ή φορητές)
Χρήση τους Μηχανές οχημάτων	• Ναυτικές μηχανές • Βιομηχανικές μηχανές(σταθερές)
Μέθοδο εισαγωγής του καυσίμου	• Με εξαεριωτήρα (carburator) • Με αντλία εγχύσεως και εγχυτήρα (injection)
Φορά περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα:	• Ορισμένης φοράς περιστροφής • Αναστρέψιμες μηχανές
Παραγόμενη ισχύ ανά κύλινδρο στις κανονικές στροφές λειτουργίας	• Μικρής ισχύος (μέχρι 20 PS) • Μέσης ισχύος (μέχρι 200 PS) • Μεγάλης ισχύος (άνω των 200 PS)
Τρόπο αποδόσεως της ισχύος	• Σταθερών στροφών (και μεταβλητού φορτίου) • Μεταβλητών στροφών
Είδος του θαλάμου καύσεως	• Ενιαίος θάλαμος καύσεως • Διαιρούμενος θάλαμος καύσεως

1.3. ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΚ

Τον κύριο κινηματικό μηχανισμό που συγκροτεί τον εμβολοφόρο ΜΕΚ τον αποτελεί ο μηχανισμός εμβόλου - διωστήρα - στροφάλου, ένας τέτοιος μηχανισμός απεικονίζεται στο Σχήμα1.1. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι ο μηχανισμός αυτός έχει την δυνατότητα με την παλινδρομική κίνηση του εμβόλου να μετατρέπει με την βοήθεια του διωστήρα την κίνηση σε περιστροφική. Αυτό συμβαίνει διότι η παλινδρομική κίνηση του εμβόλου πραγματοποιείται στα δύο άκρα τα οποία ονομάζονται Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ) και Κάτω Νεκρό Σημείο (ΚΝΣ). Η απόσταση που διανύει το έμβολο από το ΑΝΣ έως το ΚΝΣ καλείται διαδρομή του εμβόλου ή «χρόνος» της μηχανής και αντιστοιχεί ουσιαστικά σε μισή της στροφαλοφόρου ατράκτου στροφή ,δηλαδή σε 180^o (Heywood, 1988).



Σχήμα 1.1: Κινηματικός μηχανισμός διωστήρα στροφάλου (Heywood, 1988)

Ωστόσο, για την κατανόηση της λειτουργίας ενός εμβολοφόρου κινητήρα αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά. Ο όγκος εμβολισμού V_h, δηλαδή ο όγκος του κυλίνδρου που σαρώνεται από το έμβολο κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής δίνεται από την σχέση:

$$V_h = \frac{\pi D^2 s}{4} \quad (1.1)$$

Όπου:

D= η διάμετρος του εμβόλου-κυλίνδρου και
s= η διαδρομή του εμβόλου

Ακόμα, ο βαθμός συμπίεσης δίνεται από το άθροισμα του όγκου εμβολισμού και του επιζήμιου όγκου, δηλαδή ο όγκος του κυλίνδρου πάνω από την κεφαλή του εμβόλου δια του επιζήμιου όγκου και η σχέση είναι η εξής:

$$\varepsilon = \frac{(V_h + V_c)}{V_c} \quad (1.2)$$

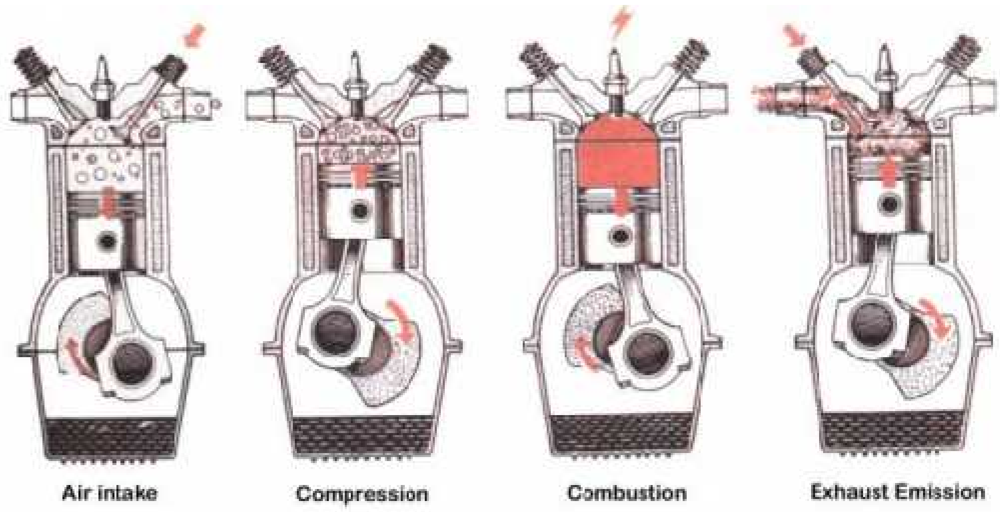
Όπου:

V_c = ο επιζήμιος όγκος
V_h = όγκος εμβολισμού

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, το κριτήριο της εξωτερικής λειτουργίας των εμβολοφόρων κινητήρων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δύο ή τέσσερεις χρόνους με συνέπεια να διαχωρίζονται σε δίχρονους (2Χ) και τετράχρονους κινητήρες (4Χ) (Βλαϊκίδης, 2014).

1.3.1. Τετράχρονοι κινητήρες

Η περίοδος λειτουργίας των τετράχρονων κινητήρων αντιστοιχεί σε δύο περιστροφές της στροφαλοφόρου ατράκτου ($2*360^o$). Άρα πραγματοποιούντα τέσσερις πλήρεις διαδρομές του εμβόλου, εκ των οποίων οι δύο γίνονται με σκοπό την εναλλαγή αερίων. Ειδικά όργανα διανομής έχουν την δυνατότητα να ρυθμίζουν τη πλήρωση, την εκκένωση του κυλίνδρου καθώς και την έναρξη της καύσης. Τα ειδικά όργανα είναι η βαλβίδα – εγχυτήρας ή ο διανομέας – σπινθηριστής αντίστοιχα. Αυτά λαμβάνουν κίνηση από την εκκεντροφόρο άτρακτο, στην οποία η κίνηση της έχει προέλθει από την στροφαλοφόρο (Βλαϊκίδης, 2014).



Εικόνα 1.1: Λειτουργία ενός τετράχρονου κινητήρα.
(Βλαϊκίδης, 2014)

Στην Εικόνα 1.1 απεικονίζονται οι φάσεις που πραγματοποιούνται μέσα στον κύλινδρο. Αυτό που παρατηρείται είναι η πορεία που ακολουθεί το έμβολο στην κάθε περίπτωση, έτσι διακρίνονται οι τέσσερεις χρόνοι που διέπουν έναν κύκλο λειτουργίας μιας τέτοιας μηχανής. Στην συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση των χρόνων σύμφωνα με τον Λουράντος (2014):

1. **Αναρρόφηση:** η οποία ξεκινάει με το έμβολο στο ΑΝΣ και τελειώνει με το έμβολο στο ΚΝΣ, κατά τη διάρκεια της οποίας το εργαζόμενο μέσο αναρροφάται στο εσωτερικό του κυλίνδρου. Για να αυξηθεί η αναρροφώμενη μάζα, η βαλβίδα εισαγωγής ανοίγει λίγο πριν το έμβολο ξεκινήσει την κάθοδο του και κλείνει λίγο μετά το ΚΝΣ.
2. **Συμπίεση:** η οποία συμβαίνει όταν οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής είναι κλειστές, καθώς το έμβολο κινείται από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ. Προς το τέλος της διαδικασίας της συμπίεσης, πριν το ΑΝΣ, έχουμε την έναυση του μείγματος κάτι που οδηγεί σε έντονη αύξηση της πίεσης μέσα στον κύλινδρο.

3. **Εκτόνωση:** η οποία ξεκινά με το έμβολο στο ΑΝΣ καθώς τα προϊόντα της καύσης, υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, σπρώχνουν το έμβολο προς τα κάτω και αναγκάζουν τη στροφαλοφόρο άτρακτο να περιστραφεί. Το τέλος της εκτόνωσης σηματοδοτείται από το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής λίγο πριν το ΚΝΣ (40 – 60°).
4. **Εξαγωγή:** κατά τη διάρκεια της οποίας τα προϊόντα της καύσης εξέρχονται από τον κύλινδρο. Αυτό συμβαίνει αρχικά διότι η πίεση εντός του κυλίνδρου είναι υψηλότερη από την πίεση του αγωγού εξαγωγής. Σε δεύτερη φάση έχουμε εξαναγκασμένη οδήγηση των καυσαερίων προς τον αγωγό εξόδου από την ανοδική κίνηση του εμβόλου από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ. Τέλος, καθώς το έμβολο πλησιάζει το ΑΝΣ ανοίγει η βαλβίδα εισαγωγής και ακριβώς μετά το ΑΝΣ κλείνει η βαλβίδα εξαγωγής, αρχίζοντας έτσι ένα νέο κύκλο λειτουργίας

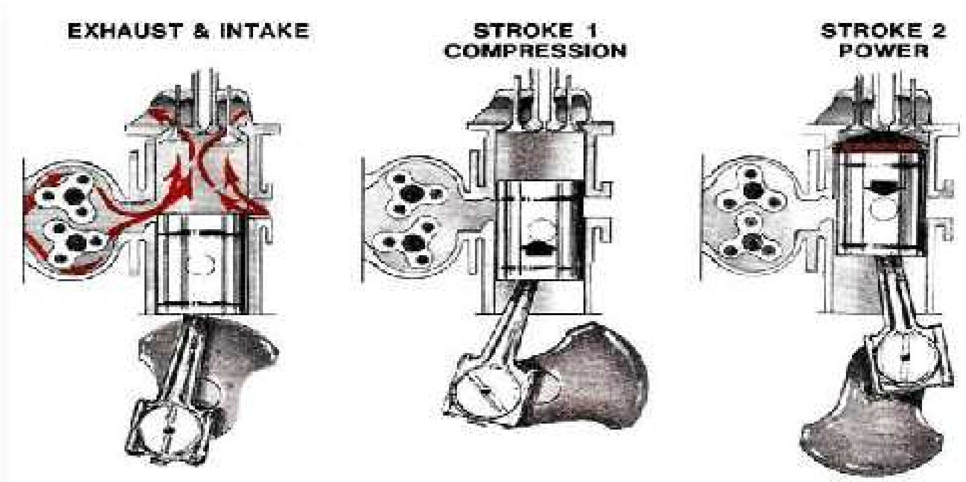
1.3.2. Δίχρονοι κινητήρες

Η περίοδος λειτουργίας ενός δίχρονου κινητήρα αντιστοιχεί σε μια ολόκληρη περιστροφή της στροφαλοφόρου ατράκτου, δηλαδή των 360^{o}. Αυτό σημαίνει ότι πραγματοποιεί δύο διαδρομές το έμβολο, εκ των οποίων μόνο το μισό γίνεται κοντά στο ΚΣΝ, οι οποίες είναι πραγματοποιούνται για την εναλλαγή των αερίων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εναλλαγή αυτή ρυθμίζεται από μια ακμή στο πάνω μέρος του εμβόλου που είτε αποκαλύπτει είτε καλύπτει σχετικές θυρίδες, οι οποίες είναι τοποθετημένες στην παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου.

Άρα σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν γίνεται κατανοητό ότι η εναλλαγή που πραγματοποιείται γίνεται κάτω από δυσμενείς συνθήκες. Συνέπεια αυτού, είναι η απαίτηση ειδικών αντλιών απόπλυσης ή σάρωσης, οι οποίες θα έχουν την δυνατότητα να ωθούν με μεγάλη πίεση τη νέα γόμωση εντός του κυλίνδρου με αποτέλεσμα να πληρούται ο κύλινδρος αλλά και να εξέρχονται τα καυσαέρια από αυτόν. Ωστόσο, το μειονέκτημα των αντλιών αυτών είναι η απορρόφηση πολύτιμου μηχανικού έργου το οποίο προέρχεται από την στροφαλοφόρο άτρακτο.

Επιπλέον, η στροφαλοφόρος άτρακτος προσφέρει κίνηση ίδιου μεγέθους στην εκκεντροφόρο άτρακτο, καθώς εξυπηρετεί την καύση και άλλα βοηθητικά όργανα. Οι συνηθέστερες διατάξεις απόλυσης είναι η εγκάρσια, η βροχοειδή και η διαμήκη. Σημειώνεται ότι η διαμήκης απόπλυση με θυρίδες εισαγωγής και βαλβίδες καθώς και βαλβίδες εξαγωγής θεωρείται από την καλύτερη απόπλυση συγκρινόμενη με τις προαναφερόμενες. Ωστόσο, η πολυπλοκότατα της λόγω κατασκευής των βαλβίδων την κάνει απρόσιτη (Βλαϊκίδης, 2014).

.



Εικόνα 1.2: Λειτουργία ενός δίχρονου κινητήρα.

(Βλαϊκίδης, 2014)

Στην Εικόνα 1.2 απεικονίζεται η αρχή λειτουργία ενός δίχρονου κινητήρα ξεκινά με το μίγμα να οδηγείται στον κύλινδρο μέσα από περιμετρικές θυρίδες με τη βοήθεια περιστροφικού φυσητήρα. Τα καυσαέρια περνούν μέσα από μυκητοειδείς βαλβίδες που βρίσκονται πάνω στην κεφαλή του κυλίνδρου (Αναγνωστάκης Ι., 2009). Οι θυρίδες είναι αυτές που οφείλονται για την μείωση του χρόνου, στην πραγματικότητα έχουμε τον υποδιπλασιασμό του χρόνου

Τα στάδια λειτουργίας του δίχρονου κινητήρα περιγράφονται σύμφωνα με τον Λουράντος (2014):

1. **Συμπίεση:** η οποία ξεκινάει καθώς κλείνουν οι θυρίδες εισαγωγής και εξαγωγής ενώ κατευθύνεται το έμβολο από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ. Κατά τη διάρκειά της συμπιέζεται το εργαζόμενο μέσο που βρίσκεται στο εσωτερικό του κυλίνδρου και λίγο πριν το ΑΝΣ γίνεται η έναυση της καύσης.
2. **Εκτόνωση**: η οποία συμβαίνει κατά την κίνηση του εμβόλου από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ. Τα προϊόντα της καύσης ωθούν το έμβολο προς τα κάτω παράγοντας μηχανικό έργο. Κατά τη διάρκεια της καθοδικής κίνησης του εμβόλου, αρχικά αποκαλύπτονται από την άνω ακμή του οι θυρίδες εξαγωγής (ή ανοίγουν βαλβίδες εξαγωγής) και έτσι τα καυσαέρια ξεκινούν να εγκαταλείπουν το εσωτερικό του κυλίνδρου. Στη συνέχεια, αποκαλύπτονται οι θυρίδες εισαγωγής βοηθώντας στην απόπλυση του κυλίνδρου από τα καυσαέρια και την πλήρωση του κυλίνδρου με νέα ποσότητα εργαζόμενου μέσου. Το έμβολο και οι θυρίδες είναι διαμορφωμένες με κατάλληλο τρόπο ώστε να αποφεύγεται το πέρασμα του εργαζόμενου μέσου απευθείας από την εισαγωγή στην εξαγωγή, ενώ ταυτόχρονα το νεοεισερχόμενο εργαζόμενο μέσο ωθεί τα καυσαέρια στην εξαγωγή. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται απόπλυση και πραγματοποιείται, ειδικότερα σε κινητήρες οι οποίοι δεν είναι υπερπληρωμένοι, με τη βοήθεια ειδικής αντλίας αποπλύσεως, η οποία παίρνει κίνηση από τη στροφαλοφόρο άτρακτο και ωθεί το εργαζόμενο μέσο στο εσωτερικό του κυλίνδρου στον πολύ λίγο χρόνο που είναι διαθέσιμος στους 2-Χ κινητήρες κατά τη διαδικασία της εναλλαγής των αερίων.

1.3.3. Σύγκριση δίχρονων και τετράχρονων μηχανών

Οι μηχανές είτε είναι δίχρονες (2-Χ) είτε είναι τετράχρονες (4-Χ) παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα. Εκεί λοιπόν πρέπει να δοθεί έμφαση για να πραγματοποιηθεί μια σύγκριση.

Τα πλεονεκτήματα την τετράχρονης μηχανής (Τζιφάκης 1978):

- Ο καθαρισμός του κυλίνδρου πραγματοποιείται ευκολότερα από την 2-Χ μηχανή. Πο συγκεκριμένα κατά την εξαγωγή του κασαυερίου σε μια 4-Χ μηχανή εκμεταλλευόμαστε μια πλήρη διαδρομή του εμβόλου ενώ στη 2-Χ η εξαγωγή διαρκεί μόνο για λίγες μοίρες στροφάλου.
- Η εκτόνωση των καυσαερίων σε μια 4-Χ μηχανή διαρκεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε μια 2-Χ. Άρα στη δίχρονη μηχανή πραγματοποιείται η διακοπή της εκτονώσεως των καυσαερίων νωρίτερα, με αποτέλεσμα να αποκτηθεί καλή σάρωση
- Οι φάσεις διαρκούν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από την αντίστοιχη 2-Χ, με αποτέλεσμα να υπάρχει άνεση χρόνου για την εκτέλεση των διαφόρων φάσεων λειτουργίας
- Οι καταπονήσεις των διαφόρων εξαρτημάτων της 4-Χ μηχανής είναι μι-κρότερες από τις αντίστοιχες της 2-Χ. Συνέπεια αυτού, η ευκολότερη απαγωγή της

θερμότητας από τις 4-Χ και είναι ο λόγος που οι 4-Χ μηχανές θεωρούνται καταλληλότερες για λειτουργία σε μεγάλο αριθμό στροφών.
- Στις 4-Χ μηχανές είναι εύκολη η ρύθμιση των στοιχείων διανομής (π.χ. βαλβίδες εισαγωγής, εξαγωγής).

Από την άλλη όψη τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει μια δίχρονη μηχανή είναι (Τζιφάκης 1978):

- Το ωφέλιμο έργο στην 2-Χ μηχανή είναι θεωρητικά το διπλάσιο από αυτό που αποδίδει μια 4-Χ μηχανή με τις ίδιες διαστάσεις. Αυτό οφείλεται στο ότι κάθε κύλινδρος μιας 4-Χ μηχανής παράγει ωφέλιμο έργο κάθε 4 διαδρομές του εμβόλου (2 στροφές του στροφάλου) ενώ κάθε κύλινδρος μιας 2-Χ μηχανής παράγει έργο κάθε 2 διαδρομές του εμβόλου (1 στροφή του στροφάλου). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το έργο που παράγει μια 2-Χ μηχανή συγκρινόμενο με το έργο μίας 4-Χ, των ίδιων διαστάσεων και βάρους δεν είναι ακριβώς διπλάσιο αλλά κυμαίνεται από 1,7 εως 1,8 φορές περισσότερο εξαιτίας της ισχύος που απορροφάται από την αντλία σαρώσεως και της σύγχρονης (σε ορισμένες στιγμές) εξαγωγής και σάρωσης.
- Στην 4-Χ μηχανή υπάρχουν απαραίτητα οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής, πράγμα που κάνει τη μηχανή πολύπλοκη όσον αφορά τους μηχανισμούς λειτουργίας των βαλβίδων. Την πολυπλοκότητα αυτή δε τη συναντάμε στη 2-Χ όπου ο αριθμός των βαλβίδων είναι μικρότερος ή και δεν υπάρχουν καθόλου βαλβίδες.
- Η ροπή στρέψεως μιας 4-Χ μηχανής είναι πιο ανομοιόμορφη από τη ροπή στρέψεως μιας 2-Χ ιδίων διαστάσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι οι 4-Χ μηχανές αφιερώνουν δύο χρόνους (1 κύκλο στροφάλου) στην εναλλαγή των αερίων, στους οποίους δεν παράγει ισχύ η μηχανή, αντίθετα με τη 2-Χ, όπου σε κάθε κύκλο έχουμε παραγωγή ισχύος.

Σύμφωνα λοιπόν με όσα προαναφέρθηκαν διεξάγεται το συμπέρασμα ότι οι 2-Χ μηχανές προτιμούνται να χρησιμοποιούνται σαν αργόστροφες μηχανές μεγάλων ισχύων ενώ οι 4-Χ σαν ταχύστροφες μηχανές μικρότερων γενικά ισχύων.

1.3.4. Λοιποί εμβολοφόροι κινητήρες

Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα κάποιοι κινητήρες, οι οποίοι δεν χρησιμοποιούνται τόσο συχνά, αυτοί είναι οι κάτωθι:

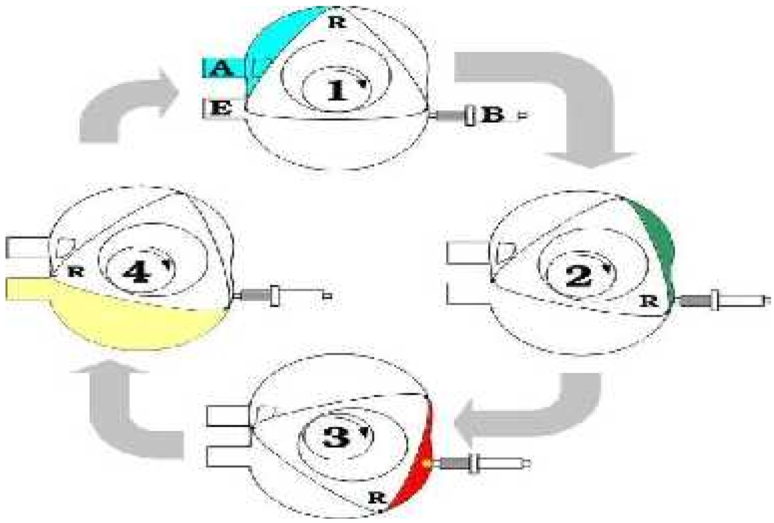
❖ **Περιστροφικός κινητήρας Βάνκελ**

Ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης με περιστροφικό έμβολο, που αναπτύχθηκε στη Γερμανία, είναι διαφορετικός σε δομή από τους συμβατικούς κινητήρες με παλινδρομικά έμβολα. Ο κινητήρας επινοήθηκε από τον Φέλιξ Βάνκελ και η κατασκευή του άρχισε το 1956. Αντί για έμβολα ο κινητήρας Βάνκελ έχει έναν τροχιακό ρότορα, ισόπλευρο και περίπου τριγωνικό, που στρέφεται μέσα σε έναν κλειστό θάλαμο, ενώ οι τρεις κορυφές του εφάπτονται συνεχώς πάνω στην εσωτερική επιφάνεια του κελύφους. Τα στάδια λειτουργίας του είναι τα ακόλουθα:

1. **Φάση εισπνοής:** μία από τις πλευρές του ρότορα περνάει επάνω από τα intake ports, τις θυρίδες εισαγωγής από όπου εισέρχεται το προς καύσιν μείγμα βενζίνης/αέρα. Όταν η επόμενη κορυφή του ρότορα κλείσει εντελώς τις θυρίδες εισαγωγής, έχουμε πλήρωση του πρώτου θαλάμου με μείγμα.
2. **Φάση συμπίεσης**: συνεχίζοντας την περιστροφή του, ο ρότορας λόγω της μορφής του στάτορα - συμπιέζει το μείγμα βενζίνης/αέρα σύμφωνα με τον λόγο συμπίεσης

που έχει ο κινητήρας Βανκελ. Στην περίπτωση του Renesis αυτός ο λόγος είναι 10:1, δηλαδή το μείγμα συμπιέζεται στο 1/10 του αρχικού του όγκου.

3. **Φάση ανάφλεξης**: στην τρίτη φάση περιστροφής του ρότορα το συμπιεσμένο μείγμα οδηγείται πάνω από τα δύο μπουζί (ανά θάλαμο) ώστε να αναφλεγεί και να μετατραπεί η χημική ενέργεια του σε κινητική, η οποία πρακτικά «σπρώχνει» τον ρότορα ώστε να συνεχίσει την περιστροφή του. Οι κινητήρες Βάνκελ, λόγω του ιδιόμορφου και σχετικά μακρύ θαλάμου που σχηματίζουν δεν έχουν καλή και πλήρη καύση, για αυτό και πάντα χρησιμοποιούν δύο μπουζί ανά θάλαμο.
4. **Φάση εκτόνωσης:** η ίδια πλευρά του ρότορα πλέον περνάει πάνω από τις θυρίδες εξαγωγής, μέσα από τα οποία τα καυσαέρια οδηγούνται προς την εξάτμιση. Και εδώ έχουμε το ίδιοφαινόμενο μικρής σχετικά ταχύτητας καυσαερίων στις χαμηλές στροφές, που οδηγεί σε μερική πλήρωση του ιδίου θαλάμου, και άρα σε σχετικά χαμηλή παραγόμενη ροπή.



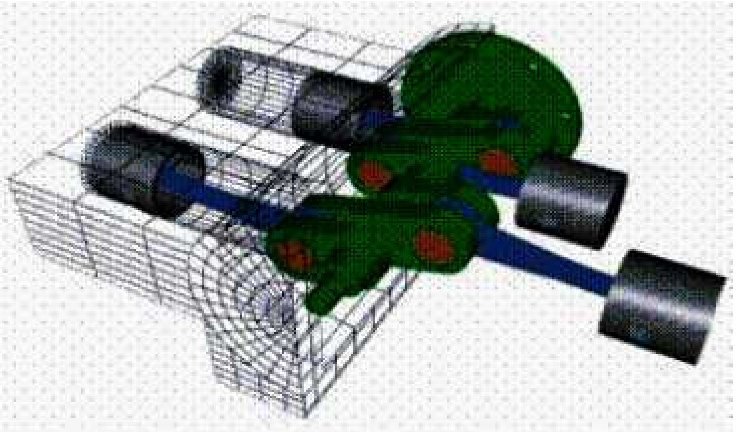
Σχήμα 1.2: Αρχή λειτουργιάς Βάνκελ [1]

Βασικό πρόβλημα στο σχεδιασμό είναι η στεγανοποίηση στις κορυφές και τις παρειές του ρότορα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του κινητήρα Βάνκελ είναι ο μικρός χώρος και τομικρό βάρος ανά μονάδα ισχύος, η στρωτή, χωρίς κραδασμούς αθόρυβη λειτουργία του καθώς και το χαμηλό κόστος κατασκευής του, αποτέλεσμα της μηχανικής του απλότητας. Η απουσία αδρανειακών δυνάμεων από τα μέρη που παλινδρομούν και η κατάργηση των μυκητοειδών βαλβίδων επιτρέπουν λειτουργία σε πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες από ότι στους παλινδρομικούς κινητήρες. Η εισαγωγή νωπού μίγματος καυσίμων και η εξαγωγή των καυσαερίων είναι αποτελεσματικότερες, γιατί οι θυρίδες του ανοιγοκλείνουν ταχύτερα από ότι με μυκητοειδείς βαλβίδες, ενώ η ροή μέσα από αυτές είναι σχεδόν συνεχής. Η οικονομία σε καύσιμο είναι εφάμιλλη με εκείνη στις συμβατικές μηχανές, επιτρέποντας αθόρυβη καύση και μεγαλύτερη ποικιλία καυσίμων. Η μικρότερη μάζα και η χαμηλότερη θέση του κέντρου βάρους καθιστούν τον κινητήρα αυτόν ασφαλέστερο για αυτοκίνητα. Τα κινούμενα μέρη ενός κινητήρα Βάνκελ ανέρχονται στο ένα τρίτο περίπου από ότι σε τυπικό εξακύλινδρο κινητήρα (Αναγνωστάκης, 2009).

❖ ***Κινητήρας αντίθετων εμβόλων***

Έχει δύο έμβολα που κινούνται αντίθετα μέσα στον ίδιο κύλινδρο και δύο ομάδες θυρίδων κατάλληλα διατεταγμένες, ώστε η μία από αυτές να καλύπτεται και να αποκαλύπτεται από το ένα έμβολο, ενώ η άλλη να ελέγχεται από το άλλο έμβολο. Ο σχεδιασμός των αντίθετων εμβόλων έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα, οι μάζες που παλινδρομούν κινούνται σε αντίθετες διευθύνσεις ζυγοσταθμίζοντας έτσι τον κινητήρα.

Επιπλέον, δε χρειάζονται οι μυκητοειδείς βαλβίδες που είναι απαραίτητες σε κινητήρες με μονόδρομη σάρωση (Αναγνωστάκης, 2009).



Εικόνα 1.3: Κινητήρας αντίθετων εμβόλων
(Αθανασίου & Γιοντανόφ, 2010)

❖ **Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου**

Στον κινητήρα αυτόν τα έμβολα δε συνδέονται στην ίδια άτρακτο, όπως σε ένα συμβατικό κινητήρα. Αντίθετα, τα καυσαέρια μεταδίδουν την ισχύ τους σε έναν στρόβιλο. Κατασκευασμένος αρχικά ως αεροσυμπιεστής, ο κινητήρας αυτός χρησιμοποιήθηκε συστηματικά για πρώτη φορά από τους Γερμανούς κατά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο για την εκτόξευση τορπιλών. Το προς καύση μίγμα αναφλέγεται από τη θερμότητα της συμπίεσης και όχι από σπινθηριστή (Αναγνωστάκης, 2009).

1.4. ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Στην εσωτερική λειτουργία η βασική διάκριση των κινητήρων πραγματοποιείται στου κινητήρες OTTO (βενζινοκινητήρες) και κινητήρες DIESEL (Πετρελαιοκινητήρες). Η διάκριση αυτή έχει γίνει σύμφωνα με τον τρόπο αναφλέξεως (εναύσεως) που επιδρά στον τρόπο καύσεως του καυσίμου, το οποίο μπορεί να είναι είτε υγρό είτε αέριο. Είναι σωστό να αναφερθεί ότι με το πέρασμα των χρόνων η καύση των ορυκτών καυσίμων αντικαθίσταται με νέα καύσιμα τα οποία είτε είναι ανανεώσιμα είτε είναι πολύ φιλικά προς το περιβάλλον. Όμως, ακόμα και για την λειτουργία των «νέων» κινητήρων πάντα χρησιμοποιείται ένα μέρος βενζίνης ή πετρελαίου (Καρόφυλλος, 2010). Συγκεκριμένα ο κινητήρας «Semi–Diesel» και ο κινητήρας «Diesel – Gas» είναι ουσιαστικά κινητήρες Diesel δύο καυσίμων. Επίσης, υπάρχει και ο κινητήρας πολλών καυσίμων, που μπορεί να λειτουργήσει σε ικανοποιητικό βαθμό με ένα μεγάλο φάσμα καυσίμου, δηλαδή από ανθεκτική σε κρουστική καύση βενζίνης έως ελαφρύ λιπαντικό έλαιο (Βλαϊκίδης, 2014).

1.4.1. Βενζινοκινητήρας Otto

Ο Γερμανός Nikolaus Augustus Otto (Όττο, 1832-1891) με σπουδές εμπορικών θεμάτων ξεκίνησε να μελετά τη μηχανή του Lenoyar και το 1987 κατασκεύασε έναν τετράχρονο βενζινοκινητήρα. Όμως πριν από αυτή την κατασκευή είχε δημιουργήσει έναν ατμοσφαιρικό κινητήρα ελεύθερου εμβόλου, για την πραγματοποίηση αυτού του κινητήρα τον είχε στηρίξει οικονομικά E. Langen. Το έτος 1867 παρουσιάστηκε αυτός ο κινητήρας στην παγκόσμια έκθεση του Παρισιού και παρά τη θορυβώδη λειτουργία του, πήρε ένα χρυσό βραβείο διότι είχε κατά 60% μειωμένη κατανάλωση καυσίμου. Αποτέλεσμα αυτού ήταν ο Otto να αναγνωριστεί σαν τον πρώτο μηχανικό που είχε κατασκευάσει τον πρώτο κινητήρα με ικανοποιητικό βαθμό αποδόσεως. Ωστόσο, επιβεβαιώθηκε για άλλη μια φορά να εφευρίσκει ένας Γάλλος μία μηχανή, η οποία να βελτιώνεται και τελειοποιείται από Ἄγγλους και Γερμανούς.

Η μεγάλη ζήτηση για τους κινητήρες του Otto οδήγησε στην ίδρυση από τον Langen της ανώνυμης εταιρίας Deutz AG στην Πολωνία, το έτος 1872, η οποία είχε στόχο τη μαζική παραγωγή κινητήρων. Σήμερα αυτή η εταιρία έχει εξελιχθεί σε πρωτοπόρο κατασκευαστή μηχανών κάθε μεγέθους και λειτουργικής αρχής. Υπεύθυνος για τη σχεδίαση ήταν ο Wilhelm Maybach (Μάιμπαχ,1986-1929) και για την παραγωγή ο Gottlieb Daimler (Ντάιμλερ, 1834-1900).Το έτος 1874 έφτασε η μηνιαία παραγωγή τους 80 κινητήρες, αλλά στο τέλος του ίδιου έτους προέκυψε εμπορικό πρόβλημα: αυτοί οι κινητήρες με ισχύ περί τα 2 kW (~2,7 PS) δεν ήταν σε θέση να καλύψουν τις ανάγκες των βιοτεχνιών και μικρών βιομηχανιών.

Ωστόσο, εκείνη την εποχή κυκλοφορούσε παράλληλα οι κινητήρες Stirling (υπέρθερμου αέρα) οι οποίοι, αν και είχαν μικρότερο βαθμό αποδόσεως, είχαν υψηλότερη σταθερή ισχύ. Οι κινητήρες αυτοί είχαν την δυνατότητα να χρησιμοποιούν σαν καύσιμο ξύλα, τύρφη ή κάρβουνο και δεν είχαν εξάρτηση από το φωταέριο. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, έπρεπε να βελτιωθεί ο κινητήρας του εργοστασίου Deutz και για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένα «Τμήμα Ερευνών», του οποίου την λειτουργία ανέλαβε ο Otto.Έτσι έγινε δυνατή η μελέτη για την κατασκευή κινητήρων που είχε διακοπεί από το 1862. Ήδη το έτος 1876 παρουσίασε ο Otto το «νέο κινητήρα», όπως ονομαζόταν για πολύ καιρό ο τετράχρονος βενζινοκινητήρας, με τον οποίο έκλεισε οριστικά η εποχή των πρώιμων κινητήρων.

Το βασικό πλεονέκτημα του νέου αυτού κινητήρα ήταν η συμπίεση του μίγματος καύσιμο-αέρας, μια αρχή που δεν άλλαξε μέχρι και σήμερα, παρά τις πάμπολλες τροποποιήσεις και βελτιώσεις. Η περιοδικά επαναλαμβανόμενη διεργασία στον κινητήρα Otto είναι η ακόλουθη:

- Ο κύλινδρος γεμίζει με καύσιμο και αέρα
- Το έμβολο συμπιέζει το μείγμα
- Το συμπιεσμένο μείγμα πυροδοτείται (ηλεκτρικός σπινθηριστής, μπουζί), οπότε διαστέλλεται το καιγόμενο μείγμα και απωθεί το έμβολο, παράγοντας έργο
- Τα καυσαέρια εξάγονται από τον κύλινδρο.

Οι παραπάνω λειτουργικές εκτελούντα σε τέσσερεις χρόνους, αυτό είναι και ο λόγος που ονομάστηκε τετράχρονος κινητήρας (Καρόφυλλος, 2010 ; Τσιγκάρας, 2015). Άρα σύμφωνα με τα προαναφερόμενα κάνοντας μια λεπτομερή περιγραφή της αρχής λειτουργίας ενός κινητήρα Otto, αρχικά πραγματοποιείται πρόσμιξή του καυσίμου με τον απαιτούμενο ατμοσφαιρικό αέρα για την καύση, η οποία πραγματοποιείται μέσα στον κύλινδρο με την βοήθεια μιας ειδικής βαλβίδας αναμείξεως που συνδυάζεται τις περισσότερες φορές και με τη βαλβίδα εισαγωγής. Ο κινητήρας Otto κατά γενική περιγραφή αναρροφά ομογενές μείγμα αέρα – καυσίμου (ατμών) που προετοιμάζεται σε ένα ειδικό όργανο που καλείται εξαεριωτής. Ωστόσο, υπάρχουν και διατάξεις στις οποίες η έγχυση του καυσίμου (βενζίνης) γίνεται μηχανικά με τη βοήθεια συγκροτήματος αντλίας καυσίμου – εγχυτήρα. Αυτές οι διατάξεις μπορούν να διακριθούν περαιτέρω στα εξής συστήματα:

- Συνεχούς εγχύσεως: αδιάκοπη έγχυση της βενζίνης σε κατάλληλη θέση του σωλήνα εισαγωγής του αέρα
- Διακοπτόμενης εγχύσεως: χωριστή έγχυση της βενζίνης σε κάθε κύλινδρο

Σημειώνεται ότι τα συστήματα διακοπτόμενης εγχύσεως χωρίζονται σε εμμέσου εγχύσεως όπου η έγχυση πραγματοποιείται λίγο πριν τη βαλβίδα εισαγωγής και σε αμέσου εγχύσεως όπου η έγχυση πραγματοποιείται εντός του κυλίνδρου (Βλαϊκίδης, 2014 ; Λουράντος 2014.

Όμως αναφέρεται ότι υπάρχει και μία άλλη εκδοχή του κινητήρα Otto όπου είναι ο δίχρονος, ο οποίος χρησιμοποιείται πλέον μόνο σε πολύ μικρά οχήματα και άλλες μονάδες μικρής ισχύος. Ο Maybach που ήταν υπεύθυνος για το σχεδιασμό των κινητήρων στο εργοστάσιο Deutz, βελτίωσε διάφορες τεχνικές λεπτομέρειες αυτού του κινητήρα και ήδη το έτος 1876 τον παρουσίασε στην αγορά με το όνομα Deutz-A-Motor.

Η ισχύς του ήταν πάλι περί τα 2 kW, αλλά με καλύτερο βαθμό αποδόσεως. Το αμέσως επόμενο έτος αυξήθηκε η ισχύς στα 3,5 kW (~5 PS) και η εμπορική επιτυχία του έδωσε τη δυνατότητα για περισσότερες βελτιώσεις. Διάφορες εταιρίες στη Γερμανία και το εξωτερικό έλαβαν άδεια κατασκευής του τετράχρονου κινητήρα κι έτσι διαδόθηκε ταχύτατα η χρήση του σε διάφορες παραγωγικές μηχανές.

Όπως συμβαίνει συνήθως με τις μεγάλες ανατροπές, το εργοστάσιο Deutz δεν μπόρεσε να προσαρμοστεί εύκολα στην παραγωγή της νέας μηχανής, γιατί οι εγκαταστάσεις παραγωγής του παλιού κινητήρα Otto δεν είχαν ακόμα αποσβεστεί. Ο Daimler και ο Maybach αποχώρησαν κατόπιν αυτού και ίδρυσαν το έτος 1882μια νέα εταιρία στο Cannstatt, κοντά στη Στουτγάρδη, όπου άρχισε να παράγεται ο νέος ελαφρύς και πολύστροφος βενζινοκινητήρας με ικανοποιητική ισχύ που ήταν κατάλληλος για οχήματα. Το έτος 1885, κυκλοφόρησε ένα δίτροχο με τον κινητήρα Otto και το έτος 1886 κυκλοφόρησαν τα πρώτα οχήματα με κινητήρα με υγρό καύσιμο. Με αυτή την επιτυχία άρχισε να μειώνεται το ενδιαφέρον για τα ατμοκίνητα οχήματα και άρχισε η εποχή των βενζινοκίνητων που διαρκεί, με ένα πλήθος βελτιώσεων και τροποποιήσεων, μέχρι των ημερών μας.

Οι σημερινοί βενζινοκινητήρες για οχήματα έχουν βαθμό αποδόσεως (χημική σε μηχανική ενέργεια) στην περιοχή τιμών 20-30%. Με τις τριβές στα μηχανικά μέρη του οχήματος και των ελαστικών στο έδαφος ο συνολικός βαθμός αποδόσεως ενός οχήματος είναι ακόμα μικρότερος (Καρόφυλλος, 2010).

1.4.2. Πετρελαιοκινητήρας Diesel

Στον κινητήρα Diesel δεν εισάγεται εύφλεκτο μείγμα καυσίμου-αέρα, το οποίο πυροδοτείται, αλλά διαχέεται το καύσιμο με ισχυρό περίσσευμα αέρα, το οποίο συμπιέζεται με μια σχέση 25:1 και αυτό-αναφλέγεται σε θερμοκρασία που κυμαίνεται από 700 έως 900^{o}C. Οι κινητήρες αυτοί αντέχουν σε πολύ υψηλές πιέσεις, πράγμα που στη δεκαετία του 1890 δεν ήταν εύκολο να υλοποιηθεί. Ο κινητήρας αυτός, ανακοινώθηκε ως ευρεσιτεχνία το έτος 1892 από το Γερμανό μηχανικό Rudolf Diesel (Ντίζελ, 1858 -1913) και μελετήθηκε στα έτη 1893-1897 με χρηματική υποστήριξη της εταιρίας Friedrich Krupp AG. Το 1893 εξερράγη ένας κινητήρας στο εργαστήριο, λόγω των πολύ υψηλών πιέσεων λειτουργίας και μόνο τυχαία γλίτωσε ο Diesel το θάνατο. Το πρώτο λειτουργικά ολοκληρωμένο δείγμα με καλό βαθμό αποδόσεως και εξοικονόμηση καυσίμου, κατασκευάστηκε στο εργοστάσιο της εταιρίας MAN στην πόλη Augsburg της Βαυαρίας.

Με την πάροδο των χρόνων ιδρύθηκαν εργοστάσια σε διάφορες ευρωπαϊκές πόλεις για τη μαζική παραγωγή κινητήρων Diesel. Το έτος 1908 κατασκευάστηκαν, αφενός ο πρώτος μικρού μεγέθους κινητήρας για ελαφριά οχήματα, αφετέρου το πρώτο όχημα βαρέων μεταφορών και η πρώτη σιδηροδρομική μηχανή έλξης με κινητήρα Diesel. Έκτοτε περιορίστηκε η ατμομηχανή σταδιακά σχεδόν αποκλειστικά σε παλιές μονάδες παραγωγής και σε λίγα πλοία. Στο λιμάνι της Νέας Υόρκης ήταν το έτος 1920 μόνο οι μαούνες ακόμα ατμοκίνητες, όλα τα εμπορικά πλοία διέθεταν ήδη κινητήρες Diesel (Καρόφυλλος, 2010).

Τα βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του κινητήρα Diesel είναι τα εξής (Τσιγκάρας, 2015):

- Το καύσιμο και ο αέρας αναμιγνύονται στον κύλινδρο
- Λόγω της υψηλής συμπίεσης υπερθερμαίνεται το καύσιμο μείγμα και αυτό-αναφλέγεται

- Η ισχύς του κινητήρα ρυθμίζεται με την ποσότητα του εισερχόμενου καυσίμου.

Αναλυτικότερα η αρχή λειτουργίας ενός πετρελαιοκινητήρα είναι ως εξής, αρχικά αναρροφά πάντα ατμοσφαιρικό αέρα και χρησιμοποιεί για καύσιμα τα πιο βαριά υγρά της βενζίνης της κατηγορίας των πετρελαίων, τα οποία είναι λιγότερο πτητικά και πιο οικονομικά. Για να πραγματοποιηθεί ο σχηματισμός του καυσίμου μείγματος, το πετρέλαιο εισάγεται στον κύλινδρο, και διασκορπίζεται στη μάζα του αέρα που έχει ήδη συμπιεστεί, με τη βοήθεια μηχανικής εγχύσεως. Το σύστημα που χρησιμοποιείται είναι αντλία καυσίμου – εγχυτήρα , η οποία δημιουργεί και την απαιτούμενη υψηλή πίεση (Βλαϊκίδης, 2014 ; Λουράντος 2014).

Ο Diesel είχε δοκιμάσει κατά τη φάση ανάπτυξης του κινητήρα του διάφορα υγρά καύσιμα, είχε όμως προβλήματα με τις αντλίες που θα διεκπεραίωναν την έκχυση του καυσίμου. Τελικά κατέληξε σε ένα κλάσμα αποστάξεως ορυκτού πετρελαίου, το οποίο ονομάστηκε επίσης ντίζελ, όπως και ο κινητήρας. Με κατάλληλες μετατροπές, ο κινητήρας αυτός είναι δυνατόν να λειτουργήσει και με άλλα υγρά και αέρια καύσιμα όπως για παράδειγμα με φυτικά έλαια. Στις μέρες μας χρησιμοποιείται για την εκκίνηση των πετρέλαιο-κινητήρων, ιδίως σε ψυχρό περιβάλλον, ένα ηλεκτρικά πυρακτωμένο τύλιγμα (περίπου όπως ο αναπτήρας στο αυτοκίνητο) για την εύκολη έναυση και την αποφυγή καυσαερίων.

Σε σύγχρονους κινητήρες Diesel ο βαθμός αποδόσεως (χημική σε μηχανική ενέργεια) κυμαίνεται από 15 έως 50%, όπου οι μεγάλες τιμές αφορούν κινητήρες μεγάλης ισχύος (πλοία, τραίνα κλπ.) και οι μικρές τιμές κινητήρες μικρών οχημάτων. Ο Diesel δεν είχε ποτέ σημαντικά οικονομικά οφέλη από την εφεύρεσή του, αφού οι διάφορες εταιρίες που συνέβαλαν στην ανάπτυξη του κινητήρα διεκδικούσαν μερίδιο από τα δικαιώματα του εφευρέτη, με αποτέλεσμα να εξελιχθούν πολύχρονες και πολυέξοδες δίκες, οι οποίες επηρέασαν τη σωματική και την ψυχική υγεία του Diesel. Ακριβώς, λόγω του καταθλιπτικού χαρακτήρα του, έφυγε ο μεγάλος εφευρέτης με περίεργο τρόπο από τη ζωή το 1913 (Καρόφυλλος, 2010 ; Τσιγκάρας, 2015).

1.5. ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

1.5.1. Ρύθμιση της ισχύος στους κινητήρες Otto

Η ρύθμισης της ισχύος στους κινητήρες Otto μπορεί να πραγματοποιηθεί από τον εξαερωτή. Το ομογενές μείγμα που αποτελείται από αέρα – καύσιμο, προετοιμάζεται σε μια στενή περιοχή αναμείξεως, που περιλαμβάνει τη στοιχειομετρική τιμή και είναι απαραίτητη για να γίνει η έναυση με τον σπινθήρα. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται η διάδοση της φλόγας, συγκεκριμένα η κίνηση του μετώπου της φλόγας μέσα από το άκαυστο ομογενές μείγμα. Η ρύθμιση της ισχύος του κινητήρα Otto βασικά είναι ποσοτική. Δίνεται η δυνατότητα αυξομείωσης του έργου και την ισχύος με τη μεταβολή της ποσότητας του μείγματος που πρόκειται να γεμίσει τον κύλινδρο. Η μεταβολή της ποσότητας επιτυγχάνεται με μία στραγγαλιστική δικλείδα, γνωστή και ως καρμπυρατέρ ή πεταλούδα, η οποία ρυθμίζει την πίεση κατά την είσοδο στους κυλίνδρους. Ταυτόχρονα όμως η ποιότητα του μείγματος παραμένει σταθερή και σχετικά κοντά στη στοιχειομετρική.

Όταν ένας κινητήρας Otto μπορεί να χρησιμοποιεί την άμεση ή την ηλεκτρονική έγχυση. Στην πρώτη περίπτωση, δηλαδή της άμεσης έγχυσης το σύστημα αποτελείται από μια αντλία και έναν διανομέα καυσίμου. Η ρύθμιση της δόσης της βενζίνης έχει ως βασικό μέγεθος την παροχή του αέρα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε αυτό το σημείο επιτυγχάνεται η σύνθεση του μείγματος που χρειάζεται κάθε φορά. Το σύστημα αυτό παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα και χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε κινητήρες αυτοκινήτων υψηλής ποιότητας αλλά και σε αεροπορικούς κινητήρες, λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής. Στην δεύτερη περίπτωση του κινητήρα Otto με ηλεκτρονική έγχυση η ρύθμιση της ισχύος πραγματοποιείται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Συγκεκριμένα ο ηλεκτρονικός υπολογιστής επεξεργάζεται τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας όπως την ταχύτητα περιστροφής, την υποπίεση στον αγωγό εισαγωγής, τη θέση της ρυθμιστικής δικλείδας, τη θερμοκρασία του αέρα, του ψυκτικού μέσου κτλ.

Αυτό που θα πρέπει να τονιστεί είναι ότι υπάρχουν δύο ειδικές μορφές τύπων κινητήρων Otto, τους κινητήρες στρωματικής γομώσεως και τους κινητήρες πτωχού μείγματος. Ο κινητήρας Otto με στρωματική γόμωση διαφέρει από τον κλασικό κινητήρα Otto αφού σε αυτόν δημιουργείται ένα ανομοιογενές μείγμα καυσίμου – αέρα. Συγκεκριμένα γύρωθεν του σπινθηριστή το μείγμα είναι πλούσιο με συνέπεια να γίνεται ανάφλεξη. Ωστόσο, στην περιοχή μακριά από αυτόν το μείγμα είναι πτωχό. Ο τρόπος περιγράφηκε είναι και αυτός που επιτυγχάνεται η διάδοση της φλόγας και στο πτωχό τμήμα του μείγματος και μάλιστα με πολύ μικρό κίνδυνο κρουστικής καύσεως αφού αυτή ευνοείται για τιμές της σύνθεσης κοντά στη στοιχειομετρική. Ο κινητήρας Otto πτωχού μείγματος βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη όμως εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα. Στην περίπτωση του λοιπόν, επιτρέπεται η καύση πολύ πτωχών μειγμάτων και αυτό πραγματοποιείται λόγω αυξημένη τύρβης της γομώσεης. Επίσης, γίνεται χρήση υψηλών βαθμών συμπίεσης καθώς συγκεντρώνονται στο θάλαμο καύσεων. Με αυτό τον τρόπο τελικά γίνεται βελτίωση του βαθμού απόδοσης και τη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και όλα αυτά με σχετικά φθηνότερη κατασκευή (Βλαϊκίδης, 2014).

1.5.2. Ρύθμιση της ισχύος στους κινητήρες Diesel

Οι κινητήρες Diesel παρουσιάζουν διαφορές συγκρινόμενη με τους κινητήρες Otto, αφού η καύση ετερογενούς μείγματος καυσίμου – αέρα και το υγρό καύσιμο εγχύεται στο τέλος της συμπίεσης. Συγκεκριμένα πραγματοποιείται μηχανική έγχυση του καυσίμου στον κύλινδρο κάτω από την επίδραση υψηλής πίεσης της τάξεως από 150 έως 1500 bar. Το σύστημα προσαγωγής του καυσίμου από κατασκευαστικής και λειτουργικής άποψης παρουσιάζει υψηλές απαιτήσεις και αποτελείται από την αντλία καυσίμου, τον εγχυτήρα και τον συνδεδεμένο με αυτά σωλήνα καταθλίψεως.

Η ρύθμιση ισχύος του κινητήρα Diesel είναι ποιοτική, σε αντίθεση με του κινητήρα Otto που όπως προαναφέρθηκε είναι ποσοτική. Η αυξομείωση του έργου και της ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με την μεταβολή της ποιότητας του μείγματος του καυσίμου, ενώ η ποσότητα του αέρα που αναρροφάται,άρα ουσιαστικά και του μείγματος, παραμένει πρακτικά σταθερή. Στον κινητήρα Diesel , το μέγιστο φορτίο τίθεται συνήθως από την καύση, δηλαδή αντιστοιχεί στο φορτίο πέρα από το οποίο έχουμε απαράδεκτο καπνό (άκαυστο άνθρακα) στην εξαγωγή.

Αυτό που θα πρέπει να σημειωθεί για τον κινητήρα Diesel είναι ότι θα πρέπει να λειτουργεί σε ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να πραγματοποιείται ο κατάλληλος έλεγχος έγχυσης του καυσίμου και της κίνησης του αέρα στον θάλαμο καύσης. Η καλή ποιότητα έγχυση του καυσίμου οφείλεται στα ακροφύσια πολλών οπών υπό υψηλή διαφορά πιέσεως έγχυσης, ενώ το υψηλό επίπεδο κίνησης του αέρα επιτυγχάνεται με την κατάλληλη διαμόρφωση του θαλάμου καύσης. Αυτός είναι και ο σκοπός που υπάρχει ενιαίος θάλαμος καύσης με άμεση έγχυση και ο διμερής θάλαμος καύσης έμμεσης έγχυσης. Στους κινητήρες μεγάλων και μεσαίων διαστάσεων χρησιμοποιείται ο πρώτος τύπος θαλάμου (Βλαϊκίδης, 2014).

1.6. ΒΟΗΘΗΤΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΩΝ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ ΜΕΚ

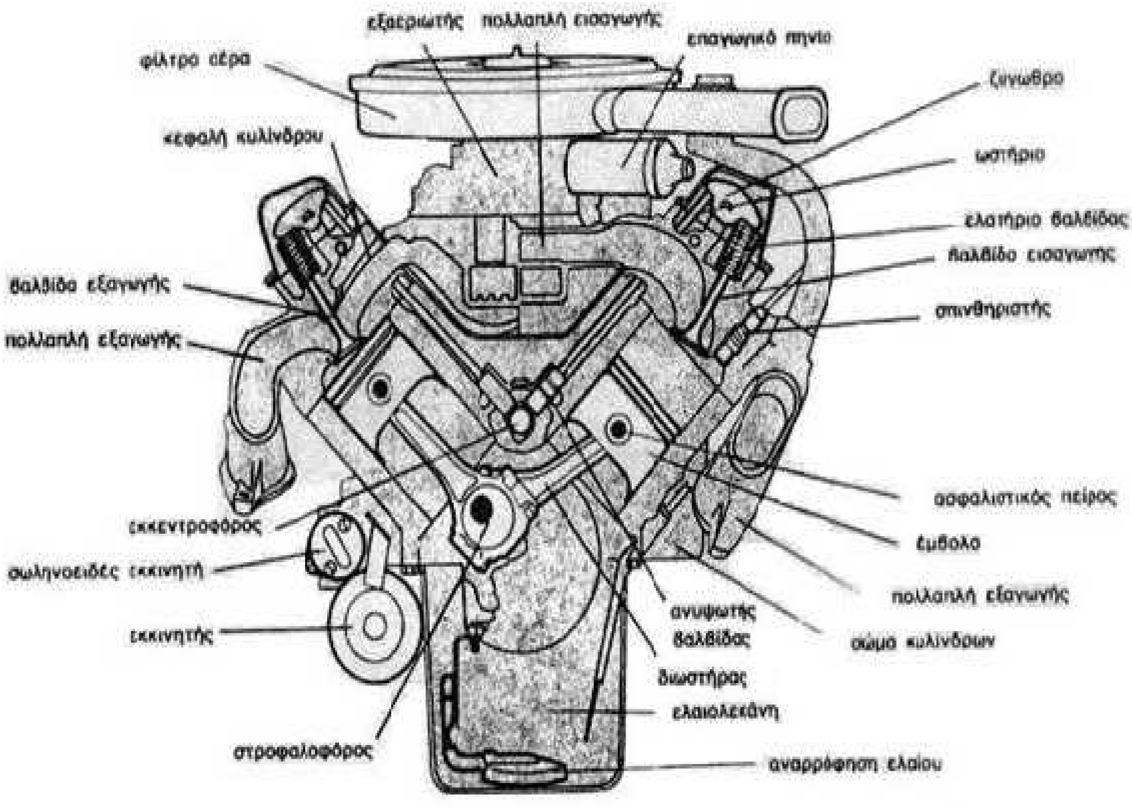
Για την καλή λειτουργία μια εμβολοφόρου μηχανής εσωτερικής καύσης σημαντικό ρόλο παίζει το σύστημα ψύξης και λίπανσης.

Ο ρόλος του συστήματος ψύξης είναι σημαντικός διότι υπάρχει ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στα μέρη που βρίσκονται εκτεθειμένα στα αέρια του θαλάμου καύσεως. Τα μέρη αυτά είναι το κάλυμμα του κυλίνδρου, το χιτώνιο του κυλίνδρου καθώς και το έμβολο. Γίνεται κατανοητό ότι είναι απαραίτητη η ψύξη των μερών αυτών, όμως η διαδικασία αυτή οδηγεί στην κατανάλωση ενός σημαντικού ποσοστού θερμικής ενέργειας που παράγεται από το καύσιμο. Σύμφωνα με τον τρόπο ψύξης γίνεται ο διαχωρισμός σε υδρόψυκτους και σε αερόψυκτους κινητήρες. Οι υδρόψυκτοι κινητήρες είναι οι συνηθέστεροι και παρουσιάζονται σε όλες τις διαστάσεις των κινητήρων, ενώ οι αερόψυκτοι είναι κατάλληλοι για κινητήρες μικρών διαστάσεων.

Ωστόσο, εξίσου σημαντική για την «σωστή» λειτουργία του κινητήρα είναι η λίπανση αφού με τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα ελάττωσης των τριβών μεταξύ των κινούμενων μερών. Το σύστημα της λίπανσης αποτελείται από μια ειδική αντλία που αναρροφά το λιπαντικό έλαιο από την ελαιολεκάνη του στροφαλοθαλάμου με τη χρήση ειδικών φίλτρων και στη συνέχεια το καταθλίβει δια μέσου σωληνώσεων ή οχετών στις θέσεις που απαιτείται η λίπανση. Στους κινητήρες μεγάλης ισχύος το έλαιο που χρησιμοποιείται για τη λίπανση ψύχεται περαιτέρω με τη βοήθεια νερού ή αέρα (Βλαϊκίδης, 2014).

1.7. ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΜΕΡΗ ΕΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Εκτός από το είδος του κύκλου (2-Χ και 4-Χ) η κυριότερη δομική διαφορά ανάμεσα σε κινητήρες αυτοκινήτων, αεροσκαφών, θαλάσσης ή στάσιμους κινητήρες έγκειται στον τρόπο εδράσεις τους. Όταν χρησιμοποιείται ο συμπλέκτης και το κιβώτιο ταχυτήτων, όπως στα αυτοκίνητα, ο κινητήρας αποτελεί μια αυτόνομη μονάδα ισχύος. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με 4-Χ κινητήρα βενζίνης.



Εικόνα 1.4: Κινητήρας 4-Χ κινητήρα
(Καρόφυλλος, 2010)

Ακολουθεί η ανάλυση των βασικών μερών του κινητήρα σύμφωνα με τον Καρόφυλλο (2010):

❖ ***Σώμα κυλίνδρων***

Το κύριο δομικό στοιχείο των κινητήρων είναι το σώμα κυλίνδρων. Το σώμα αυτό αποτελεί τον σκελετό και ταυτόχρονα φέρει την πλάκα με την οποία ο κινητήρας στηρίζεται στο πλαίσιο. Το σώμα των κυλίνδρων είναι συνήθως από χυτοσίδηρο. Ο στροφαλοθάλαμος σχηματίζεται από το κάτω μέρος του σώματος και από την ελαιολεκάνη, που περικλείει το κάτω μέρος του κινητήρα και χρησιμεύει ως δεξαμενή του λιπαντικού ελαίου. Η διάταξη των κυλίνδρων είναι δύο ειδών-κατακόρυφη ή ευθύγραμμη ή σχήματος V. Ο ευθύγραμμος κινητήρας έχει μια σειρά κυλίνδρων τοποθετημένων κατακόρυφα ή και πλάγια και ευθυγραμμισμένων με τους τριβείς του στροφαλοφόρου. Ο κινητήρας τύπου V έχει δύο σειρές κυλίνδρων, οι άξονες των οποίων σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 60 ή 90 μοιρών. Οι κινητήρες V-8 (οκτώ κύλινδροι) είναι συνήθως 90 μοιρών. Ορισμένοι μικροί εξακύλινδροι κινητήρες αεροπλάνων, τέλος, έχουν οριζόντιους και αντίθετα τοποθετημένους κυλίνδρους(κινητήρας boxer).

Στο χώρο κατά μήκος του σώματος των κυλίνδρων βρίσκεται ο εκκεντροφόρος άξονας, που ενεργοποιεί τις βαλβίδες. Κατάλληλη διάταξη συνδέει τον εκκεντροφόρο με τον στροφαλοφόρο άξονα. Το κωνοειδές κέλυφος που περικλείει τον σφόνδυλο και στον οποίο προσαρμόζεται το κιβώτιο ταχυτήτων σχηματίζεται στο πίσω άκρο του σώματος. Γύρω από τους κυλίνδρους διαμορφώνονται κατάλληλοι χώροι για την κυκλοφορία του ψυκτικού υγρού

Εικόνα 1.5: Σώμα κυλίνδρων (Καρόφυλλος, 2010)

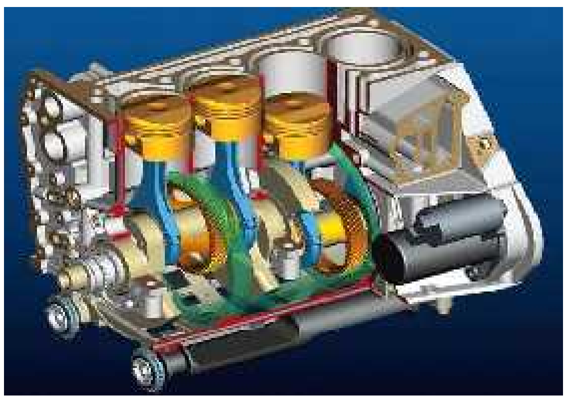
❖ ***Θάλαμος καύσης***

Ο όγκος του θαλάμου καύσης σε σχέση προς τον όγκο εκτόπισης του εμβόλου καθορίζει τον λόγο συμπίεσης του κινητήρα. Ο όγκος εκτόπισης του εμβόλου είναι αυτός που σαρώνεται σε μία διαδρομή. Ο λόγος του μεγαλύτερου δυνατού όγκου – με το έμβολο στο χαμηλότερο σημείο του- προς τον μικρότερο δυνατό όγκο-με το έμβολο στο ανώτερο σημείο-ονομάζεται λόγος συμπίεσης. Ο λόγος συμπίεσης είναι ο σημαντικότερος παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η θεωρητική απόδοση του κύκλου του κινητήρα.

Εικόνα 1.6: Θάλαμος καύσης (Καρόφυλλος, 2010)

❖ ***Έμβολα***

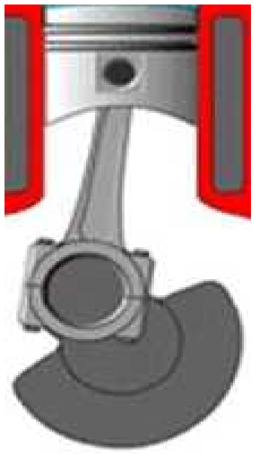
Τα έμβολα έχουν μορφή ανεστραμμένου κυπέλλου και είναι από χάλυβα ή κράμα αλουμινίου. Το επάνω άκρο τους σχηματίζει την κατώτερη επιφάνεια του θαλάμου καύσης και δέχεται τη δύναμη από τα καυσαέρια. Η εξωτερική επιφάνεια εφαρμόζει στο εσωτερικό του κυλίνδρου, ενώ ειδικοί δακτύλιοι, τοποθετημένοι σε αύλακες της επιφάνειας αυτής, στεγανοποιούν τον υπερκείμενο χώρο. Σε ειδικές ενισχυμένες υποδοχές στα πλευρά του εμβόλου προσαρμόζεται πείρος από σκληρυσμένο χάλυβα, που διαπερνά το ένα άκρο του διωστήρα.



Εικόνα 1.7: Εμβολα (Καρόφυλλος, 2010)

❖ ***Διωστήρας και στροφαλοφόρος***

Ο κατασκευασμένος από σφυρήλατο χάλυβαδιωστήρας συνδέει το έμβολο με τον αντίστοιχο στρόφαλο της ατράκτου, μετατρέποντας έτσι την παλινδρομική κίνηση του εμβόλου σε περιστροφική του στροφάλου. Κάθε διωστήρας στον ευθύγραμμο κινητήρα, ή κάθε ζεύγος διωστήρων στον κινητήρα τύπου V, συνδέεται με έναν στρόφαλο της ατράκτου. Κάθε στρόφαλος αποτελείται από έναν πείρο, που συνδέεται με τον αντίστοιχο διωστήρα και από δύο ακτινικές μάζες, εκατέρωθεν του στροφαλοφόρου άξονα, που στρέφονται γύρω από κύριους τριβείς, ή τριβείς βάσης. Η θέση κάθε στρόφαλου κατά μήκος του στροφαλοφόρου εξαρτάται από τη σειρά ανάφλεξης των κυλίνδρων. Η σειρά ανάφλεξης υπαγορεύεται πρωτίστως για λόγους κατανομής ισχύος, στρεπτικών ταλαντώσεων και τάξης ζυγοστάθμισης έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι κραδασμοί. Υπάρχει μια τυπική σειρά ανάφλεξης κατά τον τετρακύλινδρο κινητήρα όπου είναι 1-3-2-4 και για τον εξακύλινδρο 1-5-3-6-2-4,που δείχνει την πρακτική της εναλλαγής διαδοχικών θέσεων των κυλίνδρων.



Εικόνα 1.8:Διωστήρας και στροφαλοφόρος (Καρόφυλλος, 2010)

Η ευστάθεια του στροφαλοφόρου βελτιώνεται με την προσθήκη αντίβαρων και προσθήκη κατάλληλων συστημάτων αντιστάθμισης. Ο σχεδιασμός του στροφαλοφόρου καθορίζει και το μήκος διαδρομής του εμβόλου. Ο λόγος της διαδρομής του εμβόλου προς τη διάμετρο του κυλίνδρου αποτελεί σημαντική παράμετρο σχεδιασμού. Στα πρώτα χρόνια του αυτοκινήτου, οι κατασκευαστές χρησιμοποιούσαν τιμές μεταξύ 1 και 1.5. Καθώς όμως οι ταχύτητες αύξαναν και έγινε αντιληπτό ότι οι απώλειες λόγω τριβών μεγάλωναν με την παλινδρομική κίνηση των εμβόλων, παρά με την ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου, η διαδρομή του εμβόλου μίκραινε και σε ορισμένες περιπτώσεις έφθασε να γίνει κατά 20% μικρότερη της διαμέτρου του.

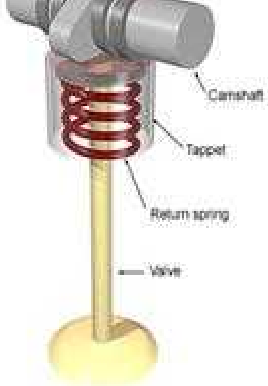
.

❖ ***Βαλβίδες - ωστήρια - ζύγωθρα***

Στον κινητήρα με βαλβίδες στην κεφαλή, τα ωστήρια που συνδέονται με τα αντίστοιχα έκκεντρα κινούνται κατακόρυφα μέχρι να συναντήσουν τα ζύγωθρα, που είναι πάνω στην κεφαλή των κυλίνδρων. Τα ζύγωθρα συνδέονται στο άλλο άκρο τους με τα στελέχη των βαλβίδων και μεταδίδουν σε αυτές την κίνηση από το αντίστοιχο έκκεντρο. Ανάμεσα στο στέλεχος και στο ζύγωθρο προβλέπεται διάκενο, για το κατάλληλο κλείσιμο των βαλβίδων, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του κινητήρα. Η βαλβίδα εισαγωγής πρέπει να είναι ανοιχτή όταν το έμβολο κατέρχεται κατά τον χρόνο εισαγωγής και η βαλβίδα εξαγωγής να είναι ανοιχτή όταν το έμβολο ανέρχεται κατά τον χρόνο εξαγωγής. Θα φαινόταν φυσικό επομένως το ανοιγοκλείσιμο να γίνεται στα κατάλληλα άνω και κάτω νεκρά σημεία.

Ο χρόνος όμως για το ανοιγοκλείσιμο των βαλβίδων καθώς και η υψηλή ταχύτητα στην έναρξη και τη λήξη της ροής των αερίων απαιτούν οι διαδικασίες του ανοίγματος να προηγούνται ελαφρώς του άνω νεκρού σημείου, ενώ οι αντίστοιχες του κλεισίματος να έπονται του κάτω νεκρού σημείου.

Έτσι, οι φάσεις ανοίγματος γίνονται νωρίτερα και οι αντίστοιχες του κλεισίματος καθυστερούν λίγο, ώστε με κατάλληλη διαμόρφωση το έκκεντρο να επιτρέπει προοδευτικό αρχικό άνοιγμα και το τελικό κλείσιμο. Άλλος λόγος που επιβάλλει το πρωθύστερο του ανοίγματος και κλεισίματος είναι η αρτιότερη πλήρωση και εκκένωση των κυλίνδρων.



Εικόνα 1.9: Βαλβίδες, ωστήρια και ζύγωθρα (Καρόφυλλος, 2010)

❖ ***Εκκεντροφόρος***

Ο εκκεντροφόρος ανοιγοκλείνει τις βαλβίδες και παίρνει κίνηση από τον στροφαλοφόρο. Το ανοιγοκλείσιμο των βαλβίδων συμπληρώνεται σε μια περιστροφή του εκκεντροφόρου. Επιπλέον, ο άξονας αυτός έχει τόσα εξογκώματα όσε είναι οι βαλβίδες που ανοιγοκλείνει. Ακόμα χαρακτηρίζεται από κάποια νούμερα που δηλώνουν βύθισμα της βαλβίδας και την διάρκεια που αυτή παραμένει ανοικτή.

Εικόνα 1.10: Εκκεντροφόροι [9]

❖ ***Σφόνδυλος***

Σε κάθε παλινδρομικό κινητήρα η ροπή (δύναμη περιστροφής) εξασκείται διακεκομμένα κάθε φορά που γίνεται κάπου έναυση. Στα ενδιάμεσα διαστήματα, το ανερχόμενο κατά τη συμπίεση έμβολο και η αντίσταση του φορτίου ασκούν αρνητική ροπή. Η εναλλάξ επιτάχυνση από τις ώσεις ισχύος και η επιβράδυνση που οφείλεται στη συμπίεση, έχουν ως αποτέλεσμα ανομοιόμορφη περιστροφή.

Εικόνα 1.11: Σφόνδυλος [10]

Ο ρόλος του σφονδύλου είναι προσαρμοσμένος στο άκρο του στροφαλοφόρου, είναι να εξουδετερώνει την ανομοιομορφία της κίνησης. Ο σφόνδυλος είναι ένας βαρύς χυτοσίδηρος τροχός. Η μάζα του έχει αρκετή αδρανειακή ορμή, ώστε να ανθίσταται στις μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής του, αναγκάζοντας έτσι τον στροφαλοφόρο να στρέφεται με σταθερή ταχύτητα.

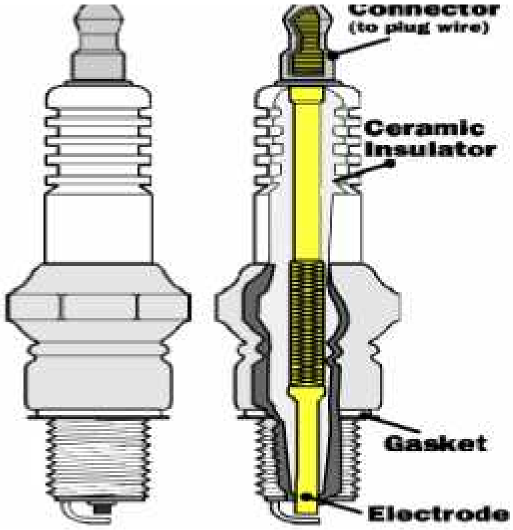
❖ ***Τριβείς***

Ο στροφαλοφόρος άξονας έχει επιφάνειες τριβής σε κάθε πείρο του στροφάλου και στα έδρανα. Τα έδρανα υπόκεινται σε μεγάλα φορτία λόγω των δυνάμεων που ασκούνται από τα έμβολα καθώς και λόγω του βάρους του στροφαλοφόρου και του σφονδύλου. Ένα πολύ μικρό διάκενο ανάμεσα στις επιφάνειες τριβής επιτρέπει την παρουσία ενός λεπτού στρώματος από λιπαντικό έλαιο.

❖ ***Σύστημα ανάφλεξης***

Τα ηλεκτρικά συστήματα ανάφλεξης είναι μαγνητικά ή συστήματα συσσωρευτή και πηνίου. Το μαγνητικό σύστημα είναι αυτοδύναμο και χρειάζεται μόνο τους σπινθηριστές και την καλωδίωση, ενώ το σύστημα συσσωρευτή και πηνίου συνεπάγεται χρήση πολλών εξαρτημάτων. Το κύκλωμα περιλαμβάνει τον συσσωρευτή, ένας πόλος του οποίου γειώνεται, ενώ ο άλλος οδηγεί μέσω διακόπτη στην πρωτεύουσα περιέλιξη του πηνίου και σε έναν αυτόματο διακόπτη. Ο σπινθηριστής όπως έχει προαναφερθεί λειτουργεί κάτω από αντίξοες συνθήκες. Είναι εκτεθειμένος στις υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις του θαλάμου καύσης καθώς και στις ρυπαντικές ιδιότητες των προϊόντων της καύσης. Απαιτεί επομένως μεγαλύτερη συντήρηση και είναι συνήθως το πλέον βραχύβιο εξάρτημα του βενζινοκινητήρα.

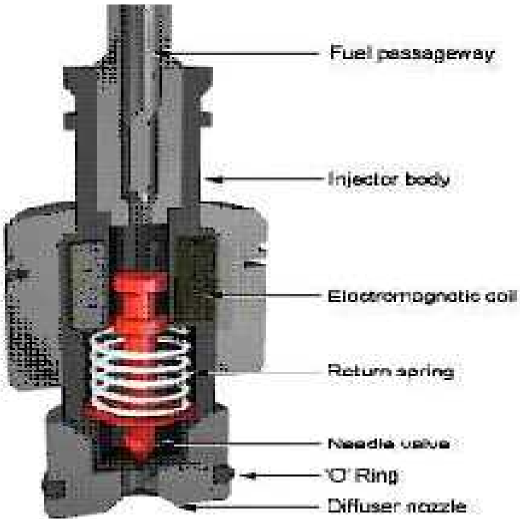
Το σύστημα έναυσης με πυκνωτή παρέχει σπινθήρα με μεγάλη ένταση, καθιστώντας έτσι ευκολότερη την έναυση ενός ψυχρού ή υπερπληρωμένου με καύσιμο κυλίνδρου. Συνεχίζει να προκαλεί σπινθήρα ακόμη και όταν στα ηλεκτρόδιά του σπινθηριστή υπάρχουν αποθέσεις ή έχει μεγαλώσει το διάκενο. Άλλα πλεονεκτήματα του είναι ο μεγαλύτερος χρόνος ζωής του σπινθηριστή, καλύτερη έναυση για μεγαλύτερη περιοχή ταχυτήτων και μεγαλύτερη αντοχή στην υγρασία. Το μαγνητικό σύστημα είναι μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με μόνιμο μαγνήτη, για τη λειτουργία των σπινθηριστών. Το σύστημα αυτό απαιτεί μόνο σπινθηριστές, καλώδια και διακόπτες.



Εικόνα 1.12: Σύστημα ανάφλεξης [11]

❖ ***Εξαεριωτής***

Ο εξαεριωτής της βενζίνης είναι διάταξη που εισάγει καύσιμο σε ρεύμα αέρα, καθώς αυτός εισρέει στον κινητήρα. Ο πλωτήρας, πουενεργοποιεί την βαλβίδα, διατηρείτη στάθμη της βενζίνης σε κατάλληλο επίπεδο. Ο αέρας που εισρέει προσπερνά τη βαλβίδα ρύθμισης της παροχής- τύπου πεταλούδας- και προωθείται προς τους κυλίνδρους. Κατά τη διέλευσή του από τον λαιμό του σωλήνα βεντούρι, ο αέρας επιταχύνεται, δημιουργώντας υποπίεση και προκαλώντας έτσι την έγχυση καυσίμου από τον αναβλυστήρα.



Εικόνα 1.13: Εξαεριωτής
(Καρόφυλλος, 2010)

❖ ***Ψεκασμός καυσίμου***

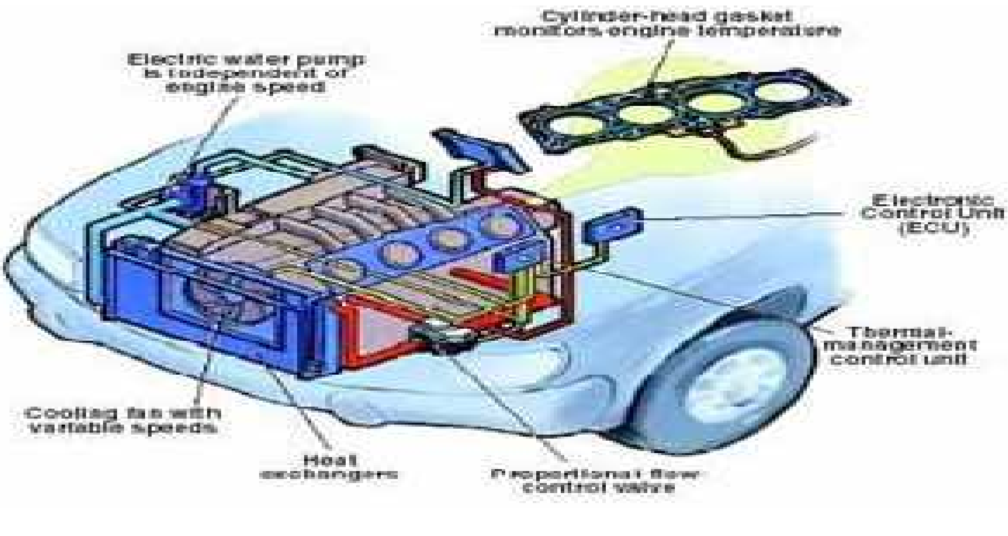
Συστήματα με ψεκασμό βενζίνης, στα οποία το καύσιμο προωθείται με αντλία και ψεκάζεται κατευθείαν στον κύλινδρο, είχαν χρησιμοποιηθεί σε μηχανές αεροπλάνων πριν από τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο. Η απόδοση των κινητήρων αυτών ήταν εξαιρετική, αλλά το μεγάλο κόστος τους, σε σχέση με τον κινητήρα με εξαεριωτήρα, περιόρισε τη διάδοσή τους. Ένα σύγχρονο σύστημα ψεκασμού μπορεί να αποτελείται από μια απλή αντλία με ανάλογο σύστημα διανομής ή από πολλαπλές αντλίες. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα ψεκασμού της βενζίνης είναι:

- Οικονομία καυσίμου λόγω ακριβέστερης αναλογίας καυσίμου προς αέρα
- Περισσότερη ισχύς λόγω της μη θέρμανσης του καυσίμου,
- Αποφυγή τυχόν στερεών αποθέσεων και, τέλος, πιο ομοιόμορφη
- Άμεση τροφοδοσία καύσιμου μίγματος στους κυλίνδρους.

Εικόνα 1.14: Ψεκασμός καυσίμου
(Καρόφυλλος, 2010)

❖ ***Σύστημα ψύξης***

Όπως προαναφέρθηκε οι κύλινδροι των ΜΕΚ χρειάζονται ψύξη. Η διαδικασία ψύξης πραγματοποιείται ως εξής, το υγρό κυκλοφορεί γύρω από τους κυλίνδρους απάγοντας θερμότητα, την οποία αποδίδει στο ψυγείο του κινητήρα. Το κύκλωμα περιλαμβάνει συνήθως θερμοστάτη για να κρατά τη θερμοκρασία στα χιτώνια των κυλίνδρων σταθερή. Στο σύστημα ψύξης επικρατεί συνήθως υπερπίεση για να ανυψώνει το σημείο ζέσης του ψυκτικού μέσου, έτσι ώστε το τελευταίο να διατηρείται σε υγρή κατάσταση και να διευκολύνεται η μεταφορά θερμότητας στο ψυγείο.



Εικόνα 1.15:Μέρη του αυτοκινήτου, περιλαμβάνει και το σύστημα ψύξης
(Καρόφυλλος, 2010)

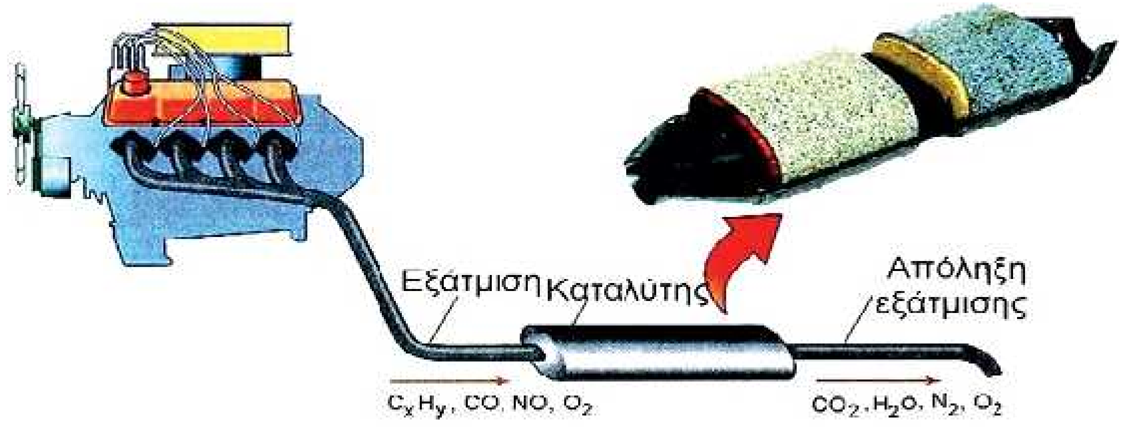
❖ ***Σύστημα λίπανσης***

Η λίπανση όπως προαναφέρθηκε αποσκοπεί στη μείωση των τριβών, επιτυγχάνεται με παρεμβολή ενός υμένα ελαίου ανάμεσα στα τριβόμενα εξαρτήματα. Σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά των λιπαντικών ελαίων παίζει το ιξώδες, που όπως είναι γνωστό εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία. Το σύστημα λίπανσης τροφοδοτείται από την ελαιολεκάνη που βρίσκεται στη χαμηλότερη στάθμη του κινητήρα. Το λιπαντικό προωθείται με αντλία συνήθως οδοντωτή, υπό πίεση, σε σύστημα αγωγών ή διαύλων. Το έλαιο προωθείται υπό πίεση στον στροφαλοφόρο και στους κύριους τριβείς του. Οι στρόφαλοι φέρουν ειδικές οπές που διευκολύνουν να φθάσει το έλαιο μέχρι τον πείρο κάθε στροφάλου. Καθώς το έλαιο εξέρχεται από τις οπές των στροφάλων εκτινάσσεται και διαβρέχει τα τοιχώματα των κυλίνδρων, τα έκκεντρα και τα έμβολα, φθάνοντας μέχρι και τους πείρους των διωστήρων. Πρόσθετα ανοίγματα στα στελέχη των έκκεντρων τροφοδοτούν με έλαιο τους υδραυλικούς μηχανισμούς ανύψωσης των ωστηρίων των βαλβίδων, αν υπάρχουν. Η πίεση του ελαίου στους υδραυλικούς αυτούς ανυψωτές διατηρείται στην επιθυμητή στάθμη με ρυθμιστικές βαλβίδες.

❖ ***Σύστημα εξαγωγής***

Τα καυσαέρια περνούν μέσα από τον σιγαστήρα που περιορίζει τις ηχητικές ταλαντώσεις. Ο σιγαστήρας αποσβένει τις ταλαντώσεις αυτές έτσι ώστε τα καυσαέρια να εξέρχονται σχετικά ομαλά και χωρίς μεγάλο θόρυβο. Οι συνηθέστεροι σήμερα σιγαστήρες χρησιμοποιούν θαλάμους συντονισμού που επικοινωνούν με τους χώρους διέλευσης των καυσαερίων. Από κάθε θάλαμο ξεκινούν ταλαντώσεις σε συχνότητα που καθορίζεται από τις διαστάσεις του.

Οι ταλαντώσεις αυτές εξουδετερώνουν ή απορροφούν τις ταλαντώσεις του διερχόμενου ρεύματος των καυσαερίων, που έχουν την ίδια περίπου συχνότητα. Αρκετοί τέτοιοι θάλαμοι, ένας για κάθε μία από τις επικρατέστερες συχνότητες στο ρεύμα των καυσαερίων μειώνουν αποτελεσματικά τον θόρυβο. Στο σύστημα εξαγωγής προστίθενται συχνά συσκευές ελέγχου των καυσαερίων, με σκοπό τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Σε σειρά με το σιγαστήρα τοποθετούνται κατάλληλοι καταλύτες (υλικά που διευκολύνουν επιλεκτικά επιθυμητές χημικές αντιδράσεις), έτσι ώστε να μειώνεται η εκπομπή άκαυστων υδρογονανθράκων ή μονοξειδίου του άνθρακα.



Εικόνα 1.16: Καταλυτικός μετατροπέας προσαρμοσμένος στο σύστημα εξαγωγής των καυσαερίων (εξάτμιση) του αυτοκινήτου [14]

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Ατμοσφαιρικός κινητήρας: ορίζεται ο κινητήρας εσωτερικής καύσης, στον οποίο η πίεση εισαγωγής του αέρα που χρησιμοποιείται για την καύση δεν υπερβαίνει την ατμοσφαιρική πίεση. Ωστόσο σαν ατμοσφαιρικός μπορούν να χαρακτηριστούν όλοι οι κινητήρες οι οποίοι δεν χρησιμοποιούν κάποιο σύστημα υπερτροφοδότησης (τούρμπο ή μηχανικό συμπιεστή) (Αρχοντίτσης Π., 2008).

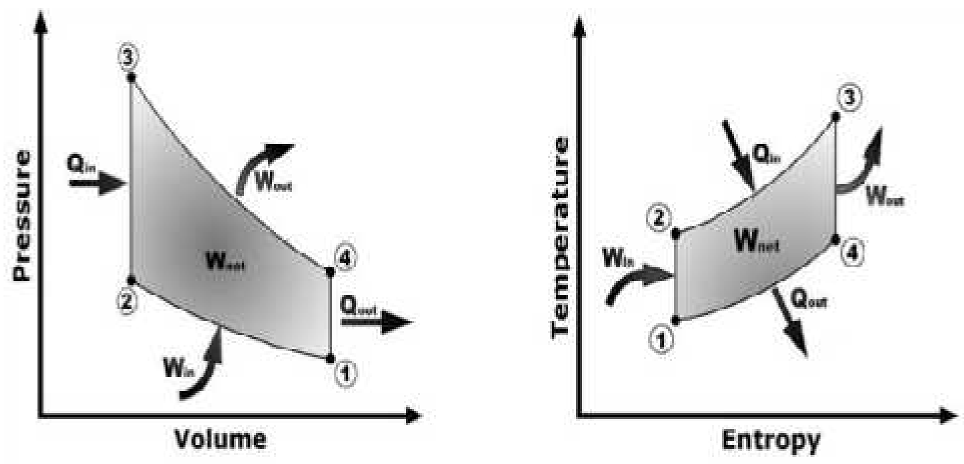
2.2. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

2.2.1. Ιδανικές συνθήκες λειτουργίας

Οι ιδανικές συνθήκες λειτουργίας είναι ιδεατές κυκλικές διαδικασίες, συμφώνα με τις οποίες υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργήσει μια ιδανική μηχανή. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίες αποκλίνουν αρκετά από τις ιδανικές. Ωστόσο, βάσει αυτών δίνεται η δυνατότητα να μελετηθούν και να αναλυθούν πλήρως οι πορείες εργασίας σε πραγματικές μηχανές. Για τους βενζινοκινητήρες ή αλλιώς κινητήρες Otto που θα μελετηθούν στην παρούσα πτυχιακή εργασία έχει επιλεχθεί ως ιδανική διεργασία η ισόχωρη διεργασία διότι η ισόχωρη διεργασία είναι ιδανική για τους τετράχρονους κινητήρες Otto. Σε αυτή την διεργασία το καύσιμο καίγεται ακαριαία δηλαδή υπό σταθερό όγκο (Μαυρίδης, 2007)

Ο κύκλος αυτός αποτελείται από τις εξής τέσσερις διεργασίες , όπως απεικονίζονται και στα θερμοδυναμικά επίπεδα (P,V) και (T,S) του Διαγράμματος 2.1 (Βλαϊκίδης, 2014):

- Μεταβολή 1-2 : ισεντροπική συμπίεση του αέρα , κατά το λόγο των όγκων $V_1/V_2=ε$ (ή των ειδικών όγκων V_2/V_1,εφόσον η μάζα m του εργαζόμενου μέσου παραμένει σταθερή), όπου ε ορίζεται ο βαθμός συμπίεσης.
- Μεταβολή 2-3: πρόσδοση θερμότητας υπό σταθερό όγκο.
- Μεταβολή 3-4: ισεντροπική εκτόνωση του αέρα, μέχρι τον αρχικό όγκο
- Μεταβολή 4-1: αποβολή θερμότητας υπό σταθερό όγκο για την συμπλήρωση του κύκλου.



Διάγραμμα 2.1: Ιδανικοί κύκλοι Otto
(Βλαϊκίδης, 2014)

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ιδανικού κύκλου Otto είναι τα ακόλουθα:

- Έργο ιδανικού κύκλου Otto:

$W=Q_{23}-Q_{41}$ (2.1)

Όπου:

Q_{23}= η προσδιδόμενη θερμότητα (Q_{23}= εμβαδόν υπό τη 23 στο επίπεδο T,S)
Q_{41}= η αποβαλλόμενη θερμότητα (Q_{41}= εμβαδόν υπό τη 23 στο επίπεδο T,S)

Άρα ότι το έργο είναι το εμβαδό του κύκλου (1234) στα επίπεδα που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2.1 (P,V – T,S).

- Βαθμός απόδοσης ιδανικού κύκλου Otto:

$$n_o = \frac{W}{Q_{23}} \Rightarrow n_o = \frac{Q_{23}-Q_{41}}{Q_{23}} \Rightarrow n_o = 1-\frac{Q_{41}}{Q_{23}} \quad (2.2)$$

Σε ένα ιδανικό κινητήρα όλα τα μεγέθη απαιτούνται να είναι ίδια με αυτά του πραγματικού κινητήρα. Στον κύλινδρο πρέπει να βρίσκεται μόνο καθαρό μίγμα καυσίμου αέρα και καθόλου υπολειπόμενο καυσαέριο από τον προηγούμενο κύκλο λειτουργίας. Ο λόγος αέρα (*λ*) θα πρέπει να είναι ίσο με αυτόν του πραγματικού κινητήρα. Θα πρέπει να τονιστεί ότι το καύσιμο θα πρέπει να καίγεται πλήρως. Μεταξύ του λειτουργούντος μέσου και των τοιχωμάτων που το περιβάλλουν δεν πρέπει να λαμβάνει χώρα ανταλλαγή θερμότητας.

Κατά την εισροή και εκροή των αερίων δεν πρέπει να υπάρχουν διαρροές. Κατά την διάρκεια του κύκλου λειτουργίας καλό θα ήταν να μην γίνονται διαρροές αερίου λόγω κακής στεγανότητας. Το λειτουργούν μέσο να είναι ιδανικό και όχι πραγματικό αέριο. Συμπερασματικά λοιπόν η ειδική θερμοχωρητικότητα δεν μεταβάλλεται με την θερμοκρασία και ότι σε υψηλές θερμοκρασίες δεν εμφανίζεται διάσπαση μορίων. Ο υπολογισμός της κυκλικής διεργασίας μια ιδανικής μηχανής που πληροί τους προαναφερόμενος λόγους δίνει καλές ιδανικές τιμές (Μαυρίδης, 2007).

2.2.2. Πραγματικός κύκλος λειτουργίας

Ωστόσο, ο πραγματικός κύκλος λειτουργίας του κινητήρα διαφέρει σημαντικά από τον ιδανικό κύκλο. Ο πραγματικός κύκλος περιλαμβάνει το σύνολο των αλλαγών κατάστασης, τις οποίες διατρέχει στην πραγματικότητα το εργαζόμενο μέσο στη μηχανή. Ο κύκλος αυτός μπορεί να καθοριστεί μόνο με συνεχείς μετρήσεις της πλήρους κατάστασης της μηχανής. Συνήθως όμως μπορεί να ανακτηθεί μόνο ένα δυναμοδεικτικό διάγραμμα της λειτουργίας του κινητήρα, το οποίο δίνει την τιμή της πίεσης (P) σε κάθε θέση του εμβόλου x και επομένως και για κάθε συνολικό όγκο.

Το δυναμοδεικτικό διάγραμμα δεν έχει την δυνατότητα να δώσει την εκάστοτε πλήρη κατάσταση του αερίου στον κύλινδρο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για τον καθορισμό της κατάσταση του αερίου απαιτείται ένα ζεύγος θερμοδυναμικών μεγεθών (P,T ή P, V). Ο καθορισμός όμως της θερμοκρασίας (T) δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί γιατί η μέτρηση της είναι δύσκολη αλλά και εμφανίζει σημαντική διασπορά μέσα στον κύλινδρο. Επιπλέον, κατά τη φάση εναλλαγής των αερίων , είναι πολύ δύσκολος ο προσδιορισμός της εκάστοτε μάζας (m) στον κύλινδρο.

Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρά τα μειονεκτήματα που προαναφέρθηκαν το δυναμοδεικτικό διάγραμμα είναι πολύτιμο γιατί δίνει την δυνατότητα του καθορισμού του πλήρους αποδιδόμενου μηχανικού έργου διογκώσεως στο έμβολο, σε μια πλήρη περίοδο λειτουργίας. Αυτό το έργο καλείται ενδεικνυμένο έργο και εκφράζεται από την σχέση:

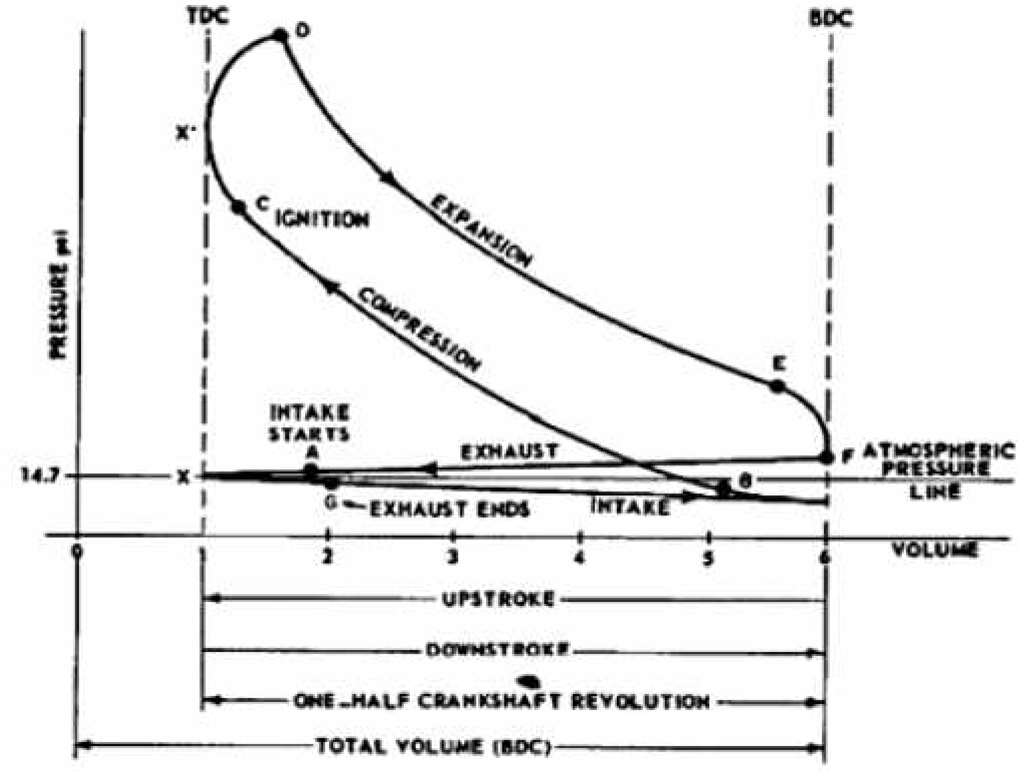
$$W_i = \oint p \cdot d \quad \Rightarrow W_i = A \oint p \cdot d \qquad (2.3)$$

Όπου:

P= η πίεση για κάθε θέση εμβόλου
dV= η μεταβολή όγκου
dx = η μεταβολή θέσης εμβόλου
A= η επιφάνεια εμβόλου

Η αλλαγή κατάστασης στον κύλινδρο της μηχανής είναι ηπίως μη αναστρέψιμη και όχι πλήρως αναστρέψιμη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το επί του εμβόλου αποδιδόμενο έργο διόγκωσης να είναι μεγαλύτερο από το καθαρό μηχανικό έργο διότι υπάρχουν οι εσωτερικές απώλειες. Ωστόσο, οι εσωτερικές απώλειες στην εμβολοφόρο μηχανή είναι σχετικά μικρές, με συνέπεια το δια μετρήσεως λαμβανόμενο ενδεικνύμενο έργο να θεωρείται σαν το «εσωτερικό», δηλαδή επί του εμβόλου αποδιδόμενο έργο, των εσωτερικών απωλειών συμπεριλαμβανομένων στο γενικότερο όρο «μηχανικές απώλειες» και αφαιρουμένων εκ του κατά τον προσδιορισμό του πραγματικού έργου.

Το Διάγραμμα 2.2. απεικονίζει ένα τυπικό δυναμοδεικτικό διάγραμμα ενός 4-Χ κινητήρα Otto, με καύση εκτελούμενη κατά ένα τμήμα ισόογκα και κατά ένα άλλο ισόθλιπτα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στους κινητήρες Otto το μεγαλύτερο ποσοστό της καύσεως εκτελείται ισόογκα (Βλαϊκίδης, 2014).



Διάγραμμα 2.2: Ενδεικτικός κύκλος Otto
(Βλαϊκίδης, 2014)

Συμπερασματικά λοιπόν με όσα προαναφερθήκαν στον κύκλο δεν βρίσκονται μόνο καθαρά μίγματα αλλά και υπολειπόμενο καυσαέριο από τον προηγούμενο κύκλο λειτουργία. Επιπλέον, δεν υπάρχει πλήρη καύση του καυσίμου και η καύση δεν πραγματοποιείται ούτε υπό σταθερό όγκο ούτε υπό σταθερή πίεση. Επίσης, το αέριο ανταλλάσει θερμότητα με τα τοιχώματα. Κατά την εισροή και εκροή εμφανίζονται διαρροές. Τα αέρια διαφεύγουν μέσα από τα ελατήρια του εμβόλου. Η εξέλιξη της πραγματικής διεργασίας λαμβάνεται με το δυναμοδεικτικό διάγραμμα, το οποίο έχει την δυνατότητα να καταγράφει την πίεση στον κύλινδρο σε σχέση με την διαδρομή του εμβόλου ή με τον χρόνο. Επιπλέον, εμφανές οι απώλειες ροής κατά την διεργασία εισροής και εκροής, η ανταλλαγή θερμότητας με τα τοιχώματα και οι διαφοροποιήσεις κατά την πορεία καύσης (Μαυρίδης, 2007).

2.2.3. Θερμικός βαθμός απόδοσης

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος προς την ισχύ της ιδανικής θερμότητας και δίνεται από την σχέση:

$$n_{th} = \frac{L}{Q} \qquad (2.3)$$

Όπου:

$$L = Q - Q_E \qquad (2.4)$$

Άρα η σχέση 2.3 με την σχέση 2.4. δίνουν:

$$n_{th} = 1 - \frac{Q}{Q_E} \qquad (2.5)$$

Όπου:

L= η ωφέλιμη θερμότητα στην μονάδα χρόνου
Q= η παρεχόμενη θερμότητα στην μονάδα του χρόνου
Q_E= η απαγόμενη θερμότητα στην μονάδα του χρόνου

Η σχέση 2.5. χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του θερμικού βαθμού απόδοσης. Ωστόσο, δεν μπορούμε να υπολογίζουμε με αυτόν τον τρόπο τον βαθμό απόδοσης μία τετράχρονής μηχανής. Αποτέλεσμα αυτού είναι να γίνεται χρήση των παρακάτω σχέσεων. Αρχικά πραγματοποιείται υπολογισμός της μεικτής διεργασίας και στην συνέχεια της ισόχωρης, η παρεχόμενη θερμότητα ανά κύκλο λειτουργίας αποτελείται από δύο επιμέρους θερμότητες. Παρεχόμενη θερμότητα υπό σταθερό όγκο V, παρεχόμενη θερμότητα υπό σταθερό πίεση P.

$$Q_1 = m \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) \Rightarrow Q_1 = m \cdot c_v \cdot T_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right) \qquad (2.6)$$

$$Q_2 = m \cdot c_p \cdot (T_4 - T_3) \Rightarrow Q_2 = m \cdot c_p \cdot T_3 \cdot \left(\frac{T_4}{T_3} - 1 \right) \qquad (2.7)$$

Όπου:

m = η μάζα αερίου ανά κύκλο λειτουργίας (kg)
c_v = η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο (cal/gr.grad)
c_p = η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση (cal/gr.grad)

Για την απλούστευση των υπολογισμών δεν λαμβάνεται υπόψη η εξάρτηση από τις θερμοκρασίες καθώς επίσης και η διάσπαση των μορίων λόγω υψηλών θερμοκρασιών.

Ο πολυτροπυκός εκθέτης δίνεται από την σχέση:

$$© = \frac{c_p}{c_v} \tag{2.8}$$

Με την εισαγωγή του πολυτροπικού εκθέτη στην παρεχόμενη θερμότητα δίνεται η εξίσωση:

$$Q = Q_1 + Q_2 \Rightarrow Q = m \cdot c_v \cdot \left[\left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right) \cdot T_2 + © \cdot \left(\frac{T_4}{T_3} - 1 \right) \cdot T_3 \right] \tag{2.9}$$

Ωστόσο, για την ολοκλήρωση του υπολογισμού χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα μεγέθη:

- *Λόγος συμπίεσης:*

$$£ = \frac{V_h + V_c}{V_c} \Rightarrow £ = \frac{V_1}{V_2} \tag{2.10}$$

- *Λόγος αύξησης πίεσης:*

$$= \frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2} \tag{2.11}$$

- Λόγος έγχυσης:

$$¥ = \frac{V_4}{V_3} = \frac{T_4}{T_3} \tag{2.12}$$

Για την ισεντροπική μεταβολή από την κατάσταση 1 στην 2 ισχύει η σχέση:

$$T_2 = T_1 \cdot £^{©-1} \tag{2.13}$$

Με την βοήθεια της σχέσης αυτής η ανά κύκλο λειτουργίας παρεχόμενης θερμότητας είναι:

$$Q = m \cdot c_v \cdot £^{©-1} \cdot \left[\quad -1 + © \cdot \quad \cdot (¥ - 1) \right] \tag{2.14}$$

Η ανά κύκλο λειτουργία απαγόμενης θερμότητας δίνεται από την σχέση:

$$Q_E = m \cdot c_v \cdot \left(¥^{©} \cdot \quad -1 \right) \tag{2.15}$$

Σύμφωνα με την προαναφερόμενες εξισώσεις προκύπτει ο βαθμός απόδοσης ενός τετράχρονου κινητήρα. Ωστόσο, υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης των ροών θερμότητας με τις ποσότητες θερμότητας ανά κύκλο λειτουργία. Η σχέση που δίνεται είναι η κάτωθι:

$$n_{th} = 1 - \frac{1}{£^{©-1}} \cdot \frac{¥^{©} \cdot \quad -1}{-1 + © \cdot \quad \cdot (¥ - 1)} \qquad (2.16)$$

Ωστόσο, γνωρίζοντας ότι έχουμε ισόχωρη μεταβολή και εκθέτης γ είναι ίσος με την μονάδα τότε ο βαθμός απόδοσης για τετράχρονη μηχανή Otto δίνεται από την σχέση:

$$n_{th} = 1 - \frac{1}{£^{©-1}} \qquad (2.17)$$

Αποτέλεσμα των προαναφερόμενων είναι ότι η ισόχωρη μεταβολή παρουσιάζει τον καλύτερο βαθμό απόδοσης όταν έχουμε τον ίδιο λόγο συμπίεσης. Η μαθηματική έκφραση που το αποδεικνύει είναι η εξής:

$$\frac{¥^{©} \cdot \quad -1}{-1 + © \cdot \quad \cdot (¥ - 1)} > 1 \qquad (2.18)$$

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι στην περίπτωση που αυξήσουμε την συμπίεση ε τότε αυξάνεται και ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα. Ο λόγος συμπίεσης για τους τετράχρονους κινητήρας Otto ανέρχεται περίπου από 7 έως 10 (Μαυρίδης, 2007).

2.2.4. Ισχύς

Η ισχύς είναι φυσικό μέγεθος που χρησιμοποιείται για την σύγκριση απόδοσης των κινητήρων. Η σχέση που δίνει την ισχύ είναι η εξής:

$$P = \frac{W}{t} \qquad (2.19)$$

Όπου:

W = Ωφέλιμο έργο κινητήρα
t =Χρόνος

Η ισχύς είναι προερχόμενη από το παραγόμενο έργο για κάποια διαδεδομένη στιγμή. Όσο πιο γρήγορα παράγεται το έργο τόσο πιο γρήγορη επιτάχυνση επιτυγχάνεται. Επίσης έχει μονάδα μέτρησης το Watt αλλά στην αυτοκινητοβιομηχανία συνήθως χρησιμοποιείται η μονάδα μέτρησης των ίππων Hp.

2.2.4.1. Ωφέλιμη ισχύς

Η εσωτερικής ισχύς P_i ονομάζεται και ενδεικτική ισχύς, αφού καθορίζεται από το ενδεικτικό διάγραμμα. Η ισχύς αυτή μεταφέρεται από το λειτουργούν μέσο στο έμβολο. Η εσωτερική ισχύς υπολογίζεται με την μέση πίεση του εμβόλου και δίνεται η σχέση:

$$P_i = p_i \cdot V_h \cdot z \cdot n \cdot i \qquad (2.20)$$

Όπου:

z = ο αριθμός των κυλίνδρων
n = ο αριθμός στροφών

i = ο συντελεστής 0.5 γα τετράχρονο κινητήρα
V_h = ο όγκος εμβολισμού
p_i= η μέση πίεση επί του εμβόλου

2.2.4.2. Ενεργός ισχύς

Η ενεργός ισχύς $P_ε$ είναι η ισχύς που αποδίδεται στον συμπλέκτη δηλαδή στον άξονα μίας μηχανής. Η ενεργός ισχύς είναι μικρότερη από την εσωτερική ισχύ και την ισχύ των τριβών.

2.2.4.3. Ισχύς τριβών

Η ισχύς τριβών συνιστάται από την ισχύ τριβών στο έμβολο, στα ελατήρια του εμβόλου και στα υπόλοιπα εξαρτήματα του μηχανισμού κίνησης του κινητήρα, από την ισχύ που απαιτείται για να τεθούν σε λειτουργία οι απαραίτητες βοηθητικές συσκευές όπως:

- Αντλία βενζίνης
- Αντλία νερού
- Αντλία λαδιού
- Ανεμιστήρας
- Αντλία έγχυσης
- Συμπιεστής σάρωσης
- Δυναμό (σε νεκρή λειτουργία)

Η ωφέλιμη ισχύ μετράται με τις πέδες μέτρησης ισχύος. Η ισχύς των τριβών $P_{τρ}$ δίνεται από την σχέση:

$$P_{τρ} = P_i - P_ε \qquad (2.21)$$

Όπου:
$P_ε$= η ενεργός ισχύς
P_i= η ωφέλιμη ισχύ

Ωστόσο, η παραπάνω τιμή μπορεί να δοθεί από την σχέση των πιέσεων

$$p_{τρ} = p_i - p_ε \qquad (2.22)$$

Όπου:
$p_{τρ}$= η μέση πίεση τριβής
p_i= η μέση πίεση επί του εμβόλου
$p_ε$= η μέση ωφέλιμη πίεση

Επίσης, η ισχύς των τριβών μπορεί να αποδοθεί με την βοήθεια του μηχανικού βαθμού απόδοσης n_m, από την εξίσωση:

$$n_m = \frac{P_ε}{P_i} \Rightarrow n_m = \frac{P_ε}{P_ε + P_{τρ}} \Rightarrow P_{τρ} = P_ε \cdot \left(\frac{1}{n_m} - 1\right) \qquad (2.23)$$

Όπου:
$P_{τρ}$= η ισχύς τριβών

$P_ε$= η ενεργός ισχύς
P_l= η ωφέλιμη ισχύ
n_m= ο μηχανικός βαθμός απόδοσης

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και ότι αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου του. Στους 4-Χ κινητήρες κυμαίνεται υπό πλήρες φορτίο μεταξύ 0,78 και 0,92. Ωστόσο, από τεχνικής άποψης και επιστημονική πλευρά είναι επιθυμητό η ισχύς των τριβών, που είναι η ισχύς απωλειών, να διατηρείται όσο το δυνατόν σε χαμηλές τιμές. Ο ακριβής προσδιορισμός της δε θεωρείται ότι είναι απλός. Επίσης θα πρέπει να τονίσουμε ότι η εσωτερική ισχύ και η ωφέλιμη ισχύς θα πρέπει να υπολογίζονται με μεγάλη ακρίβεια. Στην περίπτωση που δεν υφίσταται ακρίβεια τα σφάλματα των υπολογισμών είναι μεγάλα, αφού η ισχύς των τριβών είναι διαφορά μικρή στην τιμή των δύο μεγάλων στην τάξη μεγεθών (Μαυρίδης, 2007).

2.2.5. Πραγματικός βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης περιγράφεται με τη σχέση δύο ισχύων. Όπως έχει προαναφερθεί ο θερμικός βαθμός απόδοσης. Εκτός αυτού, υπάρχουν και άλλοι σημαντικοί βαθμοί απόδοσης, για την αξιολόγηση ενός κινητήρα. Ο βαθμός ποιότητας είναι ο λόγος της εσωτερικής ισχύος προς την ισχύ της ιδανικής μηχανής και δίνεται από την σχέση:

$$n_g = \frac{P_i}{P_I} \quad (2.24)$$

Όπου:
n_g =ο βαθμός ποιότητας
P_i = η ενδεικτική ισχύς
P_I=η ισχύς της δυναμικής της μηχανής

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο λόγος αυτός δείχνει πόσο υψηλό είναι η ποιότητα της πραγματικής μηχανής δηλαδή το κατά πόσο πλησιάζει η πραγματική λειτουργία την ιδανική. Εμπειρικές τιμές είναι για τους Otto κινητήρες είναι n_g=0,4 έως 0,7.

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης ή ο ενδεικνυόμενος βαθμός απόδοσης εκφράζεται μέσα από την σχέση της εσωτερικής ισχύος προς την παρεχόμενη θερμική ισχύ στο καύσιμο:

$$n_i = \frac{P_i}{Q} \quad (2.25)$$

Όπου:

$$Q = K \cdot H_u \quad (2.26)$$

Όπου:
K= η κατανάλωση καυσίμου (ποσότητα καυσίμου σε μονάδα χρόνου)
H_U=η ειδική θερμογόνος δύναμη καυσίμου

Επιπλέον, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης μπορεί να καθοριστεί και με την βοήθεια του θερμικού βαθμού απόδοσης και του βαθμού ποιότητας και δίνεται από την σχέση:

$$n_{th} = \frac{P_I}{Q} \tag{2.27}$$

και

$$n_g = \frac{P_i}{P_I} \tag{2.28}$$

Επόμενος δίνεται η σχέση:

$$n_i = n_{th} \cdot n_g \tag{2.29}$$

Όπου:

n_g =ο βαθμός ποιότητας
n_{th}=θερμικός βαθμός απόδοσης

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης περιλαμβάνει όλες τις απώλειες ισχύος λόγω των τριβών συμπεριλαμβανομένης και της ισχύος που είναι απαραίτητη για τη μετάδοση της κίνησης των βοηθητικών συσκευών. Άρα ο μηχανικός βαθμός απόδοσης δίνεται από την σχέση:

$$n_{th} = \frac{P_{£}}{P_i} \tag{2.30}$$

Όπου:

$P_{ε}$= η Ωφέλιμη ισχύς
P_i = η ενδεικτική ισχύς
n_{th}=ο θερμικός βαθμός απόδοσης

Η τιμή του μηχανικού βαθμού απόδοσης είναι της τάξης του 80%.

Ο ωφέλιμος βαθμός απόδοσης η ενεργός βαθμός απόδοσης είναι ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος προς την παρεχόμενη θερμική ισχύ στο καύσιμο, η σχέση είναι η ακόλουθη:

$$n_{£} = \frac{P_{£}}{\mathrm{KH}_u} \tag{2.31}$$

Ο βαθμός ατός, παραγόμενος από τους επιμέρους βαθμούς απόδοσης είναι ο κάτωθι:

$$n_{£} = \frac{P_{£} \cdot P_i \cdot P_I}{P_i \cdot P_I \cdot \mathrm{K} \cdot \mathrm{H}_u} \Rightarrow n_{£} = n_m \cdot n_g \cdot n_{th} \Rightarrow n_{£} = n_m \cdot n_i \tag{2.33}$$

Όπου:

n_i= ενδεικνυόμενος βαθμός απόδοσης
n_{th}=ο θερμικός βαθμός απόδοσης
n_m= ο μηχανικός βαθμός απόδοσης

Για την επίτευξη καλής συνολικής απόδοσης της μηχανής απαιτείται η σύμμετρη προσπάθεια βελτιώσεως και των τριών βασικών παραγόντων του βαθμού απόδοσης της ποιότητας, του μηχανικού βαθμού απόδοσης καθώς και του θερμικού βαθμού απόδοσης και όχι η ασύμμετρη βελτίωση του ενός μόνο εξ αυτών σε βάρος των άλλων Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τον ωφέλιμο βαθμό απόδοσης λαμβάνονται οι ακόλουθες βέλτιστες τιμές όπου για κινητήρες Otto είναι $n_{ε}$= 0,25 έως 0,30 (Μαυρίδης 2007 ; Βλαϊκίδης, 2014)

2.2.6. Μέση πίεση εμβόλου

Συμφώνα με το διάγραμμα που διατυπώθηκε σε προηγούμενο εδάφιο τονίζεται ότι η επιφάνεια του δίνει το αποδιδόμενο έργο της μηχανής. Ένα διαμορφωθεί το διάγραμμα αυτό σε ένα ισοδύναμης επιφάνειας ορθογωνίου αντιστοιχεί στην μέση πίεση του εμβόλου. Με την πίεση αυτή το αποδιδόμενο έργο ανά κύκλο λειτουργίας για έναν κύλινδρο μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω εξίσωση:

$$E = p_i \cdot V_h \qquad (2.34)$$

Όπου:

p_i= η μέση πίεση εμβόλου
V_h = ο όγκος εμβολισμού

Η μέση πίεση του εμβόλου μπορεί να χαρακτηριστεί και ως ειδικό έργο εμβόλου. Σύμφωνα με την σχέση 2.24 η μέση πίεση του εμβόλου περιγράφεται σαν έργο ανά όγκο εμβολισμού. Η μέση ενεργός πίεση του εμβόλου p_ε είναι ένα καθαρό υπολογιστικό μέγεθος, ακριβώς όπως η μέση ενδεικτική πίεση του εμβόλου p_i. Η εξίσωση της ωφέλιμης ισχύος είναι:

$$P_\varepsilon = p_\varepsilon \cdot V_h \cdot z \cdot n \cdot i \qquad (2.35)$$

Όπου:

z = ο αριθμός των κυλίνδρων
n = ο αριθμός στροφών
i = ο συντελεστής 0.5 γα τετράχρονο κινητήρα
p_ε= η μέση ωφέλιμη πίεση

Η ωφέλιμος ισχύς και η εσωτερική ισχύς διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την ισχύ των τριβών και εκφράζονται από την σχέση:

$$P_\varepsilon = P_i \cdot n_m \qquad (2.36)$$

Και επίσης, όπως προαναφέραμε μπορεί να γίνει αντικατάσταση της ισχύς με τις πίεσης, με αποτέλεσμα να δίνεται η σχέση:

$$p_\varepsilon = p_i \cdot n_m \qquad (2.37)$$

Η μέση ενεργός πίεση του εμβόλου προκύπτει λοιπόν από την εξίσωση:

$$p_\varepsilon = \frac{P_\varepsilon}{V_h \cdot z \cdot n \cdot i} \qquad (2.38)$$

Όπου:

z = ο αριθμός των κυλίνδρων
n = ο αριθμός στροφών
i = ο συντελεστής 0.5 γα τετράχρονο κινητήρα
V_h = ο όγκος εμβολισμού
P_ε= η ενεργός ισχύς

Η θερμογόνος δύναμη του μίγματος H_α είναι το ποσό θερμότητας που απελευθερώνεται από την καύση κανονικού κυβισμού μέτρου μίγματος βενζίνης και αέρα.

Επιπλέον, ο όρος βαθμός παροχής π_1 είναι ο λόγος της, μετά την πλήρωση πραγματικής ευρισκόμενης μέσα στον κύλινδρο μάζα m_1 φρέσκου μίγματος προς την θεωρητική μάζα πλήρωσης $m_m * \rho_\alpha$, όπου και είναι η πυκνότητα του φρέσκου μίγματος στον κύλινδρο.

$$\pi_1 = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_\alpha \cdot p_1}{T_1 \cdot p_a} \quad (2.39)$$

Όπου:

T_α = η απόλυτη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα
T_1 = η απόλυτη θερμοκρασία του κυλίνδρου μίγματος
p_1 = η απόλυτη πίεση κυλίνδρου
p_α = η απόλυτη πίεση εξωτερικού αέρα

Η θερμοκρασίας T_1 είναι σαφώς μεγαλύτερη της T_α διότι το μίγμα κατά την εισροή του θερμαίνεται από τα τοιχώματα. Επίσης η πίεση p_1 είναι μικρότερη της p_α λόγω των απωλειών κατά την εισροή. Η υπόθεση ότι ο συνολικός όγκος εμβολισμού πληρώνεται με φρέσκο μίγμα μπορεί να επαληθευτεί για τετράχρονους κινητήρες.

Επίσης οι πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί έχουν καταλήξει σε εμπειρικές τιμές του βαθμού παροχής π_1, ο οποίος για τετράχρονους κινητήρες Otto κυμαίνεται από 0,7 έως 0,9.

Η ωφέλιμη ισχύ δίνεται από την σχέση:

$$P_\varepsilon = Q \cdot n_\varepsilon \Rightarrow P_\varepsilon = Q \cdot n_{th} \cdot n_g \cdot n_m \quad (2.40)$$

Όπου:

n_ε =ο ωφέλιμος βαθμός απόδοσης
n_{th} = η μηχανικός βαθμός απόδοσης
n_g = ο βαθμός ποιότητας
n_m= ο μηχανικός βαθμός απόδοσης

Η παρεχόμενη ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα χρόνου δίνεται από την σχέση:

$$Q = H_\alpha \cdot m_1 \cdot \rho_o \cdot z \cdot n \cdot i \quad (2.41)$$

Όπου:

$$m_1 = \pi_1 \cdot m_{th} \quad (2.42)$$

και

$$m_{th} = \rho_\alpha \cdot V_h \quad (2.43)$$

Όπου:

ρ_α = η πυκνότητα αέρα
ρ_o = η πυκνότητα φρέσκου μίγματος
z = ο αριθμός των κυλίνδρων
n = ο αριθμός στροφών
i = ο συντελεστής 0.5 γα τετράχρονο κινητήρα
V_h = ο όγκος εμβολισμού

Άρα η εξίσωση 2.31 βάσει των εξισώσεων 2.32 και 2.33 γίνεται:

$$Q = H_a \cdot \text{®}_1 \cdot \frac{\overset{\circ}{\sim}}{\underset{-}{\circ}} \cdot V_h \cdot z \cdot n \cdot i \qquad (2.44)$$

Η παρεχόμενη θερμότητα τοποθετείται στην ωφέλιμη ισχύ με αποτέλεσμα να δίνεται η σχέση:

$$P_{£} = n_{th} \cdot n_g \cdot n_m \cdot H_a \cdot \text{®}_1 \cdot \frac{\overset{\circ}{\sim}}{\underset{-}{\circ}} \cdot V_h \cdot z \cdot n \cdot i \qquad (2.45)$$

Όπως έχει προαναφερθεί υπάρχει σχετική αναλογία της ωφέλιμης ισχύς με την πίεση. Με αποτέλεσμα αν χρησιμοποιηθεί η σχέση 2.28 καταλήγουμε:

$$p_{£} = n_{th} \cdot n_g \cdot n_m \cdot \text{®}_1 \cdot \mathrm{H}_{\sim} \cdot \frac{\overset{\circ}{\sim}}{\underset{-}{\circ}} \qquad (2.46)$$

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΥΠΕΡΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

3.1. ΥΠΕΡΤΟΦΟΔΟΤΗΣΗ - ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ

Η υπερτοφοδότηση ή υπερπλήρωση είναι η εισαγωγή συμπιεσμένου αέρα στους κυλίνδρους του κινητήρα και έχει στόχο την αύξηση της ισχύος του. Για έναν κινητήρα με δεδομένο κυβισμό και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, η υπερπλήρωση είναι ο μόνος τρόπος αύξησης ισχύος, εφόσον ούτε ο αριθμός στροφών ούτε η σχέση συμπίεσης μπορούν να αυξηθούν πάνω από κάποιο όριο. Άρα όταν εισάγεται συμπιεσμένο αέρα στο κύλινδρο επιτυγχάνεται η είσοδος μεγαλύτερης μάζας αέρα στο συγκεκριμένο όγκο. Επομένως, η καύση γίνεται πολύ πιο αποτελεσματικά, αυξάνοντας σημαντικά τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ του κινητήρα και τη μέγιστη ροπή του. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την υπερπλήρωση είναι οι μηχανικοί συμπιεστές – υπερτοφοδότες και οι στροβιλοσυμπιεστής καυσαερίου (turbo), ωστόσο, υπάρχει και περεταίρω διαχωρισμός ο οποίος παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Τύποι υπερπλήρωσης
(Βλαϊκίδης, 2014)

ΤΥΠΟΙ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ
Τρόπος κίνησης του συμπιεστή υπερπλήρωσης	• Κινούμενος από την άτρακτο του κινητήρα (μηχανική υπερπλήρωση) • Εξωτερικά κινούμενος (π.χ. μέσω ηλεκτροκινητήρα) • Κινούμενος από στρόβιλο καυσαερίου (στροβιλοϋπερπλήρωση) • Μέσω κύματος πίεσης (Comprex)
Σχεδιασμός του συμπιεστή υπερπλήρωσης	• Θετικής εκτόπισης • Δυναμικής ροής
Σύνδεση μονάδας υπερπλήρωσης και κινητήρα:	• Μηχανική υπερπλήρωση • Απλή στροβιλοϋπερπλήρωση • Στροβιλοϋπερπλήρωση με ενδιάμεσο ψυγείο αέρα • Συνδυασμένη στροβιλοϋπερπλήρωση (combined supercharging) • Διβάθμια στροβιλοϋπερπλήρωση (two-stage turbocharging) • Στρόβιλος με αεριογόνο
Είδος του κινητήρα	• Κινητήρας εναύσεως με σπινθηριστή • Κινητήρας Diesel

Σκοπός της υπερπλήρωσης των εμβολοφόρων ΜΕΚ είναι η αύξηση της πυκνότητας του αέρα πλήρωσης πριν την εισαγωγή του στους κυλίνδρους, η οποία πραγματοποιείται με αντίστοιχη αύξηση της πίεσης του, έτσι ώστε να αυξάνεται η μάζα του σε κάθε κύκλο λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση συγκέντρωσης ισχύος του κινητήρα, καθώς και βελτίωση των επιδόσεων του. Επειδή κατά τη συμπίεση του αέρα αυξάνεται και η θερμοκρασία του, είναι δυνατό να εφαρμοστεί ψύξη του αέρα πλήρωσης αμέσως μετά τη συμπίεση του και πριν την εισαγωγή του στους κυλίνδρους σε ψυγείο που λειτουργεί με νερό ή αέρα, με σκοπό την περαιτέρω αύξηση της πυκνότητας του.

Η υπερπλήρωση χρησιμοποιείται στους 4-Χ κινητήρες για να αυξήσει τη συγκέντρωση ισχύος τους. Οι βασικές λοιπόν αρχές της υπερπλήρωσης είναι:

- Η απόδοση του κινητήρα αυξάνεται ανάλογα με τον όγκο του καυσίμου μίγματος μέσα στον κύλινδρο
- Η απόδοση του κινητήρα αυξάνεται με τη ψύξη του εισερχόμενου καύσιμου μίγματος, λόγω αύξησης της πυκνότητας του μίγματος κατά την ψύξη του.

Βασική αρχή της μηχανικής είναι ότι η ισχύς ενός κινητήρα είναι ανάλογη με την ποσότητα του εισερχομένου, σε αυτόν, αέρα, και επειδή με τη σειρά της η ποσότητα αυτή είναι ανάλογη της πυκνότητας του, η ισχύς ενός κινητήρα – έχοντας ως προϋπόθεση τον ίδιο κυβισμό και τις ίδιες στροφές λειτουργίας – μπορεί να αυξηθεί με την προσυμπίεση του αέρα, πριν αυτός εισέλθει στους κυλίνδρους. Αυτή, ακριβώς, η αναγκαστική εισαγωγή ή προσυμπίεση του αέρα, ονομάζεται υπερπλήρωση. Ακόμα, ο βαθμός υπερπλήρωσης δείχνει την αύξηση της πυκνότητας του αέρα, σε σύγκριση με την αντίστοιχη ενός ατμοσφαιρικού κινητήρα. Άρα ο στόχος της υπερπλήρωσης είναι να επιτρέψει στον κινητήρα την εισαγωγή και καύση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου, ώστε να αυξηθεί η αποδιδόμενη ισχύς του (Γαλανοπούλου, 2011).

3.1.1. Μηχανικοί υπερτοφοδότες

Στη μηχανική υπερτροφοδότηση, ο υπερσυμπιεστής παίρνει κίνηση απευθείας από τον κινητήρα, συνήθως κάτω από μια σταθερή σχέση μετάδοσης. Για την εναλλαγή των συνθηκών της κατάστασης λειτουργίας του υπερσυμπιεστή, χρησιμοποιούνται μηχανικοί ή ηλεκτρομαγνητικοί συμπλέκτες. Για τους κινητήρες των αυτοκινήτων είναι κατάλληλοι μόνο οι υπερσυμπιεστές των οποίων ο ρυθμός παροχής του αέρα μεταβάλλεται, γραμμικά, με την περιστροφική ταχύτητα (Καλούδης & Μπίζα, 2013).

3.1.1.1. Κατηγοριοποίηση υπετροφοδοτών

Βασισμένοι σε μέθοδο συμπίεσης, οι υπετροφοδότες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Θετικής μετατόπισης τύπου, ο οποίος διανέμει ένα σχεδόν προκαθορισμένο όγκο αέρα ανά περιστροφή σε όλες τις ταχύτητες με μια σχεδόν σταθερή ώθηση ανεξάρτητα από την ταχύτητα της μηχανής.
- Δυναμικοί συμπιεστές που εξαρτώνται στον επιταχυνόμενο αέρα σε υψηλές ταχύτητες και στη συνέχεια ανταλλάσουν αυτή την ταχύτητα για πίεση με διάχυση ή επιβράδυνση και διανέμουν αυξανόμενη ώθηση με αυξανόμενη ταχύτητα μηχανής.

Ένας υπετροφοδότης του τύπου ένα ωθεί τον αέρα μέσα στον κινητήρα σε σταθερή ταχύτητα, ενώ ένας τύπου δύο χρησιμοποιεί την ταχύτητα για να ελέγξει την πίεση του αέρα. Σε κάθε περίπτωση το οξυγόνου του συμπιεσμένου αέρα καθώς διανέμεται στον κινητήρα επιτρέπει μεγαλύτερα ποσά ισχύος να εξαχθούν από κάθε έκρηξη στο θάλαμο καύση. Σήμερα υπάρχουν πολλοί τύποι υπετροφοδοτών που χρησιμοποιούνται στις μηχανές. Στην αγορά οι πιο συνηθισμένοι τύποι είναι οι ακόλουθοι:

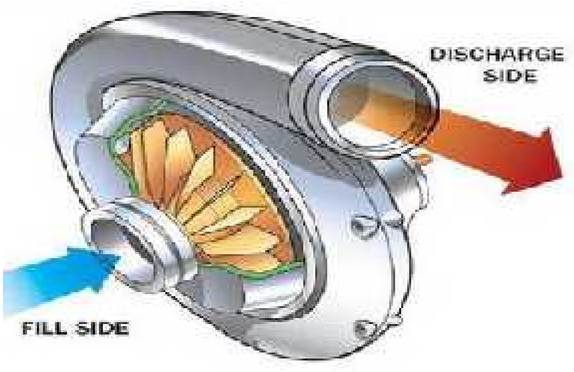
- Φυγοκεντρικοί υπετροφοδότες
- Roots υπετροφοδότες
- Twinscrew υπερτροφοδότες (Διπλής βίδας υπερτροφοδότες)

Στην συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση των προαναφερόμενα δίνοντας έμφαση στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά καθώς και στην λειτουργία τους (Καλούδης & Μπίζα, 2013).

- **Φυγοκεντρικός υπερτροφοδότης (centrifugal)**

Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Οι φυγοκεντρικοί υπετροφοδότες αποτελούνται από ένα στροφείο με πολλά πτερύγια που περιστρέφονται με πολύ υψηλή ταχύτητα σε περίπου 50.000 rpm. Η πτερωτή ωθεί τον αέρα προς τα έξω εξαιτίας φυγόκεντρης δύναμης. Επίσης, αποτελείται από έναν διαχύτη που μετατρέπει την ταχύτητα σε υψηλή πίεση.



Σχήμα 3.1: Αρχής λειτουργίας φυγοκεντρικού υπετροφοδότη
(Καλούδης & Μπίζα, 2013)

Εικόνα 3.1: Φυγοκετρικός υπετροφοδότης
(Καλούδης & Μπίζα , 2013)

Λειτουργία

Καθώς ο αέρας τραβιέται στο εσωτερικό του στροφείου, φυγόκεντρη δύναμη προκαλεί την ακτινωτή έξοδό του. Ο αέρας βγαίνει από το στροφείο με μεγάλη ταχύτητα αλλά με μικρή πίεση. Ένας διαχύτης μετατρέπει τον αέρα υψηλής ταχύτητας (και χαμηλής πίεσης) σε υψηλής πίεσης αέρα. Συνεπώς ο συμπιεσμένος αέρας εξασφαλίζεται.

- Η ταχύτητα του στροφείου κυμαίνεται από 50.000 σε 60.000 rpm.
- Φυγοκετρικοί υπερτροφοδότες χρησιμοποιούνται κυρίως σε κοινά συστήματα επαγωγής.

- Έχουν μεγαλύτερη απόδοση.
- Έχουν μικρό μέγεθος, μικρό βάρος και τοποθετούνται μπροστά από την μηχανή.
- Συνεπώς οι φυγοκεντρικοί υπετροφοδότες θεωρούνται οι «καλύτεροι».

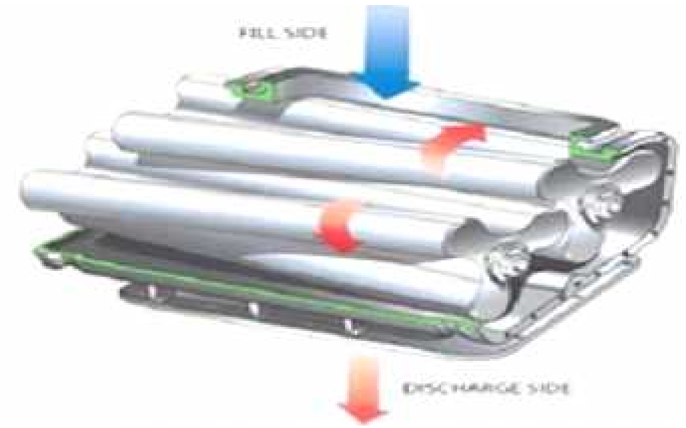
❖ **Roots υπερτροφοδότης**

Σύντομη ιστορική αναδρομή

Ο υπερτροφοδότης Roots είναι το παλαιότερο σχέδιο που έχει χρησιμοποιηθεί σε κάθε είδος μηχανής. Οι Philander και Roots το 1860, εισήγαγαν την ιδέα ενός τέτοιου εξαρτήματος. Ωστόσο, έκαναν πατέντα το σχέδιο ως μια μηχανή που θα βοηθούσε στον εξαερισμό φρεατίων ορυχείων και αργότερα μετατράπηκε σε μια μεγαλειώδη εφέυρεση για μηχανικούς στον τομέα της αυτοκίνησης. Το 1900, ο Gottleib Daimler για πρώτη φορά συμπεριέλαβε έναν Roots υπετροφοδότη σε μια μηχανή αμαξιού ο οποίος βελτίωσε την ισχύ του αυτοκινήτου. Ήταν το πρώτο βήμα προς την ανάπτυξη στον τομέα αυτό.

Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Αυτός ο υπερτροφδότης αποτελείται από δύο πλεγματώδεις λοβούς που είναι τοποθετημένοι σε δύο παράλληλους άξονες. Οι δύο λοβοί είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε ο αέρας που αποθηκεύεται ανάμεσά τους και τα τοιχώματα να μειώνεται καθώς ο αέρας οδηγείται από το στόμιο εισαγωγής στο σημείο εξόδου. Έτσι, ο διερχόμενος αέρας συμπιέζεται.



Σχήμα 3.2: Υπετροφοδότης Roots
(Καλούδης & Μπίζα, 2013).

Εικόνα 3.2: Υπετροφοδότης Roots
(Σταυρόπουλος, 2012)

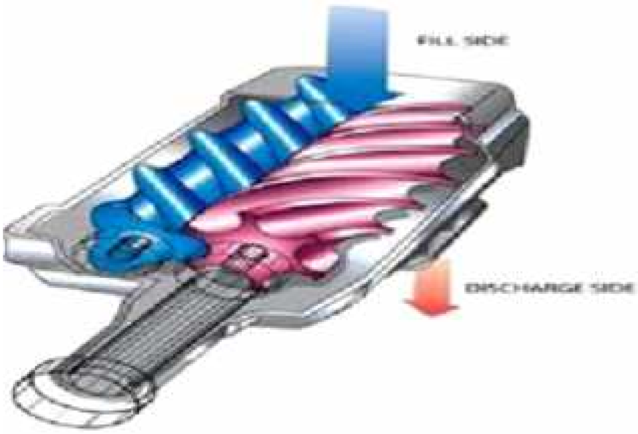
Λειτουργία

Καθώς οι λοβοί περιστρέφονται, ο παγιδευμένος αέρας στα διάκενα μεταξύ των λοβών μεταφέρεται από την πλευρά εισόδου προς την πλευρά εξόδου και μεγάλες ποσότητες αέρα μετακινούνται προς την πολλαπλή εισαγωγή και «σταματά» για να δημιουργηθεί μια θετική πίεση. Αυτός ο συμπιεσμένος αέρας λαμβάνεται στην πλευρά εκροής. Οι υπερτροφοδότες Roots είναι συνήθως μεγάλοι και τοποθετούνται στο πάνω μέρος της μηχανής αλλά έχουν το μειονέκτημα να είναι οι λιγότερο αποδοτικοί υπερτροφοδότες. Οι λόγοι που επηρεάζουν την αποδοτικότητα τους είναι το βάρους που προσθέτουν στο όχημα καθώς και ότι παρέχουν αέρα σε διακριτές εκρήξεις αντί να παρέχουν αέρα με ομαλό και συνεχή τρόπο.

- ***Twin – Screws υπερτροφοδότης***

Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Ο υπερτροφοδότης αυτού του τύπου αποτελείται από δύο λοβούς που μοιάζουν με ένα σετ ατερμόνα κοχλία. Τα δύο γρανάζια ταιριάζουν με τέτοιο τρόπο που ο αέρας που αποθηκεύεται μεταξύ αυτών συνεχώς μειώνεται καθώς προχωρά προς το εσωτερικό.



Σχήμα 3.4: Αρχή λειτουργίας twin – screw υπερτροφοδότη
(Καλούδης & Μπίζα, 2013)

Εικόνα 3.3: Twin-screw υπετροφοδότης
(Καλούδης & Μπίζα, 2013)

Λειτουργία

Αυτός ο υπερτροφοδότης λειτουργεί αντλώντας αέρα διαμέσω ενός ζεύγους λοβών που μοιάζουν με ατέρμονα κοχλία. Οι ρότορες έχουν κωνική λέπτυνση, που σημαίνει ότι ο αποθηκευμένος αέρας συμπιέζεται καθώς κινείται προς το σημείο εξόδου. Συνεπώς ένας twin – screw υπερτροφοδότης συμπιέζει τον αέρα μέσα στο στροφείο. Καθώς οι θύλακες αέρα συρρικνώνονται, ο αέρας συμπιέζεται σε μικρότερο μέγεθος.

- Οι twin-screw υπερτροφοδότες είναι πιο αποδοτικοί σε σύγκριση με τον υπερτροφόδοτη Root.
- Κοστίζουν περισσότερο επειδή έχουν απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια στην κατασκευή.
- Κάνουν περισσότερο θόρυβο.
- Ο συμπιεσμένος αέρας που φεύγει από το στόμιο εξόδου δημιουργεί ένα μακρόσυρτο σφύριγμα που πρέπει να ελεγχθεί με τεχνικές μείωσης ήχου.

3.1.2. Μεταδότες κίνησης των υπερτροφορδοτών

Οι μεταδότες κίνησης είναι βασικά τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν την ισχύ από τον έναν άξονα στον επόμενο άξονα. Σε έναν υπετροφοδότη χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν την ισχύ από ένα μέρος της μηχανής στον υπετροφοδότη. Υπάρχουν πολλοί τύποι τέτοιων εξαρτημάτων μετάδοσης που χρησιμοποιούνται για την έγχυση του υπερτροφοδότη. Αυτά τα εξαρτήματα χρησιμοποιούνται σύμφωνα με αυτές τις απαιτήσεις:

❖ *Μηχανολογικά:*
  - Ιμάντες (Ιμάντες V, οδοντωτοί και επίπεδοι).
  - Γρανάζια κίνησης
  - Μετάδοση κίνησης με αλυσίδα

❖ *Στρόβιλοι καυσαερίων:*
  - Αξονική τουρμπίνα
  - Ακτινική τουρμπίνα

❖ *Άλλα είδη:*
  - Ηλεκτρικά μοτέρ

3.2. ΥΠΕΡΤΟΦΟΔΟΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Σύμφωνα με τον Γαλανόπουλο (2011) στην υπερπλήρωση με εκμετάλλευση της ενέργειας των καυσαερίων, η ενέργεια που χρειάζεται ο υπερσυμπιεστής, λαμβάνεται από τα καυσαέρια. Από την μια λοιπόν, γίνεται εκμετάλλευση της ενέργειας, που στην περίπτωση των ατμοσφαιρικών κινητήρων δεν μπορεί να γίνει, εξαιτίας των συνθηκών εκτόνωσης που επιβάλλονται από το μηχανισμό του στροφαλοφόρου – μπιέλας, ενώ από την άλλη, η πίεση των καυσαερίων αυξάνεται ώστε να επιτευχθεί η αναγκαία ισχύς συμπίεσης.

Σήμερα, στους σύγχρονους υπερτροφοδοτούμενους κινητήρες, η ενέργεια των καυσαερίων μετατρέπεται σε κινητική, μέσω μιας τουρμπίνας που κινείται από τα καυσαέρια, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση υπερσυμπιεστή για την προσυμπίεση του εισερχόμενου αέρα. Έτσι, ο συνδυασμός της τουρμπίνας που κινείται από τα καυσαέρια και του υπερσυμπιεστή, μας προσφέρει έναν υπερσυμπιεστή καυσαερίων ή υπερσυμπιεστή εξάτμισης, γνωστό με την ονομασία «Φυγοκεντρικός υπερσυμπιεστής – Turbocharger».

3.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΠΕΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ

Τα βασικά πλεονεκτήματα της υπερπλήρωσης είναι (Γαλανόπουλος, 2011):

1. Η αύξηση της ισχύος και η μείωση του όγκου της μηχανής, σε σχέση με μια άλλη της ίδιας ισχύος χωρίς υπερπλήρωση. Με την χρήση εναλλάκτη θερμότητας (intercooler) επιτυγχάνεται μείωση της θερμότητας του εισερχόμενου αέρα από 200^oC (που αυτή η θερμοκρασία επηρεάζει το ιξώδες του λαδιού, δημιουργεί ανθρακώματα) σε 100^oC, ή χρησιμοποιούνται υδρόψυκτοι υπερσυμπιεστές (νέα κατηγορία υπερσυμπιεστών, το ψυκτικό κυκλοφορεί μέσα στο σώμα τους που είναι σαν σαλίγκαρος) το ψυκτικό έρχεται από το κύκλωμα ψύξης του κινητήρα, διατηρεί την θερμοκρασία του κάτω από 140^oC και έτσι εισάγεται μεγαλύτερη μάζα αέρα καυσίμου με αποτέλεσμα αύξηση της ισχύος και της ροπής μέχρι 50% στους 2-Χ και μέχρι 100% στους 4-Χ.
2. Η αύξηση της μέγιστης ροπής της μηχανής, χωρίς αύξηση των στροφών (ειδικά στους Diesel, που υπάρχει περιορισμός στροφών).

3. Η μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου, η καλύτερη καύση που επιτυγχάνεται στους κινητήρες με υπερπλήρωση (συγκρινόμενη με τον αντίστοιχο απλό κινητήρα), έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και χαμηλότερες εκπομπές καυσαερίων.

4. Μείωση του θορύβου από 2-5 db, η συσκευή επενεργεί σαν έξτρα σιγαστήρας.

Τα βασικότερα μειονεκτήματα της υπερπλήρωσης είναι (Γαλανόπουλος, 2011):

1. Καθυστέρηση στην επιτάχυνση, όταν ο οδηγός πατήσει το γκάζι απότομα (πεντάλ), παρουσιάζεται νεκρός χρόνος (το φαινόμενο αυτό δεν παρουσιάζεται στους συμβατικούς κινητήρες) δηλαδή μια μικρή καθυστέρηση στην αύξηση των στροφών (Turbo Lag). Οι αιτίες μπορεί να είναι πολλές όπως:
    - Η αδράνεια που παρουσιάζει ο στρόβιλος και κατ' επέκταση ο αεροσυμπιεστής.
    - Ο κακός σχεδιασμός των πτερυγίων.
    - Ο κακός χρονισμός προπορεία εναύσεως (αβάνς)
    - Ο κακός ψεκασμός καυσίμου

    Τα τελευταία χρόνια με την χρήση καινούριων υλικών, έχουν βελτιωθεί πολύ με την χρησιμοποίηση δύο αεροσυμπιεστών σε σειρά άρα μείωση του βάρους και της αδράνειας και έτσι αντιμετωπίζεται καλύτερα το πρόβλημα αυτό.

2. Ανομοιόμορφη λειτουργία στις χαμηλές στροφές. Η ποσότητα των καυσαερίων καθώς και η κινητική τους ενέργεια είναι μικρή στις χαμηλές στροφές. Οι κατασκευαστές έχουν παρουσιάσει πολλές λύσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, όπως:
    - Μεταβαλλόμενη διατομή του κελύφους της τουρμπίνας, δηλαδή μικραίνει η διατομή στις χαμηλές στροφές του αεροσυμπιεστή ενώ όταν μεγαλώνει η διατομή (υψηλές στροφές) μειώνονται οι στροφές του αεροσυμπιεστή.
    - Άλλος τρόπος είναι η λειτουργία ενός μικρού μετακαυστήρα στην πολλαπλή εξαγωγή (στις χαμηλές στροφές). Η πρόσθετη ποσότητα καυσαερίων που δημιουργείται δίνει την απαιτούμενη ενέργεια.
    - Η χρήση του υπερσυμπιεστή (COMPREX) στον οποίο υπάρχει συνδυασμός στροβιλοσυμπιεστή με κίνηση από τα καυσαέρια και μετάδοση κίνησης στην συσκευή από τον στροφαλοφόρο άξονα με ιμάντες (χαμηλές στροφές).
    - Μη καλή λίπανση στον άξονα του συμπιεστή.

3. Η αποτελεσματική λίπανση του άξονα αποτελεί ίσως το σημαντικότερο πρόβλημα στην χρήση των TURBO. Το λάδι λιπαίνει και ψύχει ταυτόχρονα. Ο άξονας του TURBO στηρίζεται σε έδρανα υψηλής ταχύτητας (τριβείς). Το λάδι έρχεται από την έξοδο του φίλτρου με την βοήθεια ατσάλινων σωλήνων. Ο υπερσυμπιεστής περιστρέφεται από 30000 έως 100000 rpm. Χρειάζεται καλή λίπανση με λάδι με χαρακτηριστικούς τίτλους (όπως turbo tested). Πολλές φορές τοποθετείται μια ηλεκτρική αντλία λαδιού η οποία λειτουργεί για ένα μικρό χρονικό διάστημα αφού σβήσει ο κινητήρας, διότι ο άξονας του στροβίλου εξακολουθεί να περιστρέφεται λόγω αδράνειας περίπου 2 με 3 λεπτά (η θερμοκρασία μπορεί να ανέβει σχεδόν $25^{o}C$) κια έτσι αποφεύγεται η υπερθέρμανση του άξονα.

4. Προβλήματα προανάφλεξης και αυτανάφλεξης. Η αύξηση της πίεσης στους κινητήρες με υπερπλήρωση δημιουργεί προβλήματα προανάφλεξης και αυτανάφλεξης. Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού μπορεί να γίνει με μείωση της συμπίεσης.

3.4. ΥΠΕΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Το φρέσκο μίγμα σε έναν κινητήρα με υπερτροφοδότηση οδηγείται στον κύλινδρο με υπερπίεση μέσω ενός συμπιεστή, δηλαδή του μηχανικού υπερτροφοδότη. Έτσι η ποσότητα του φρέσκου μίγματος αυξάνεται, αφού καίγεται περισσότερο καύσιμο με αποτέλεσμα η πραγματική ωφέλιμη ισχύ να αυξάνεται ανάλογα με αυτήν την αύξηση. Στους 4-Χ κινητήρες Otto η εφαρμογή της υπερτροφοδότησης πραγματοποιείται για δύο κυρίως λόγους:

- Η αύξηση της ωφέλιμης ισχύς με σύγχρονη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου σε σύγκριση με κινητήρες παρόμοιων κατασκευαστικών μεγεθών στις ίδιες στροφές λειτουργίας
- Η εξίσωση της ολοένα μειωμένης ισχύς του κινητήρα με αυξανόμενό ύψος της θέσης ή αντίστοιχα της πτήσης (αύξηση υπερτροφοδότησης)

Σύμφωνα με την εξίσωση της ωφέλιμης ισχύος αν πραγματοποιηθεί μεταφορά από τετράχρονο κινητήρα σε δίχρονο θα έπρεπε η ωφέλιμη ισχύ να τετραπλασιαστεί. Αυτό όμως δεν είναι δυνατόν, επειδή η μέση ενεργός πίεση του εμβόλου είναι μικρότερη στον 2-Χ κινητήρα σε σχέση με τον 4-Χ. Άρα για την αύξηση ισχύος απορρίπτεται η θεωρεία αλλαγής κύκλου λειτουργίας. Ωστόσο, σε μία αύξηση του κυβισμού V_h ή του αριθμού των στροφών n, δεν πρέπει να υπερβαίνει την μέση ταχύτητα u_μ του εμβόλου και επίσης ο βέλτιστος λόγος εμβολισμού κ δεν θα πρέπει να μεταβάλλεται. Βάση λοιπόν όλων των προαναφερόμενων γίνεται κατανοητό ότι υπάρχει δυνατότητα αύξησης του κυβισμού ή του αριθμού των στροφών ή του αριθμού των κυλίνδρων και του κυβισμού.

Για την πραγματοποίηση της αύξηση του κυβισμού θα πρέπει να συνδυαστούν τα παρακάτω μεγέθη:

$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \qquad (3.1)$$

$$\kappa = \frac{H}{D} \qquad (3.2)$$

$$u_\mu = 2Hn \qquad (3.3)$$

Άρα από την σχέση 3.1, 3.2 και 3.3 καταλήγουμε:

$$V_h = \frac{\text{®}}{32} \cdot \frac{1}{\text{©}^2} \cdot \frac{u_{\text{«}}^3}{\text{®}^3} \qquad (3.4)$$

Όπου:

V_h= ο όγκος εμβολισμού
u_μ = η μέση ταχύτητα εμβόλου
π=3,14 (σταθερά)
κ = ο βέλτιστος λόγος εμβολισμού

Από την σχέση της ωφέλιμης ισχύς, που διατυπώθηκε στο Κεφάλαιο 2 ισχύει:

$$P_{\text{£}} = p_{\text{£}} \cdot V_h \cdot z \cdot n \cdot i \qquad (3.5)$$

Όπου:

z = ο αριθμός των κυλίνδρων
n =ο αριθμός στροφών
i = ο συντελεστής 0.5 γα τετράχρονο κινητήρα
p_ε= η μέση ωφέλιμη πίεση

Όταν επιθυμείται να διπλασιαστεί η ισχύ θα πρέπει να αυξηθούν κάποια από τα μεγέθη τα οποία εξαρτάται. Τα μεγέθη τα οποία μπορούν να αλλάξουν είναι τα ακόλουθα:

- Μέση ωφέλιμη πίεση
- Αριθμός των στροφών
- Όγκος εμβολισμού
- Αριθμός των κυλίνδρων.

Τα υπόλοιπα μεγέθη όπως είναι ο συντελεστής κινητήρα, η μέση ταχύτητα εμβολισμού και ο λόγος εμβολισμού παραμένουν σταθερά.

Μία αύξηση της ωφέλιμης ισχύς μέσω της ανύψωσης της μέσης ενεργούς πίεσης ή του αριθμού των κυλίνδρων είναι δυνατή. Ωστόσο, η αύξηση της μέσω ανύψωσης του αριθμού στροφών δεν είναι δυνατή πρακτικώς, επειδή ο αριθμός των κυλίνδρων και του κυβισμού θα έπρεπε να αυξηθεί κατά την τρίτη δύναμη του λόγου ισχύος. Μία αύξηση του κυβισμού ή του αριθμού των κυλίνδρων γίνεται μόνο όταν υπάρχει χώρος εγκατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη και την αύξηση βάρους του κινητήρα. Εάν δεν είναι δυνατή αυτή η λύση, τότε μένε μόνο η αύξηση της ισχύος μέσω ανύψωσης της μέσης ενεργούς πίεσης του εμβόλου.

Για την αύξηση της πίεσης του εμβόλου χρησιμοποιείται η σχέση:

$$p_{\text{£}} = n_{th} \cdot n_g \cdot n_m \cdot \text{a}_1 \cdot \text{H}_{\sim} \cdot \frac{\circ_{\sim}}{\circ_{-}} \qquad (3.6)$$

Όπου:

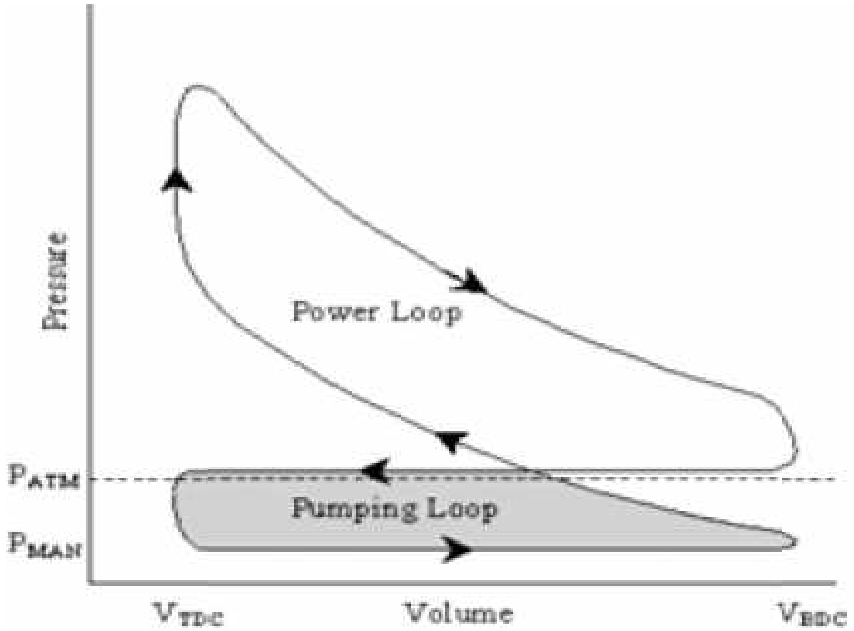
ρ_α =η πυκνότητα αέρα
ρ_o = η πυκνότητα φρέσκου μίγματος
n_{th} = ο θερμικός βαθμός απόδοσης
n_m =ο μηχανικός βαθμός απόδοσης
n_g =ο βαθμός ποιότητας καύσης
H_α =η θερμογόνος δύναμη του μίγματος
λ_1 = ο βαθμός παροχής

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με τον λόγο συμπίεσης ε. Στους 4-Χ κινητήρες Otto τα όρια λειτουργίας του κινητήρα περιορίζονται σε σχέση με τον λόγο συμπίεσης ε της ανάγκης απρόκοπης λειτουργίας του κινητήρα δίχως χτυπήματα (πειράκια). Επίσης, με την πρόωρη χρονική στιγμή ανάφλεξης και την μείωση των απωλειών ροής κατά την εναλλαγή του φορτίου μπορεί να υπάρξει μικρή άνοδο του βαθμού ποιότητας καύσης. Ο μηχανικός βαθμός βελτιώνεται όταν χρησιμοποιούνται στον στροφαλοφόρο έδρανα με κυλινδρικούς αντί των απλών εδράνων. Η θερμογόνος δύναμη του μίγματος καθορίζεται από την θερμογόνο δύναμη του καυσίμου και του απαιτούμενου αέρα. Αυτό λοιπόν που παραμένει για την αύξηση της μέσης ενεργούς πίεσης του εμβόλου είναι ο βαθμός παροχής. Ο βαθμός παροχής αυξάνεται μέσω της υπερτροφοδότησης.

Για την αύξηση του βαθμού παροχής μίγματος, δηλαδή την υπερτροφοδότηση του κινητήρα υπάρχουν οι τρόποι που αναλύθηκαν προηγουμένως. Η λειτουργία τέτοιων συστημάτων ακολουθεί συγκεκριμένη διαδικασία, αφού πάντα ένας συμπιεστής οδηγεί το προ - συμπιεσμένο φρέσκο μίγμα στον κύλινδρο. Σημειώνεται ότι η μηχανική υπερτροφοδότες χρησιμοποιούνται συνήθως σε μικρούς κινητήρες, επειδή σε αυτούς η στροβιλο - υπερτροφοδότηση καυσαερίων θα ανέβαζε κατά πολύ την τιμή της υπερτροφοδότησης. Επίσης, ο στροβιλο - συμπιεστής καυσαερίων λειτουργεί σε χαμηλές ροές με αποτέλεσμα οι βαθμοί απόδοσης να μην είναι καλοί.

Οι υπερτροφοδότες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι οι Roots. Η ποσότητα παροχής αυτών των συμπιεστών μεταβάλλεται ανάλογα με τις στροφές και είναι σχεδόν ανεξάρτητοι της πίεσης καταθλίψεως. Η ικανότητα απορρόφησης του κινητήρα αυξάνεται ανάλογα με τον αριθμό των στροφών, ο συμπιεστής περιστρεφόμενου εμβόλου ενδείκνυται ως τον πλέον κατάλληλο για υπερτροφοδότηση τετράχρονου κινητήρα Otto.

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 3.1. διαπιστώνεται ότι το έμβολο του κινητήρα με υπερτροφοδότηση παράγει θετικό έργο και κατά την πλήρωση του κυλίνδρου, αποτέλεσμα αυτού είναι η ενεργεία που αποδίδει ο συμπιεστής στο φρέσκο μίγμα ξανά κερδίζεται.

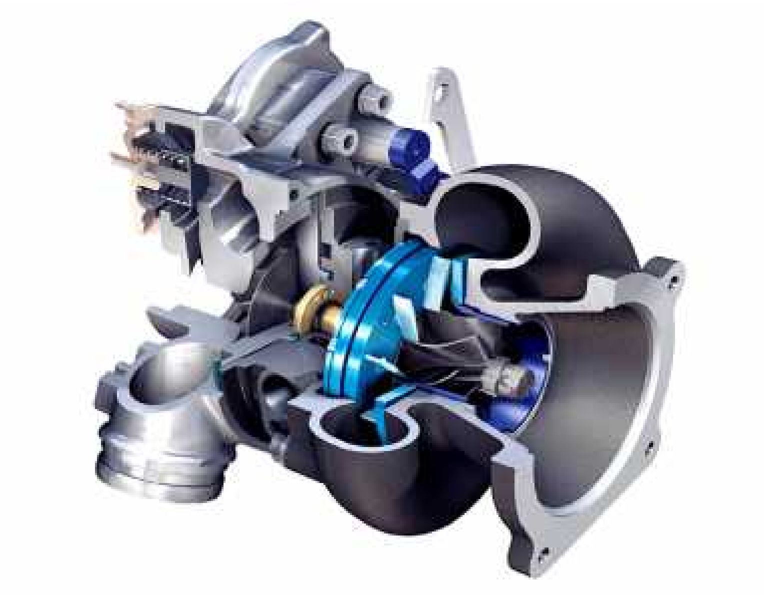


Διάγραμμα 3.1: Κύκλος λειτουργία 4-Χ μηχανής Otto με υπερτροφοδότηση [20]

Με ανοικτή εξαγωγή, η πίεση στον κύλινδρο του κινητήρα με υπερτροφοδότηση είναι υψηλότερη από την πίεση του απλού κινητήρα που υπάρχει απώλεια περισσότερης ενέργειας μαζί με τα καυσαέρια. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου, ιδιαίτερα στο πεδίο λειτουργίας του κινητήρα, είναι στον κινητήρα με μηχανική υπερτροφοδότηση υψηλότερη από αυτή στο μη υπερτροφοδοτούμενο, κάτω από την σύγκριση ίδιων χαρακτηριστικών μεγεθών. Η σύγκριση ωστόσο, δεν είναι και τόσο ορθή αφού έχουν διαφορετική ωφέλιμη ισχύ. Αυξάνοντας τα μεγέθη κυβισμού και στροφών του κινητήρα χωρίς υπερτροφοδότηση, ώστε να αποδώσει την ίδια ωφέλιμη ισχύ με τον κινητήρα υπερτροφοδότισης αυξάνεται δυσανάλογα η ισχύς τριβών σε σχέση με τις απώλειες ισχύος λόγω του συμπιεστή. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι ένας κινητήρας με υπερτροφοδότηση θα έχει καλύτερη κατανάλωση καύσιμου (Μαυρίδης, 2007)

3.4.1. Υπερτοφοδότηση και απόδοση

Η υπερτροφοδότηση των κινητήρων εσωτερικής καύσης είναι η βεβιασμένη παροχή στους θαλάμους καύσης περισσότερης μάζας αέρα από αυτή που έχουν την δυνατότητα να λάβουν κατά την λειτουργία τους. Κάθε κατασκευαστής έχει σκοπό στην δημιουργία ενός κινητήρα με μεγάλη απόδοση, μετατρέποντας δηλαδή το ωφέλιμο μηχανικό έργο το μέγιστο της προδιδόμενης αυτόν χημικής ενέργειας. Επιπλέον, επιδιώκει ο κατασκευαστής μικρό βάρος και περιορισμένες απώλειες κατά την λειτουργιά.



Σχήμα 3.5: Τα συστήματα υπερτροφοδότησης μεταβλητής γεωμετρίας κυριαρχούν στους κινητήρες diesel αλλά ποτέ δεν μπόρεσαν να καθιερωθούν και στους βενζινοκινητήρες λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας των καυσαερίων [15]

3.4.1.1. Θερμοδυναμική απόδοση

Σκοπός του κινητήρα εσωτερικής καύσης είναι η μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε θερμική ενέργεια και στην συνέχει σε κινητική ενέργεια, δηλαδή σε ωφέλιμο μηχανικό έργο. Στον ιδανικό κινητήρα εσωτερικής καύσης η θερμοδυναμική απόδοση θα αγγίζει το 100%, δηλαδή θα υπάρχει η δυνατότητα να μετατραπεί όλη η ενέργεια που περιέχουν τα καταναλισκόμενα καύσιμα σε ωφέλιμο έργο. Ωστόσο, αυτό δεν είναι εφικτό στην πραγματικότητα. Οι δυνατότητες των κινητήρων να μετατρέψει την ενέργεια του καυσίμου σε μηχανικό έργο κυμαίνονται 22 έως 28%. το υπόλοιπο της ενεργείας είναι απώλειες που διαμερίζονται σε ίσες περίπου αναλογίες στο σύστημα ψύξης και στα καυσαέρια που διοχετεύονται στο περιβάλλον. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι ότι η βελτίωση της απόδοσης ενός κινητήρα έγκειται τον περιορισμό των απωλειών του, είτε μειώνοντας τις τριβές είτε με την εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμότητας (Αρχοντίτσης, 2008).

3.4.1.2. Ογκομετρική απόδοση

Κανένας ατμοσφαιρικός κινητήρας δεν μπορεί να γεμίσει τους κυλίνδρους του εξολοκλήρου με φρέσκο μείγμα σε κάθε κύκλο λειτουργίας του. Αυτό οφείλεται σε παράγοντες όπως:

- Ο σχεδιασμός του συστήματος εισαγωγής και εξαγωγής
- Οι τριβές του αέρα κατά τη ροή του στην εισαγωγή
- Ο σχεδιασμός της κυλιδροκεφαλής
- Ο σχεδιασμός θαλάμου καύσης
- Ο χρονισμός των βαλβίδων

Η ογκομετρική απόδοση ενός σύγχρονου κινητήρα παραγωγής έχει την δυνατότητα να φτάσει βαθμό απόδοσης της τάξης του 80 - 85%, δηλαδή στην πράξη ενός ατμοσφαιρικού κινητήρα χωρητικότητας 2 lit αποδίδει την ισχύ που βάση της θεωρίας (δηλαδή της ογκομετρικής απόδοσης 100%) θα απέδιδε ένας κινητήρας 1,6lit.

Εκμεταλλευόμενοι τις αρχές τις ρευστοδυναμικής και της αεροδυναμικής μπορούμε σε ορισμένες περιπτώσεις να προσεγγίσουμε, ή να ξεπεράσουμε το 100% της ογκομετρικής απόδοσης ενός ατμοσφαιρικού κινητήρα, αλλά σε περιορισμένο ρυθμό περιστροφής και σε συνθήκες λειτουργίας. Στα αρχικά στάδια της υπερτροφοδότησης αποσκοπούσε στην αποκατάσταση του 100% της ογκομετρικής απόδοσης των μηχανών εσωτερικής καύσης, αλλά σύντομα οι Μηχανολόγοι Μηχανικοί χρησιμοποίησαν ως ένα μέσο «κατά βούληση» υπερκυβισμού των κινητήρων τους (Αρχοντίτσης, 2008).

3.5. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ TURBO

Η υπερτροφοδότηση κάνει την εμφάνιση της στα τέλη του 19ου αιώνα, όπου ο Gottlied Daimlerκατασκεύασε μια αντλία που λειτουργεί σε γρανάζια για να αυξήσει την πίεση στην εισαγωγή ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης. Το 1885 πραγματοποιείται η πρώτη εμφάνιση ενός μηχανικού υπερτροφοδότη. Ωστόσο, πραγματοποιήθηκαν πολλές αλλαγές με αποτέλεσμα ο σημερινός υπερτροφοδότης καυσαερίων στην σημερινή αρχή λειτουργίας να ανακαλυφθεί από τον Ελβετό Alfred Buchi, ο οποίος χρησιμοποίησε έναν συμπιεστή κινούμενο από τα καυσαέρια της εξάτμισης για συμπιέσει αέρα εμβολοφόρου κινητήρα.

Κατά την διάρκεια του Πρώτου παγκόσμιου πολέμου ο Γάλλος Auguste Rateau, χρησιμοποίησε υπερτροφοδότη καυσαερίων στους κινητήρες της Renault, οι οποίοι τότε κινούσαν κάποια μοντέλα Γαλλικών μαχητικών. Το όλο εγχείρημα έχει κάποια επιτυχία. Το 1918 ο μηχανικός της General Electric, Sanford Moss, προσάρμοσε τουρμπίνα σε ένα αεροπορικό κινητήρα Liberty V12. Η δοκιμή έγινε στο Pikes Peaktou Colorado όπου το σκάφος πέταξε σε 4.300m με απόλυτη επιτυχία. Η General Electric ήθελε με αυτό τον τρόπο να δείξει ότι βρήκαν τη μέθοδο να αντισταθμίσουν τις απώλειες ισχύος που δημιουργούσε το μεγάλο υψόμετρο με τον κατά συνέπεια φτωχότερο σε περιεκτικότητα οξυγόνο αέρα. Το νέο αυτό σύστημα ονομάστηκε Turbo supercharging.

Στις αρχές του 1920, το Turbo έκανε την εμφάνιση του σε αεροσκάφη παραγωγής αλλά και πλοία με κινητήρες Diesel. Οι Αμερικάνοι κατείχαν τα πρωτεία στη τεχνολογία αυτή, αφού η General Electric ήταν ουσιαστικά η πρώτη που έκανε τόσο μεγάλη εξέλιξη. Ωστόσο, με την πάροδο των χρόνων και φτάνοντας στον Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο τα περισσότερα μαχητικά αμερικανικά αεροσκάφη χρησιμοποιούσαν κινητήρες Turbo.

Στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας το πρώτο όχημα με Turbo, ήταν η Oldsmobile Cutlass Jetfire, με κινητήρα που κατασκευάστηκε από την General Motorsκαι την turbo Garrett Air Reseach 1962. Η πίεση στην εισαγωγή έφτανε τα 0,35bar στις 2.200rpm. Το αυτοκίνητο υπέφερε από έντονη προανάφλεξη λόγω υψηλής συμπίεσης που έφτανε το 10,25:1 και για αυτό και έκανε χρήση ενός αρχαίου Water Injection. Έτσι λοιπόν, είχε ένα δοχείο που γέμιζε νερό και μεθανόλη και αναμειγνυόταν με την βενζίνη που έφτανε τελικά στο καρμπυρατέρ. Στην περίπτωση που το υγρό τελείωνε υπήρχε μία δεύτερη πεταλούδα που έκλεινε και περιόριζε την πίεση, αφού ακόμα δεν υπήρχε το Wastegate. Η ισχύς έφτανε τα 215Ps, που ήταν μεγάλος αριθμός για V8, τον κινητήρα δηλαδή της εποχής. Τα 0-100 km/h είχε την δυνατότητα να τα φτάσει σε χρόνο 9,2sec και η τελική ταχύτητα του έφτανε τα 176 km/h. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι εκείνη την εποχή υπήρχε μπαρόμετρο, αλλά όχι στροφόμετρο.

Το ίδιο χρονικό διάστημα με την General Motors κάνει αισθητή την παρουσία της η Chevrolet Monza Spyder που έκανε χρήση του Turbo της TRW. Το 1973 ακολούθησε η BMW με τη 2002 Turbo και το 1974 στο Paris Auto Show, παρουσιάζεται το ταχύτερο αυτοκίνητό παραγωγής με τουρμπίνα καυσαερίων και με την τεχνολογία Wastegate που έκανε την πρώτη της εμφάνιση. Η Porsche 911 Turbo, μέχρι τότε για τον περιορισμό της πίεσης, χρησιμοποιούν μηχανικά κλαπέτα που ανοιγοκλείνουν βάση της πίεσης εισαγωγής ή των στροφών του Turbo.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι στροφές περιστροφής της τουρμπίνας και οι τεχνολογίες λαδιών καθώς και η ζυγοστάθμιση δεν έχουν καμία σχέση με τα σημερινά δεδομένα. Οι πιλότοι λοιπόν, στα μαχητικά χειροκίνητα αυξομείωναν την πίεση ανάλογα με το υψόμετρο και βάση των ενδείξεων πίεσης και στροφών Turbo. Αυτό δείχνει και την σημασία της τεχνολογικής ανάπτυξης, Wastegate και τις προόδους που θα ακολουθήσουν στην τεχνολογία των Turbo.

Στην Formula 1, τοTurbo κάνει για πρώτη φορά την εμφάνιση του το 1977 από την Renault στον μόλις 1.5 lit κινητήρα της. Η RS01 όπως ονομαζόταν, είχε τρελή δύναμη, μεγάλο Turbolag και μεγάλη αναξιοπιστία, αφού αντιμετώπιζε διαρκώς προβλήματα κατά την λειτουργία της. Ωστόσο οι ανταγωνιστές της έρχονται να δώσουν λύση στα προβλήματα της, έτσι η Renault RS01γράφει ιστορία κερδίζοντας αγώνα της F1, τότε σήμανε και η αρχή της υπερτροφοδότησης.

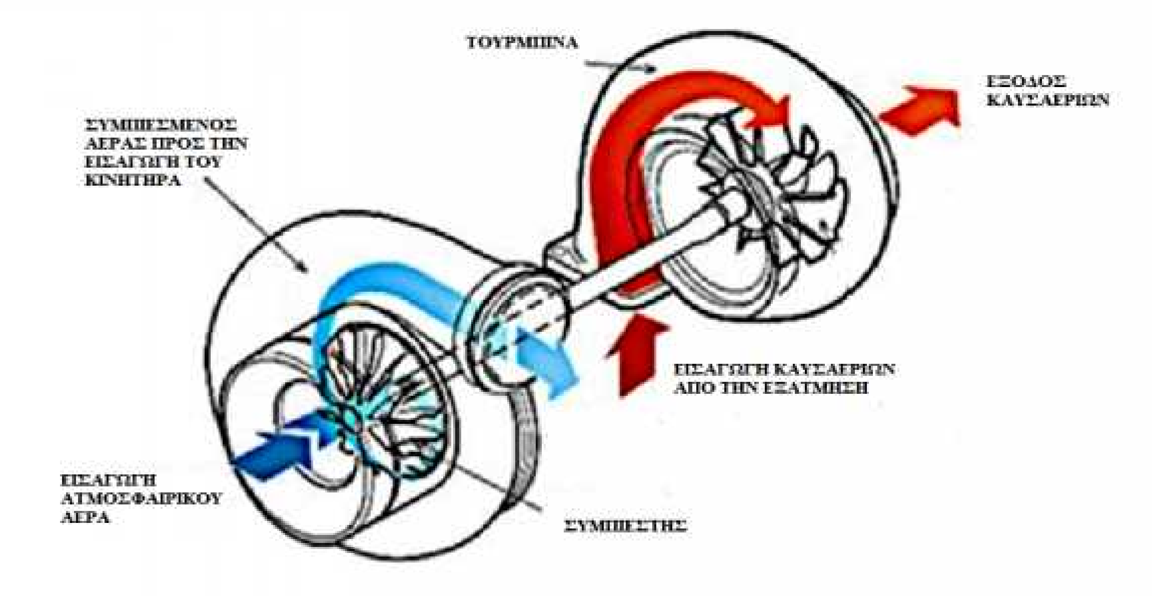
Έτσι λοιπόν η τεχνολογία που χλεύαζαν πολλοί μηχανικοί ανεβάζει την χωρητικότητα των ατμοσφαιρικών ανταγωνιστών από 3 lit στα 3.5 lit και η πίεση περιορίζεται στα 4 bar. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να αναδειχθεί η τεράστια διαφορά ισχύς.

Εικόνα 3.4: Απεικόνιση Renault RS01 και τον κινητήρα του, το πρώτο υπερτροφοδοτούμενο όχημα που κερδίζει αγώνα της Formula 1 [15]

3.5.1. Σκοπός Turbo

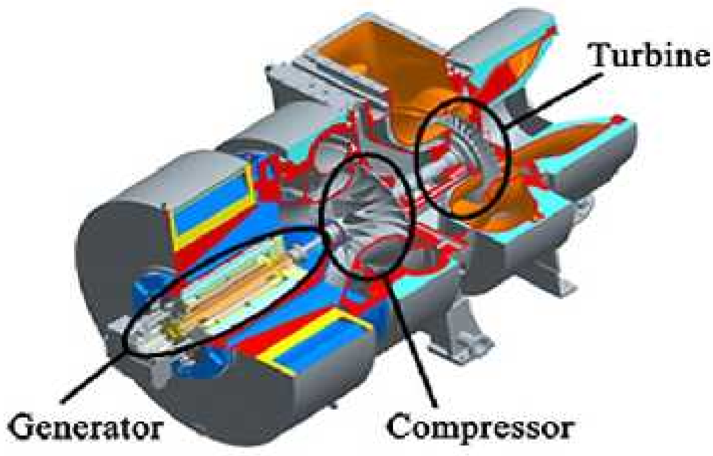
Ο βαθμός πλήρωσης με αέρα σε έναν κινητήρα αυτοκινήτου φθάνει στο μέγιστο ή λίγο παραπάνω από 80% όταν η ταχύτητα του είναι η μισή περίπου της μέγιστης δυνατής, ενώ μειώνεται σημαντικά σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Η μείωση αυτή του εισαγόμενου αέρα, με την αύξηση της ταχύτητας, έχει ως αποτέλεσμα ανάλογες μεταβολές στη ροπή στρέψης στον στροφαλοφόρο άξονα. Έτσι η ισχύς φθάνει σε μια μέγιστη τιμή καθώς η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνει. Σε ταχύτητες πάνω από την οριακή, η ανά κύκλο τροφοδοσία με αέρα ελαττώνεται τόσο γρήγορα ώστε η αποδιδόμενη ισχύς να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη σε χαμηλότερες ταχύτητες. Η ανικανότητα του κινητήρα να δεχθεί την απαραίτητη ποσότητα αέρα στις υψηλές ταχύτητες περιορίζει την απόδοσή του.

Το μειονέκτημα της μείωσης της απόδοσης παρακάμπτεται με τη βοήθεια του λεγόμενου υπερτροφοδότη, δηλαδή μιας αεραντλίας, ή ενός φυσητήρα που αυξάνει την πίεση του αέρα ο οποίος εισέρχεται στους κυλίνδρους, επομένως και την ποσότητά του. Ο στροβιλοτροφοδότης χρησιμοποιεί έναν αεριοστρόβιλο, που λειτουργεί με τα καυσαέρια, για να κινήσει έναν φυγοκεντρικό φυσητήρα. Ο κινητήρας με υπερτροφοδότη αποκτά μεγαλύτερη ισχύ και λειτουργεί με μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου. Οι κινητήρες των αεροπλάνων υπερτροφοδοτούνται συνήθως και με κοινούς φυσητήρες και με στροβιλοτροφοδότες, για να εξασφαλίζουν ομαλή λειτουργία στα μεγάλα ύψη (Καρόφυλλος, 2010).



Σχήμα 3.5.: Υπερτροφοδότης
(Αθανασίου & Γιοντανόφ, 2010).

Όπως έχει προαναφερθεί, η βασική αρχή της υπερτοφοδότησης είναι η παροχή αέρα στην εισαγωγή του κινητήρα, με μάζα ίση ή από αυτή που μπορεί να αντλήσει μόνος του από το περιβάλλον. Στην ουσία οι υπερτροφοδότες είναι αντλίες που συμπιέζουν αέρα στην εισαγωγή του κινητήρα. Οι αντλίες αυτές μπορούν να κινούνται είτε από στροφαλοφόρο μέσω ιμάντων, γραναζιών κ.ά. (μηχανικοί υπερσυμπιεστές - Compressor), είτε να παίρνουν κίνηση από τα καυσαέρια του κινητήρα (στροβιλοσυμπεστές εξάτμισης – Turbo). Το Turbo είναι η ευφυής επινόηση του Ελβετού μηχανικού Dr.Alfred Buchi (1909). Το Turbo έφερε την επανάσταση στους αεροπορικούς και βιομηχανικούς κινητήρες. Η αξιοπιστία και τα πλεονεκτήματα του σε σχέση με τους Compressor, οδήγησε στην καθιέρωση του στην αυτοκινητοβιομηχανία, αρχικά στους πετρελαιοκινητήρες φορτηγών και μηχανημάτων.



Σχήμα 3.6: Compressor και Turbo [15]

Επιπλέον, ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του Turbo είναι ότι δεν καταναλώνει ενέργεια από τον κινητήρα για την κίνηση του. Κινητήρια δύναμη είναι η θερμότητα των καυσαερίων, και κινητική και ηχητική ενέργεια. Με άλλα λόγια τα 35% της χαμένης ισχύος ενός κινητήρα, αυτό δηλαδή που αποβάλλεται μέσω των καυσαερίων και ισοδυναμεί με ισχύ μεγαλύτερη ακόμα και από την ισχύ που παράγει ο κινητήρας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα βαθμό για την κίνηση του Turbo.Ο άξονας του Turbo μεταφέρει ισχύ σχεδόν ίση με 20% της ισχύς του κινητήρα, πόσο μπορεί να φτάσει και το 100% αυτής της ισχύος σε αγωνιστικούς κινητήρες. Υπάρχουν εφαρμογές σε μεγάλους ναυτικούς κινητήρες ισχύος δεκάδων χιλιάδων ίππων, όπου ο άξονας μεταφέρει στην Πτερωτή εισαγωγής της τάξης των 5.000Ps, δηλαδή έξι φορές μεγαλύτερη από αυτή που καταναλώνει ένας μηχανικός υπερσυμπιεστής τύπου Roots σε έναν κινητήρα Top Fuel απόδοσης 1000 Ps/Lit (Αρχοντίτσης, 2008).

3.6. ΑΝΑΤΟΜΙΑ ΕΝΟΣ TURBO

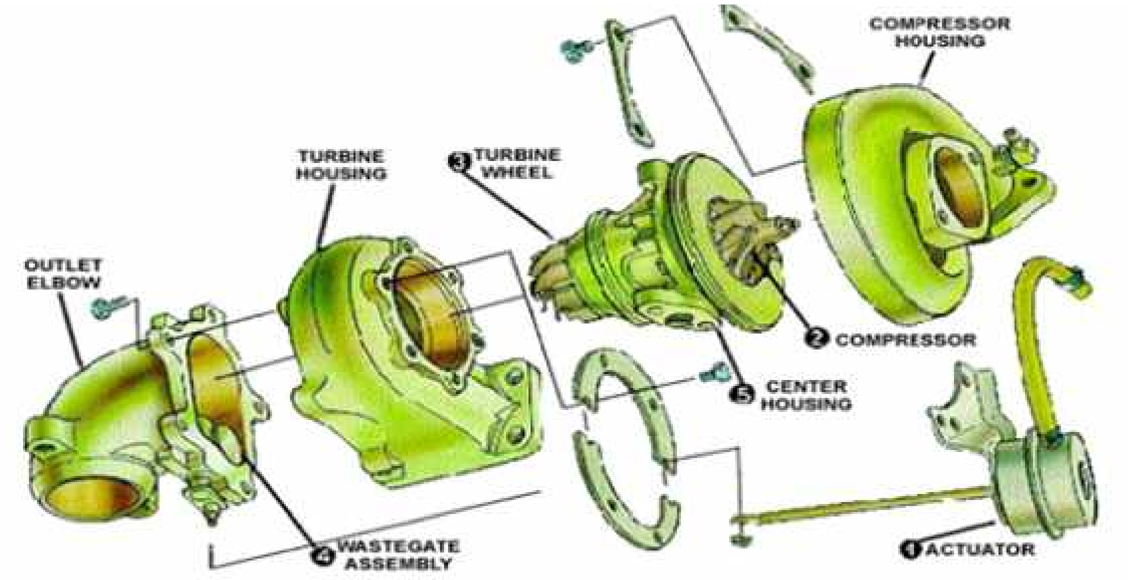
Όλοι οι στροβιλοσυμπιεστές αποτελούνται από κάποια κοινά εξαρτήματα. Ανάλογα με την εφαρμογή και τον τύπο του Turbo, δημιουργούνται παραλλαγές ως προς τα εξής:

- Την στήριξη του άξονα
- Τη μορφή φτερωτών
- Τα περιφερικά συστήματα έλεγχου Turbo

Πιο αναλυτικά ένα Turbo αποτελείται από τα εξής μέρη:

- ***Άξονας***: Φέρει τις πτερωτές αποτελώντας την «καρδία» του Turbo.
- ***Σώμα (cartridge)***: Περιέχει τα κουζινέτα του άξονα που τον στηρίζουν κατά την περιστροφή τους. Επίσης, περιλαμβάνει τους αγωγούς και τις κοιλότητες λίπανσης και ψύξης του turbo, και στηρίζει το κελύφη εισαγωγής και εξαγωγής.
- ***Κουζινέτα***: Εδράζουν στον άξονα, του επιτρέπου να περιστρέφεται στις 200.000 rpm (μικρά Turbo) και αποφεύγουν τις εγκάρσιες μετακινείς του, παραλαμβάνοντας τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την συμπίεση του αέρα.
- ***Κελύφη***: είναι γνωστό και με την ονομασία σαλιγκάρι, έχει την δυνατότητα να οδηγεί τις μάζες αέρα μεταβάλλοντας την πίεση και την ταχύτητα του. Το μαντέμι ή αλλιώς κέλυφος εξαγωγής επιταχύνει την ροή των καυσαερίων που προσκρούουν στην Πτερωτή εξαγωγή για να κινηθούν στον άξονα. Συνήθως περιλαμβάνει και την βαλβίδα διαφυγής το προαναφερόμενο Weastage, το οποίο είναι μια διάταξη που

εκτρέπει την ροή των καυσαερίων από την Πτερωτή και τα οδηγεί κατευθείαν στην εξάτμιση. Αποτέλεσμα αυτού είναι ο περιορισμός της ταχύτητας του Turbo και να σταθεροποιείται η πίεση υπερμπλήρωσεις στα επιθυμητά επίπεδα. Επιπλέον, το κέλυφος εισαγωγής ή συμπίεσης οδηγεί τον αέρα εισαγωγής στο συμπιεστή, ο οποίος κατά την λειτουργία του επιταχύνει τον αέρα και τον συμπιέζει (Αρχοντίτσης, 2008).



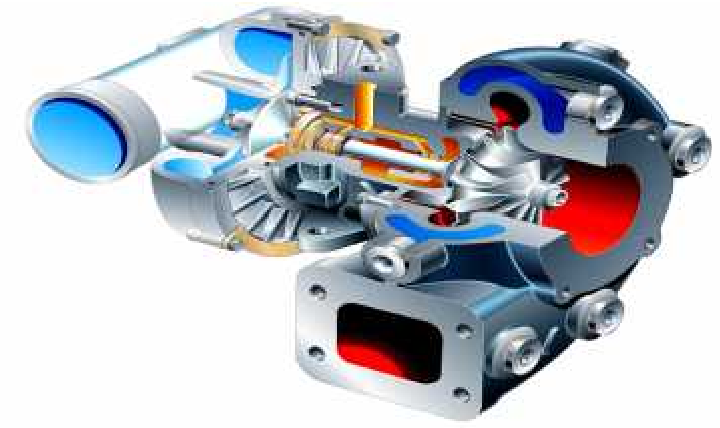
Σχήμα 3.7: Μέρη του Turbo [15]

3.6.1. Αρχή λειτουργιάς Turbo

Τα καυσαέρια του κινητήρα συλλέγονται στην πολλαπλή εξαγωγής και με μεγάλη ταχύτητα οδηγούνται στην είσοδο του μαντεμιού του Turbo, το οποίο είναι συνήθως στηριγμένο στην πολλαπλή. Το μαντέμι σχηματίζει ένα κωνικό στόμιο που αυξάνει την πίεση και την ταυτότητα των καυσαερίων. Ο όγκος των καυσαερίων διοχετεύεται και εκτονώνεται περιμετρικά στον κύριο θάλαμο του κελύφους, ο οποίος περικλείει την Πτερωτή εξαγωγής. Τα καυσαέρια παρασύρουν την Πτερωτή θέτοντας την κίνηση των Turbo.

Η Πτερωτή έχει σχήμα τέτοιο με σκοπό να εκμεταλλεύεται κατά το μέγιστο την ενέργεια των καυσαερίων και να την μετατρέπει σε κινητική ενέργεια του άξονα. Καθώς τα καυσαέρια αλλάζουν πορεία χάρη στο σχήμα των πτερυγίων και την γεωμετρία του μαντεμιού, διοχετεύονται προς την έξοδο του με διεύθυνση παράλληλη του άξονα. Από την άλλη πλευρά του Turbo, η Πτερωτή εισαγωγής ρουφαεί το αέρα μέσο του στομίου του κελύφους προς το εσωτερικό. Η σχεδίαση της Πτερωτή ς είναι τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται προς την περιφέρεια της πτερωτής. Από την Πτερωτή ο αέρας οδηγείται στο συλλέκτη του συμπιεστή, δηλαδή στο σωληνωτό τμήμα του σαλιγκαριού, περιμετρικά της Πτερωτή ς. Αυτό είναι διαμορφωμένο κατάλληλα ώστε να επιβραδύνει τον αέρα στον επιθυμητό βαθμό και να σταθεροποιεί την πίεση και την ροή του.

Στην συνέχεια ο αέρας κατευθύνεται προς την έξοδο του κελύφους συμπίεσης και από εκεί στον κινητήρα. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι την αρχή λειτουργίας ενός Turbo μπορούν να την επηρεάσουν πολλοί παράγοντες με αποτέλεσμα να μην δίνονται τα μέγιστα αποτελέσματα της απόδοσης του κινητήρα και να μην μπορεί να αναδειχθεί η αποτελεσματικότητα του μηχανισμού (Αρχοντίτσης, 2008).



Σχήμα 3.8: Τομή σε Turbo [15]

3.6.2. Μηχανική λειτουργιά Turbo

Για να μπορέσει ένας μηχανισμός Turbo να φτάσει και να ξεπεράσει τις 200.000 rpm πρέπει να έχει κατασκευαστεί με συγκεκριμένες ακρίβειες και ειδικές σχεδιαστηκές μεθόδους. Σκοπός του μηχανισμού δεν είναι μόνο η βέλτιστη απόδοση αλλά και η μακροζωία και η αξιοπιστία. Το σημείο κλειδί του σχεδιασμού ενός Turbo είναι ο άξονας.

Τα καυσαέρια ενός βενζινοκινητήρα φτάνουν στην Πτερωτή εισαγωγή με θερμοκρασίες που σε αρκετές περίπτωσης αγγίζουν τους 1100^{o}C. Επιπλέον, με τις ταχύτητες που περιστρέφονται οι πτερωτές δέχονται μεγάλες καταπονήσεις λόγω της κεντρομόλου δύναμης που δέχονται τα μόρια του υλικού της. Για τους προαναφερόμενους λόγους είναι κατασκευασμένες από πυρίμαχα κράματα μετάλλων υψηλής αντοχής και τεχνολογίας. Έχουν πραγματοποιηθεί πειραματικές μελέτες για την αντικατάσταση αυτών των υλικών ωστόσο, δεν έχει βρεθεί ακόμα το υλικό που θα δίνει καλύτερα αποτελέσματα για την διάρκεια ζωής.

Ο άξονας του Turbo αποτελεί ενιαίο κομμάτι με την Πτερωτή εξαγωγής και τις περισσότερες φορές είναι κατασκευασμένος με το ίδιο υλικό. Η κατεργασία του γίνεται με εργαλειομηχανές μεγάλης ακρίβειας και με πολύ μικρές κατασκευαστικές ανοχές, και ζυγοσταθμίζεται σε υψηλές ταχύτητες μαζί με τη Πτερωτή εισαγωγής. Ο άξονας διαθέτει ειδικές διαμορφώσεις για την έδραση του και ένα σπείρωμα στην άκρη του για την στήριξη του συμπιεστή. Ο συμπιεστής κατασκευάζεται συνήθως από κράματα αλουμινίου, διότι υπόκειται σε μικρότερες θερμικές καταπονήσεις από την τουρμπίνα. Όμως είναι πιο επιρρεπής σε μηχανικές ζημίες που προκαλούνται από την είσοδο ακαθαρσιών, θραυσμάτων ξένων σωμάτων στοTurbo. Τα ξένα σώματα έχουν την δυνατότητα να σπάσουν την Πτερωτή και να χαθεί η ζυγοστάθμιση του συνόλου που οδηγεί σε μείωση της απόδοσης και σε μερικές περιπτώσεις και ολική καταστροφή του συστήματοςTurbo. Αποτέλεσμα αυτού είναι να απαιτείτε η χρήση φίλτρων για την προστασία του.

Με την πάροδο των χρόνων γίνονται πειραματικές έρευνες για την αντικατάσταση των υλικών κατασκευής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι λόγοι των πειραμάτων θέλουν να οδηγήσουν στα εξής:

- Μείωση του βάρους των φτερωτών
- Μικρότερη αδράνεια περιστροφής
- Μικρότερο spool

Ωστόσο, ακόμα και σήμερα αυτές οι τεχνολογίες έχουν σοβαρά προβλήματα, αφού δεν μπορούν να αντέξουν τις υψηλές θερμοκρασίες και τις υψηλές πίεσεις που δημιουργούνται στο Turbo.

Τα έδρανα του άξονα βρίσκονται στο σώμα του Turbo ανάμεσα στις πτερωτές εισαγωγής και εξαγωγής. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο άξονας εδράζεται με κουζινέτα που λιπαίνονται με υδροδυναμική λίπανση από το κύριο κύκλωμα λίπανσης του κινητήρα. Ο κινητήρας παρέχει λάδι, συνήθως σε πίεση που κυμαίνεται από 0,5 έως 1,5 bar, στο σώμα το οποίο παρέχει ειδικές κοιλότητες και αυλάκια για την λίπανση των εδράνων. Τα έδρανα και ο άξονας είναι κατασκευασμένα με τέτοιες ανοχές ώστε να επιπλέει σε ένα λεπτό φιλμ από λάδι.

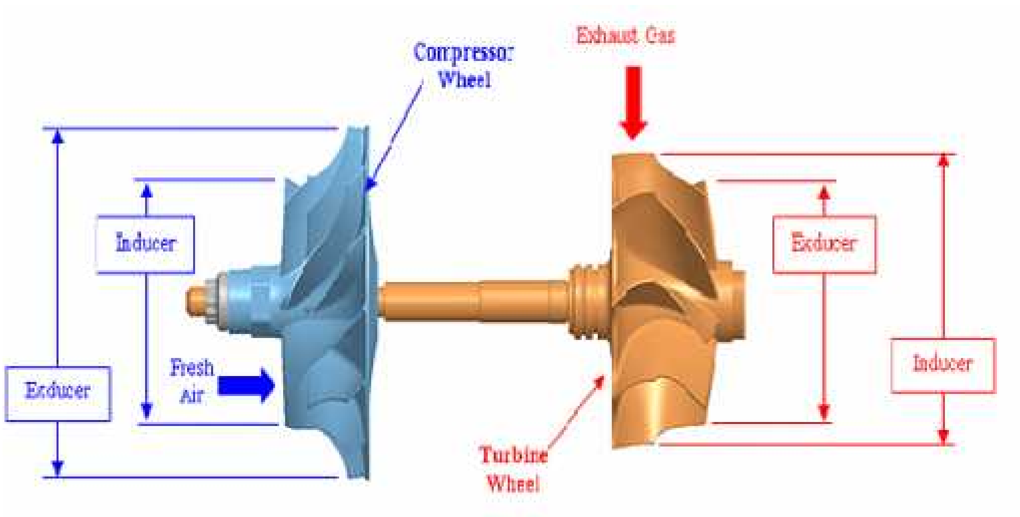
Τα κουζινέτα είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο ή κράματα ορείχαλκου, εμπλουτισμένα με μόλυβδο ή επικολλημένα με μόλυβδο ή αλουμίνιο ή λευκομέταλλα. Τα σταθερά κουζινέτα ήταν απλά στην κατασκευή και χαμηλού κόστους ωστόσο, δεν είχαν και τις καλύτερες αντοχές στις υψηλές ταχύτητες. Στην περίπτωση που ο άξονας έφτανε στην κρίσιμη ταχύτητα ή όταν χανόταν η ζυγοστάθμιση του στροφείου, ο άξονας εμφανίζει κραδασμούς με αποτέλεσμα το κέντρο περιστροφής του να μετακινείται διαρκώς μέσα στις ανοχές με συνέπεια όλα αυτά να καταπονούν τα κουζινέτα. Επιπλέον, αν και ο άξονας βάφεται πριν την τοποθέτηση του στο σύστημα οι φθορές που δέχεται είναι αναπόφευκτες και η διάρκεια ζωής του περιορίζεται.

Όμως, η λύση δόθηκε τα τελευταία χρόνια κατασκευάζοντας τα κουζινέτα και αυτά με ανοχές. Τα κουζινέτα δεν είναι πακτωμένα στο σώμα με αποτέλεσμα το λιπαντικό να κυκλοφορεί μεταξύ άξονα και κουζινέτων και μεταξύ κουζινέτων και σώματος. Τα κουζινέτα επίσης έχουν την δυνατότητα να περιστρέφονται με ταχύτητα που μπορεί να φτάσει το 50% της ταχύτητας του άξονα παρασυρόμενα από τις υδροδυναμικές τριβές λιπαντικού. Με αυτό τον τρόπο το κουζινέτο λειτούργει σαν «αμορτισέρ», μετατρέποντας τους συντονισμούς του στροφείου σε πλευρικές κινήσεις που τις αποσβένει μέσα από το λιπαντικό.

Σχήμα 3.9: Λεπτομερή απεικόνιση συστήματος Turbo (Αρχοντίτσης, 2008)

Η μέθοδος που προαναφέρουμε προϋποθέτει περίπλοκες διαμορφώσεις στο σώμα και ειδική κατεργασία του, ενώ συχνά το υλικό κατασκευής του είναι σίδηρος ή μαντέμι για να αντέχει στη φθορά και την τριβή των κουζινέτων πάνω του.

Η τελευταία παραλλαγή της έδρασης με κουζινέτα είναι τα «ημιπλεούμενα», τα οποία είναι στηριγμένα με πείρους ώστε να μην περιστρέφονται, αλλά διατηρούν τη δυνατότητα να κινούνται κάθετα προς τον άξονα για να μειώνουν τους κραδασμούς και τα κρουστικά φορτία. Ωστόσο, υπάρχει και το θρός το οποίοι είναι ένα δίσκος κατασκευασμένος από κράματα ανάλογα με των κουζινέτων. Επίσης, προλαμβάνει τα αξονικά φορτία του στροφείου, ώστε να μην κινδυνεύουν οι πτερωτές να έρθουν σε επαφή με τα κελύφη τους. Οι επιφάνειες του λιπαίνονται και αυτές υδροδυναμικά και διαθέτουν ειδικά αυλάκια και οπές για την κίνηση του λιπαντικού.



Σχήμα 3.10: Απεικόνηση φτερωτών και άξονα Turbo [18]

Με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας νέες τεχνικές εφαρμόζονται με σκοπό την μείωση των τριβών. Ωστόσο η πολυπλοκότητα τους, το βάρος και ο μεγάλος όγκος τις κάνει ακατάλληλες για την χρήση τους στην αυτοκινητοβιομηχανίας. Με την εξέλιξη της μεταλλουργίας και την κατασκευή ενσφαιρών τριβέων (ρουλεμάν) κατέστη δυνατή η χρήση τους σε πολυστροφέα Turbo υψηλών θερμοκρασιών. Το πλεονέκτημα των ρουλεμάν σε σχέση με τα κουζινέτα είναι οι μειωμένες τριβές και οι πολύ πικρότερες ανοχές. Συνέπεια αυτού είναι η αύξηση της ευστροφίας και της πολυστροφίας της τουρμπίνας και η μείωση των ανοχών μεταξύ κελυφών και φτερωτών, γεγονός που μειώνει τις απώλειες της πίεσης και αυξάνει την απόδοση του Turbo.

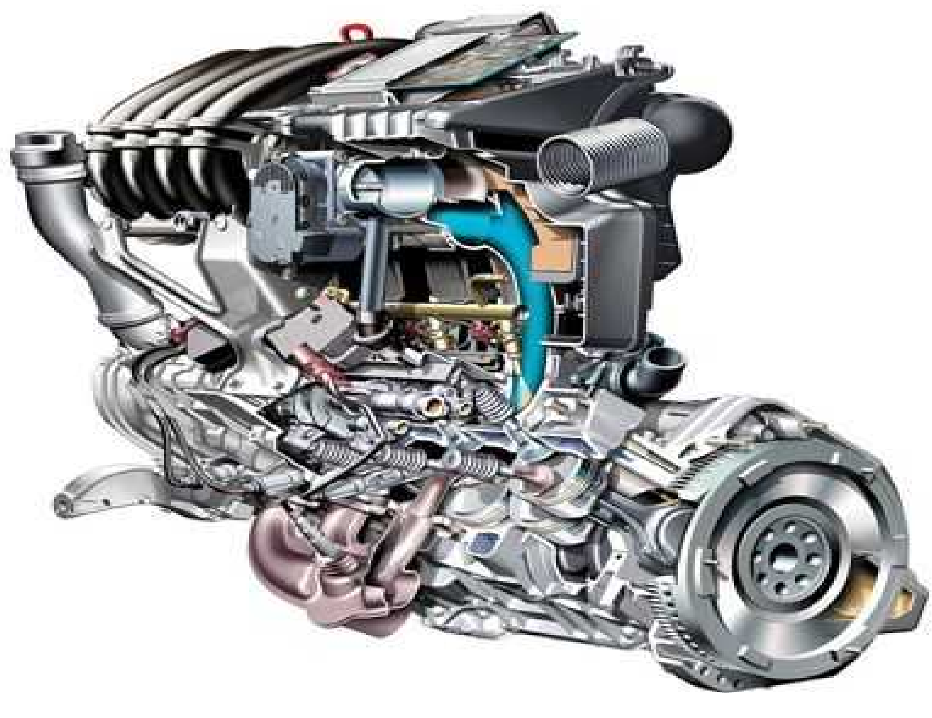
Η κατασκευή των ρουλεμάν έκανε το θρος περιττό, καθώς και οι ράγες στις οποίες κινούνται τα σφαιρίδια προσφέρουν και αξονική στήριξη στο στροφείο. Επιπλέον, το ρουλεμάν δεν απαιτεί διαρκεί παροχή λαδιού υπό πίεση για την συνεχή λίπανση του, αρκεί ο ψεκασμός με ένα σπρέι λαδιού. Έτσι εξασφαλίζεται και η στεγανοποίηση τωνTurbo, η μείωση της κατανάλωσης λαδιού, ενώ οι υδροδυναμικές τριβές μειώνονται και οι εσωτερικές απώλειες ισχύος Turbo περιορίζονται.

Τέτοιου τύπου Turbo έχει μεγαλύτερο ρελαντί από τα συμβατικά, προσφέροντας μειωμένο χρόνο ανάληψης ωφέλιμης ταχύτητας λειτουργίας κατά την διάρκεια του πατήματος του γκαζιού. Πειραματικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι το Turbo με ρουλεμάν εμφανίζουν 75% μικρότερες εσωτερικές απώλειες ισχύος, λόγω μειωμένων τριβών στον άξονα. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα ρουλεμάν που τοποθετούνται στα Turbo κοστίζουν διότι θα πρέπει να παρουσιάζουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και ιδιαίτερα να είναι ανθεκτικά στην θερμοκρασία με αποτέλεσμα να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (Αρχοντίτσης, 2008).

3.6.3. Στεγανοποίηση του Turbo

Για την στεγανοποίηση του Turbo έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρού διάφορες μέθοδοι. Ωστόσο, η πιο διαδεδομένη λύση είναι η τοποθέτηση στα κελύφη ελατηρίων ιδίων με αυτά που χρησιμοποιούνται στα πιστόνια για την στεγανοποίηση των αερίων, αλλά με διαστάσεις ανάλογες του άξονα του Turbo. Το ελατήριο σχεδόν εφαρμόζει στον άξονα χωρίς να το ακουμπάει και αφήνει πολύ μικρά περιθώρια διαφύγεις 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 του σώματος ακολουθεί το λιπαντικό προς το κάρτερ και στην συνέχεια ακολουθεί την ίδια οδό με τις αναθυμιάσεις του, προς την εισαγωγή του κινητήρα.

Στην μεριά του συμπιεστή η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη και αυτό οφείλεται στις συνθήκες υποπίεσης είτε λόγω της κοινής λειτουργία του κινητήρα σε χαμηλές στροφές είτε εξαιτίας της κλειστής πεταλούδας στο άφησα του γκαζιού είτε λόγω των ρευμάτων του αέρα μεταξύ Πτερωτή ς εισαγωγής και κελύφους. Στην περίπτωση αυτή το λιπαντικό αναρροφάτε μαζί με καυσαέρια προς το συμπιεστή και καίγεται στον κινητήρα. Άλλη μια αποδοτική πρακτική είναι η δυναμική στεγανοποίησης, εδώ η πατούρα του άξονα για το θρος είναι διάτρητη ακτινικά ώστε όταν φτάσει σε αυτό το σημείο το μίγμα αερίου και λιπαντικού το λάδι λόγω βαρύτητας παρασύρεται από την φυγοκεντρική δύναμη και διαχωρίζεται από τα αέρια, οδηγούμενο μέσα από τις τρύπες προς το εσωτερικό του σώματος.

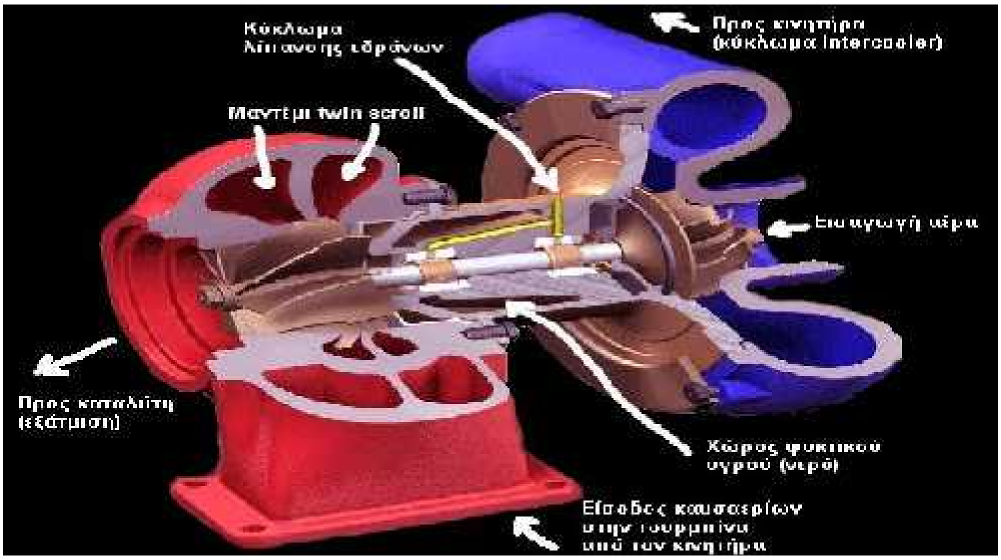


Σχήμα 3.11: Λεπτομερή απεικόνιση στοιχείων Turbo (π.χ. ελατηρίων κ.ά) (Αρχοντίτσης, 2008)

Ωστόσο πειραματικές μελέτες, έχουν πραγματοποιηθεί με δακτύλους από γραφίτη που εφάπτονται στον άξονα με την βοήθεια προ φορτισμένων ελατηρίων στο κέλυφος. Η στεγανοποίηση σε αυτή την περίπτωση είναι σχεδόν τέλεια, όμως οι τριβές είναι τόσο μεγάλες με αποτέλεσμα να περιορίζουν την ευστροφία του Turbo και να κρίνουν την μέθοδο ακατάλληλη (Αρχοντίτσης, 2008).

3.6.4. Λίπανση και Ψύξη

Ο κινητήρας παρέχει συνεχώς στο Turbo μια ποσότητα λιπαντικού το οποίο περνώντας από τα έδρανα αναμειγνύεται με τα καυσαέρια και τον συμπιεσμένο αέρα που διαρρέουν στο σώμα σχηματίζοντας αφρό. Το άφρισμα του λιπαντικού γίνεται εντονότερο λόγω της ταλάντωσης του άξονα στις υψηλές ταχύτητας περιστροφής του κατά την λειτουργία του Turbo υπό φορτίο. Επειδή ο αφρός συχνά είναι παχύρρευστος και με δεδομένο ότι στην έξοδο του Turbo το λιπαντικό έχει χάσει την αρχική του πίεση και η μόνη δύναμη που το οδηγεί στο Κάρτερ είναι η βαρύτητα, ο αγωγός εξόδου του λαδιού από το σώμα έχει μεγαλύτερες διαστάσεις από ότι ο αγωγός εισόδου. Ο αγωγός επιστροφής λαδιού καταλήγει σε τέτοιο σημείο στο Κάρτερ ώστε η ροή του λαδιού να είναι ελεύθερη και να μην εμποδίζεται από την στάθμη του λαδιού.



Εικόνα 3.5: Αναλυτική απεικόνιση κυκλώματος λίπανσης και ροή αέρα [19]

Το λιπαντικό εκτός από την λίπανση των εδράνων είναι επιφορτισμένο με την ψύξη του άξονα και του σώματος. Όπως είναι κατανοητό το λάδι υποβάλλεται σε υψηλές θερμοκρασίες καταπονήσεως που αλλοιώνουν τη σύσταση. Αυτός είναι και ο λόγος που οι κατασκευαστές Turbo κινητήρων συνιστούν να γίνεται χρήση συνθετών λιπαντικών, που είναι ανθεκτικότερα σε στις διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας τους και στις υψηλές θερμοκρασίας λειτουργίας. Επίσης, συχνά εξοπλίζουν τους κινητήρες τους με ψυγείο λαδιού για να αποφεύγουν την αποσύνθεση του λιπαντικού.

Ωστόσο, συχνά τα Turbo «πεθαίνουν» είτε από την ελλιπή λίπανση είτα από την προβληματική λίπανση. Οι υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται στην μεριά του μαντεμιού, τα λιπαντικά ακατάλληλης ποιότητας και η κακή χρήση από τους κατόχους – οδηγούς προκαλούν την δημιουργία στερεών καταλοίπων στα κουζινέτα. Τα στερεά κατάλοιπα «coke» δημιουργούν προβλήματα όπως το φράξιμο του αγωγού λαδιού του Turbo. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μείωση της απόδοσης και καταστροφής του με το πέρασμα των χρονών.

Μετά από πειραματικές μελέτες κατέληξαν οι κατασκευαστές – μηχανικοί ότι ύστερα από παρατεταμένη χρήση υπό φορτίο ενδείκνυται η λειτουργία του κινητήρα στο ρελαντί πριν το σβήσιμό του ώστε η κυκλοφορία του λιπαντικού να κρυώνει στο σώμα με σκοπό να αποφεύγεται η αποκρυστάλλωση του λιπαντικού. Στις εξεταζόμενες εφαρμογές η ψύξη του Turbo και η προστασία από τη στερεοποίηση του λιπαντικού ενισχύεται με την ψύξη του στο σώμα από το ψυκτικό υγρό του κινητήρα ένας ειδικός θάλαμος στον οποίο κυκλοφορεί νερό περικλείει τα έδρανα και απάγει μεγάλο μέρος της θερμότητας τους. Το κύκλωμα ψύξης είναι σχεδιασμένο ώστε ακόμα και μετά το σβήσιμο του κινητήρα να κυκλοφορεί νερό μέσα στο

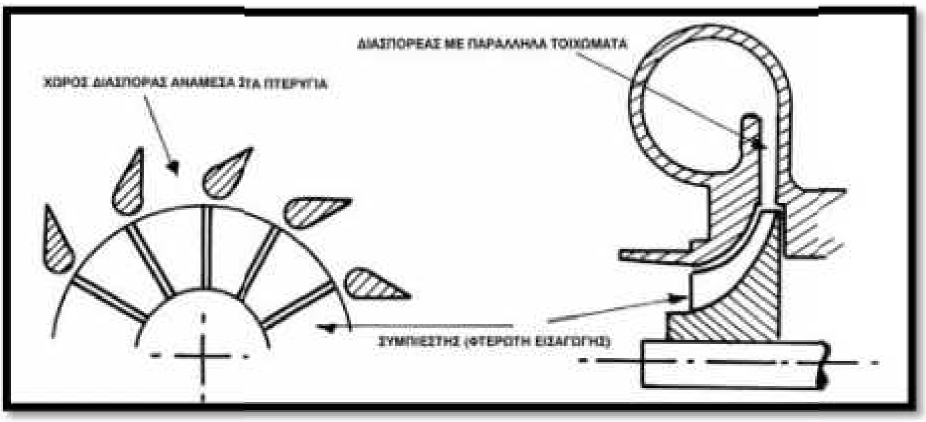
Turbo, σύμφωνα με το φαινόμενο του θερμοσίφωνου (το ψυχρό νερό είναι πυκνότερο από το θερμό και κατεβαίνει προς το χαμηλότερο σημεία ενός κυκλώματος) (Αρχοντίτσης, 2008).

Εικόνα 3.6: Το σύνθετα λιπαντικά θεωρούνται η καλύτερη λύση διότι έχουν την δυνατότητα να αντέχουν στις διαφοροποιήσεις των θερμοκρασιών
(Αρχοντίτσης, 2008)

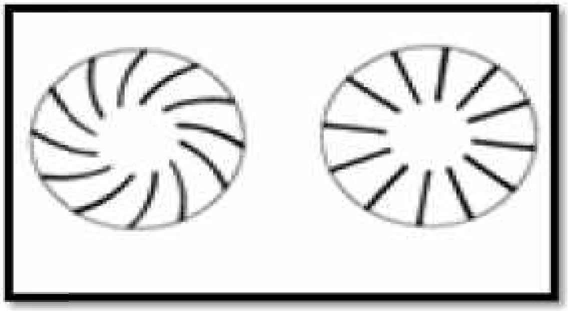
3.6.5. Τεχνικές λεπτομέρειες ενός Turbo

Τα βασικά χαρακτηρίστηκα ενός Turbo είναι τα εξής:

- Διάμετρος φτερωτών
- Trim φτερωτών
- Ροϊκή ικανότητα
- Βαθμός απόδοσης
- Μέγιστη πίεση λειτουργίας
- Λόγος A/R
- Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής
- Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας



Σχήμα 3.12: Σύγκρισης στροβίλου με και χωρίς πτερύγια. Αριστερά διακρίνεται ο στρόβιλος με πτερύγια, όπου μια σειρά κεκλιμένων πτερυγίων περιλαμβάνει το συμπιεστή. Ο χώρος ανάμεσα στα πτερύγια δημιουργεί τα αποκλίνοντα περάσματα διασποράς χωρίς πτερύγια, όπου τα τοιχώματα του κελύφους σχηματίζουν το χώρο διασποράς.
(Αρχοντίτσης, 2008)



Σχήμα 3.13: Οι δύο τύποι συμπιεστών με ευθεία και υπό κλίση πτερύγια. Ο τύπος με ευθεία πτερύγια επιτυγχάνει καλύτερες αποδόσεις αλλά σε περιορισμένο αριθμό στροφών.0ι συμπιεστές με υπό κλίση πτερύγια έχουν μικρότερη μηχανική αντοχή και λειτουργούν σε μικρότερους λόγους πίεσης
(Αρχοντίτσης, 2008).

3.6.5.1. Το κέλυφος και ο ρόλος του

Ο ρόλος του κελύφους όπως προαναφέραμε είναι πολύ σημαντικός. Στην ουσία συλλέγει τα αέρια και στη συνέχεια μεταβάλλει την πίεση και την ροή τους. Ακολουθεί πλήρη θεωρητική ανάλυση παραμένοντας στις συνήθεις αυτοκινητιστικές εφαρμογές (Αρχοντίτσης, 2008).

- **Κέλυφος εισαγωγής**

Το κέλυφος εισαγωγής παραλαμβάνει τον ατμοσφαιρικό αέρα, οδηγώντας τον στο συμπιεστή, δηλαδή τη Πτερωτή εισαγωγής. Καθώς ο αέρας φτάνει στην άκρη του συμπιεστή η πίεση πέφτει και η ταχύτητα του αυξάνει ανάλογα. Τα πτερύγια του συμπιεστή στροβιλίζουν τον αέρα, ενώ αυξάνουν και την κινητική ενέργεια. Καθώς ο αέρας φτάνει στην περιφέρεια του συμπιεστή, η πίεση και η ταχύτητα του έχουν αυξηθεί εξαιτίας της επιτάχυνσης που δέχτηκε από τα πτερύγια και της αυξημένης του κινητικής ενεργείας. Η ταχύτητα με την οποία ο αέρας φεύγει από τον συμπιεστή φτάνει και ξεπερνά σε μερικές περιπτώσεις την ταχύτητα του ήχου.

Στην συνέχεια ο αέρας πρέπει να επιβραδύνει και η αυξημένη κινητική του ενέργεια μετατρέπεται σε ωφέλιμη άνοδο της πίεσης του, προτού αυτό διοχετευθεί στον κινητήρα. Αυτή είναι και η λειτουργιά που επιτελεί ο στρόβιλος, το οποίο είναι και εξάρτημα του κελύφους. Στα πρώτα βήματα του Turbo, ο στρόβιλος αποτελείτο από μια σειρά αποκλινόντων ακροφυσίων, τα οποία επιβραδύνουν τον αέρα εκτονώνοντας τον, αυξάνοντας δηλαδή τον όγκο του. Με το εξέλιξη της τεχνολογίας τα ακροφύσια αντικαταστάθηκαν από ένα δακτύλιο με λεπίδες ή πτερύγια, που σχηματίζον κατάλληλους αυλούς για την εκτόνωση του αέρα. Ωστόσο, η απλούστερη μορφή διασποράς που χρησιμοποιεί υθυνόμενος προς τον κινητήρα. Σε ορισμένες περιπτώσεις κάτι στις μέρες μας είναι αυτή χωρίς πτερύγια.

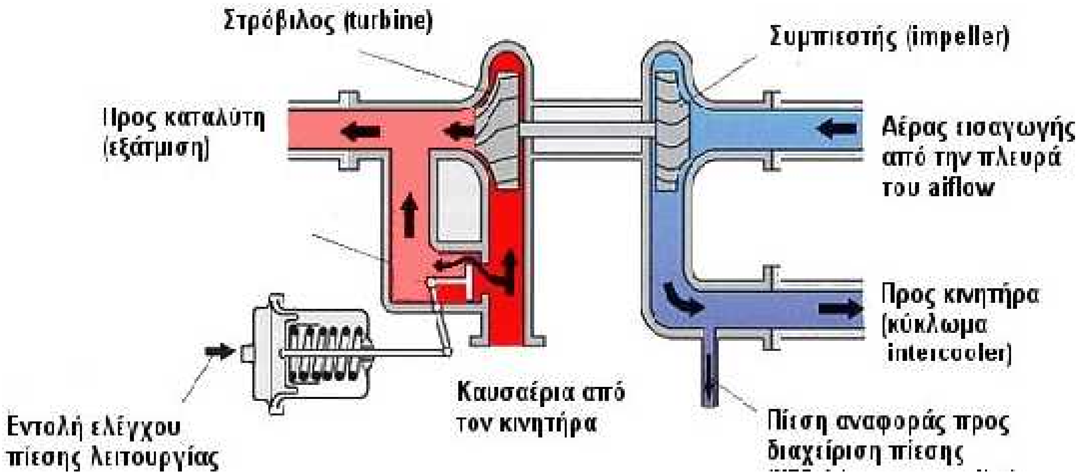
Το κέλυφος είναι κατάλληλα διαμορφωμένο γύρω από την Πτερωτή και σχηματίζει ένα στενό πέρασμα ανάμεσα στα τοιχώματα του τα τοιχώματα είναι παράλληλα και ο αέρας απομακρύνεται από το κέντρο της Πτερωτή ς, τόσο ο όγκος που περικλείεται ανάμεσα στα τοιχώματα αυξάνει τόσο και η ταχύτητα του αέρα επιβραδύνει. Στην συνέχεια διοχετεύεται στο συλλέκτη κελύφους, δηλαδή το σωληνοειδές τμήμα του σαλιγκαριού περιμετρικά της Πτερωτή ς. 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 στρόβιλος μπορεί να είναι σχηματισμένα έτσι, ώστε η αύξηση του περικυκλωμένου όγκου να μη είναι γραμμική.

Ο στρόβιλος χωρίς πτερύγια είναι πολύ διαδομένος διότι έχει μεγάλο εύρος λειτουργίας, το χαμηλό του κόστος, καλή μηχανική αντοχή και μεγάλη διάρκεια ζωής. Σημειωθεί ότι το μειονέκτημα του είναι η πολύ μικρή άνοδο της πίεσης σε σύγκριση με έναν διασπορέα, ανάλογης διαμέτρου, με πτερύγια.

❖ **Κέλυφος εξαγωγής (μαντέμι)**

Το κέλυφος εξαγωγής συλλέγει τα καυσαέρια όπως έρχονται από την πολλαπλή εξαγωγής, αυξάνει την ταχύτητα τους και τα στροβιλίζει κατευθύνοντας τα στην Πτερωτή εξαγωγής την οποία θέτουν σε κίνηση. Η αρχή λειτουργίας του είναι παρόμοια με αυτή του κελύφους εισαγωγής μόνο που η διαδικασία επαναλαμβάνεται αντίστροφα. Πιο συγκεκριμένα αντί να περιέχει μια κινούμενη Πτερωτή και να εκμεταλλεύεται την επιτάχυνση του αέρα που αυτή προκαλεί, το κέλυφος επιταχύνει τα αέρια (που περιλαμβάνει από την πολλαπλή εξαγωγής) και τα στροβιλίζει με σκοπό να τα διοχετεύσει επάνω στην Πτερωτή εξαγωγής και να την περιστρέψει, καθιστώντας τον κινητήρα. Το ακροφύσιο του μαντεμιού είναι ο «ομόλογος» του διασπορέα και είναι το μέρος του μαντεμιού που προκαλεί τον στροβιλισμό των καυσαερίων.

Στις τουρμπίνες που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία για λόγους κατασκευής και οικονομίας το ακροφύσιο δεν έχει πτερύγια καθώς τα καυσαέρια κινούνται 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 μαντεμιού, δηλαδή με την στατική μείωση της ακτίνας του θαλάμου της Πτερωτή ς.



Σχήμα 3.14: Απεικόνιση κυκλοφορίας αέρα μέσα στην τουρμπίνα [14]

3.6.5.2. Πτερωτές

Η επέμβαση στις πτερωτές ενός Turbo μπορεί να λύσει ή και να δημιουργήσει πολλά προβλήματα. Οι πτερωτές είναι ένα από τα βασικά εξαρτήματα του συστήματος Turbo και θέλει ιδιαίτερη προσοχή (Αρχοντίτσης, 2008).

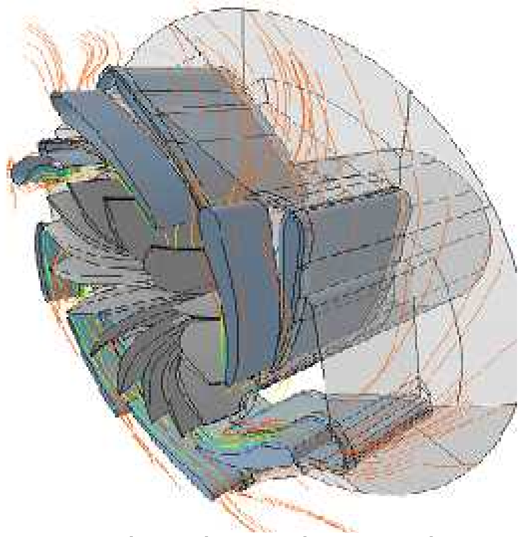
Εικόνα 3.7: Πτερωτή τελευταίας τεχνολογίας [20]

❖ **Πτερωτή εισαγωγής - συμπιεστής**

Κάθε συμπιεστής έχει έναν συγκεκριμένο συνδυασμό παραγόμενης πίεσης και ροής, στον οποίο παρουσιάζει την μέγιστη απόδοση του. Η απόδοση του συμπιεστή (compressor efficiency) είναι ένα ποσοστιαίο μέγεθος το οποίο προκύπτει από την σύγκριση δύο θερμοκρασιών. Οι δύο αυτές θερμοκρασίες είναι η πραγματική θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα στην έξοδο του Turbo, και της ιδανικής θερμοκρασίας, η οποία έχει υπολογιστεί βάσει πειραματικών διαδικασιών και των αρχών της θερμοδυναμικής. Όπως έχουμε προαναφέρει δεν υπάρχει ιδανικός κινητήρας που να έχει απόδοση 100%, για αυτό το λόγο το μέγιστο του συστήματα των Turbo είναι 80%.

Ωστόσο, για την απόδοση των Turbo υπάρχουν χάρτες που απεικονίζουν κάθε τύπου συμπιεστή και τις δυνατότητες που έχει σε συγκεκριμένη ροη και πίεση. Αυτοί οι χάρτες μπορούν να είναι διαθέσιμοι και στον κάτοχο του συγκεκριμένου συστήματος Turbo. Με την χρήση των χαρτών μπορούμε να υπολογίσουμε και να επιλέξουμε τον κατάλληλο συμπιεστή για το μοτέρ που διαθέτουμε.

Κάθε πτερωτή εισαγωγής έχει δυο διαφορετικές διαμέτρους, την μικρή διάμετρο στην είσοδο αέρα και την μεγάλη διάμετρο στην βάση της πτερωτή ς από όπου και ο αέρας φεύγει προς τον διασπορέα. Το trim είναι ένας αριθμός ο οποίος προσκόπτει από την ύψωση του τετραγώνου του πηλίκου της μικρής διαμέτρου προς την μεγάλη και τον πολλαπλασιασμό του πηλίκου αυτού επί εκατό. Όσο μεγαλύτερη τιμή παρουσιάζει το trim τόσο μεγαλύτερη είναι η παροχή του συμπιεστή κι 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.

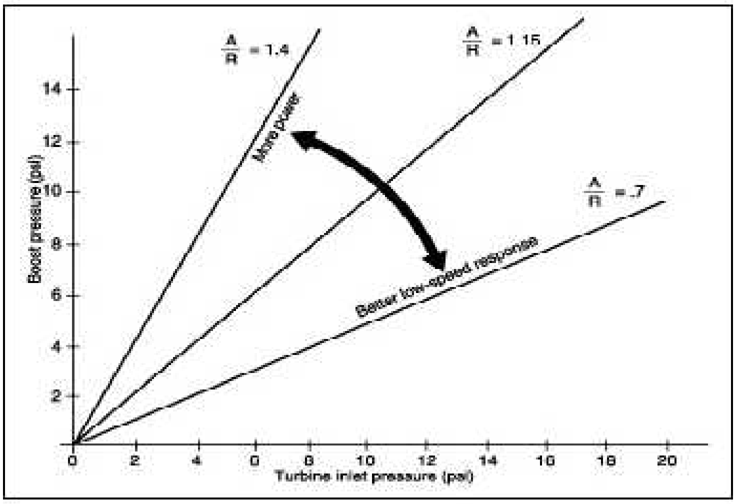


Σχήμα 3.15: Πτερωτή κατά την διάρκεια ροής του αέρα [20]

❖ **Πτερωτή εξαγωγής - τουρμπίνα**

Ο σκοπός για τον οποίο προορίζεται ένα Turboκαθορίζει το μέγεθος της τουρμπίνας που θα χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση. Υπάρχουν δύο κριτήρια για αυτή την επιλογή, η βασική διάμετρος της τουρμπίνας και ο λόγος A/R. Το μέγεθος της τουρμπίνας αντικατοπτρίζει την ικανότητα της τουρμπίνας να περιστρέφει τον άξονα με τέτοια ροπή και ταχύτητα, ώστε ο συμπιεστής να δώσει την απαιτούμενη πίεση και την ροή. Συνεπώς, οι μεγαλύτερες τουρμπίνες παράγουν περισσότερη δύναμη στον άξονα (άρα και η ισχύ του κινητήρα) από ότι οι μικρότερες. Για λόγους απλούστευσης, το μέγεθος της τουρμπίνας μπορεί να προκύψει από την διάμετρο της εξόδου των καυσαερίων στο μαντέμι. Αυτό αποτελεί και την πιο απλή επεξήγηση του συστήματος όμως, αποτελεί μια καλή αναπαράσταση της ροϊκής ικανότητας της τουρμπίνας (Διάγραμμα 3.2)

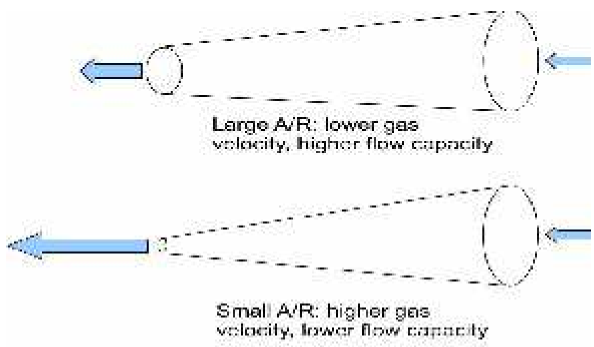
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γραφική παράσταση του μεγέθους προς την ροή δεν αποτελεί ακριβές εργαλείο για την επιλογή της τουρμπίνας, όμως χρησιμοποιείται για κάποια συμπεράσματα για την συμπεριφορά των μεγεθών. Επίσης, για την επιλογή της τουρμπίνας θα πρέπει να συνυπολογίζουμε διαφόρους παράγοντες με συνέπεια ότι λίγο μεγαλύτερη τουρμπίνα θα δίνει αποτελέσματα με μεγαλύτερη ασφάλεια και άνετη λειτουργία. Ακόμα δίνει την δυνατότητα να πραγματοποιηθούν βελτιώσεις.



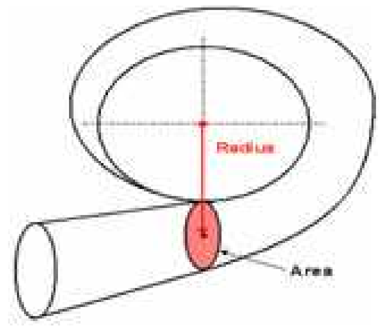
Διάγραμμα 3.2: Η επίδραση των διαφόρων λόγων A/R, όταν οι υπόλοιπες παράμετροι του κινητήρα παραμένουν σταθερές (Αρχοντίτσης, 2008)

❖ ***Προσδιορισμός της ροϊκής ικανότητας της τουρμπίνας:***

Για τον προσδιορισμό της ροϊκής ικανότητας μιας τουρμπίνας ο λόγος A/R είναι μια από τις ακριβέστερες παραμέτρους της εκάστοτε τουρμπίνα. Για να γίνει ευκολότερος και πιο κατανοητούς ο λόγος A/R μπορούμε να υποθέσουμε το κέλυφος εξαγωγής ως ένα κώνο τυλιγμένο γύρο από έναν άξονα, ώστε να μοιάζει με σαλιγκάρι. Ξετυλίγοντας τον κώνο και αφαιρώντας την μύτη του η τρύπα που δημιουργείται είναι η επιφάνεια αποβολής. Η επιφάνεια αυτής της τρύπα είναι η παράμετρος του λόγου A/R. Το μέγεθος αυτής της τρύπας καθορίζει την ταχύτητα με την οποία τα καυσαέρια εξέρχονται από το θάλαμο εξαγωγής και εισέρχονται στην τουρμπίνα. Τα αέρια κατά την είσοδο τους προσκρούουν στις λεπίδες της. Για οποιαδήποτε δεδομένη ροή καυσαερίων, μια μικρή επιφάνεια αποβολής θα προκαλεί την ταχύτερη κίνηση τους από ότι μια μεγαλύτερη. Συνεπώς, αυτή η ταχύτητα των καυσαερίων είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες έλεγχου της ταχύτητας περιστροφής του Turbo.



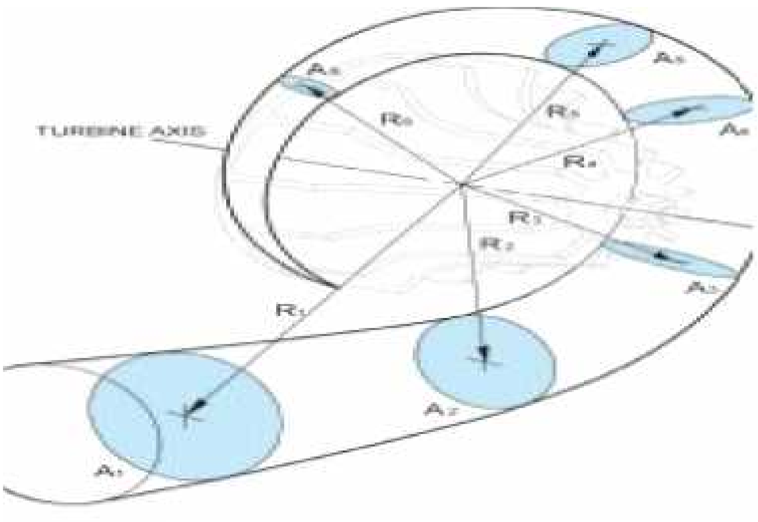
Σχήμα 3.16: Ο καθορισμός ταχύτητας σύμφωνα με την επιφάνεια (τρύπα κώνου) [20]



Σχήμα 3.17: Θα πρέπει ο λόγος A/R πρέπει να είναι σταθερό, δηλαδή Area/Radius=c [20]

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επιφάνεια υποβολής είναι ο καθοριστικός παράγοντας της πίεσης που δημιουργεί ο Turbo στην εξαγωγή, μια παρενέργεια που ευθύνεται για την επιστροφή των 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 με τα αντίστοιχα R σε ένα σύστημα τούρμπο θα πρέπει να δίνουν το ίδιο πηλίκο, διότι ο λόγος είναι σταθερός. Η ακτίνα R συμβάλει και αυτή μες τον τρόπο της στην ταχύτητα περιστροφής της πτερωτή ς και στην ροπή που θα παραλαμβάνει ο άξονας. Είναι προφανές ότι ένα μικρό R θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερης ταχύτητας περιστροφής του τούρμπο, ενώ ένα μεγαλύτερο R θα έχει μικρότερή ταχύτητα αλλά με μεγαλύτερη ροπή στρέψεις ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι συμπιεστές όπου αυτί φυσικά κρίνεται απαραίτητο. Ωστόσο, στην πράξη αυτό που διαφοροποιούν στα μαντέμια τους οι κατασκευαστές τούρμπο είναι η επιφάνεια αποβολής A και όχι η ακτίνα.



Σχήμα 3.18: Ακριβής υπολογισμός του λόγου A/R [20]

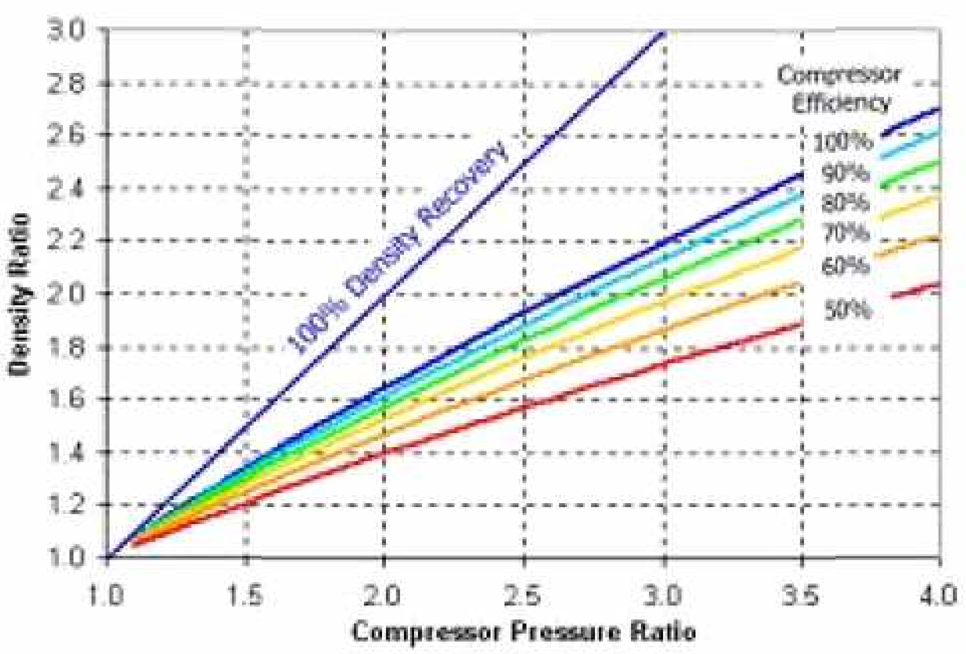
- ***Λόγος πίεσης***

Ο λόγος πίεσης είναι η συνολική απόλυτη πίεση που παράγεται από το τούρμπο διαιρούμενη με την ατμοσφαιρική πίεση. Η απόλυτη πίεση είναι η πίεση πάνω από το απόλυτο κενό. Το απόλυτο κενό σημαίνει μηδενική απόλυτη πίεση, ενώ η ατμοσφαιρική πίεση ισοδυναμεί με 1bar. Έτσι λοιπόν για 0,2 bar πίεσης υπερπλήρωσης η απόλυτη πίεση στην εισαγωγή είναι 1,2 bar. Συμπερασματικά η απόλυτη πίεση είναι η ένδειξη του μπαρομέτρου της εισαγωγής προσθέτοντας 1bar ακόμα.

Συμφώνα λοιπόν με τα παραπάνω ο λόγος πίεσης είναι ένα πηλίκο της απόλυτης πίεσης στην έξοδο του Turbo προς την ατμοσφαιρική πίεση και αντικατοπτρίζει την άνοδο της πίεσης σε σχέση με την ατμοσφαιρική. Η άνοδο της πίεσης είναι εν μέρει το μέγεθος που μας δίνει πόσος περισσότερος αέρας μπαίνει στον κινητήρα με την χρήση Turbo. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι όταν η πίεση υπερπλήρωσης είναι 0,5 bar ο λόγος πίεσης είναι 1,5 δηλαδή η πίεση ισοδυναμεί με 1,5 φορά της ατμοσφαιρικής πίεσης.

- ***Λόγος πυκνότητας***

Η ισχύς που παράγεται με την υπερτροφοδότηση είναι άμεση συνάρτηση της τελικής πυκνότητας του αέρα που καταναλώνει ο κινητήρας, δηλαδή του αριθμό των μορίων του αέρα που είναι σε κάθε μονάδα όγκου.



Διάγραμμα 3.3: Γραφική παράσταση της πυκνότητας του αέρα προς την πίεση του. Η πυκνότητα. Η πυκνότητα ελαττώνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας, για αυτό η άνοδος της ισχύς του κινητήρα δεν είναι απόλυτος ανάλογη της ανόδου της πίεσης
(Αρχοντίτσης, 2008)

Η πυκνότητα του αέρα είναι το πιο πολύπαθο μέγεθος σε ένα σύστημα Turbo. Καθώς ο συμπιεστής φέρει τα μόρια του πιο κοντά το ένα με το άλλο, η πυκνότητα του αέρα δεν ανεβαίνει στον ίδιο βαθμό με τη θερμοκρασία και την πίεση. Ο σπουδαιότερος παράγοντας που ευθύνεται για το φαινόμενο αυτό είναι ο λόγος απόδοσης του συμπιεστή. Ωστόσο, η χρήση του intercooler, αποδοτικών συμπιεστών και εξεζητημένων σαλιγκαριών σε συνδυασμό με κατάλληλα επιλεγμένες τουρμπίνες και λόγους A/R τείνει να ταυτίσει τον λόγο της πυκνότητας με τον λόγο πίεσης. Αυτό όμως δεν είναι ακόμα εφικτό.

❖ ***Ροή αέρα***

Η ροή του αέρα μέσα σε έναν κινητήρα αναφέρεται συνήθως ως κυβικά πόδια ανά λεπτό στην ατμοσφαιρική πίεση. Ωστόσο, ο τεχνικός όρος, ο οποίο σπανίως χρησιμοποιείται είναι η μέτρηση της μάζας του αέρα και όχι του όγκου του σε λίμπρες ανά λεπτό. Για να υπολογίσει κανείς την κατανάλωση αέρα ενός κινητήρα που λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση, δηλαδή χωρίς Turbo ή με το Turbo να μην παράγει πίεση αρκεί να υπολογιστεί το γινόμενο του συνολικού κυλινδρισμού του κινητήρα σε κυβικές ίντσες επί το μέγιστο αριθμό περιστροφής σε rpm επί την ογκομετρική του απόδοση επί 0,5 διότι η τετράχρονες κινητήρες γεμίζουν τους κυλίνδρους σε κάθε δεύτερη περιστροφή του στροφαλοφόρου και να διαίρεση όλο αυτό το γινόμενο με το 1.728 το οποίο μετατρέπει τις κυβικές ίντσες σε κυβικούς πόδες.

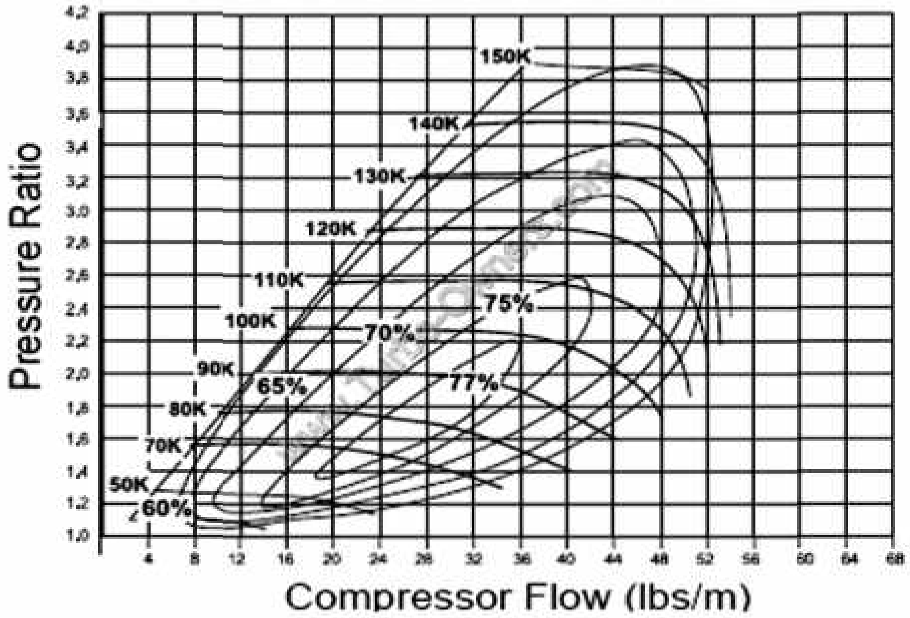
Έχοντας προσδιορίσει την βασική κατανάλωση του αέρα μπορεί να υπολογιστεί και η απαιτούμενη ροή από το Turbo βάση της πίεσης υπερπλήρωσης με την οποία θα λειτουργήσει το μοτέρ. Αυτό γίνεται πολύ απλά αν πολλαπλασιάσουμε την βασική κατανάλωση επί τον επιθυμητό λόγο πίεσης. Αν δηλαδή, έχουμε ένα μοτέρ με βασική κατανάλωση 250 cfm και το τουρμπίσουμε στο 0,8 bar ο λόγος πίεσης θα είναι 1,8 και η τελική κατανάλωση θα είναι 250 * 1,8 = 400 cfm.

3.6.5.3. Χάρτες απόδοσης

Ένας χάρτης απόδοσης περιλαμβάνει μερικές ελλείψεις διαγραμμένες σε ένα ορθοκανονικό σύστημα αξόνων. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η ροή του αέρα ενώ στον κατακόρυφο ο λόγος πίεσης. Πάνω στις ελλείψεις αναγράφονται κάποια ποσοστά, δηλαδή οι αντίστοιχοι ρυθμοί απόδοσης που αντιπροσωπεύουν κάθε καμπύλη και κάποιο αριθμοί που αντιπροσωπεύουν τον ρυθμό περιστροφής του ρότορα υπό τις αντίστοιχές συνθήκες.

Στο αριστερό του χάρτη οι καμπύλες αναγράφονται οι συνθήκες σε χαμηλή ροή, δηλαδή σε χαμηλές στροφές κινητήρα. Η ακραία αριστερή καμπύλη προσδιορίζει το όριο ασταθούς ροής (surgelimit), το οποίο προέρχεται από την πολύ χαμηλή ροή στην είσοδο του Turbo. Η μεσαίες καμπύλες εμφανίζουν την μέγιστη απόδοση του συμπιεστή, ενώ οι δεξιές αναφέρονται σε καταστάσεις πολύ υψηλής ροής, οι οποίες εμφανίζονται δυναμικά κατά την λειτουργία του μοτέρ.

Συμπερασματικά, η μέθοδος που ακολουθείται είναι σχετικά απλή επιλέγοντας τις στροφές που θέλουμε να επιταχύνουμε υπολογίζουμε το μέγιστό λόγο πίεσης και στην συνέχεια τα ανάλογα cfm τα οποία και σημειώνονται στο χάρτη. Θα πρέπει να επισημανθεί επίσης ότι το σημείο που θα επιλεγεί θα πρέπει οπωσδήποτε να βρίσκεται δεξιότερα της γραμμής ασταθούς λειτουργίας. Ορισμένοι χάρτες δεν αναφέρουν το surgelimit με αποτέλεσμα να θεωρείται από τον μηχανικό ότι το όριο βρίσκεται στην αριστερή γραμμή (Αρχοντίτσης, 2008).



Διάγραμμα 3.4: Χάρτης απόδοσης [21]

3.7. ΕΠΙΛΟΓΗ TURBO

Τα κριτήρια για την επιλογή είναι η απόκριση του κινητήρα, η αναμενόμενη δύναμη και το ωφέλιμο πεδίο στροφών του. Συνήθως είναι εύκολο να συνδυάσουμε την δύναμη στις χαμηλές και μεσαίες στροφές ή τις μεσαίες και υψηλές, χωρίς πολλές θυσίες από μεριά lag,αντίστασης στην ροή των καυσαερίων και ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών. Το πράγμα όμως δυσκολεύει όταν θέλουμε να γίνει συνδυασμός όλων των ανωτέρων και μάλιστα με ένα turbo. Η παράγοντες προς επιλογή είναι η διάμετρος της εξόδου του μαντεμιού και οι διαθέσιμες επιλογές A/R. Τα διαγράμματα που έχουν δημιουργηθεί για να μπορούν να υπολογιστούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά δεν θεωρούνται ασφαλή μέθοδο. Το τελικό και το ασφαλή αποτέλεσμα το δίνει η δοκιμή που πραγματοποιείται, η απόρριψη ή η αποδοχή του συστήματος.

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 το lag καταφεύγει στην επιλογή του μικρού λόγου A/R. Ωστόσο, θα πρέπει να υπολογιστεί ο κίνδυνος ότι το μικρό μαντέμι «πνίγει» τον κινητήρα. Άρα, θα πρέπει να μετρηθεί η πίεση στην πολλαπλή εισαγωγής και εξαγωγής για να κριθεί αν το A/R είναι κατάλληλο. Ο χρυσός κανόνας για γρήγορή απόκριση και άνετη λειτουργία του μοτέρ είναι η μέγιστη πίεση στο μαντέμι να μην είναι διπλάσια της μέγιστης πίεσης εισαγωγής του κινητήρα. Επίσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι δύο παράγοντες οι οποίοι είναι το πεδίο θερμοκρασίας και οι στροφές λειτουργίας.

Με τους προαναφερόμενους παράγοντες μπορεί να επιλεγεί το turbo. Ωστόσο, υπάρχει περίπτωση είτε ο κινητήρας να αναπτύξει θερμοκρασία περά από την αντοχή του turbo είτε να αναπτύξει περισσότερες στροφές με αποτέλεσμα να καταστραφεί. Υπάρχει και η αντίθετη εκδοχή, δηλαδή να μην περιστρέφεται πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα να μην δίνει την μέγιστη απόδοση. Κάθε μηχανικός θα πρέπει βάσει των διαγραμμάτων και της εμπειρίας του να εντοπίζει την χρειάζεται κάθε κινητήρας ώστε να δίνει μέγιστη απόδοση και ασφαλή λειτουργία (Αρχοντίτσης, 2008).

4.ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΕΡΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί η μελέτη ενός υπερτροφοδότη για 4-Χ βενζινοκινητήρα. Τα όσα έχουν προαναφερθεί αποτελούν την πλήρη περιγραφή και ανάλυση του συστήματος υπερτροφοδότησης αλλά όχι την θερμοδυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Σκοπός λοιπόν της μελέτης είναι η θερμοδυναμική ανάλυση του υπερτροφοδότη ο οποίος καθορίζει την πίεση και την παροχή του αέρα σάρωσης της μηχανής, που αποτελεί ένα από τα βασικότερα λειτουργικά μεγέθη της μηχανής. Οι βασικές παράμετροι για τη λειτουργία ενός υπερτροφοδότη (στροβιλοϋπερπληρωτή - turbocharger) δηλαδή του συστήματος συμπιεστή – στροβίλου είναι η παροχή αέρα που διακινεί, η ταχύτητα περιστροφής, ο λόγος πίεσης και φυσικά ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης. Σύμφωνα με αυτές τις παραμέτρους δημιουργείται ο χάρτης λειτουργίας του συμπιεστή ή του στροβίλου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τις περισσότερες φορές οι κατασκευαστές δεν παρέχουν τους χάρτες λειτουργίας των συνιστωσών του υπερτροφοδότητη όποτε θα πρέπει κάποιες παράμετροι να μετρηθούν με όργανα (πίεση, ταχύτητα περιστροφής) και οι υπόλοιπες (παροχή αέρα, ισεντροπικός βαθμός απόδοσης) να υπολογιστούν – εκτιμηθούν.

4.2. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΕΡΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ

Η αύξηση της απόδοσης μιας μηχανής απαιτεί την καύση περισσότερου καυσίμου και μεγαλύτερη έκρηξη σε κάθε κύκλο. Ο τρόπος αύξησης της ισχύος είναι να κατασκευαστεί μια κανονικού μεγέθους μηχανή η οποία θα είναι πιο αποδοτική. Αυτό μπορεί να επιτευγχθεί με την επιπρόσθετη παροχή αέρα στο θάλαμος καύσης. Περισσότερος αέρας και περισσότερο καύσιμο οδηγούν σε μεγαλύτερη καύση και υψηλότερη ιπποδύναμη. Αυτό μπορεί να επιτευγχθεί με έναν υπετροφοδότη.

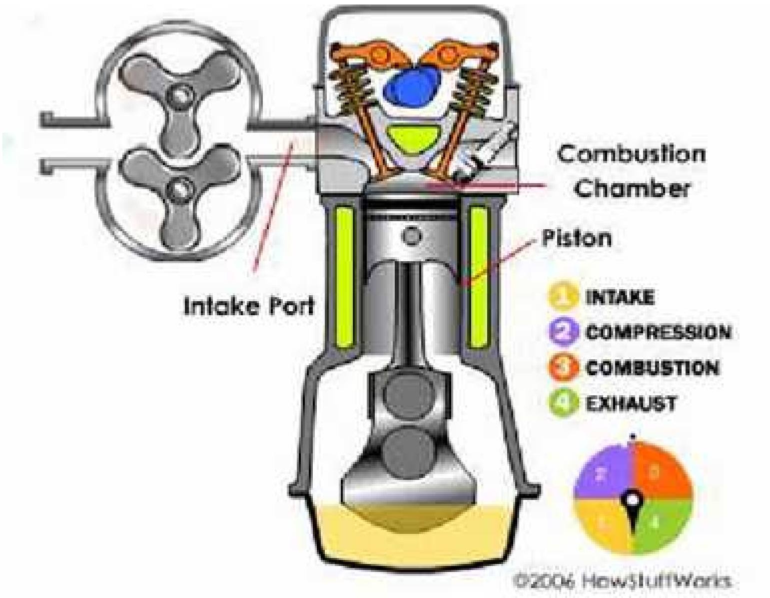
Όπως έχει προαναφερθεί ο υπετροφοδότης είναι στην ουσία ένας συμπιεστής αέρα για την εξαναγκασμένη επαγωγή του κινητήρα. Κάνει την ίδια δουλειά με έναν συμπιεστή, δηλαδή Συμπιέζει τον αέρα που διανέμει στον θάλαμο καύσης της μηχανής. Όσο μεγαλύτερη η παροχη αέρα τόσο περισσότεο οξυγόνο συνεισφέρει στην ανάφλεξη από ότι αν η ποσότητα του αέρα ήταν σε μια απλή μηχανή. Αυτό επιτρέπει την είσοδο περισσότερου καύσιμου στο θάλαμο και περισσότερο έργο να πραγματοποιείται ανά κύκλο, αυξάνοντας την έξοδο ισχύος της μηχανής. Έτσι λοιπόν ένας υπετροφοδότης είναι ένα επιπλεόν εξάρτημα σε μια μηχανή για την αύξηση της απόδοσης και της ροπής της μηχανής.

Η αρχή λειτουργίας ενός υπερτροφοδότη είναι η ακόλουθη:

Επιπλέον καύσιμο + επιπλέον αέρας = Μεγαλύτερη έκρηξη →

Μεγαλύτερη έκρηξη = Υψηλότερη ιπποδύναμη

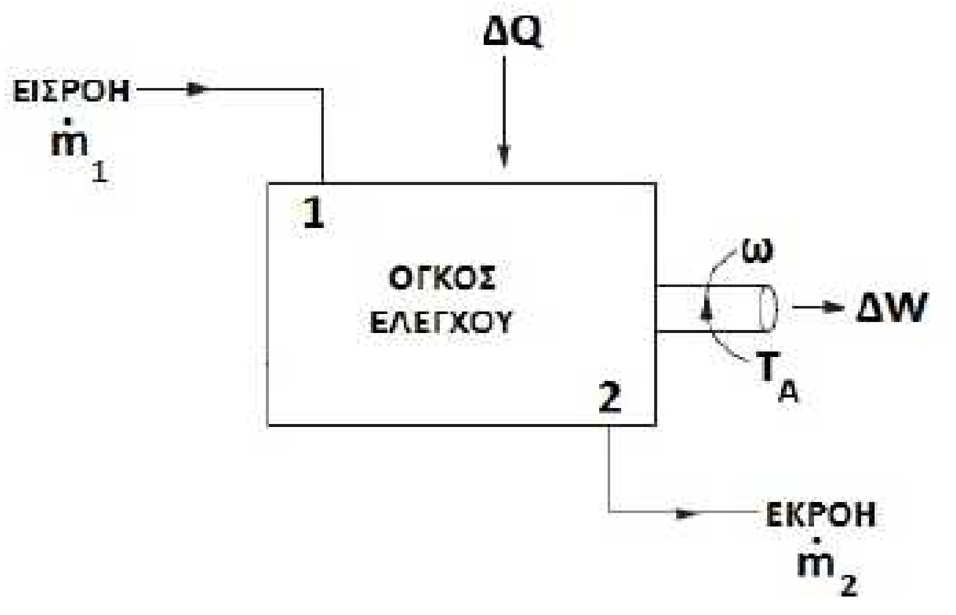
Είναι απολύτως απλό και κατανοητό ότι για να παρθεί παραπάνω ισχύς από μια μηχανή πρέπει να γίνει καύση περισσότερου καυσίμου. Επιπλέον καύσιμο σημαίνει μεγαλύτερη έκρηξη σε κάθε κύκλο, η οποία θα σπρώξει το πιστόνι με μεγαλύτερη ώθηση και συνεπώς αυτή η ώθηση θα μεταδοθεί στους τροχούς με τη βοήθεια του στρόφαλου και του άξονα. Οι τροχοί θα περιστραφούν πιο γρήγορα και με μεγαλύτερη ισχύ. Για να καεί περισσότερο καύσιμο στον κινητήρα είναι απαραίτητη μεγαλύτερη ποσότητα αέρα μέσα στο θάλαμο. Το χημικά ορθό μίγμα - αναλογία αέρα – καυσίμου 14:1 είναι απαραίτητη για μια μηχανή ώστε να λειτουργεί ορθά. Ο υπετροφοδότης συμπιέζει τον αέρα που διανέμεται στον κινητήρα ώστε να παρέχει την ίδια ποσότητα στον περιορισμένο χώρο το κυλίνδρου. Για αυτό ο υπετροφοδότης αυξάνει την ισχύ εξόδου κάθε κινητήρα.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα λειτουργίας ενός κινητήρα εξοπλισμένου με έναν υπετροφοδότη [27]

4.2.1. Θερμοδυναμική ανάλυση υπερτροφοδότη

Η θερμοδυναμική ανάλυση τέτοιων συστημάτων χρησιμοποιεί την ιδέα του Ανοικτού θερμοδυναμικού συστήματος. Στο ανοικτό θερμοδυναμικό σύστημα εισέρχεται ρευστό στο σημείο 1 και εξέρχεται αντίστοιχη ποσότητα στην κατάσταση 2. Ταυτόχρονα μεταφέρεται θερμική ισχύς ΔQ/Δt και μηχανική ισχύς ΔW/Δt όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1



Σχήμα 4.2: Το ανοιχτό θερμοδυναμικό σύστημα μιας στροβιλομηχανής (Γεωργίου, 2015)

Η μηχανική ισχύς μεταφέρεται μέσω του άξονα έτσι ώστε να ισχύει:

$$\Delta\dot{W} = \omega \cdot T \quad (4.1)$$

Όπου:

ω = η γωνιακή ταχύτητα του άξονα (rad/s)
T = η ροπή που ασκείται στον άξονα (Nm)

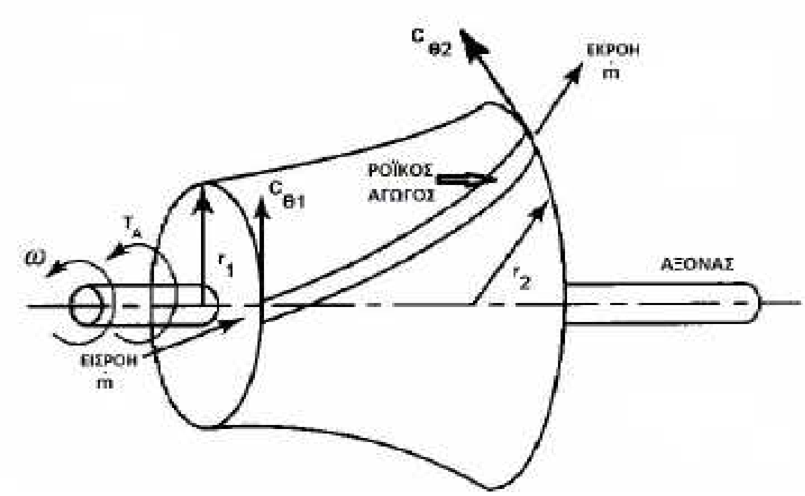
Το πρώτο αξίωμα της θερμοδυναμικής με σταθερές συνθήκες εισροής, εκροής και μεταφοράς είναι το ακόλουθο:

$$(\dot{m}_1 \cdot H_1) - (\dot{m}_2 \cdot H_2) = \Delta\dot{W} - \Delta Q \quad (4.2)$$

Όπου:

$\dot{m}$ = η παροχή μάζας
H = η ειδική ενθαλπία του ρευστού
ΔW/Δt = το καθαρό έργο που παράγει ο στροβιλομηχανισμός
ΔQ/Δt = το καθαρό ποσό θερμότητας που εισέρχεται στο στροβιλομηχανισμό

Στο παρακάτω Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται ο όγκος ελέγχου ενός στοιχειώδους ροϊκού αγωγού.



Σχήμα 4.3: Όγκος ελέγχου ενός στοιχειώδους ροϊκού αγωγού
(Γεωργίου,2015)

Στη ροϊκή και θερμοδυναμική ανάλυση στροβιλομηχανισμών χρησιμοποιείται η εξίσωση Euler και αποτελεί τη βασική εξίσωση για το σχεδιασμό τους. Δεν έχει βέβαια τόσο απλή χρήση γιατί δεν είναι γνωστές από πριν οι κατανομές των θέσεων που εξέρχονται οι στοιχειώδεις ροϊκοί αγωγοί στο επίπεδο εκροής. Επίσης, δε γίνεται να οριστεί ένας άπειρος αριθμός στοιχειωδών ροϊκών αγωγών. Όταν η λειτουργία των βαθμίδων δεν είναι τέλεια αλλά υπάρχουν έργα τριβής (W_F) και διαρροές θερμότητας (ΔQ_L) τότε χρησιμοποιείται η πλήρης μορφή του πρώτου θερμοδυναμικού αξιώματος:

$$\Delta Q_{in} - \Delta Q_L + W_L - W_A = \Delta H \quad (4.3)$$

Οι παρακάτω σχέσεις εφαρμόζονται στη μελέτη τόσο της υπερτροφοδότησης όσο και στην στροβιλοτροφοδότησης.

❖ ***Λόγοι υπερτοφοδότησης***

Το καύσιμο που καίγεται ανά κύκλο σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης είναι περιορισμένο σε ποσότητα αέρα. Για τον υπολογισμός της αναλογίας των καυσαερίων χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\frac{F}{A} = \frac{1}{14.6} \qquad (4.4)$$

Όπου:

A= η επιφάνεια
F= η δύναμη

Η ροπή του υπερτροφοδότη υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_{orq} = \frac{n_f \cdot m_f \cdot Q_{HV}}{2® n_R} \qquad (4.5)$$

Ακόμα η γωνιακή ταχύτητα έχει υπολογιστεί από την σχέση:

$$\mu = 2® n_R \qquad (4.6)$$

Όπου:

n_f = η μετατροπή καυσίμου και ογκομετρικές αποδόσεις
m_f =η μάζα καυσίμου ανά κύκλο
Q_{HV}= η θερμογόνος δύναμη καυσίμου
n_R =2 για τετράχρονες μηχανές
ω = η γωνιακή ταχύτητα ή ταχύτητα περιστροφής

Η ισχύς του υπερτροφοδότη υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Power = T_{orq} \cdot 2® N \qquad (4.7)$$

Όπου:

T_{org}= η ροπή υπερτροφοδότη
π =3.14 (σταθερά)
N = οι στροφές συστήματος ανά λεπτό

Η παροχή μάζας υπολογίζεται από την σχέση:

$$m_f = \left(\frac{F}{A}\right) \cdot n_v \cdot °_{a,0\cdot} \cdot V_D \qquad (4.8)$$

Όπου:

F/A=η αναλογία των καυσαερίων
n_v = η μετατροπή καυσίμου και ογκομετρικές αποδόσεις
V_D = ο κυβισμός μηχανής
$\rho_{a,0}$ = η πυκνότητα αέρα

Όπως έχουμε προαναφέρει και στα θεωρητικά Κεφάλαια της παρούσας εργασίας, η πυκνότητα του αέρα με την υπερτροφοδότηση αυξάνεται. Επιπλέον, όταν αυξηθεί η πυκνότητα του φορτίου παρατηρούνται τα εξής:

❖ ***Υπερτροφοδότηση:*** ο συμπιεστής παίρνει ισχύ από την έξοδο της μηχανής

- Όχι καθυστέρηση (turbo lag)
- Δεν επηρεάζει την επεξεργασία των καυσαερίων
- Αυξάνεται η κατανάλωση καυσίμου

❖ ***Στροβιλοτροφοδότηση:*** ο συμπιεστής παίρνει ισχύ από τα καυσαέρια της μηχανής.

- Χρησιμοποιεί καυσαέρια για να δημιουργήσει ισχύ
- Υπάρχει πρόβλημα καθυστέρησης (turbolag)
- Λιγότερες εκπομπές ρύπων τύπου NOx.

4.2.2. Υπολογισμός απόδοσης φορτιστή και στροβίλου

Για συμπιεστές η αύξηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόδοσης.

$$T_{2S} = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(\copyright-1)}{\copyright}} \tag{4.9}$$

Όπου:

T_1= η αρχική Θερμοκρασία συμπίεσης (τιμή εισόδου)
p_1/p_2 = η αναλογία μεταξύ της αρχικής και της τελικής πίεσης συμπίεσης
κ= η σταθερά λόγου πιέσεων (p_2/p_1)

Η μεταβολή της θερμοκρασίας μπορεί να προσδιοριστεί και από της σχέση:

$$\Delta T = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2eff} - h_1} \tag{4.10}$$

Ωστόσο, η ισεντροπική απόδοση του συμπιεστή μπορεί να υπολογιστεί από την ίδια εξίσωση (4.10) και δίνεται από τον τύπο:

$$n_{s-i,C} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2eff} - h_1} \tag{4.11}$$

Όπου:

h_1= η αρχική τιμή ενθαλπίας συμπίεσης (τιμή στην είσοδο)
h_{2s}= η ισεντροπική τιμή ενθαλπίας συμπίεσης
h_{2eff}=η πραγματική τιμή ενθαλπίας συμπίεσης

Για κάθε εξάρτημα και διεργασία ισχύουν διαφορετικοί θερμοδυναμικοί κύκλοι. Τα δύο παραπάνω διαγράμματα ενθαλπίας – εντροπίας είναι ενδεικτικά για φυγοκεντρικό συμπιεστή και για ακτινικό στρόβιλο.

Με τη θεώρηση του αέρα ως ιδανικό αέριο με σταθερή ειδική θερμότητα η παραπάνω σχέση γίνεται:

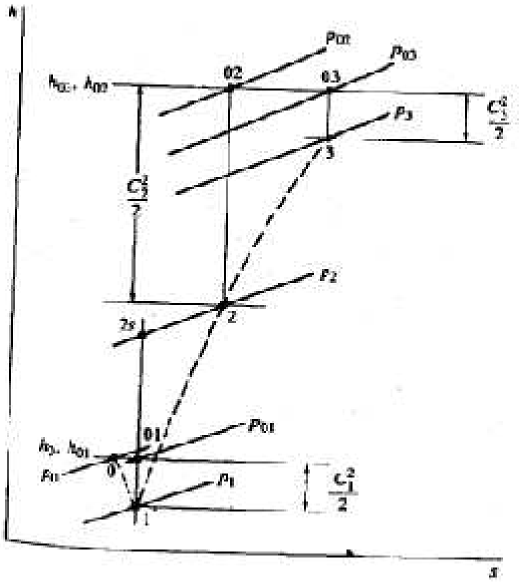
$$n_{s-i,C} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_{2eff} - T_1} \tag{4.12}$$

Όπου:

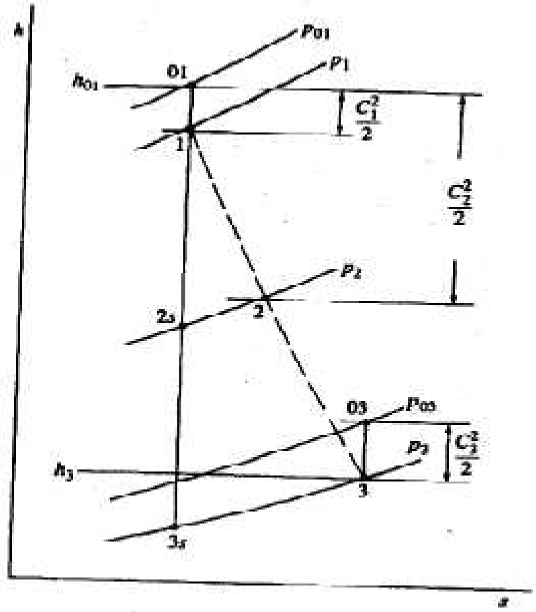
T_1=η αρχική Θερμοκρασία συμπίεσης (τιμή στην είσοδο)

T_{2s}= η ισεντροπική θερμοκρασία συμπίεσης

T_{2eff} =η πραγματική θερμοκρασία συμπίεσης



Διάγραμμα 4.1:Διάγραμμα ενθαλπίας εντροπίας για τη ροή μέσω φυγοκεντρικού συμπιεστή
(Heywood, 1988)



Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα ενθαλπίας εντροπίας για ακτινικό στρόβιλο
(Heywood, 1988)

Το ισεντροπικό ειδικό έργο συμπίεσης μπορεί να υπολογιστεί με την εφαρμογή των νόμων της θερμοδυναμικής:

$$W_{s-i,\mathrm{C}} = \frac{\copyright}{\copyright - 1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{P_1}{P_1} \right)^{\frac{\copyright - 1}{\copyright}} - 1 \right] \tag{4.13}$$

Ο λόγος των πιέσεων μπορεί να τυπωθεί και με την παρακάτω σχέση:

$$\Pi = \frac{P_2}{P_1} \tag{4.14}$$

Όπου:

R= η παγκόσμια σταθερά αερίων

κ = η σταθερά λόγου πιέσεων (p_2/p_1)

T_1= η αρχική θερμοκρασία συμπίεσης

P_2/P_1 = η αναλογία μεταξύ της αρχικής και της τελικής πίεσης συμπίεσης

Η ισχύς του συμπιεστή ορίζεται ως:

$$P_c = \frac{\dot{m}_c}{n_{s-i,c}} \cdot \frac{W_{s-i,c}}{n_{n,c}} \tag{4.15}$$

Όπου:

$\dot{m}_c$= η μάζα παροχής καυσίμου

$\eta_{m,c}$= η μηχανική απόδοση του συμπιεστή (ρουλμάν, μετάδοση κίνησης).

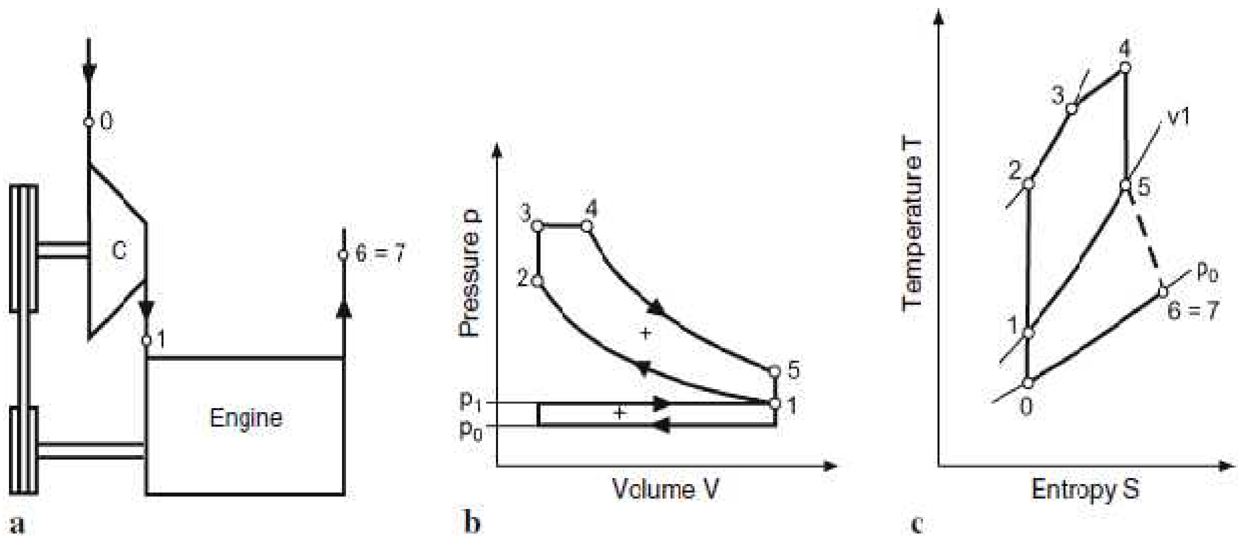
$n_{s-i,C}$= η ισεντροπική απόδοση του συμπιεστή

$W_{s-i,C}$ = η ισεντροπικό ειδικό έργο συμπίεσης

4.2.3. Θερμοδυναμικά διαγράμματα Πίεσης – Όγκου (pV) και Θερμοκρασίας – Εντροπίας (TS)

Οι διαδικασίες αυτές, ή μέρη του κύκλου, περιγράφουν την ανταλλαγή φορτίου, καθώς και την αξιοποίηση της ενέργειας των καυσαερίων για προσυμπίεση και, συνεπώς, των τεχνικών διαδικασιών της υπερτροφοδότησης. Με την αρχή της διάταξης κοιτάζοντας το P-V και το TS διάγραμμα (Διάγραμμα 4.3) μιας μηχανικής υπερτροφοδότησης ιδανικού κινητήρα, μπορούν να προσδιοριστούν τρία σημαντικά γεγονότα.

Ως συνέπεια του κύκλου, στο τέλος της διεργασίας (4), η πίεση στον κύλινδρο της υπερτροφοδότησης τετράχρονου κινητήρα είναι υψηλότερη από την πίεση P_1 του περιβάλλοντος (5-6). Ωστόσο, αυτή η υψηλότερη πίεση, δεν μπορεί να μετατραπεί σε έργο απευθείας στον κύλινδρο, λόγω του γεγονότος ότι υπάρχει γεωμετρικός περιορισμό της. Δεδομένου ότι η πίεση υπερπλήρωσης είναι μεγαλύτερη από την πίεση του περιβάλλοντος, η ίδια η ανταλλαγή αερίων συμβάλλει θετικά το έργο του κινητήρα.



Διάγραμμα 4.3: α) Αρχή λειτουργίας, β) διάγραμμα TS και c) ιδανικός υπερτροφοδοτούμενος κινητήρας (Hiereth &Prenninger, 2003*)*

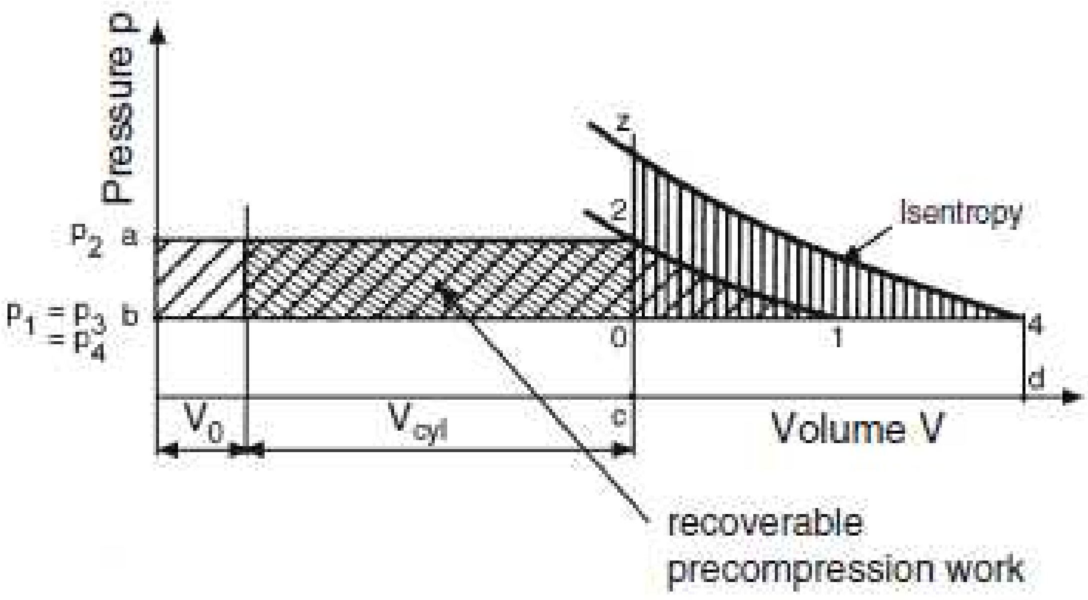
Χωρίς απώλειες το έργο αυτό ανταποκρίνεται στο έργο συμπίεσης (κλειστή διαδρομή 1-5-6-7). Αντιθέτως το έργο συμπίεσης πρέπει να παρέχεται από την μηχανή από μόνο του. Για ισεντροπική διεργασία προκύπτει το έργο αερίου που ανακτάται και υπολογίζεται:

$$W_{GEX} = (P_1 - P_2) \qquad (4.16)$$

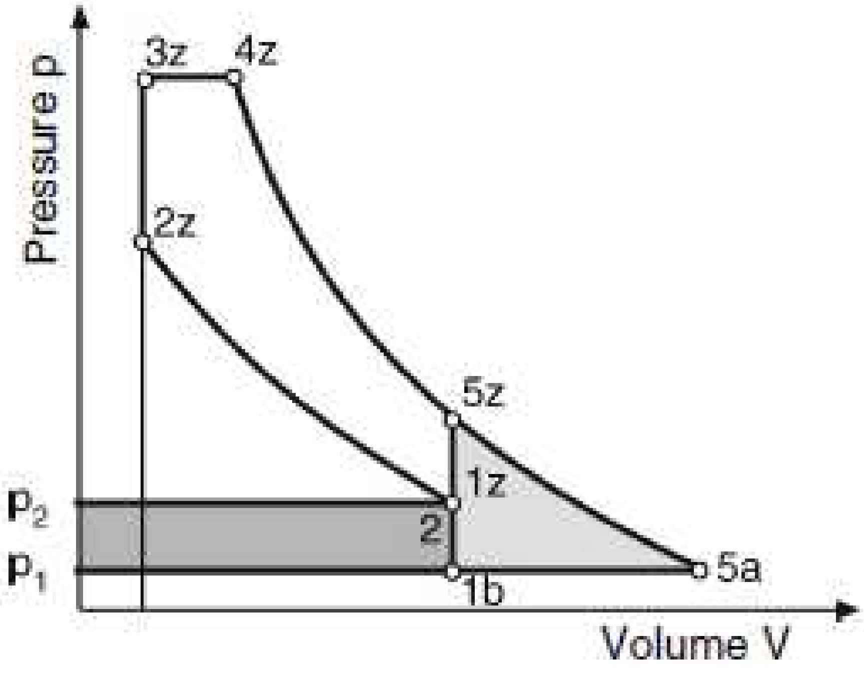
Σε περίπτωση μηχανικής υπετροφοδότησης δε χάνεται όλο το έργο μηχανικής υπερτροφοδότησης αλλά μόνο η διαφορά:

$$W_{S-i,c} - W_{GEX} = (P_1 - P_2) \qquad (4.17)$$

Αυτή η διεργασία μπορεί να θεωρηθεί ως θετικό έργο εξόδου από το πιστόνι κατά την καύση κατά την οποία η πίεση ώθησης p_2 είναι υψηλότερη από την ατμοσφαιρική που δρα στο πιστόνι.



Διάγραμμα 4.3: Ανάκτηση μέρους του έργου προ-συμπίεσης (Hiereth &Prenninger, 2003*)*



Διάγραμμα 4.4: Διάγραμμα pV υπετροφοδοτούμενης μηχανής που απεικονίζει το έργο της εξάτμισης αερίου (Περιοχή 5z – 5a – 1b) (Hiereth & Prenninger, 2003*)*

4.2.4. Βασική θερμοδυναμική συμπιεστή και στροβίλου

Τα χαρακτηριστικά του συμπιεστή και του στροβίλου είναι τα εξής:

- Πίεση P_2
- Η πίεση P_2 είναι συνάρτηση των παρακάτω μεγεθών:
  - $P_2 = f(m, RT_1, RT_2, P_1, N, D, \mu, \gamma,$ αναλογίες γεωμετρίας).
- Διαστασιολόγηση
  - 7 μεταβλητές διαστάσεων → (7-3) = 4 μη διαστασιολογημένες παράμετροι (επιπλέον το «γ» και οι «γεωμετρικές αναλογίες»)

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = f\left(\frac{N}{\sqrt{\frac{\gamma R T_1}{D}}}, \frac{\dot{m}}{\left(\frac{P_1}{RT_1}\right)\sqrt{RT_1}D^2}, Re, \gamma, \text{γεωμετρικές αναλογίες}\right) \quad (4.19)$$

Ταχύτητα Πυκνότητα Ταχύτητα

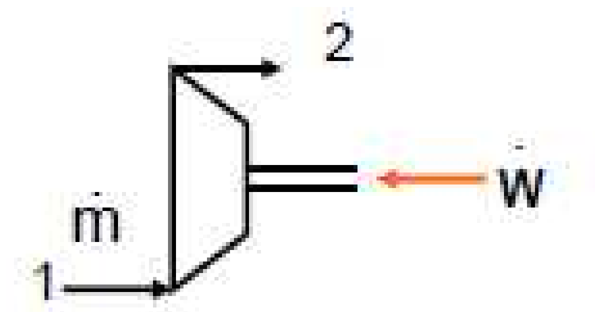
Ροή με υψηλό αριθμό Reynolds (Re) έχει σαν αποτέλεσμα σε χαμηλή εξάρτηση από τον αριθμό Re.

Για προκαθορισμένες μηχανές και ιδιότητες αερίων: $\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = f\left(\frac{N}{\sqrt{T_1}}, \frac{\dot{m}\sqrt{T_1}}{P_1}\right)$ (4.18)

Στην συνέχεια ακολουθεί η θερμοδυναμική ανάλυση του συμπιεστή και του στροβίλου (Haddad & Watson, 1984).

4.2.4.1. Συμπιεστής

Η βασική θερμοδυναμική που διέπει το συμπιεστή θα αναλυθεί παρακάτω.



Σχήμα 4.4: Συμπιεστής [22]

Η απόδοση του συμπιεστή (η_c) δίνεται από τη σχέση:

$$n_c = \frac{\dot{W}_{(\text{§¢~¬§©ό})}}{\dot{W}_{(\text{®°~¥«~²§©ό})}} \quad (4.20)$$

Οπού το ιδανικό έργο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{W}_{\text{(§¢~¬§©ό)}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot T_1 \cdot \left(\frac{T_2'}{T_1} - 1 \right) \qquad (4.21)$$

Όπου:

m =η μάζα παροχής καυσίμου
c_p= η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
$\frac{T_2'}{T_1}$ =ο λόγος θερμοκρασιών

Ο λόγος των θερμοκρασιών υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\text{¥}-1}{\text{¥}}} \qquad (4.22)$$

Επίσης, όπου ο αδιαβατικός εκθέτης ισχύει:

$$\text{¥} = \frac{c_p}{c_v} \qquad (4.23)$$

Όπου:

γ =ο αδιαβατικός εκθέτης
P_2/P_1 = η αναλογία μεταξύ της αρχικής και της τελικής πίεσης συμπίεσης
c_p = η ειδική θερμοχωρητικότηταυπό σταθερή πίεση
c_v= η ειδική θερμοχωρητικότηταυπό σταθερό όγκο

Όπου το πραγματικό έργο υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{W}_{\text{(§¢~¬§©ό)}} = \frac{1}{n_c} \cdot \dot{m} \cdot c_p \cdot T_1 \cdot \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\text{¥}-1}{\text{¥}}} - 1 \right) \qquad (4.24)$$

Όπου:

γ = ο αδιαβατικός εκθέτης
P_2/P_1 =η αναλογία μεταξύ της αρχικής και της τελικής πίεσης συμπίεσης
c_p = η ειδική θερμοχωρητικότηταυπό σταθερή πίεση
n_c= η απόδοση συμπιεστή
T_1=η αρχική θερμοκρασία εισόδου στον συμπίεσης

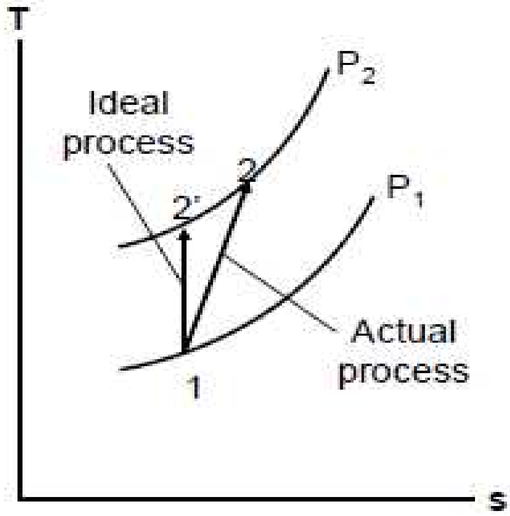
Τέλος, η τελική θερμοκρασία T_2 υπολογίζεται ως εξής:

$$T_2 = T_1 + \frac{W_{\text{®°~¥«~²§©ό}}}{\dot{m} \cdot c_p} \qquad (4.25)$$

Όπου:

m = η μάζα παροχής καυσίμου
c_p =η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
T_1= η αρχική Θερμοκρασία εισόδου στον συμπίεσης
$W_{πραγμ}$= το πραγματικό έργο συμπιεστή

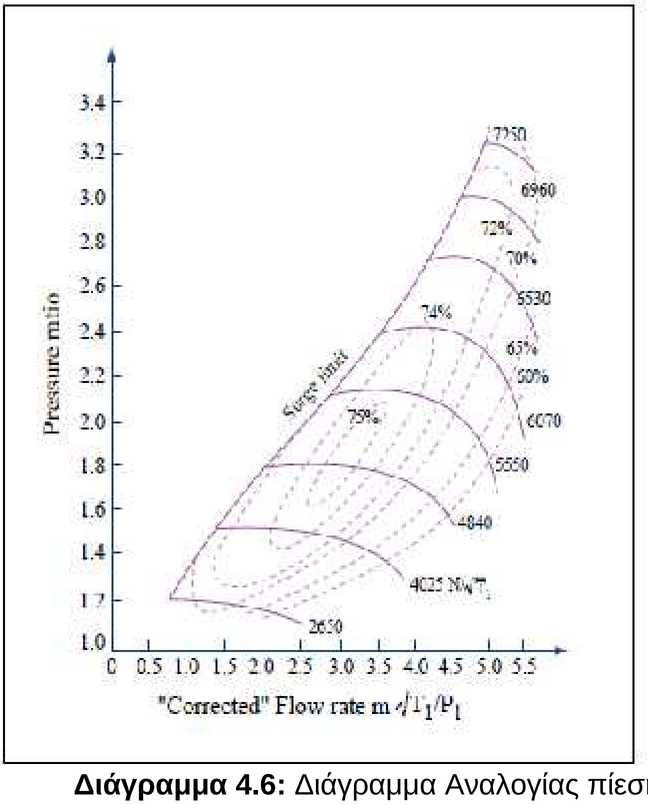
Το Διάγραμμα 4.5 είναι Θερμοκρασίας (T) – Εντροπίας (s) και απεικονίζει την πραγματική μεταβολή από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2 και την ιδανική διεργασία από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2’.



Διάγραμμα 4.5: Διάγραμμα Θερμοκρασίας – Εντροπίας συμπιεστή [18]

4.2.4.1.1. Χάρτης δεδομένων συμπιεστή

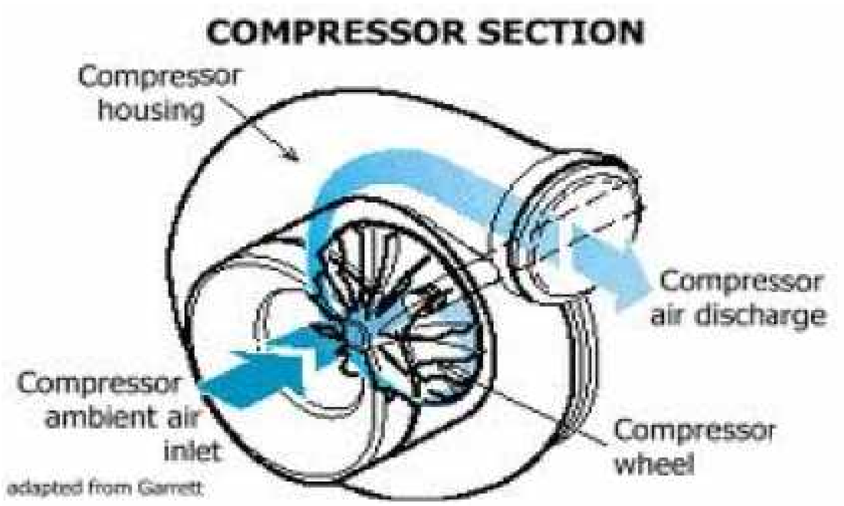
Ο χάρτης δεδομένων του συμπιεστή μας δίνει την δυνατότητα να επιλεγούν οι κατάλληλες στροφές καθώς και το μέγιστο λόγο πίεσης. Υπενθυμίζεται ότι το σημείο που επιλέγεται θα πρέπει οπωσδήποτε να βρίσκεται δεξιότερα της γραμμής ασταθούς λειτουργίας.



Όπου:

- ✓ T_1:θερμοκρασία εισόδου (K)
- ✓ P_1: Πίεση εισόδου (bar)
- ✓ N: στροφές ανα λεπτό (rpm)
- ✓ $\dot{m}$: παροχή μάζας (kg/s)

Διάγραμμα 4.6: Διάγραμμα Αναλογίας πίεσης – διορθωμένου ρυθμού ροής (Haddad & Watson, 1984)



Σχήμα 4.35: Αναλυτικό σχήμα συμπιεστή
(Αθανασίου & Γιοντανόφ, 2010)

4.2.4.1.2. Θερμοκρασία και πίεση συμπιεσμένου αέρα

Ορίζεται ως θερμοδυναμική απόδοση του συμπιεστή το ποσοστό αύξησης της θερμοκρασίας του αέρα κατά τη συμπίεσή του. Οι συμπιεστές χαρακτηρίζονται από χάρτες θερμοδυναμικής (αδιαβατικής) απόδοσης, που περιγράφουν τη θέρμανση του αέρα ως συνάρτηση της πίεσης υπερπλήρωσης και της παροχής αέρα. Είναι σκοπός η απόδοση του συμπιεστή να μην πέφτει κάτω από το 65% σε καμία φάση λειτουργίας του κινητήρα, σε περίπτωση που το intercoolerδεν μπορεί να ανταπεξέλθει στην αύξηση της θερμοκρασίας. Ισχύει η σχέση:

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{P_2}{P_1} \cdot 0,286 \qquad (4.26)$$

Όπου:

T_2=η θερμοκρασία συμπιεσμένου αέρα
T_1= η θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα
P_2= η πίεση εισαγωγή κινητήρα
P_1 = η ατμοσφαιρική πίεση

4.2.4.1.3. Σχέση Συμπίεσης

Σε έναν υπερτροφοδοτούμενο κινητήρα απασχολεί η δυναμική συμπίεση, για να υπολογιστεί η γεωμετρική συμπίεση (η μείωση της σχέσης συμπίεσης του ατμοσφαιρικού κινητήρα) ώστε να μην υπάρξει υπέρβαση κατά πολύ τις προδιαγραφές ασφαλείας.

Δυναμική συμπίεση = γεωμετρική x ογκομετρική απόδοση κινητήρα

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προαναφερόμενη σχέση ισχύει σε ταχύτητες λειτουργίας σε σχέση με την ονομαστική χωρητικότητα

Για πρακτικούς λόγους όπως Βαλβίδες, φίλτρο αέρα κτλ., η ογκομετρική απόδοση των κινητήρων είναι μικρότερη από 100%. Στους 16Vκινητήρες είναι περίπου 80-85%. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα δυναμικής συμπίεσης ενός κινητήρα υπολογίζεται ως εξής:

- Γεωμετρική συμπίεση = 10:1
- Ογκομετρική απόδοση = 85%

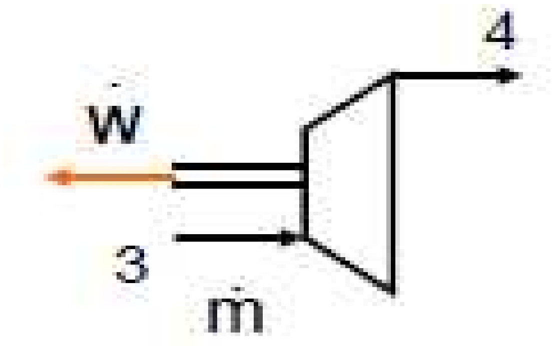
Άρα, 10 * 0.85 = 8,5:1 (Ατμοσφαιρική λειτουργία).

Σε συνθήκες υπερπλήρωσης:

Στη χαμηλή περιοχή πίεσης υπερπλήρωσης, μεταξύ 0.3 – 0.6 bar, κάθε 0.26 bar υπερπλήρωσης ισοδυναμεί με περίπου μια μονάδα αύξησης της δυναμικής σχέσης συμπίεσης. Για το παραπάνω παράδειγμα, με 0.55barυπερπλήρωση η δυναμική συμπίεση του κινητήρα ανεβαίνει σε 10.5:1. Είναι μια ασφαλής τιμή για χρήση βενζίνης του εμπορίου (δεν προκαλείται προανάφλεξη). Η δυναμική συμπίεση δεν πρέπει να ξεπερνά τη σχέση 12:1 η οποία είναι το όριο ασφαλείας για καύσιμο 98 οκτανίων.

4.2.4.2. Στρόβιλος

Η βασική θερμοδυναμική που διέπει το στρόβιλο (τουρμπίνα) θα αναλυθεί παρακάτω.



Σχήμα 4.6: Στρόβιλος [22]

Η απόδοση του στροβίλου (η_t) δίνεται από τη σχέση:

$$n_t = \frac{\dot{W}_{(®°\sim¥«\sim²§©ό)}}{\dot{W}_{(§¢\sim¬§©ό)}} \tag{4.27}$$

Όπου το ιδανικό έργο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{W}_{(§¢\sim¬§©ό)} = \dot{m} \cdot c_p \cdot T_3 \cdot \left(\frac{T_4^{'}}{T_3} - 1 \right) \tag{4.28}$$

Όπου:

m = η μάζα παροχής καυσίμου
c_p =η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
T_3=η θερμοκρασία εισόδου στροβίλου

Ο λόγος των θερμοκρασιών υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\text{¥}-1}{\text{¥}}} \qquad (4.29)$$

Όπως προαναφέραμεόπου ο αδιαβατικός εκθέτης $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$

Το πραγματικό έργο υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{W}_{(\text{§¢~¬§©}ό)} = \frac{1}{n_t} \cdot \dot{m} \cdot c_p \cdot T_3 \cdot \left(\left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\text{¥}-1}{\text{¥}}} - 1 \right) \qquad (4.30)$$

Όπου:

m =η μάζα παροχής καυσίμου
P_4/P_3 = η αναλογία μεταξύ πίεση εξόδου και εισόδου στροβίλου
c_p= η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
n_t= η απόδοση στροβίλου
γ= ο διαβατικός εκθέτης
T_3= η θερμοκρασία εισόδου στροβίλου

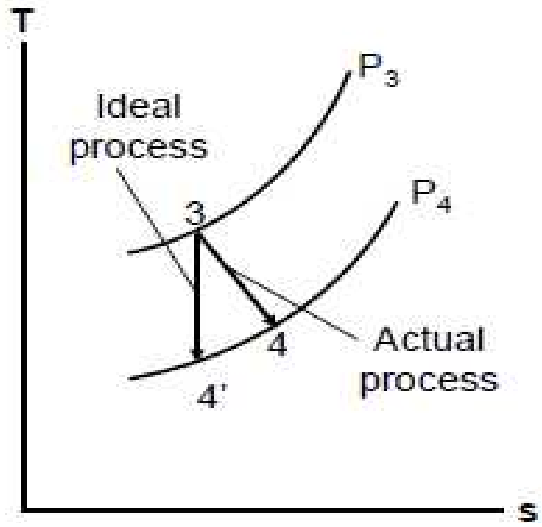
Τέλος, η θερμοκρασία T_4 υπολογίζεται ως εξής:

$$T_4 = T_3 + \frac{W_{\text{®°~¥«~²§©}ό}}{\dot{m} \cdot c_p} \qquad (4.31)$$

Όπου:

m = η μάζα παροχής καυσίμου
c_p =η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
T_3 = η θερμοκρασία εισόδου στροβίλου
$W_{πραγμ}$= η πραγματικό έργο στροβίλου

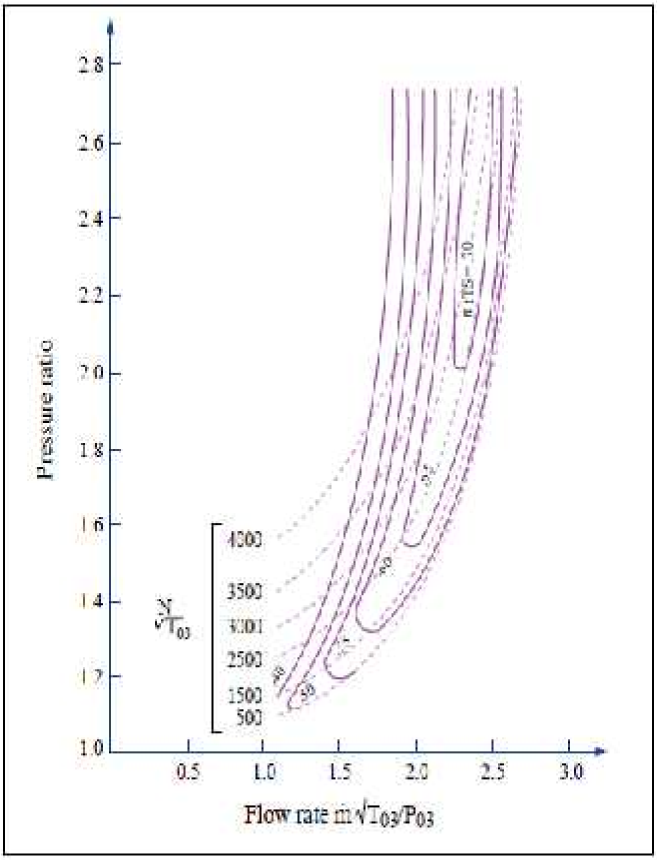
Το Διάγραμμα 4.7. είναι θερμοκρασίας (T) – εντροπίας (s) για την πραγματική κατάσταση 3 στην κατάσταση 4 και την ιδανική διεργασία 3 στην διεργασία 4'.



Διάγραμμα 4.7: Διάγραμμα Θερμοκρασίας – Εντροπίας στροβίλου [18]

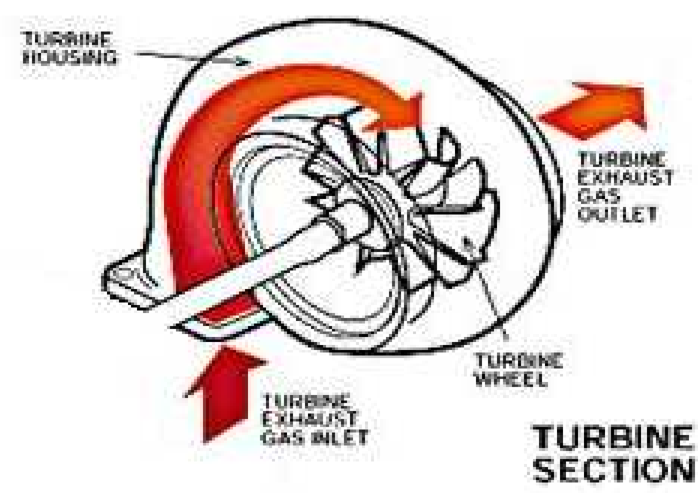
4.2.4.2.1. Χάρτης δεδομένων στροβίλου

Όπως και στην περίπτωση του συμπιεστή δίνεται ο χάρτης των δεδομένων του στροβίλου με σκοπό να δοθεί η δυνατότητα να επιλεγούν οι κατάλληλες στροφές καθώς και το μέγιστο λόγο πίεσης. Υπενθυμίζεται ότι το σημείο που επιλέγεται θα πρέπει οπωσδήποτε να βρίσκεται δεξιότερα της γραμμής ασταθούς λειτουργίας.



Όπου:
- ✓ T_{03}: Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου (K)
- ✓ P_{03}: Πίεση εισόδου στροβίλου (bar)
- ✓ P_4: Πίεση εξόδου στροβίλου (bar)
- ✓ N: Στροφές ανά λεπτό (rpm)
- ✓ $\dot{m}$: Παροχή μάζας (kg/s)

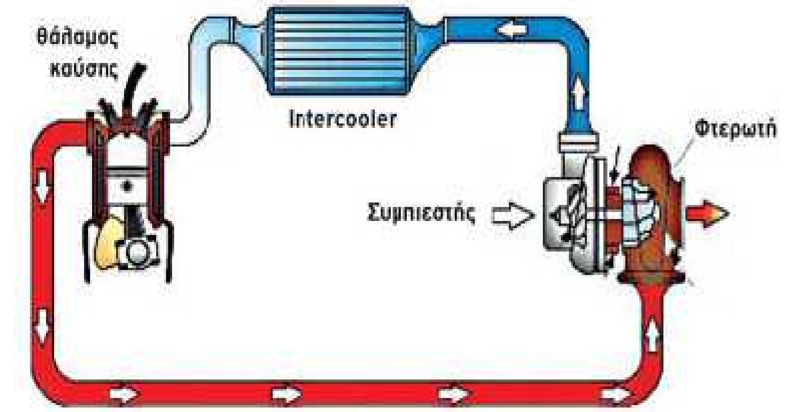
Διάγραμμα 4.8: Διάγραμμα Αναλογίας πίεσης – ρυθμού ροής (Haddad & Watson, 1984)



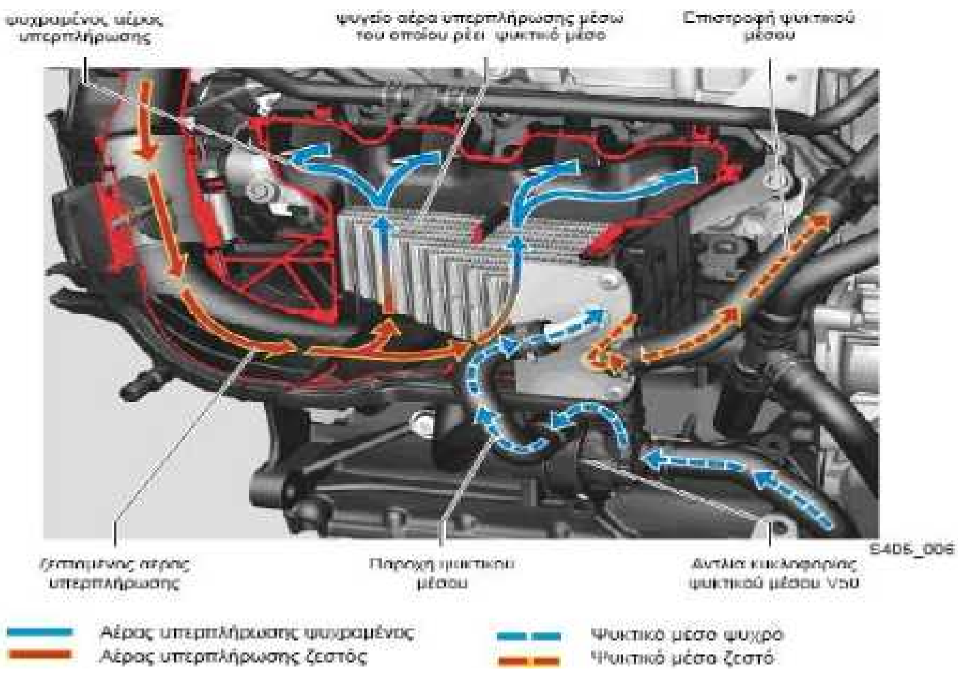
Σχήμα 4.7: Αναλυτικό σχήμα στροβίλου (τουρμπίνας) (Αθανασίου & Γιοντανόφ, 2010)

4.3. ΤΑΙΡΙΑΣΜΑ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ – ΜΗΧΑΝΗΣ – ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Το σημαντικότερο πρόβλημα που εμφανίζεται στην χρήση ενός υπερτροφοδότη είναι η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κινητήρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διαδικασία της συμπίεσης ο αέρας θερμαίνεται με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της πιθανότητας αυτανάφλεξης του καυσίμου που εκτός από τη σημαντική μείωση της απόδοσης του κινητήρα, μπορεί και να προκαλέσει την καταστροφή του. Η λύση που χρησιμοποιείται στους υπερτροφοδοτούμενους βενζινοκινητήρες είναι η μείωση της σχέσης συμπίεσης τους, που βέβαια μειώνει της τελική ισχύ τους καθώς και το βαθμό απόδοσής τους. Για την αποφυγή των φαινομένων που προαναφέρθηκαν, χρησιμοποιείται και η λύση της τοποθέτησης ενός εναλλάκτη θερμότητας (intercooler - ψυγείο αέρα), σε θέση μετά το συμπιεστή, ο οποίος θα ψύχει τον συμπιεσμένο αέρα εισαγωγής. Με τον τρόπο αυτό, η θερμοκρασία του τελευταίου, κατά την είσοδό του στους κυλίνδρους, περιορίζεται στους 40◦C περίπου. Στο Σχήμα 4.8 φαίνεται ένας υπερτροφοδοτούμενος κινητήρας ο οποίος χρησιμοποιεί ψυγείο για την ψύξη του συμπιεσμένου αέρα εισαγωγής.



Σχήμα 4.8: Ψύξη του αέρα εισαγωγής [27]



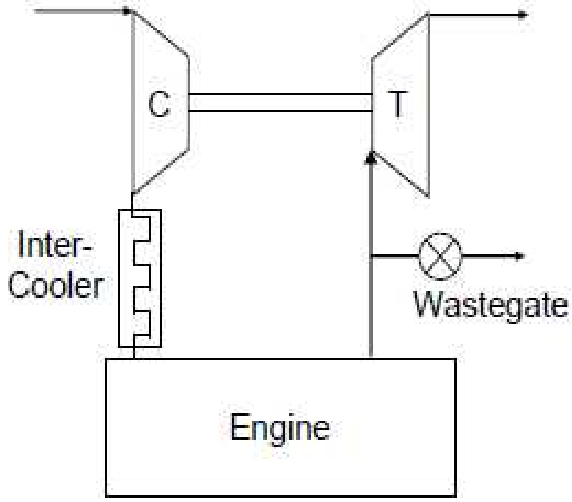
Εικόνα 4.1: Το σύστημα ψύξεως του αέρα υπερπλήρωσης είναι ένα αυτόνομο κύκλωμα ψύξεως, στο οποίο συνδέεται και ο υπερσυμπιεστής καυσαερίων [28]

Το «ταίριασμα» (matching) μεταξύ ΜΕΚ και υπερτροφοδότη 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. Ωστόσο, η μεταβατική λειτουργία ορίζεται ως την εξαναγκασμένη (και συνήθως απότομη) μεταβολή είτε παροχής καυσίμου στον κύλινδρο είτε φορτίου με το οποίο είναι συνδεδεμένος ο κινητήρας, δηλαδή με τις συνθήκες οδοστρώματος για κίνηση οχήματος.

Η επίτευξη του ιδανικού «ταιρίασματος υπερτροφοδότη – ΜΕΚ» δεν είναι πάντα δυνατή 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 υπερτροφδότη (Τσούρας, 2013).

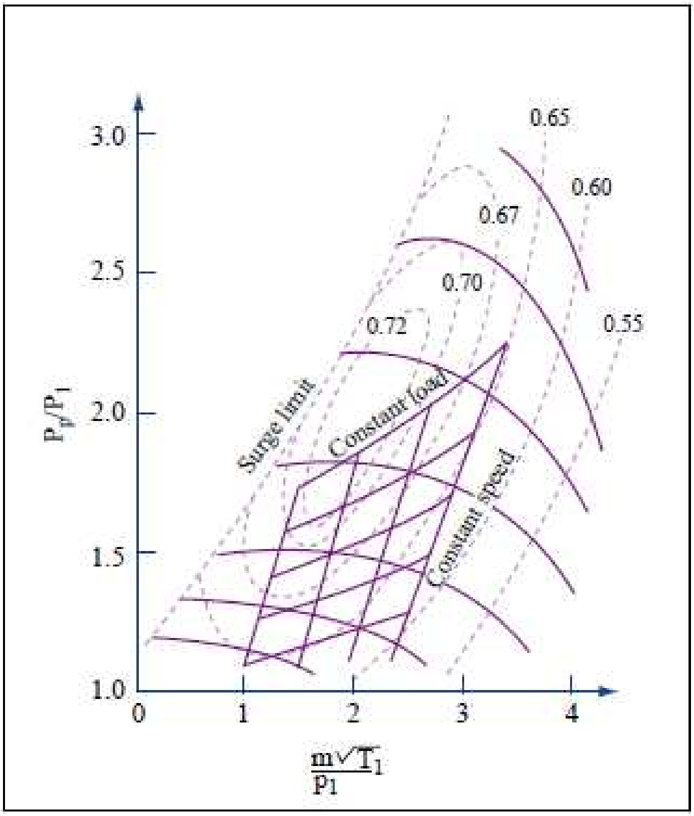
Άρα για την κατάλληλη επιλογή του υπερτροφοδότη θα πρέπει να ελέγχουν οι προαναφερόμενοι παράγοντας, αφού προηγηθούν απαραίτητοι υπολογισμοί του συστήματος δίνοντας έμφαση στα αποτελέσματα των παραγόντων που εξαρτάται το «ταίριασμα». Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ταίριασμα είναι οι ακόλουθοι (Panda, 2009):

- Οι ροές μάζας διαμέσω του συμπιεστή, του κινητήρα, του στροβίλου και της θυρίδας εξόδου πρέπει να είναι συνεχείς
- Η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο πρέπει να είναι συνεχής με τη ροή καυσίμου και την ισχύ εξόδου της μηχανής
- Ο στρόβιλος ενισχύει το έργο του συμπιεστή
- Ίδια ταχύτητα στροβίλου και συμπιεστή.



Σχήμα 4.8: Συνδυασμός συμπιεστή μηχανής και στροβίλου
(Haddad & Watson, 1984)

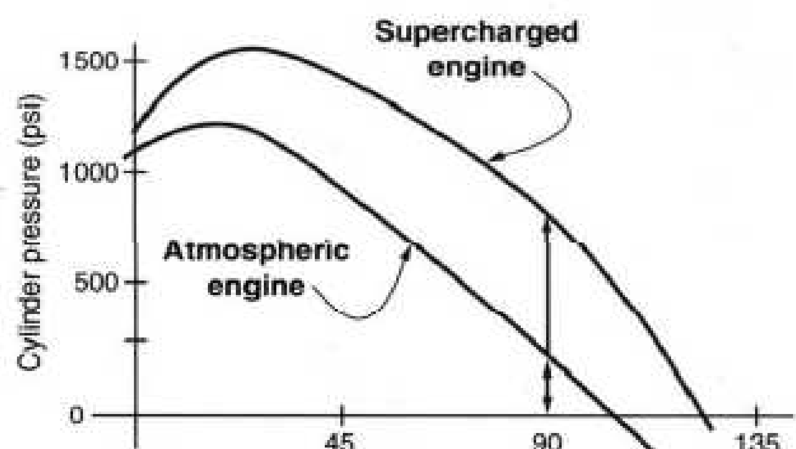
Επιπλέον, ένας από τους βασικούς παράγοντες που πρέπει να μελετηθεί για τον συνδυασμό συμπιεστή μηχανής και στροβίλου, είναι η απαίτηση ροής αέρα για μια τετράχρονη μηχανή. Για τον υπολογισμό του αέρα ροής γίνεται χρήση του παρακάτω Διαγράμματος 4.9 (Haddad & Watson, 1984)



Διάγραμμα 4.9:Απαιτήσεις ροής αέρα για μια τετράχρονη μηχανή (Haddad & Watson, 1984)

4.4. ΚΥΡΙΟ ΟΦΕΛΟΣ ΥΠΕΡΤΡΟΦΟΔΟΤΗ

Το συγκριτικό Διάγραμμα 4.10 της πίεσης κυλίνδρου και της γωνίας στροφάλου μεταξύ απλής ατμοσφαιρικής μηχανής και υπερτροφοδοτούμενης μηχανής απεικονίζει το όφελος της τοποθέτησης ενός υπερτοφοδότη σε ΜΕΚ.



Διάγραμμα 4.10: Συγκριτικό διάγραμμα Πίεσης κυλίνδρου-γωνίας στροφάλου [24]

Παρατηρείται λοιπόν στο διάγραμμα ότι στις ίδιες τιμές γωνιών του στροφάλου επιτυγχάνεται υψηλότερη πίεση στον κύλινδρο της μηχανής για μια υπερτροφοδοτούμενη μηχανή.

Επιπλέον σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν για την υπερτροφοδότηση μιας ΜΕΚ τα εξής βασικά συμπεράσματα (Panda, 2009):

- Παρά τα μειονεκτήματά τους, οι υπετροφοδότες είναι ακόμα ο πιο αποδοτικός-οικονομικός τρόπος για να αυξηθεί η ιπποδύναμη.
- Οι υπετροφοδότες μπορούν να παράξουν αύξηση της ιπποδύναμης από 50 ως 100%, είναι ιδανικά εξαρτήματα για αυτοκίνητα αγώνων, για ρυμούλκηση βαρέων φορτίων καθώς και για προσωπική ικανοποίηση στην οδηγική εμπειρία.
- Εξασφαλίζουν την πλήρη καύση οπότε μειώνουν δραματικά την ρύπανση.
- Με χρήση καυσίμου υψηλής περιεκτκότητας οκτανίων το αποτέλεσμα είναι μια οδηγική εμπειρία.

4.5. ΥΠΕΡΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣ – ΜΙΑ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΕΚΔΟΧΗ ΤΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟ – ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ

Από θερμοδυναμικής άποψης ο υπερτροφοδότης και ο στροβιλοσυμπιεστής παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, κατά την λειτουργία τους ο υπερτροφοδότης παρουσιάζεται ως μια βελτιωμένη εκδοχή του στροβιλοδυμπιερστή έχοντας τα εξής πλεονεκτήματα (Panda, 2009):

❖ **Οι υπετροφοδότες δεν πάσχουν από καθυστέρηση (lag)**

Οι υπετροφοδότες δεν έχουν καθυστέρηση στην απόκρισή τους γιατί συνδέονται κατευθείαν με το στροφαλοφόρο. Αντίθετα, οι στροβιλοσυμπιεστές έχουν καθυστέρηση επειδή χρειάζεται λίγο χρονικό διάστημα μέχρι τα καυσαέρια να αποκτήσουν ταχύτητα η οποία είναι ικανή να κινήσει την πτερωτή του στροφείου. Από τη στιγμή που οι υπετροφοδότες είναι κατευθείαν συνδεδεμένοι με τον κινητήρα, με το που η μηχανή παίρνει εμπρός, οι υπετροφοδότες ενεργοποιούνται. Αντιθέτως, οι στροβιλοσυμπιεστές χρειάζονται λίγο χρόνο μέχρι να συσσωρευθούν καυσαέρια.

❖ **Τροποποίηση του συστήματος εξάτμισης**

Η εγκατάσταση ενός υπερτροφοδότη απαιτεί εκτεταμμένη τροποποίηση του συστήματος εξάτμισης. Οι υπετροφοδότες ωστόσο τοποθετούνται πάνω ή δίπλα από τη μηχανή, στοιχείο που κάνει πιο οικονομική και ευκολότερη την πρόσβαση και τη συντήρησή τους. Αντιθέτως, αυτό είναι πρόβλημα στους στροβιλοσυμπιεστές. Αυτό γίνεται γιατί είναι δύσκολη εργασία να τροποποιηθεί το σύστημα εξάτμισης και προσθέτει επιπλέον κόστος στο όχημα.

❖ **Διαδικασία τερματισμού**

Καμία ειδική διαδικασία τερματισμού δεν απαιτείται για τους υπερτροφοδότες καθώς δεν λιπαίνονται από το λάδι της μηχανής. Μπορούν να κλείσουν – τερματίσουν κανονικά. Αντιθέτως, οι στροβιλοσυμπιεστές πρέπει να μείνουν αδρανείς για 30 δευτερόλεπτα ή περισσότερο πριν το σβήσιμο ώστε το λάδι λίπανσης να παγώσει. Αυτό είναι ένα πρόβλημα κατά τη διάρκεια του σβησίματος καθώς οι στροβιλοσυμπιεστές δεν μπορούν να σβήσουν κανονικά.

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΕΤΡΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ

5.1. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΕΡΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ

Οι αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν ανεπανόρθωτες ζημίες σε ένα σύστημα υπερτοφοδότησης είναι οι ακόλουθες:

- Έλλειψη λαδιού
- Καθυστέρηση λαδιού
- Είσοδος ακαθαρσιών
- Εισαγωγή ξένων αντικειμένων
- Υπερθέρμανση
- Μη ζυγοστάθμιση

Για την αποφυγή των προαναφερόμενων θα πρέπει να λάβουμε κάποια προληπτικά μέτρα, τα βασικότερα είναι τα εξής (Καλούδης & Μπίζα, 2013):

- Πριν πραγματοποιηθεί μια καινούρια μηχανή ή μετά από γενική επισκευή, τοποθετείται ένα φίλτρο στην είσοδο του λαδιού, που έχει σαν σκοπό τη λίπανση του ρουλεμάν. Το φίλτρο αυτό, που αλλάζεται μετά από ορισμένες ώρες λειτουργίας, χρησιμοποιείται πριν η μηχανή πάρει όλο το φορτίο της.
- Αν η μηχανή δεν έχει δουλέψει για αρκετό διάστημα χρειάζεται να λαδωθούν τα ρουλεμάν με το λαδικό, από το ειδικό σημείο λίπανσης του συστήματος.
- Δεν επιτρέπεται σε καμία περίπτωση να σβήσουμε τη μηχανή, μόλις σταματήσουμε, διότι το σύστημα έχει αυξημένη θερμοκρασία και στροφές, που η απότομη πτώση τους μπορεί να προκαλέσει ζημιά. Είναι απαραίτητη η λειτουργία της μηχανής στο ρελαντί για τόσο χρόνο, όσο χρειάζεται να φτάσει το σύστημα στις ελάχιστες στροφές και ελάχιστη θερμοκρασία.
- Θα πρέπει να παρακολουθείται συνέχεια την πίεση του λαδιού της μηχανής, που είναι εφοδιασμένη με turbocharger (για παράδειγμα 30 lb/in^2, για πλήρες φορτίο). Αν η ένδειξη του μανόμετρου είναι χαμηλότερη, θα πρέπει να κάνουμε έλεγχο, για να εντοπίσουμε το πρόβλημα και να αποκατασταθεί η πίεση, διαφορετικά μπορεί εύκολα να δημιουργηθεί βλάβη

Επιπλέον, υπάρχουν κάποια σημεία του συστήματος που θέλουν ιδιαίτερη προσοχή και είναι τα εξής:

- Οι κραδασμοί από την κύρια μηχανή πολλές φορές έχουν σαν συνέπεια να παθαίνουν ζημιά οι ενώσεις των σωληνώσεων του αέρα και του λαδιού λίπανσης. Καθημερινά θα πρέπει να ελέγχονται για διαρροές στα παραπάνω, αλλά και στην κυκλοφορία του νερού, αν το σύστημα είναι υδρόψυκτο.
- Φραγμένα φίλτρα αέρα, ασυγχρόνιστες αντλίες και υπερβολική αντίθλιψη στο σύστημα εξαγωγής, που προκαλεί μερικό φράξιμο, μπορεί να κάνει το σύστημα να καπνίζει.
- Το ξαφνικό σταμάτημα του συστήματος με υπερτροφοδοτηση από έλλειψη λίπανσης ή υπερβολικό παίξιμο του άξονα, μπορεί να προκαλέσει ζημιά στα στρεφόμενα μέρη του, που συνήθως κτυπούν στο κάλυμμα. Αν υπάρχει ανάγκη

και εφόσον δεν υπάρχουν σκουπίδια, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η μηχανή για μικρό χρονικό διάστημα, σε χαμηλές όμως στροφές.

- Ο καθαρός αέρας είναι το παν για το turbocharger. Οι τεράστιες ποσότητες αέρα, που μπαίνουν στον αεροσυμπιεστή, επιβάλλουν να είμαστε σχολαστικοί στην καθαρότητά του. Ελέγχουμε συχνά τις ελαστικές σωληνώσεις μεταξύ του φίλτρου του αέρα και του συμπιεστή. Καταλαβαίνετε τι συμβαίνει όταν ένα κομματάκι περάσει μέσα! Με τις στροφές, που στρέφεται, θα το τινάξει.
- Το κάλυμμα του συμπιεστή αφαιρείται με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα να καθαρίζονται συχνά τα στρεφόμενα μέρη.
- Η τουρμπίνα, ο συμπιεστής και ο άξονας είναι κατασκευασμένο με πολύ μικρές ανοχές, για αυτό θέλουν χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας. Ελέγχουμε, λοιπόν, τακτικά το ψυγείο για να βεβαιωθούμε πως λειτουργούν κανονικά.
- Η λίπανση του συστήματος υπερτροφοδότησης, ειδικά επειδή λειτουργεί σε πολλές στροφές, χρειάζεται μεγάλη προσοχή. Με μεγάλη σχολαστικότητα πρέπει να αλλάζουν τα φίλτρα, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή και να χρησιμοποιούνται πάντα λάδια καλής ποιότητας, ειδικά για μηχανές εφοδιασμένες με turbocharger.

Ένα από τα βασικότερα στάδια της σωστής λειτουργίας ενός συστήματος υπερτοφοδότησης είναι η συντήρηση. Αυτά που θα πρέπει να ελέγχει ο Μηχανικό είναι τα εξής:

- Να καθαρίζονται τα φίλτρο του αέρα σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Αν η μηχανή δουλεύει σε περιβάλλον, που δεν είναι καθαρό, επιβάλλεται συχνότερος καθορισμός.
- Νε ελέγχεται τακτικά τα συστήματα εισαγωγής και εξάτμισης για διαρροές ή φθορές στις ενώσεις των σωληνώσεων. Οποιαδήποτε φθορά ή διαρροή επιβάλλεται να διορθώνεται άμεσα, με μεγάλη σχολαστικότητα στο λύσιμο και δέσιμο.
- Κατά τη διάρκεια της συντήρησης, λαμβάνονται προσεκτικά μέτρα για να μην πέσει σκόνη, σκουπίδια ή μικροαντικείμενα στα συστήματα εισαγωγής και εξάτμισης, γιατί μπορεί να καταστρέφουν το συμπιεστή και την τουρμπίνα.
- Αν τύχει να αντικατασταθεί η πολλαπλή της μηχανής, καλό είναι να προτιμηθεί μια του ιδίου τύπου. Οι μηχανές εφοδιασμένες με turbo έχουν πολλαπλές από ειδικό κράμα, που δεν σκουριάζει, ούτε σπάει σε μικρά κομμάτια. Τα τρίμματα μιας σπασμένης πολλαπλής θα αναρροφηθούν από το turbo με συνέπεια τη ζημιά του.
- Εξετάζεται αν οι σωλήνες του λαδιού του συστήματος υπερτροφοδότησης είναι φραγμένες ή κατεστραμμένες.
- Εξετάζεται με προσοχή το εσωτερικό του κυλίνδρου της εξόδου του λαδιού, όταν πραγματοποιείται αλλαγή λαδιών.
- Ελέγχεται ο αναπνευστήρα του κάρτερ του λαδιού και πραγματοποιείται συντήρηση όπως προβλέπει ο κατασκευαστής.
- Γίνεται πάντα χρήση λαδιών γνωστών οίκων, του βαθμού που προβλέπει ο κατασκευαστής.
- Ελέγχεται μήπως η εξάτμιση είναι φραγμένη ή κατεστραμμένη, γιατί κάτι τέτοιο θα ανεβάσει την πίεση στην εξάτμιση και θα πέσει η απόδοση της μηχανής.
- Αν διαπιστωθεί κάποια κακή λειτουργία του υπερτροφοδότη αυτή μπορεί να οφείλεται σε κάποιο σκουπίδι στα ρουλεμάν, το οποίο γίνεται αντιληπτό αν αλλάξει ο ήχος του.

5.2. ΠΡΟΗΓΜΕΝΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΥΠΕΡ-ΣΤΡΟΒΙΛΟ/ΤΡΟΦΟΔΟΤΗ

Οι πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί από τις εταιρίες της αυτοκινητοβιομηχανιάς προσπαθούν να βελτιώσουν τα είδη υπάρχοντας συστήματα υπερτροφοδότησης με σκοπό την καλύτερη απόδοση των συστημάτων. Ωστόσο, τα μέχρι τώρα αποτελέσματα βρίσκονται σε αρχικό στάδιο χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί κάποια Επίσημη εφαρμογή. στην συνέχεια ακολουθούν οι δύο επικρατέστερες προτάσεις για την βελτίωση των συστημάτων υπερτροφοδότησης.

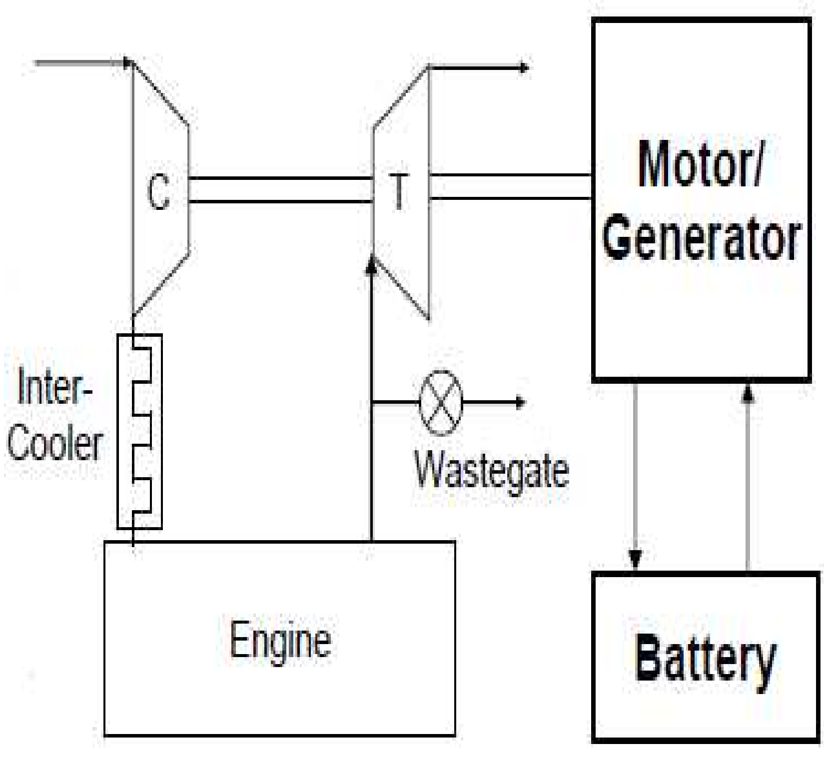
1η Πρόταση: Ηλεκτρική υποβοήθηση στροβιλοτροφοδότη

- **Βασική ιδέα**

Η τοποθέτηση μοτέρ/κινητήρα σε στροβιλοτροφοδότη και μείωση της λειτουργίας καυσαερίων.

- **Πλεονεκτήματα:**

  - ✓ Η αύξηση της ροής αέρα σε χαμηλές ταχύτητες μηχανής
  - ✓ Βοηθητική ηλεκτρική έξοδος σε μερικό φορτίο.



Σχήμα 5.1: Σκίτσο υπετροφοδότη με ηλεκτρική υποβοήθηση [28]

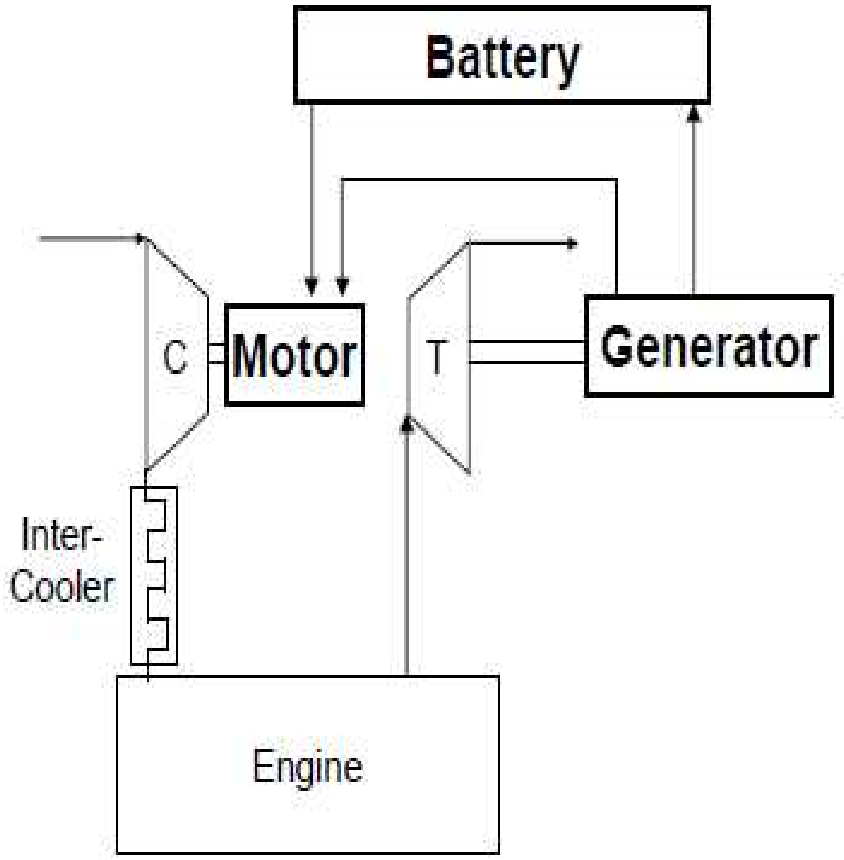
2η Πρόταση:Ηλεκτρικός στροβιλοτροφοδότης

❖ **Βασική ιδέα:**

Ο στρόβιλος να οδηγείται από γεννήτρια και ο συμπιεστής να καθοδηγείται από κινητήρα.

❖ **Πλεονεκτήματα:**

- ✓ Ανεξαρτητοποίηση από τους χάρτες συμπιεστή και στροβίλου, συνεπώς μεγαλύτερη ελευθερία στην βελτιστοποίηση της απόδοσης.
- ✓ Βοηθητική έξοδος ισχύος
- ✓ Δεν υπάρχει έξοδος καυσαερίων
- ✓ Δεν υπάρχει χρονική καθυστέρηση (turbolag)



Σχήμα 4.2: Σκίτσο ηλεκτρικού στροβιλοτροφοδότης [28]

6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη και θερμοδυναμική ανάλυση ατμοσφαιρικών και υπερτροφοδοτούμενων μηχανών εσωτερικής καύσης με στόχο την ανάδειξη του τρόπου βελτίωσης της ισχύς των κινητήρων.

Η αύξηση της απόδοσης μιας μηχανής απαιτεί την καύση περισσότερου καυσίμου και μεγαλύτερη έκρηξη σε κάθε κύκλο. Υπάρχουν δύο επιλογές για την βελτίωση της απόδοσης. Ο πρώτος τρόπος είναι να κατασκευαστεί μεγαλύτερη μηχανή. Ωστόσο, αυτό οδηγεί σε μια λύση με μεγάλο κόστος καθώς και σε μία λύση που δεν θα δώσει ποτέ την βέλτιστη απόδοση αφού το βάρος του οχήματος θα αυξηθεί αρκετά. Ο δεύτερος τρόπος αύξηση της απόδοσης ενός κινητήρα είναι να κατασκευαστή ο κινητήρας ίδιου μεγέθους αλλά μεγαλύτερης ισχύς και απόδοσης. Για την επίτευξη αυτού θα πρέπει να τοποθετηθεί μια επιπρόσθετη παροχή αέρα στο θάλαμος καύσης διότι η αύξηση του αέρα αέρας και του καύσιμο οδηγούν σε μεγαλύτερη καύση και υψηλότερη ιπποδύναμη. Αυτό μπορεί να επιτευγχθεί με έναν υπετροφοδότη.

Ο υπετροφοδότης είναι στην ουσία ένας συμπιεστής αέρα για την εξαναγκασμένη επαγωγή του κινητήρα. Κάνει την ίδια δουλειά με έναν συμπιεστή, δηλαδή συμπιέζει τον αέρα που διανέμει στον θάλαμο καύσης της μηχανής. Όσο μεγαλύτερη η παροχή αέρα τόσο περισσότερο οξυγόνο συνεισφέρει στην ανάφλεξη από ότι αν η ποσότητα του αέρα ήταν σε μια απλή μηχανή. Αυτό επιτρέπει την είσοδο περισσότερου καύσιμου στο θάλαμο και περισσότερο έργο να πραγματοποιείται ανά κύκλο, αυξάνοντας την έξοδο ισχύος της μηχανής. Έτσι λοιπόν ένας υπετροφοδότης είναι ένα επιπλέον εξάρτημα σε μια μηχανή για την αύξηση της απόδοσης και της ροπής της μηχανής.

Παρά τα μειονεκτήματα που μπορεί να δημιουργηθούν με την υπερτροφοδότηση, οι υπερτροφοδότες είναι από τις βέλτιστες λύσεις για να κατασκευαστεί ένας αποδοτικός και οικονομικός κινητήρας με αυξημένη ιπποδύναμη. Επιπλέον, οι υπερτροφοδότες έχουν την δυνατότητα να πραγματοποιήσουν αύξηση της ισχύος έως και 100%. Οι πειραματικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι είναι ιδανικά εξαρτήματα για αυτοκίνητα αγώνων, για ρυμούλκηση βαρέων φορτίων καθώς και για προσωπική ικανοποίηση στην οδηγική εμπειρία.

Ένας επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα που τους κάνει ιδανικούς είναι ότι πραγματοποιούν την πλήρη καύσης με αποτέλεσμα να μειώνουν δραματικά την ατμοσφαιρική ρύπανση που δημιουργούν σε σύγκριση με τους εκπεμπόμενους ρύπους που έχουν οι ατμοσφαιρικοί κινητήρες. Η εξέλιξη της τεχνολογίας στοχεύει σε κινητήρες υψηλών αποδόσεων με μειωμένες εκπομπές ρύπων.

Οι βελτιώσεις που προτάθηκαν ήταν η υπετροφοδότη με ηλεκτρική υποβοήθηση και ο ηλεκτρικός στροβιλοτροφοδότης μέχρι σήμερα δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στην μαζική παραγωγή διότι δεν δίνονται ακόμα τα επιθυμητά αποτέλεσμα και βρίσκονται υπό μελέτη. Σημειώνεται όμως ότι θεωρούνται οι τεχνολογίες του μέλλοντος αφού έχουν την δυνατότητα αύξησης της απόδοσης με βασικό πλεονέκτημα την μηδενική εκπομπή ρύπων.

Εκ κατακλείδι, με την παρούσα πτυχιακή εργασία δίνεται το βήμα στους συναδέλφους του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε του Τ.Ε.Ι Δυτικής Ελλάδας να πραγματοποιήσουν την μετατροπή ενός ατμοσφαιρικού κινητήρα σε υπερτροφοδοτούμενο στα πλαίσια του Μαθήματος Μηχανών Εσωτερικής Καύσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αθανασίου Β., Γιοντανόφ Π., 2010, *Τετράχρονες μηχανές εσωτερικής καύσης,* Έκδοση ΓΕΛ Αυλίδας, Εύβοια.
2. Αναγνωστάκης Ι., 2009, *Κατασκευή εποπτικού μέσου τετράχρονοι μονοκύλινδρου αερόψυκτου κινητήρα,* Έκδοση Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ηράκλειο
3. Αρχοντίτσης Π., 2008, *Εγκυκλοπαίδεια της βελτίωσης του αυτοκινήτου Power Pedia,* Έκδοση Option Press, Αθήνα.
4. Βαϊκίδης Μ., 2014, *Διερεύνηση της επίδρασης της διακύμανσης της ταχύτητας περιστροφής στη διάρκεια του κύκλου στην εκτίμηση της ισχύος κινητήρων Ντήζελ*, Εκδόσεις Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
5. Βελαώρας Ιωάννης, 1991, *Αυτοκίνητο Συμπλέκτες Κιβώτια Ταχυτήτων Διαφορικά*, Τόμος 9, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
6. Βούλγαρης Μελέτης, 2000, *Τεχνολογία Αυτοκινήτου - Συστήματα Αυτοκινήτου,* Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
7. Γεωργίου Δ., 2015, *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις μαθήματος Θερμοκινητήρες*, Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
8. Haddad and Watson, 1984, *Principles and Performancein Diesel Engineering,* E. Horwood
   Cornell University, New York.
   Hiereth &Prenninger, 2003*, Charging the Internal Combustion Engine,*, SpringerWien New York
9. Heywood J.B., 1988, *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill Inc, New York.
10. John B. Heywood, 1988, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill series in Mechanical Engineering
11. Καπετζώνης Ν*.,* 2011, *Συστήματα άμεσης έγχυσης καυσίμου βενζινοκινητήρων (F.S.I.)*, Έκδοση Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ηράκλειο.
12. Καλούδης Χ., Μπίζα Σ*.,* 2013, *Υπερπλήρωση μηχανών εσωτερικής καύσης (turbo),* Έκδοση 1ο ΕΠΑΛ, Κιάτο.
13. Καρόφυλλος Γ., 2010, *Μελέτη της καύσης στης μηχανές OTTO-DIESEL Και διαμόρφωση θαλάμου καύσης,* Έκδοση Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ηράκλειο
14. Κλιάνης Λ., Νικολός Ι., και Σιδέρης Ι., Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως. Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου, Αθήνα, 2002
15. Κυριακής Ν., 2006, *Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, εισαγωγή στη χρήση και τη λειτουργία*, Εκδόσεις Σοφία, Θεσσαλονίκη
16. Λουράντος Δ., 2014, *Ανάλυση και συγκριτική αξιολόγηση δεδομένων από εργοστασιακές δοκιμές και δοκιμές θαλάσσης μεγάλων δίχρονων ναυτικών κινητήρων Diesel,* Εκδόσεις Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

1. Μαυρίδης Κ., 1997, *Μηχανές Εσωτερικής Καύσης*, Εκδόσεις ΊΩΝ, Αθήνα
2. Πηλιούρα Φ., 2009, *Ανάλυση στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς ασύγχρονων ηλεκτρικών κινητήρων, μεγάλης ισχύος, τροφοδοτούμενων μέσω ντηζελογεννήτριας,* Εκδόσεις Πανεπιστήμιο, Πάτρας
3. Ρακόπουλος Δ., 1988, *Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή –Λειτουργία – Θερμοδυναμική*, Εκδόσεις Γρηγ. Φούντας, Αθήνα.
4. Ρακόπουλος Δ., 2000, *Εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης ΙΙ. Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία*, Εκδόσεις Γρηγ. Φούντας, Αθήνα.

5. Ρακόπουλος Δ., 1994, *Εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης*, Εκδόσεις Γρηγ. Φούντας, Αθήνα.
6. Ρακόπουλος Δ., Χουντάλας Θ, 1998, *Καύση ρύπανση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης*, Εκδόσεις Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
7. Ρακόπουλος Δ., 1998, *Αρχές Εμβολοφόρων ΜΕΚ,* Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα
8. Ρακόπουλος Δ., Γιακουμής Γ., 2006, *Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ,* Εκδόσεις Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
9. Panda Anshuman, 2010, A *technical seminar,* Report on Supercharger Department of Mechanical Engineering Bangalore
10. Power Train 2007*, Thermodynamics of supercharging,* Charging the Internal Combustion Engine, pp 23-50.
11. Principles and Performance in Diesel Engineering, Ed. By Haddad and Watson
12. Σαμπάνης Ν., 2013, *Σχεδίαση διαφορικού επιβατικού αυτοκίνητου ισχύος 200HP,* Έκδοση Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα.
13. Τζιφάκης Α., Μηχανές Ντήζελ. Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου, Αθήνα, 1978
14. Τσιγκαρας Δ., 2015, *Μελέτη της καύσης σε μηχανές OTTO – DIESEL και διαφορές υπερτροφοδοτούμενων σε σχέση με ατμοσφαιρικών εφαρμογών,* Εκδόσεις ΤΕΙ Κρήτης, Ηράκλειο
15. Τσούρας Α., 2013, *Στροβιλουπερπληρωτής Τετράχρονου Βενζινοκινητήρα*, Εκδόσεις Εμπορικού Ναυτικού, Νέα Μηχανίωνα
16. Χατζηκνωσταντής Γ., 2012, Σημειώσεις Θερμοδυναμικής, Ανοικτά Ακαδημαϊκά μαθήματα Εκδόσεις ΤΕΙ Αθήνας

Διαδίκτυο

1. http://www.mixanitouxronou.gr
2. http://www.coches.net/noticias/los-tres-ruedas-mas
3. http://2gym-pefkis.att.sch.gr
4. http://mixanologiki-gwnia.blogspot.gr
5. http://www.bmwfans.gr
6. http://www.allaboutenergy.gr
7. http://www.bmwforum.gr
8. http://www.cretaclassicclub.gr
9. http://auto.howstuffworks.com
10. http://vehiclestech.blogspot.gr
11. http://www.caroto.gr
12. http://www.puntogt.gr
13. http://www.highperformance.gr
14. http://www.autoblog.gr
15. http://www.mazdanorthclub.gr
16. http://forum.ih8mud.com
17. http://www.toyotagtturbo.com
18. http://ocw.mit.edu/index.htm
19. www.m3.tuc.gr
20. http://www.mechadyne-int.com
21. http://auto.howstuffworks.com/supercharger5.htm
22. http://ocw.mit.edu/index.htm
23. http://www.vwclub.gr/vwforum/index.php

24. http://www.sciroccoclub.gr
25. http://www.thatslife.gr/his-life/car-science-lab-katalitis-meros/
26. http://www.katalizator.gr/gr/o-katalitikos-metatropeas.html
27. http://www.automotive-iq.com/exhaust/articles/do-platinum-group-metals-still-have-a-future-in-ca
28. http://www.waybuilder.net/sweethaven/MechTech/Automotive01