

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΩΜΕΙΩΣΗΣ

ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑ

ΛΑΓΟΣ ΦΩΤΙΟΣ

ΚΑΛΟΓΗΡΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ

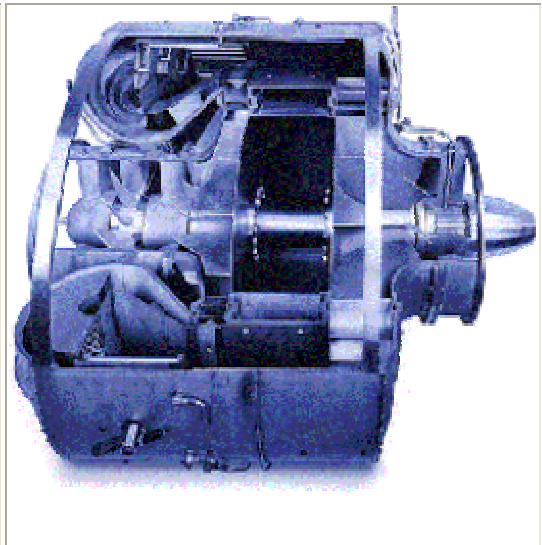
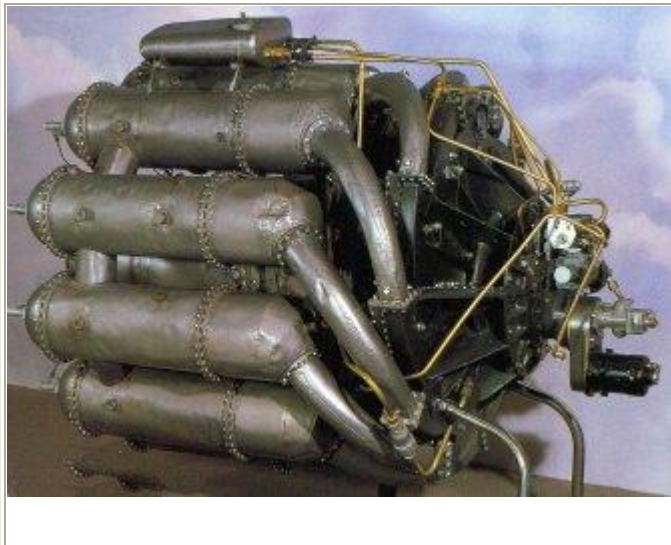
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.1 Συνοπτική Παρουσίαση των Αεριοστρόβιλων	8
1.2 Τα Βασικά Στοιχεία των Αεριοστρόβιλων.....	12
1.3 Είδη Αεριοστρόβιλων και Βασικά Χαρακτηριστικά τους.....	20
1.4 Ανοικτός Κύκλος Λειτουργίας.....	23
1.5 Σύζευξη Συμπιεστών και Στροβίλων	26
1.6 Κλειστός Κύκλος Λειτουργίας.....	28
1.7 Εφαρμογή των Αεριοστρόβιλων στην πρόωση των αεροπλάνων.....	30
2.ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	
2.1 Υπολογισμός Θερμοκρασιών, Λόγου Καυσίμου/Αέρα, Βαθμών Απόδοσης και Κατανάλωσης Καυσίμου	32
2.2 Κύκλος απλού αεριοστρόβιλου (CBT).	34
3.ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	39
4.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	46

Περίληψη

Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως βασικό στόχο την κατασκευή ενός μοντέλου όπου η λειτουργία του θα στηρίζεται στην βασική αρχή λειτουργίας των στροβιλοκινητήρων. Για την υλοποίηση του εγχειρήματος χρησιμοποιούνται απλά εξαρτήματα τα οποία έχουν εφαρμογή σε άλλες κατασκευές. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το κεντρικό τμήμα του μοντέλου είναι ένας στροβιλοσυμπιεστής αυτοκινήτου (κοινώς TURBO) το οποίο με της τροποποιήσεις που έχουν γίνει, είναι σε θέση να λειτουργήσει. Όσον αφορά στα καύσιμα, αυτά μπορούν να είναι οποιασδήποτε μορφής, από βενζίνη έως βιοντίζελ. Η ουσιαστική εφαρμογή του όμως ως κινητήρας φαντάζει αδύνατη και αυτό δεν οφείλεται στην δυσκολία της κατασκευής του. Βασικό πρόβλημα είναι το αυξημένο κόστος κατασκευής του, η εντατική επίβλεψη και συντήρηση αλλά κυρίως η ιδιαίτερα αυξημένη κατανάλωση καυσίμου. Σε αυτό το μικρό μέγεθος ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα μας, τον χαρακτηρίζει ως μη λειτουργικό. Ελπίζουμε το μοντέλο μας να βοηθήσει συναδέλφους μας στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας αυτών των ιδιαίτερων κινητήρων.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αρχή λειτουργίας των κινητήρων εκτόξευσης αερίων (στροβιλοκινητήρες) στηρίζεται στη συμπύκνωση του εισερχόμενου αέρα, στον οποίο προστίθεται καύσιμο και στην ανάφλεξη αυτού του μίγματος. Τα υπέρθερμα καυσαέρια εκτονώνονται κατά ένα μέρος σε ένα στρόβιλο ο οποίος κινεί το συμπυκνωτή και άλλους μηχανισμούς, όπως μια γεννήτρια και διάφορες αντλίες και κατά το υπόλοιπο τμήμα εκτονώνονται στην έξοδο οπότε, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής, ασκείται στον κινητήρα προωθητική δύναμη . Η λειτουργία των στροβίλων ήταν γνωστή ήδη από το έτος 1884, όταν ο Βρετανός μηχανικός Charles A. Parson (Πάρσον, 1854-1931) κατασκεύασε ένα ατμοστρόβιλο ως κινητήριο μηχανισμό για πλοία και για γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Σημαντικότερο κίνητρο για την ανάπτυξη των στροβιλοκινητήρων ήταν η αξιοποίησή τους στην αεροπλοΐα. Τα ελικοφόρα αεροπλάνα έφτασαν στα όρια ταχύτητας των 700 km/h, το οποίο όριο μόνο ελάχιστα ήταν δυνατόν να ξεπεραστεί με οριακές βελτιώσεις στους κινητήρες βενζίνης ή κηροζίνης και τη διαμόρφωση των ελίκων. Με το στροβιλοκινητήρα μπορούν να επιτευχθούν αρκετά μεγαλύτερες ταχύτητες και επιπλέον, λόγω της αποκλειστικά κυκλικής κίνησης όλων των μηχανικών μερών του, αυτός ο κινητήρας είναι δυνατόν να ζυγοσταθμιστεί ευκολότερα και αποτελεσματικότερα.



Αεριοστρόβιλος Whittle, αεριοστρόβιλος von Ohain

Τον πρώτο στροβιλοκινητήρα με αυτοδύναμη λειτουργία ανέπτυξε το έτος 1903 ο Νορβηγός Aegidius Elling (Ελινγκ, 1861-1949), φυσικά χωρίς οποιονδήποτε συσχετισμό με την αεροπλοΐα, η οποία τότε μόλις άρχιζε να παίζει ρόλο στην τεχνολογία. Ο Γάλλος Georges Marconnet (Μαρκονέ) πρότεινε πρώτος την αξιοποίηση των στροβιλοκινητήρων στην κατασκευή αεριοθούμενων αεροπλάνων και σχεδίασε μία μηχανή, η οποία μάλλον δεν πρέπει να κατασκευάστηκε ποτέ. Μερικοί άλλοι στροβιλοκινητήρες ήταν υβριδικής συγκρότησης και περιείχαν βοηθητικές, μηχανές. Π.χ. ο κινητήρας του Ρουμάνου Henri Coanda (Κοάντα, 1886-1972) από το έτος 1910 περιελάμβανε ένα βενζινοκινητήρα, ο οποίος κινούσε ανεμιστήρα για την ώθηση του αέρα. Γι' αυτόν τον κινητήρα υπήρχε επίσης η εκδοχή του Ιταλού Secondo Campini (Καμπίνι, 1904-1980) και μία ακόμα για τα αεροπλάνα των Γιαπωνέζων καμικάζι στο β' παγκόσμιο πόλεμο. Το έτος 1920 υπέβαλε ο αξιωματικός της βρετανικής αεροπορίας Frank Whittle (Χουΐτλ, 1907-1996) διάφορες προτάσεις για την κατασκευή ενός στροβιλοκινητήρα για αεροπλάνα, τα οποία θα πετούσαν σε ύψος πάνω από 10.000 μέτρα. Κύριο χαρακτηριστικό της ιδέας του Χουΐτλ ήταν ότι ο ίδιος ο αεριοστρόβιλος του κινητήρα θα παρείχε την ενέργεια

για τη λειτουργία του συμπυκνωτή. Οι δοκιμαστικές εργασίες άρχισαν το έτος 1930 και ήδη μετά από δύο χρόνια πήρε ο Χουίτλ τις σχετικές βεβαιώσεις ευρεσιτεχνίας.

Το έτος 1935 ίδρυσε Rolf Dudley Williams (Γουίλιαμς) την εταιρία *Power Jets Ltd.* και τοποθέτησε τον Χουίτλ επικεφαλής της ομάδας ανάπτυξης του κινητήρα. Το έτος 1937 τέθηκε ο πρώτος κινητήρας σε δοκιμαστική λειτουργία και αμέσως ακολούθησε χρηματοδότηση από το βρετανικό Υπουργείο Πολέμου για την κατασκευή αεριωθούμενου πολεμικού αεροπλάνου με κινητήρες του Χουίτλ. Η κατασκευή του αεροπλάνου ανατέθηκε στην εταιρία *Gloster Aircraft*, η οποία το ολοκλήρωσε το έτος 1941 και το ονόμασε *E 28/39*. Αυτές οι προσπάθειες δεν ευδοκίμησαν όμως σε ικανοποιητικό βαθμό, ώστε το αεροπλάνο να αξιοποιηθεί στο β' παγκόσμιο πόλεμο. Ανεξάρτητα από τον Χουίτλ εργαζόταν και ο Γερμανός Hans von Ohain (φον Οχάιν, 1911-1998) πάνω στην κατασκευή ενός στροβιλοκινητήρα. Ο Οχάιν συνεργάστηκε με το βιομήχανο Ernst Heinkel (Χάινκελ) και παρουσίασαν τον πρώτο κινητήρα *Heinkel HeS 1* το έτος 1937, ο οποίος είχε ως καύσιμη ύλη αρχικά το υδρογόνο. Ο τρίτος κινητήρας αυτής της σειράς, *Heinkel HeS 3*, ήταν πλέον ώριμος για χρήση σε αεροπλάνο, το οποίο κατασκευάστηκε το έτος 1939 γι' αυτή τη μηχανή και πήρε το όνομα *Heinkel He 178*. Αυτό ήταν και το πρώτο αεριωθούμενο αεροπλάνο που ήταν σε θέση να πραγματοποιήσει εκτεταμένες πτήσεις και το οποίο ο στρατιωτικός μηχανισμός της χιτλερικής δικτατορίας το προόριζε για τον επερχόμενο πόλεμο. Όμως η μαζική παραγωγή στροβιλοκινητήρων άρχισε στη Γερμανία κατά το έτος 1942 με τη μηχανή *Jumo 004* που αξιοποιήθηκε στο πολεμικό δικινητήριο αεροπλάνο *Messerschmitt Me 262*. Μέχρι το τέλος του πολέμου είχαν κατασκευαστεί περίπου 5.000 κινητήρες αυτού του τύπου.

Η τεχνολογία των κινητήρων φυγοκεντρικής ροής, jet εφευρέθηκε κατά την διάρκεια του β/παγκόσμιου ,και εξελίχθηκε μετέπειτα αντικαθιστώντας τα εμβολοφόρα μοτέρ των αεροσκαφών . Όπως οι κινητήρες εσωτερικής καύσης βασίζονται στην λειτουργία ΕΙΣΑΓΩΓΗ -ΣΥΜΠΙΕΣΗ -ΕΚΤΩΝΟΣΗ - ΕΞΑΓΩΓΗ έτσι και οι κινητήρες φυγοκεντρικής ροής παράγουν την ενέργεια με ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΑΕΡΑ -ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΑΕΡΑ -ΚΑΥΣΗ -ΕΞΑΓΩΓΗ .

Οι κινητήρες αυτού του τύπου κατασκευάζονται τα τελευταία χρόνια και υπό κλίμακα , και βασίζονται στην ίδια θεωρία των πραγματικών jet .

Ο τρόπος λειτουργίας έχει ως εξής. Την στιγμή που ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στην εισαγωγή του κινητήρα ,ο συμπιεστής επιτρέπει τον αέρα να περάσει μόνο προς το κέντρο του χωρίς μεγάλη ταχύτητα .Στην συνέχεια με την βοήθεια των πτερύγιων ο αέρας κινείται στην εξωτερική διάμετρο του συμπιεστή παράγοντας φυγοκεντρικές δυνάμεις περιστροφής αυξάνοντας την ταχύτητα του . Μετέπειτα ο αέρας περνάει στους διάχυτες που είναι ο μόνος δρόμος διαφυγής του .Η ενεργειακή ταχύτητα του αέρα μετατρέπεται σε ενέργεια πίεσης . Σε αυτή την φάση έχει ανέβει η θερμοκρασία του αέρα που συντελεί στο καλύτερο αποτέλεσμα κατά την διάρκεια της καύσης του .

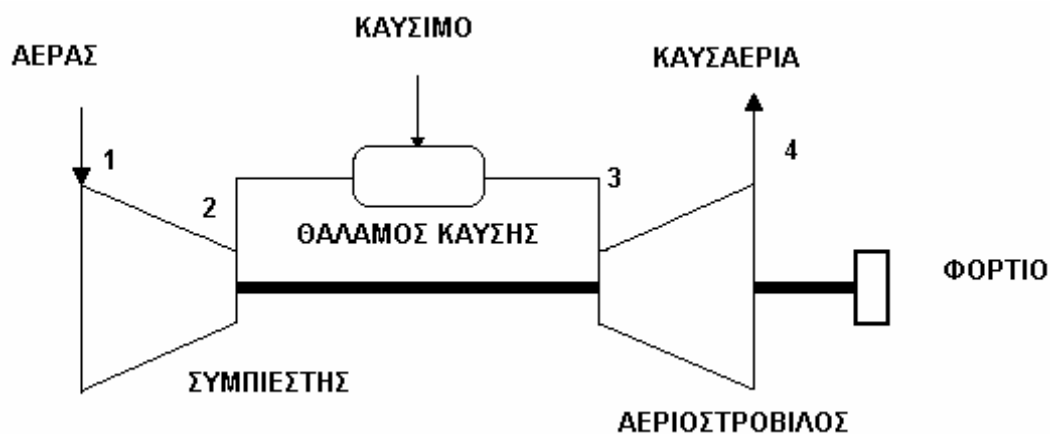
Ο ζεστός πλέον αέρας περνάει στον θάλαμο καύσης , ο οποίος αποτελείται από δυο θύλακες [δοχεία η αλλιώς καζανάκια] τα οποία είναι το ένα μέσα στο άλλο. Στο πρώτο κινείται ο ζεστός αέρας , και ανάμεσα του πρώτου και του δεύτερου υπάρχει η σωλήνωση του καύσιμου . Στην άκρη κάθε σωλήνωσης βρίσκονται μικρές οπές από όπου διοχετεύεται το καύσιμο ,και στο σημείο αυτό υπάρχει το [μπουζί] με το οποίο δημιουργείται η έκρηξη . Τα καυσαέρια που παράγονται από την έκρηξη αυξάνουν ταχύτητα και διαφεύγουν από το δεύτερο θύλακα οδηγούμενα από τα σταθερά πτερύγια που βρίσκονται μπροστά από την τουρμπίνα . Η ενέργεια έχει παραχθεί και τα καυσαέρια περνάνε στην ατμόσφαιρα από τον κώνο εξαγωγής όπου βρίσκονται τρία η τέσσερα σταθερά πτερύγια για την ομαλή έξοδο των καυσαερίων .

Αυτή ήταν μια απλή εξήγηση για την λειτουργία των κινητήρων jet ,για να
μπορέσει να κατανοήσει απλά ο καθένας

1.1 Συνοπτική Παρουσίαση των Αεριοστρόβιλων

Ο στρόβιλος γενικά, σε σχέση με τις άλλες διατάξεις παραγωγής μηχανικού έργου, παρουσιάζει αρκετά ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης. Δεν υπάρχουν πολλά τριβόμενα τμήματα, όπως στις εμβολοφόρες μηχανές, η κατανάλωση λιπαντικού είναι μικρή και έχουν ελάχιστα προβλήματα ζυγοσταθμίσεως. Γενικά οι αεριοστρόβιλοι παρουσιάζουν υψηλή αξιοπιστία. Τα πλεονεκτήματα του στρόβιλου φάνηκαν όταν χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στις αρχές του 20ου αιώνα άρχισε η χρησιμοποίηση των ατμοστρόβιλων για την κίνηση των πλοίων και των τρένων, καθώς και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα λειτουργούν εργοστάσια με ισχύ πάνω από 500 MW και απόδοση περίπου 40%. Οι ατμοστρόβιλοι, αν και έχουν βελτιωθεί αρκετά, εμφανίζουν ένα μειονέκτημα. Αυτό σχετίζεται με την εγκατάσταση παραγωγής ατμού υψηλής πίεσεως και υψηλής θερμοκρασίας. Οι εγκαταστάσεις αυτές είναι δαπανηρές και μπορεί να είναι από ένα συμβατικό λέβητα μέχρι ένα πυρηνικό αντιδραστήρα. Το βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι τα παραγόμενα θερμά αέρια, από το λέβητα ή τον αντιδραστήρα, δε χρησιμοποιούνται κατευθείαν στο στρόβιλο, αλλά για την παραγωγή ενός ενδιάμεσου ρευστού, του ατμού. Τα προβλήματα αυτά οδήγησαν στην κατασκευή και ανάπτυξη των αεριοστρόβιλων, με αποτέλεσμα τη χρησιμοποίησή τους σε ένα μεγάλο πεδίο εφαρμογών (εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας, πλοία, αεροπλάνα). Για τη λειτουργία του αεριοστρόβιλου χρειάζεται αέριο υψηλής πίεσεως το οποίο εκτονούμενο μέσα στο στρόβιλο τον κινεί. Ο απαιτούμενος υψηλός λόγος πίεσεως πραγματοποιείται με τη χρησιμοποίηση του συμπιεστή. Εάν δεν υπήρχαν απώλειες, στο σύστημα συμπιεστής – στρόβιλος, τότε το αποδιδόμενο έργο από τον στρόβιλο θα ήταν ίσο προς το καταναλισκόμενο

από τον συμπιεστή. Αλλά και σ' αυτή την ιδανική κατάσταση δε θα μπορούσε να παραχθεί ωφέλιμο έργο και το αποτέλεσμα θα ήταν απλώς η λειτουργία του συστήματος συμπιεστής-στρόβιλος. Το έργο που παράγει ο στρόβιλος αυξάνεται με την πρόσθεση ενέργειας στο εκτονούμενο αέριο που αυξάνει τη θερμοκρασία του. Όταν το αέριο είναι ο αέρας, η πρόσθεση ενέργειας πραγματοποιείται με την καύση ενός καύσιμου με τον αέρα που έχει προηγουμένα συμπιεστεί. Τα καυσαέρια εκτονούμενα παράγουν στο στρόβιλο μεγαλύτερο έργο, μέρος του οποίου κινεί τον συμπιεστή, ενώ ταυτόχρονα παράγεται και ωφέλιμο έργο. Η διαδικασία αυτή παραγωγής ωφέλιμου έργου είναι η αρχή λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου (Σχ. 1.1).



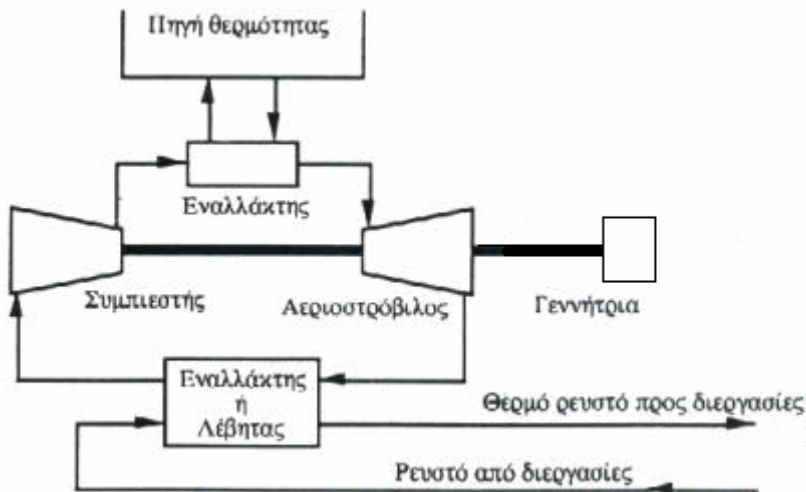
Σχήμα 1.1 Αρχή λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου.

Επειδή υπάρχουν απώλειες, το έργο που λαμβάνεται τελικά στην έξοδο του στροβίλου είναι μικρότερο. Το ωφέλιμο έργο αυξάνεται με την προσθήκη επιπλέον καυσίμου, αν και υπάρχει ένα όριο του λόγου καυσίμου/αέρα, για δεδομένη παροχή αέρα, που περιορίζει το ποσό του ωφέλιμου έργου. Η μέγιστη τιμή του λόγου καυσίμου/αέρα καθορίζεται από τη θερμοκρασία λειτουργίας των πτερυγίων του στροβίλου, η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή. Αυτή καθορίζεται από την αντοχή σε ερπυσμό των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή και από την επιθυμητή διάρκεια ζωής του αεριοστρόβιλου. Συνεπώς οι δύο βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων είναι:

- i. η απόδοση κάθε τμήματος (στρόβιλος, συμπιεστής, καυστήρας, εναλλάκτης κλπ.)
- ii. η θερμοκρασία λειτουργίας (που εξαρτάται από τα χρησιμοποιούμενα υλικά)

Η ολική απόδοση του κύκλου ενός αεριοστρόβιλου εξαρτάται και από το λόγο συμπίεσεως του συμπιεστή. Αρχικά υπήρχαν δυσκολίες στην πραγματοποίηση υψηλού λόγου συμπίεσεως, όμως σήμερα, ιδιαίτερα σε τελειοποιημένους κινητήρες, επιτυγχάνονται λόγοι συμπίεσεως πάνω από 30:1, με απόδοση συμπιεστή 85-90% και με θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο πάνω από 1200-1500°K. Παλαιότερα είχαν προταθεί δύο δυνατά συστήματα καύσεως. Το ένα υπό σταθερό όγκο και το άλλο υπό σταθερή πίεση. Θεωρητικά η θερμική απόδοση του κύκλου υπό σταθερό όγκο είναι μεγαλύτερη αυτού υπό σταθερή πίεση, αλλά οι μηχανικές δυσκολίες είναι πολύ μεγαλύτερες που σχεδόν αποκλείουν την εξέλιξη αεριοστρόβιλου με κύκλο υπό σταθερό όγκο. Οι διαδικασίες συμπίεση-καύση-εκτόνωση στον αεριοστρόβιλο δε γίνονται στην ίδια μονάδα όπως στους παλινδρομικούς κινητήρες. Οι διαδικασίες γίνονται σε ξεχωριστές μονάδες, που λέγονται στοιχεία του κινητήρα, και οι οποίες

χωρίζονται με την έννοια ότι σχεδιάζονται χωριστά. Τα στοιχεία αυτά όμως συνδέονται λειτουργικά μεταξύ τους και σχηματίζουν τον αεριοστρόβιλο. Είναι δυνατόν να προστεθούν ψύκτες μεταξύ των συμπιεστών, αναθερμαντικοί θάλαμοι καύσης μεταξύ των στροβίλων καθώς και αναγεννητές θερμότητας μεταξύ του συμπιεστή και του θαλάμου καύσης που αξιοποιούν τα καυσαέρια που εξέρχονται από το στρόβιλο για να θερμάνουν τον αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσεως. Αυτές οι διατάξεις χρησιμοποιούνται για την αύξηση της εξερχόμενης ισχύος και αποδόσεως. Η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού εξαρτάται από την ειδική περίπτωση εφαρμογής του αεριοστρόβιλου. Εκτός από τους διάφορους απλούς κύκλους, που προκύπτουν με την προσθήκη των βοηθητικών στοιχείων όπως είναι οι ψύκτες, οι αναθερμαντήρες και οι εναλλάκτες, οι αεριοστρόβιλοι κατατάσσονται σε δύο διακεκριμένες κατηγορίες: ανοικτού και κλειστού κύκλου. Στους αεριοστρόβιλους ανοικτού κύκλου (Σχ.1.1), πραγματοποιείται συνεχής εισροή ατμοσφαιρικού αέρα μέσα στο συμπιεστή και η ενέργεια προστίθεται με την καύση ενός καύσιμου εντός του αέρα. Στη συνέχεια τα καυσαέρια εκτονώνονται στο στρόβιλο και εξέρχονται στην ατμόσφαιρα. Στους αεριοστρόβιλους κλειστού κύκλου (Σχ.1.2) ένα αέριο ή ο αέρας ανακυκλώνεται συνεχώς μέσα στη μηχανή. Είναι φανερό ότι η καύση δεν λαμβάνει χώρα εντός του αερίου του κυκλώματος και η απαιτούμενη ενέργεια πρέπει να δοθεί από ένα θερμαντήρα (εναλλάκτη), ενώ η καύση λαμβάνει χώρα σ' ένα χωριστό κύκλωμα. Ο κλειστός κύκλος λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου μοιάζει με εκείνον του ατμοστρόβιλου.



Σχήμα 1. 2 Παράδειγμα κλειστού κύκλου λειτουργίας.

1.2 Τα βασικά στοιχεία του αεριοστρόβιλου

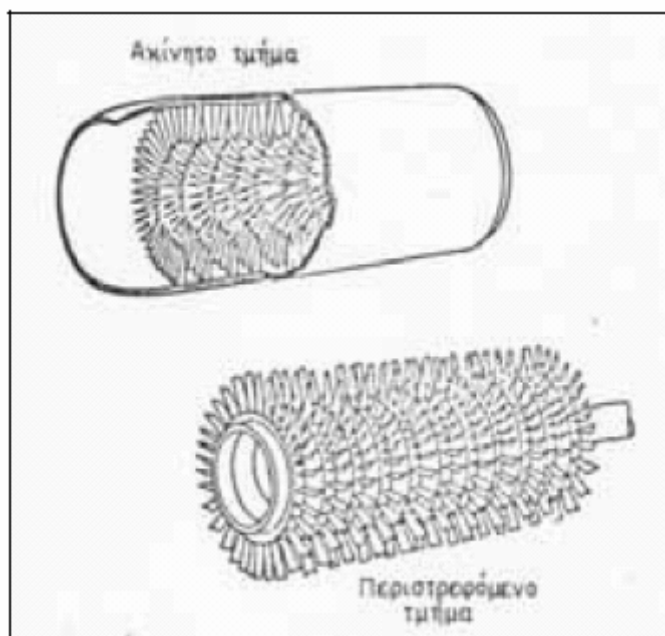
Τα βασικά στοιχεία του συστήματος είναι:

- i. Το τμήμα εισαγωγής (intake)
- ii. Ο συμπιεστής (compressor)
- iii. Ο θάλαμος καύσης (combustion chamber)
- iv. Ο στρόβιλος (turbine)
- v. Το τμήμα εξαγωγής (nozzle)
- vi. Οι εναλλάκτες θερμότητας (heat exchanger)

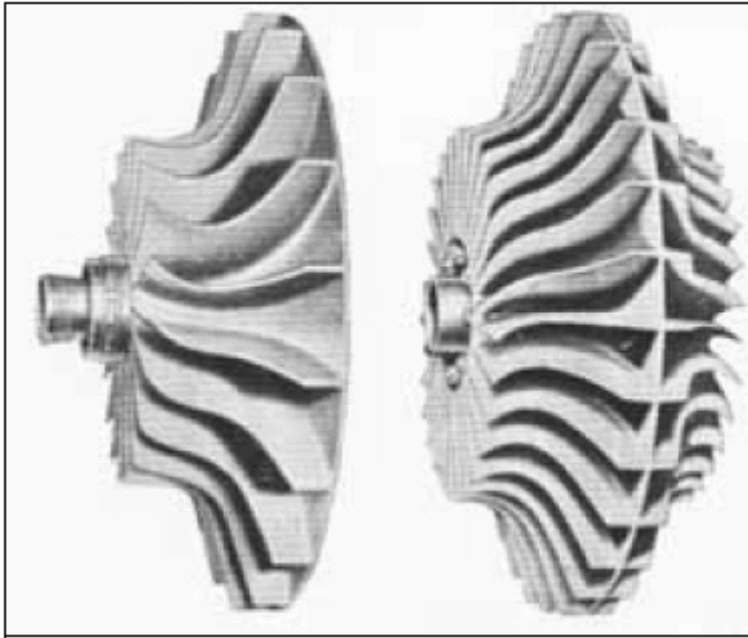
Τμήμα εισαγωγής

Προσαρμόζει τον αέρα που εισέρχεται στη μηχανή στις απαιτήσεις του συμπιεστή σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Οι πιο βασικές απαιτήσεις είναι καθαρός (από σωματίδια) αέρας, ομοιόμορφης κατανομής σε ταχύτητα και

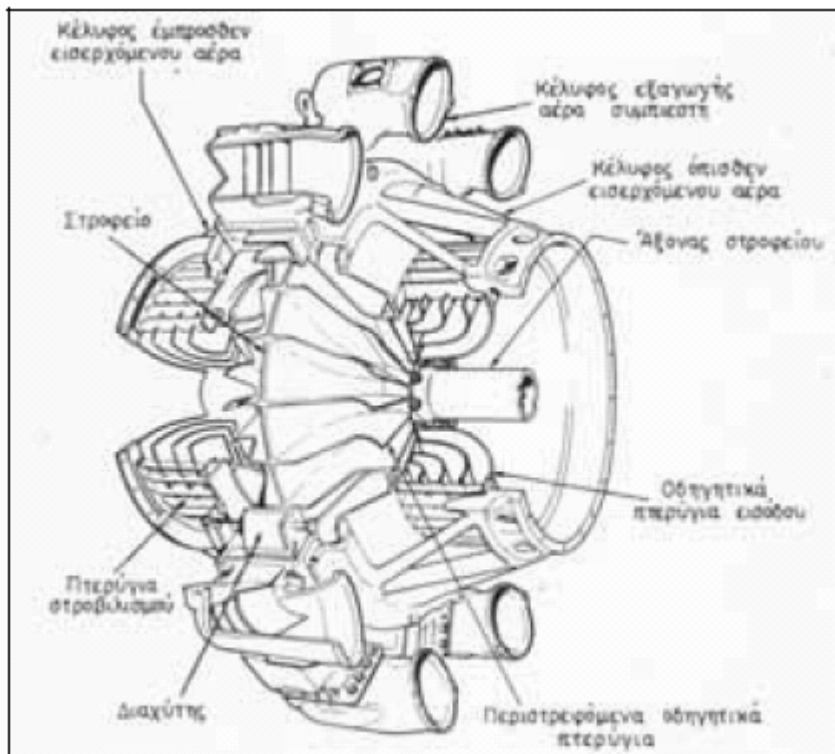
πίεση και στον κατάλληλο αριθμό Mach για αεροπορικές εφαρμογές. Μερικές φορές περιλαμβάνει και φίλτρο κατακράτησης σωματιδίων ή απορρόφησης ηχητικών κυμάτων. Ο συμπιεστής Συμπιέζει τον αέρα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του θερμοδυναμικού κύκλου. Μπορεί να είναι είτε αξονικός (Σχ.1.3), είτε φυγοκεντρικός (Σχ.1.4,1.5,1.6), είτε παλινδρομικός. Συνήθως προτιμούνται οι δύο πρώτοι τύποι, γιατί εμφανίζουν μεγαλύτερη απόδοση, είναι πιο συμπαγείς και πιο φθηνοί. Επιτρέπουν την αναρρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ατμοσφαιρικού αέρα ($\approx 150 \text{ kg/s/m}^2$ διατομής του αγωγού εισόδου σε αριθμό Mach ≈ 0.4). Τυπικές τιμές του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης είναι $0.7 \leq \eta_C \leq 0.9$. Συνήθεις λόγοι πίεσης r_C είναι 1.1 – 1.25 ανά βαθμίδα, 8-10 ανά τύμπανο και 25-30 ανά συμπιεστή.



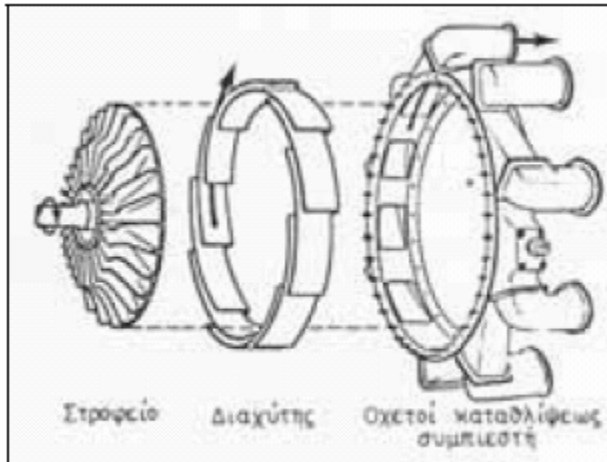
Σχήμα 1.3 Αξονικός συμπιεστής



Σχήμα 1.4 Στροφείο συμπιεστή

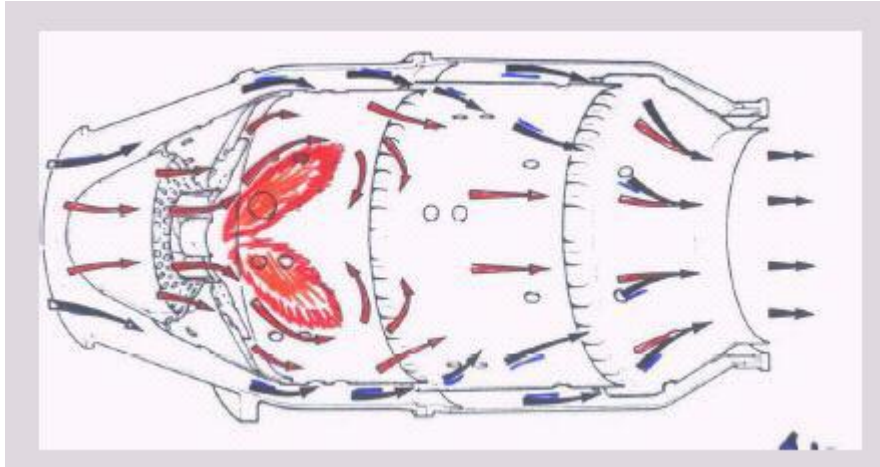


Σχήμα 1.5 Φυγοκεντρικός συμπιεστής



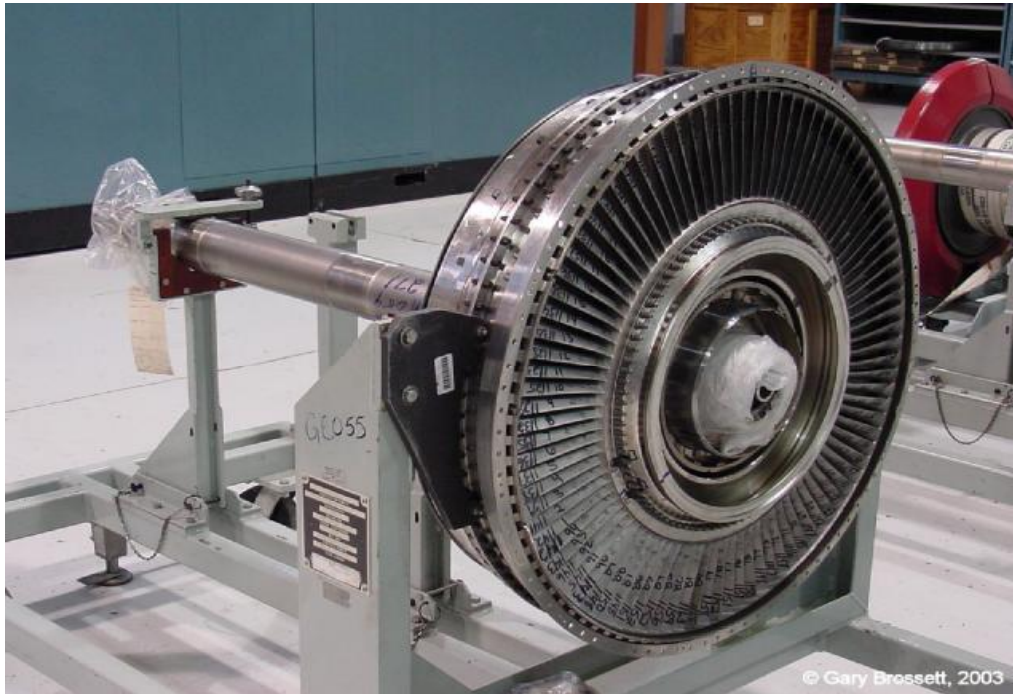
Σχήμα1.6 Φυγοκεντρικός συμπιεστής

Ο θάλαμος καύσης είναι συνεχούς λειτουργίας. Η όλη διεργασία καύσης είναι σχεδόν ισοβαρής . Επειδή ο λόγος καυσίμου/αέρα είναι μικρότερος από τη στοιχειομετρική αναλογία (περίσσεια αέρα της τάξης του 250%), μόνο μέρος του αέρα καίγεται άμεσα με το καύσιμο, στην πρωτεύουσα (primary) ζώνη, σε υψηλή θερμοκρασία. Ο υπόλοιπος αέρας εισάγεται στο θάλαμο σε δεύτερο στάδιο, ψύχοντας έτσι τα καυσαέρια στη θερμοκρασία που επιτρέπει ο στρόβιλος. Λόγω της μεγάλης πίεσης, της μεγάλης περίσσειας αέρος και του μικρού μήκους του θαλάμου (ο όγκος του θαλάμου μπορεί να είναι 10 με 20 φορές μικρότερος από τον αντίστοιχο όγκο εστίας λέβητα), απαιτείται πολύ προσεκτικός έλεγχος της ευστάθειας της καύσης. Επίσης επιβάλλεται η μικρή εκπομπή ρύπων (CO, NO, υδρογονανθράκων) και καπνού. Σε μερικές εφαρμογές η καύση γίνεται έξω από την κύρια μηχανή και η θερμότητα μεταφέρεται στον αέρα μέσω κάποιου εναλλάκτη θερμότητας.



Σχήμα 1.7 Θάλαμος καύσης

Ο στρόβιλος είναι το εξάρτημα όπου παράγεται μηχανική ισχύς λόγω της εκτόνωσης των καυσαερίων μέχρι την ατμοσφαιρική πίεση. Είναι είτε φυγοκεντρικός (σπανίως) είτε αξονικός (συνήθως). Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης είναι της τάξης $0.75 \leq \eta_T \leq 0.93$ για αξονικές βαθμίδες. Συνήθως συνδέεται με το συμπιεστή με κοινό άξονα. Επιβάλλεται επομένως να ρυθμιστούν κατάλληλα οι συνθήκες λειτουργίας του συμπιεστή και του στρόβιλου ώστε να λειτουργούν στην ίδια γωνιακή ταχύτητα.

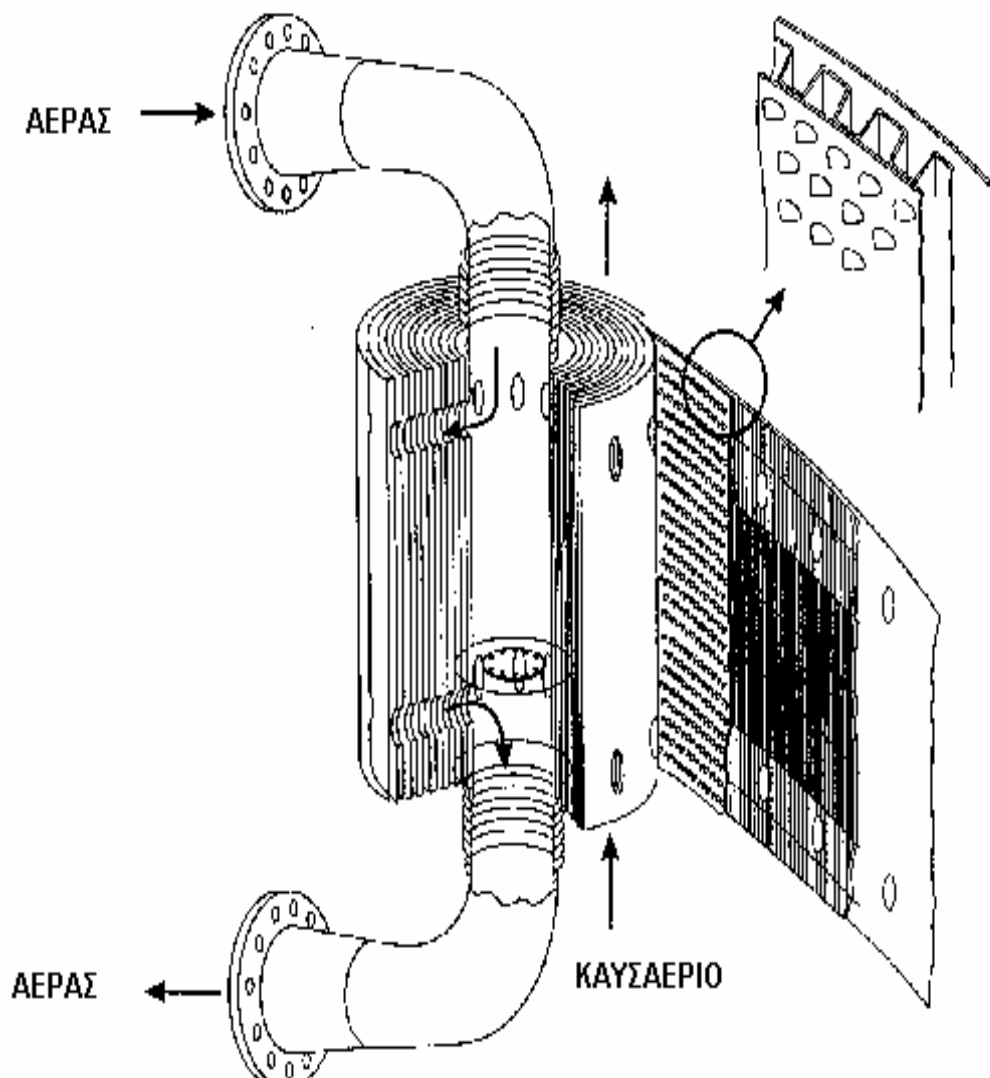


Σχήμα 1.8 Στρόβιλος χαμηλής πίεσης



Σχήμα 1.9 Στρόβιλος υψηλής πίεσης.

Το τμήμα εξόδου Το τμήμα αυτό σχεδιάζεται ανάλογα με τη χρήση της μηχανής. Στους αεροπορικούς κινητήρες έχει τη μορφή συγκλίνοντος η συγκλίνοντος – αποκλίνοντος ακροφυσίου, έτσι ώστε τα καυσαέρια να αποκτήσουν μεγάλη ταχύτητα, στους ηλεκτροπαραγωγούς κινητήρες έχει τη μορφή διαχύτη έτσι, ώστε η δυναμική πίεση στην έξοδο να είναι πολύ μικρή (της τάξης των 20 – 50 mbar). Αυτό επιτρέπει τη μέγιστη δυνατή εκτόνωση στο στρόβιλο κα επομένως, τη μεγαλύτερη θερμική απόδοση. Σε μερικούς κινητήρες περιλαμβάνει και τον μετακαυστήρα (afterburner) για την αύξηση της ενέργειας των καυσαερίων. Οι εναλλάκτες θερμότητας Αυτοί είναι διαφορετικής μορφής ανάλογα με τη θέση τους στο θερμοδυναμικό κύκλο. Οι συνηθέστεροι τύποι είναι ο αναγεννητικός προθερμαντήρας αέρα (regenerative) (Σχ.1.10), ο ενδιάμεσος ψύκτης (intercooler) και ο αντικαταστάτης του θαλάμου καύσης (σε συστήματα κλειστού κύκλου). Ο πιο συνήθης είναι ο πρώτος. Πέρα από τα παραπάνω βασικά στοιχεία, ο αεριοστρόβιλος έχει και συστήματα καύσιμου, λίπανσης, ελέγχου γωνιακής ταχύτητας του άξονα, βαλβίδες αναρρόφησης αέρα, έναυσης κλπ.



Σχήμα 1.10 Ο αναγεννητικός εναλλάκτης θερμότητας.

1.3 Είδη Αεριοστρόβιλων και βασικά χαρακτηριστικά τους

Σήμερα υπάρχει μια τεράστια ποικιλία αεριοστρόβιλων. Μερικές κατηγορίες διαχωρισμού των ειδών είναι και οι παρακάτω:

(α) Κατά τον κύκλο:

(i) Ανοικτού κύκλου (open cycle) με αναρρόφηση και επαναφορά στην ατμόσφαιρα

(ii) Κλειστού κύκλου (closed cycle), όπου το ρευστό παραμένει πάντα μέσα στη μηχανή. Τα ποσά θερμότητας εισέρχονται και εξέρχονται από τη μηχανή μέσω εναλλακτών θερμότητας.

(β) Κατά τον αριθμό αξόνων:

(i) Μονο-αξονικοί (Single shaft)

(ii) Δι-αξονικοί (Two shaft)

(iii) Τρι-αξονικοί (Triple shaft)

(iv) Με χωριστό στρόβιλο ισχύος. Εδώ η εκτόνωση γίνεται εν μέρει στο στρόβιλο που κινεί το συμπιεστή και η υπόλοιπη στο στρόβιλο ισχύος (που κινεί το φορτίο π.χ. την ηλεκτρογεννήτρια)

(γ) Κατά την ύπαρξη εναλλακτών θερμότητας:

(i) Αναγεννητικός (Regenerative)

(ii) Με ενδιάμεση ψύξη (Intercooled)

(iii) Με αναθέρμανση (Reheated)

δ) Κατά την εφαρμογή:

(i) Αεροπορικοί, που υποδιαιρούνται σε αεριοστρόβιλους, στρόβιλο-αντιδραστήρες (turbojet), στρόβιλο –ανεμιστήρες (turbofan) ή στρόβιλο-ελικοφόροι (turboprop)

(i) Ηλεκτροπαραγωγικοί

(ii) Βιομηχανικοί (Industrial)

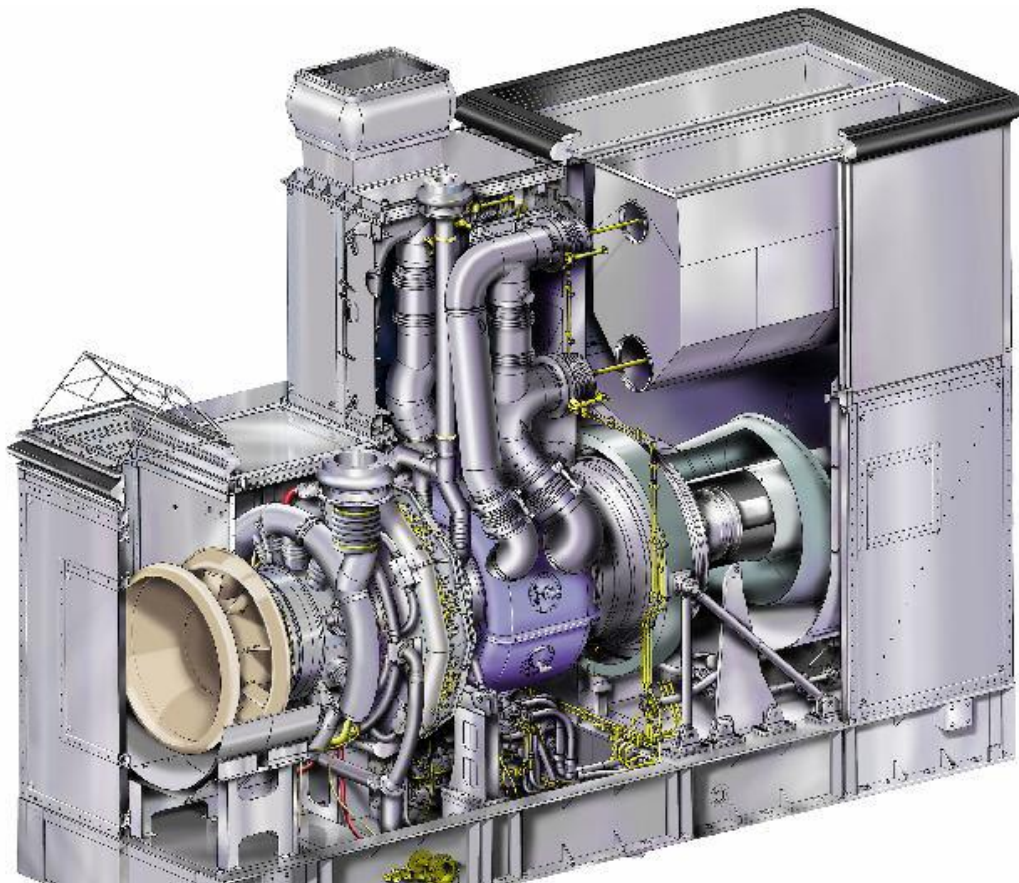
(iii) Ναυτικοί (Σχ.1.11)

Άλλα κύρια χαρακτηριστικά του κινητήρα, πέρα από τα προαναφερθέντα, είναι:

(i) Η διαδικασία εκκίνησης, με ή χωρίς εξωτερική βοήθεια. Εδώ επίσης προσδιορίζεται ο ρυθμός επιτάχυνσης (κυρίως για την αποφυγή έντονων θερμικών τάσεων) και το ελάχιστο φορτίο αυτοδύναμης λειτουργίας.

(ii) Η διαδικασία σταματήματος, με διακοπή καύσιμου και έλεγχο του ρυθμού ψύξης των εξαρτημάτων.

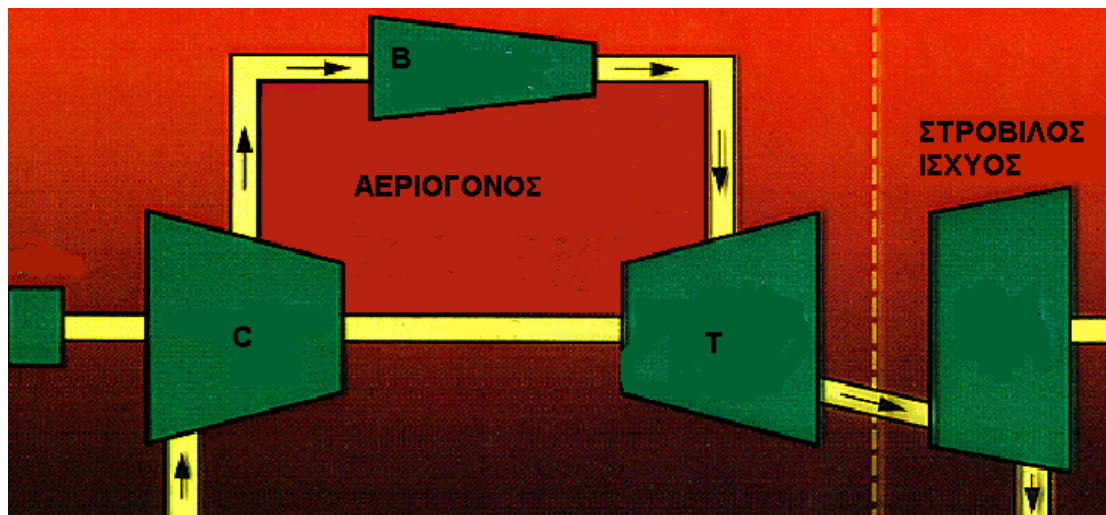
(iii) Επιτρεπόμενη περιοχή στροφών ανά λεπτό του άξονα για σταθερή λειτουργία και αντίστοιχοι ρυθμοί επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης.



Σχήμα 1.11 Ναυτικός αεριοστρόβιλος

1.4 Ανοικτός Κύκλος Λειτουργίας

Διατάξεις με απλό και διπλό άξονα Εάν ένας αεριοστρόβιλος πρέπει να λειτουργεί με σταθερό αριθμό στροφών και υπό σταθερό φορτίο (για την παραγωγή ισχύος μέγιστου φορτίου) τότε η κατάλληλη διάταξη είναι εκείνη με τον απλό άξονα που φαίνεται στο Σχ 1.1. Στην περίπτωση αυτή, η απόδοση του αεριοστρόβιλου σε μερικό φορτίο και η ευελιξία λειτουργίας (δηλ. η ταχύτητα με την οποία η μηχανή προσαρμόζεται μόνη της στις αλλαγές του φορτίου και της ταχύτητας περιστροφής) δεν είναι σημαντικές παράμετροι. Πράγματι, η αποτελεσματικά υψηλή αδράνεια, που οφείλεται στην αντίσταση του συμπιεστή, είναι ένα πλεονέκτημα, επειδή ελαττώνει τον κίνδυνο υπερβολικής ταχύτητας στην ξαφνική απώλεια φορτίου. Για να αυξηθεί η θερμική απόδοση του κύκλου προστίθεται ένας εναλλάκτης, αν και οι απώλειες πίεσεως λόγω τριβής, που εμφανίζονται στον εναλλάκτη, μπορούν να ελαττώσουν την εξερχόμενη ισχύ . Όταν ένας αεριοστρόβιλος πρέπει να έχει ευελιξία στη λειτουργία (π.χ. πλοία), τότε πρέπει να υπάρχει ένας μηχανικά ανεξάρτητος (η ελεύθερος) στρόβιλος ισχύος. Για το σκοπό αυτό είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση της διατάξεως του διπλού άξονα. Το Σχ. 1.12 δείχνει την κατάλληλη διάταξη, όπου ο στρόβιλος υψηλής πίεσεως κινεί το συμπιεστή και το σύστημα αυτό λειτουργεί ως γεννήτρια αερίου για το στρόβιλο χαμηλής πίεσεως. Διατάξεις αυτής της μορφής χρησιμοποιούνται σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου ο στρόβιλος ισχύος είναι σχεδιασμένος κατά τέτοιο τρόπο που να μπορεί να περιστρέφεται σε κατάλληλη ταχύτητα χωρίς την ανάγκη υπάρξεως ενός ακριβού συστήματος μειώσεως των στροφών. Ένα άλλο μικρότερο προτέρημα είναι ότι ο εκκινητής θα πρέπει τώρα να θέσει σε λειτουργία μόνο τη γεννήτρια αερίου. Ωστόσο ένα μειονέκτημα αυτής της διατάξεως είναι η πιθανή ανάπτυξη υπερβολικών ταχυτήτων του στρόβιλου ισχύος σε απότομη πτώση του φορτίου, με αποτέλεσμα να απαιτείται ένα σύστημα ελέγχου που θα εμποδίζει την ανάπτυξη υπερβολικής ταχύτητας.



Σχήμα 1.12 Αεριοστρόβιλος με χωριστό στρόβιλο ισχύος.

Η μεταβολή της ισχύος σε μονάδες με απλό ή διπλό άξονα επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της ροής του καύσιμου στο θάλαμο καύσεως. Καθώς η ισχύς εξόδου μειώνεται από την τιμή σχεδιασμού, μειώνονται και οι τιμές του λόγου πίεσης του κύκλου και της μέγιστης θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την πτώση του βαθμού απόδοσης του κύκλου, ιδιαίτερα κατά τη

λειτουργία με μερικό φορτίο. Η λειτουργία ενός στροβίλου βελτιώνεται σημαντικά όταν ελαττώνεται το έργο συμπίεσεως και / ή αυξάνεται το έργο εκτονώσεως. Για γνωστό λόγο συμπίεσεως, η απαιτούμενη ισχύς, ανά μονάδα ποσότητας του αερίου, είναι ανάλογη της θερμοκρασίας εισόδου. Το έργο συμπίεσεως μπορεί να ελαττωθεί με τη χρησιμοποίηση δύο ή περισσότερων συμπιεστών με ενδιάμεση ψύξη. Όμοια το έργο εκτονώσεως μπορεί να αυξηθεί με τη χρησιμοποίηση δύο ή περισσότερων στροβίλων με ενδιάμεση αναθέρμανση μέχρι τη μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία. Σύνθετοι κύκλοι αυτού του τύπου προσφέρουν τη δυνατότητα μεταβολής της ισχύος εξόδου ελέγχοντας την παροχή καύσιμου στο θάλαμο αναθερμάνσεως (αναθερμαντήρας) και αφήνοντας τη γεννήτρια αερίου να λειτουργεί πλησιέστερα στις βέλτιστες συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγαλύτερη οικονομία. Οι σύνθετοι κύκλοι εφαρμόστηκαν την εποχή αναπτύξεως των αεροσκαφών, όταν δεν ήταν δυνατή η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στο στρόβιλο (υλικά κατασκευής), ενώ ήταν επιθυμητός ένας ικανοποιητικός βαθμός απόδοσης. Η εφαρμογή των αεριοστροβίλων ήταν περιορισμένη (εκτός από τα αεροπλάνα), μέχρι που έγινε δυνατή η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών, που έκαναν τον απλό κύκλο οικονομικά εφαρμόσιμο. Τα πλεονεκτήματα των αεριοστροβίλων κατέστησαν τη χρησιμοποίησή τους ιδιαίτερα ελκυστική και για ναυτικές εφαρμογές. Στις εφαρμογές πρόωσης πλοίων, όπου υπάρχουν απαιτήσεις για μικρή ή μεσαία ταχύτητα για το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου κίνησης και για μεγάλη ταχύτητα για σχετικά μικρό ποσοστό του χρόνου, παρουσιάζουν το μειονέκτημα της υψηλής ειδικής κατανάλωσης καύσιμου (sfc) για λειτουργία υπό μερικό φορτίο. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με συνδυασμό του αεριοστροβίλου με άλλες μηχανές. Κατά καιρούς έχουν προταθεί οι ακόλουθοι συνδυασμοί:

- i. COSAG (Combined Steam And Gas) δηλαδή συνδυασμός ατμοστρόβιλου και αεριοστρόβιλου.
- ii. CODOG (Combined Diesel And Gas) δηλαδή συνδυασμός μηχανής diesel και αεριοστρόβιλου.
- iii. COGAG (Combined Gas And Gas) δηλαδή συνδυασμός αεριοστρόβιλου με αεριοστρόβιλο.
- iv. CODOG (Combined Diesel Or Gas) δηλαδή λειτουργία μηχανής diesel ή αεριοστρόβιλου.
- v. COGOG (Combined Gas Or Gas) δηλαδή λειτουργία ενός από δυο, γενικά διαφορετικούς αεριοστρόβιλους.

1.5 Σύζευξη Συμπιεστών και Στροβίλων

Για την επιτυχία υψηλού βαθμού αποδόσεως χωρίς τη χρησιμοποίηση εναλλάκτη είναι απαραίτητη η επίτευξη σχετικά υψηλού λόγου πίεσεως. Η δυσκολία που προκύπτει οφείλεται στη φύση της διαδικασίας συμπίεσεως. Επειδή η παροχή μάζας αέρα είναι συνήθως μεγάλη, στους αεριοστρόβιλους χρησιμοποιούνται πάντα συμπιεστές μη παλινδρομικοί. Αν και ένας πολυβάθμιος φυγοκεντρικός συμπιεστής είναι ικανός να παράγει υψηλό λόγο πίεσεων για μέτρια ισχύ, η απόδοσή του είναι αισθητά χαμηλότερη από αυτή των συμπιεστών αξονικής ροής. Για το λόγο αυτό προτιμούνται οι αξονικοί

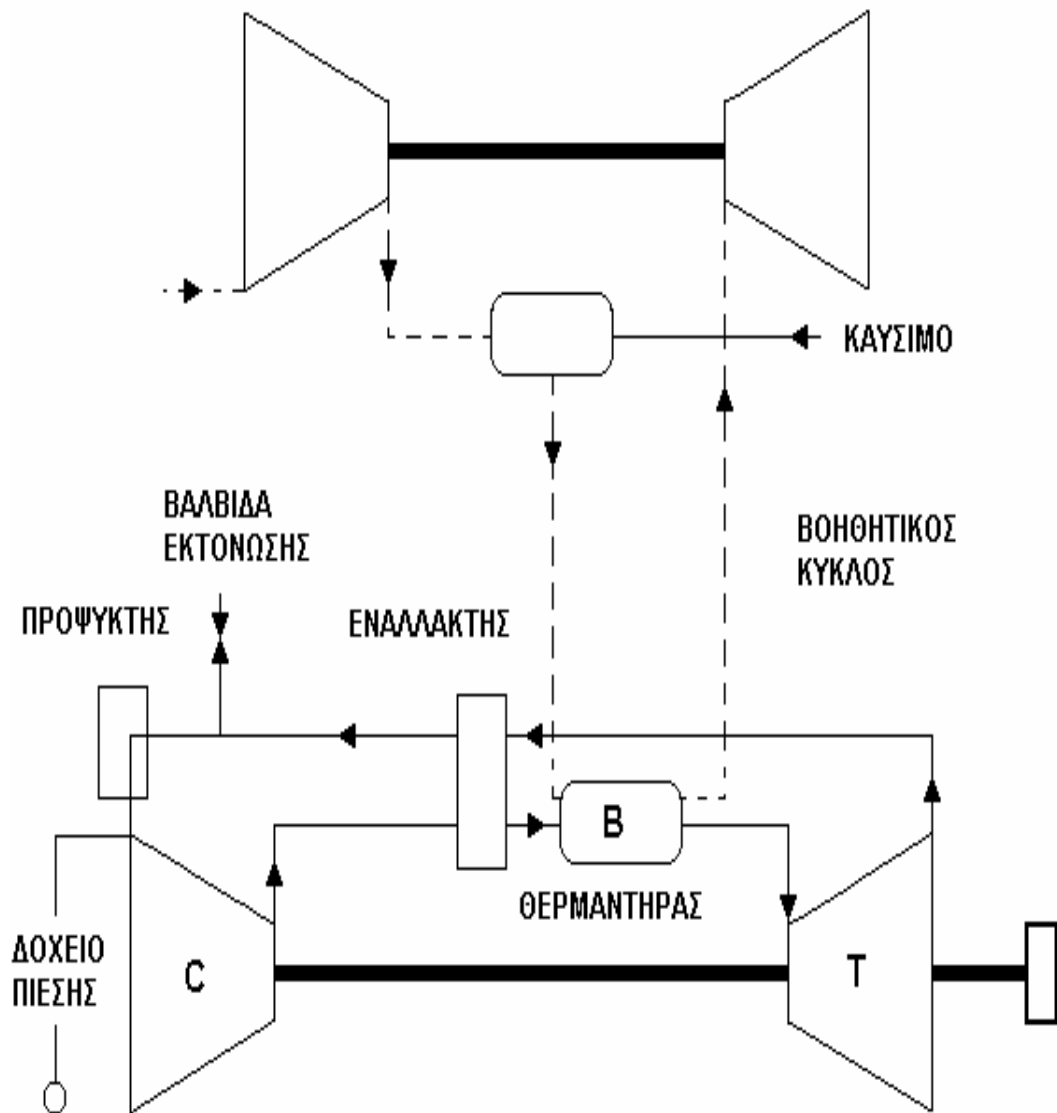
συμπιεστές, ιδιαίτερα σε μεγάλες μονάδες. Στην περίπτωση λειτουργίας των αξονικών συμπιεστών σε συνθήκες αρκετά μετατοπισμένες από το σημείο λειτουργίας του σχεδιασμού (design operating point), ο συμπιεστής εμφανίζει αστάθεια. Όταν λοιπόν ένας αξονικός συμπιεστής λειτουργεί σε ταχύτητα περιστροφής αρκετά κάτω από την τιμή σχεδιασμού, η πυκνότητα του αέρα στις τελευταίες βαθμίδες είναι τόσο πολύ χαμηλή και η αξονική ταχύτητα ροής γίνεται πολύ μεγάλη με αποτέλεσμα την απώλεια στήριξης των πτερυγίων. Η περιοχή αστάθειας είναι φανερή από τις ισχυρές ταλαντώσεις και πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη όταν ο αεριοστρόβιλος τίθεται σε λειτουργία ή λειτουργεί σε χαμηλά επίπεδα ισχύος. Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται ιδιαίτερα στην περίπτωση λόγων πιέσεων πάνω από 8-10:1 με χρήση ενός μόνο συμπιεστή. Η δυσκολία όμως αυτή αντιμετωπίζεται με το διαχωρισμό του συμπιεστή σε δύο ή περισσότερα τμήματα που λέγονται “τύμπανα”. Με αυτή τη διαίρεση, που λέγεται μηχανικός διαχωρισμός, μπορεί κάθε τύμπανο να στρέφεται σε διαφορετική ταχύτητα. Όταν οι συμπιεστές είναι μηχανικά ανεξάρτητοι, τότε κάθε ένας χρειάζεται το δικό του στρόβιλο, που θα τον κινεί. Ο συμπιεστής χαμηλής πίεσεως κινείται από το στρόβιλο χαμηλής πίεσεως και ο συμπιεστής υψηλής πίεσεως από το στρόβιλο υψηλής πίεσεως. Η ισχύς μπορεί να λαμβάνεται από το στρόβιλο χαμηλής ή υψηλής πίεσεως ή από ένα πρόσθετο ελεύθερο στρόβιλο ισχύος. Η διάταξη των δύο τυμπάνων χρησιμοποιείται ευρύτατα σε μονάδες ισχύος και σε κινητήρες αεροπλάνων. Μερικές φορές, ειδικά σε αεριοστρόβιλους με μικρή παροχή αέρα, ο συμπιεστής υψηλής πίεσεως είναι φυγοκεντρικός. Η εκλογή αυτή γίνεται επειδή οι υψηλές πιέσεις συνεπάγονται μικρή παροχή όγκου αέρα, με αποτέλεσμα η απαιτούμενη πτερύγωση για αξονικό συμπιεστή να είναι πάρα πολύ μικρή για καλή απόδοση. Με διατάξεις δύο τυμπάνων επιτυγχάνονται λόγοι πίεσεως ακόμη και πάνω από την τιμή 20:1. Ως εναλλακτική λύση της χρήσης τυμπάνων, υψηλοί λόγοι πίεσεως επιτυγχάνονται και με έναν απλό συμπιεστή αλλά με τη βοήθεια

πολλών βαθμίδων. Αυτή η προσπάθεια έγινε για πρώτη φορά από την General Electric Co. και πραγματοποιήθηκαν λόγοι πίεσεως 15:1. Οι κινητήρες υψηλής τεχνολογίας είναι συχνά μεταβλητής γεωμετρίας. Πρωτού ολοκληρωθεί το θέμα της σύζευξης αξίζει να αναφερθεί μια παλαιότερη πρόταση για μια διάταξη που ο συμπιεστής χαμηλής πίεσεως κινείται από τον στρόβιλο υψηλής πίεσεως και ο συμπιεστής υψηλής πίεσεως από το στρόβιλο χαμηλής πίεσεως. Το πλεονέκτημα από αυτή τη “σταυρωτή” διάταξη είναι η καλύτερη απόδοση σε μερικό φορτίο. Δυστυχώς το αποτέλεσμα στη σταθερότητα της λειτουργίας είναι το αντίθετο εκείνου της “ευθείας διατάξεως” με αποτέλεσμα το πρόβλημα να χειροτερεύει.

1.6 Κλειστός Κύκλος Λειτουργίας

Μεταξύ των πολλών προτερημάτων που συγκεντρώνει ο κλειστός κύκλος λειτουργίας, είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησης υψηλής πίεσεως μέσα στο κλειστό κύκλωμα που θα κατέληγε σε αεριοστρόβιλο μικρού μεγέθους και με τη δυνατότητα μεταβολής της αποδιδόμενης ισχύος με τη μεταβολή της πίεσεως στο κύκλωμα. Με τον τρόπο αυτό καλύπτεται ένα ευρύ πεδίο φορτίων χωρίς μεταβολή της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου και συνεπώς με μικρή μεταβολή της ολικής αποδόσεως. Το κύριο μειονέκτημα του κλειστού κύκλου είναι η ανάγκη υπάρξεως ενός εξωτερικού συστήματος θερμάνσεως. Το σύστημα αυτό προσφέρει την απαιτούμενη ενέργεια στο αέριο του αεριοστρόβιλου με τη βοήθεια ενός θερμαντήρα αερίου. Η επιτρεπτή θερμοκρασία λειτουργίας των επιφανειών του θερμαντήρα καθορίζει ένα ανώτατο όριο για τη μέγιστη θερμοκρασία του κύριου κύκλου. Ένα παράδειγμα

κλειστού κύκλου περιλαμβάνει έναν προψύκτη, που λειτουργεί με νερό, για το αέριο του κύριου κύκλου και είναι τοποθετημένος μεταξύ του εναλλακτή και του συμπιεστή. Σε αυτή τη διάταξη ο θερμαντήρας αποτελεί τμήμα του κύκλου του βοηθητικού αεριοστρόβιλου και η εξερχόμενη ισχύς ελέγχεται από μια βαλβίδα εκτόνωσης (blow-off valve) και από ένα βοηθητικό σύστημα συμπιεσμένου αερίου (ΣΧ.1.13). Επιπλέον των πλεονεκτημάτων του μικρότερου συμπιεστή και στροβίλου καθώς και του αποτελεσματικού ελέγχου, ο κλειστός κύκλος δεν αντιμετωπίζει προβλήματα διαβρώσεως των πτερυγίων του στροβίλου και άλλων αρνητικών επιπτώσεων που οφείλονται στα προϊόντα της καύσεως. Επίσης δε χρειάζεται φιλτράρισμα του εισερχόμενου αερίου ή αέρα στον κύριο κύκλο, πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στη λειτουργία των ανοικτών κύκλων. Η μεταφορά θερμότητας στον εναλλακτή βελτιώνεται λόγω της υψηλής πυκνότητας του αερίου. Η χρησιμοποίηση άλλων αερίων εκτός του αέρα, για το κλειστό κύκλωμα, παρέχει τη δυνατότητα εκμεταλλεύσεως αερίων με επιθυμητές θερμικές ιδιότητες. Έτσι η αντικατάσταση του αέρα, με λόγο ειδικών θερμοτήτων $\gamma=1.4$, από ένα μονοατομικό αέριο (π.χ. ήλιο), με $\gamma=1.66$ αυξάνει σημαντικά την εξερχόμενη ισχύ και τον βαθμό απόδοσης του κύκλου. Οι απώλειες πίεσεως λόγω τριβής είναι πολύ μικρότερες με το ήλιο, οι βέλτιστοι λόγοι πίεσεως του κύκλου είναι χαμηλότεροι και η μεταφορά θερμότητας καλύτερη με αποτέλεσμα το μέγεθος του εναλλάκτη και του προψύκτη να ελαττώνονται μέχρι το μισό από εκείνο στην περίπτωση του αέρα. Υπάρχουν σήμερα αεριοστρόβιλοι κλειστού κύκλου με ισχύ 2–20 MW που χρησιμοποιούν ως λειτουργούν αέριο τον αέρα και ως καύσιμο άνθρακα, φυσικά αέρια, αέρια από υψικαμίνους και πετρέλαιο. Οι πιέσεις εισόδου στο στρόβιλο είναι μεγαλύτερες από 40 at. Με την αντικατάσταση του αέρα από το ήλιο είναι δυνατή η παραγωγή ισχύος πάνω από 250 MW και συνεπώς η χρησιμοποίηση αυτού του τύπου των αεριοστρόβιλων σε συνδυασμό με πυρηνικές μονάδες.



ΣΧΗΜΑ 1.13 Παράδειγμα Κλειστού Κύκλου [1].

1.7 Εφαρμογή των Αεριοστρόβιλων στην πρόωση των αεροπλάνων

Τα είδη των αεριοστρόβιλων ή στροβιλοκινητήρων που εξετάστηκαν μέχρι τώρα αφορούσαν την εφαρμογή τους σε μονάδες ισχύος. Αναμφισβήτητα όμως η σημαντικότερη εφαρμογή των στροβιλοκινητήρων είναι στην πρόωση των

αεροπλάνων. Το 1930 ο F. Whittle σχεδίασε με επιτυχία τον πρώτο στροβιλοκινητήρα που αποτελείται από ένα φυγοκεντρικό συμπιεστή, ένα θάλαμο καύσης και ένα στρόβιλο. Ο λόγος συμπίεσης ήταν 4:1 και η ισχύς που απέδιδε ο κινητήρας 3000 HP. Από τότε οι στροβιλοκινητήρες αντικατέστησαν στα αεροπλάνα τους εμβολοφόρους κινητήρες επειδή παρουσίαζαν πολύ μεγάλο λόγο ισχύς/βάρος. Ο κύκλος λειτουργίας ενός στροβιλοκινητήρα απλής ροής (turbojet) είναι βασικά αυτός που φαίνεται στο Σχ.1.1 με τη διαφορά ότι ο στρόβιλος είναι σχεδιασμένος κατά τέτοιο τρόπο που κινεί μόνο το συμπιεστή. Τα καυσαέρια εκτονούνται δια μέσου ενός ακροφύσιου στην ατμοσφαιρική πίεση αναπτύσσουν την απαιτούμενη ώση για την πρόωση του αεροπλάνου. Σε ταχύτητες πτήσεως κάτω από 450 m.p.h. ο στροβιλοκινητήρας απλής ροής έχει μικρότερη απόδοση από το συνδυασμό εμβολοφόρου κινητήρα – έλικας, επειδή η προωθητική του απόδοση έχει άμεση σχέση με την ταχύτητα προώσεως. Αντίθετα η απόδοση της έλικας πέφτει πάνω από τα 350 m.p.h. λόγω της αεροδυναμικής απώλειας στήριξης των άκρων της πτέρυγας. Αυτά τα χαρακτηριστικά οδήγησαν στη χρησιμοποίηση μιας οικογένειας προωθητικών μηχανών. Η συνεχής εξέλιξη των στροβιλοκινητήρων οδήγησε στην κατασκευή των στροβιλοκινητήρων διπλής ροής (turbofan ή by pass). Αυτό το είδος δημιουργεί ροή μεγαλύτερων μαζών αέρα, με μικρότερη επιτάχυνση, αυξάνοντας έτσι το βαθμό απόδοσής τους σε σχέση με τους στροβιλοκινητήρες απλής ροής. Η χρησιμοποίηση εναλλάκτη στους στροβιλοκινητήρες είναι αντικοινομική λόγω του βάρους και του όγκου του, αν και είναι δυνατή η μελλοντική χρησιμοποίησή τους στους ελικοφόρους στροβιλοαντιδραστήρες (turboprop) ιδιαίτερα για την κίνηση ελικοπτέρων.

2.ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

2.1 Υπολογισμός Θερμοκρασιών, Λόγου Καυσίμου/Αέρα, Βαθμών Απόδοσης και Κατανάλωσης Καυσίμου

Ο υπολογισμός του λόγου καυσίμου /αέρα f είναι σημαντικός για την εύρεση της ειδικής κατανάλωσης του καυσίμου που καθορίζεται σαν παροχή μάζας του καυσίμου ανά μονάδα καθαρής παραγόμενης ισχύος και αυτό θα μας οδηγήσει στην απόδοση του πραγματικού κύκλου. Για τον λόγο καυσίμου /αέρα f , πρέπει να είναι γνωστή η θερμοκρασία T_C , μετά τον συμπιεστή ή τους εναλλάκτες θερμότητας, στην είσοδο του θαλάμου καύσης, και επίσης η θερμοκρασία T_{max} στην έξοδο του θαλάμου καύσης, η οποία είναι και η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου και προκαθορίζεται. Το ζητούμενο είναι να καθοριστεί η απαιτούμενη τιμή του f , για να μετατραπεί μια μονάδα μάζας αέρα που βρίσκεται σε θερμοκρασία T_C και f kg καυσίμου που βρίσκεται σε θερμοκρασία T_f σε μίγμα $(f+1)$ kg προϊόντων καύσης σε θερμοκρασία T_{max} Με θερμοκρασία αναφοράς T_0 και αν θεωρηθεί αδιαβατική καύση ο ισολογισμός ενέργειας στον θάλαμο καύσης μπορεί να γραφεί:

$$f H_u \eta_\beta = (1 + F) c_{pg} (T_{max} - T_0) - c_{pa} (T_c - T_0)$$

Και έτσι προκύπτει ο λόγος καυσίμου / αέρα :

$$f = \frac{C_{pg}(T_{max} - T_0) - C_{pa}(T_c - T_0)}{H_u \eta_\beta - c_{pg}(T_{max} - T_0)}$$

Όπου η_β : ο βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης.

H_u : η κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου.

Αν ο λόγος καυσίμου /αέρα f είναι γνωστός, η κατανάλωση καυσίμου

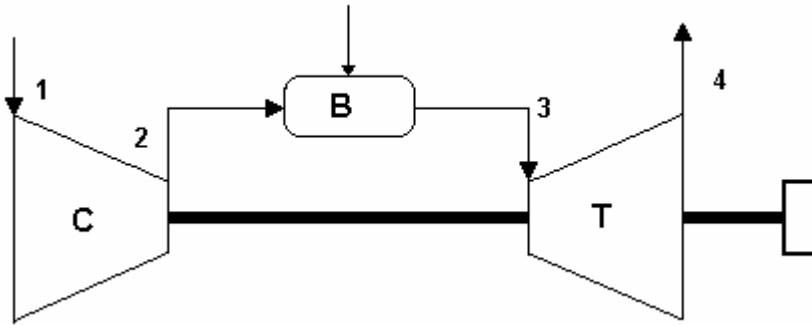
,δίνεται από το γινόμενο ($m_a * f$) όπου m_a είναι η παροχή μάζας του αέρα.

Ο βαθμός απόδοσης και η ειδική κατανάλωση καυσίμου βρίσκονται από τις σχέσεις:

$$\eta = \frac{W_N}{m_f H_u} \quad sfc = \frac{m_f}{W_N}$$

W_N : η καθαρή ισχύ του συστήματος

2.2 Κύκλος απλού αεριοστρόβιλου



1-2 Αδιαβατική συμπίεση

2-3 Ισοβαρής θέρμανση

3-4 Αδιαβατική εκτόνωση

Θερμοκρασίες εξόδου του συμπιεστή και του στροβίλου, αντίστοιχα:

$$T_2 = T_1 \left(1 + \frac{r_c^{k_a12} - 1}{\eta_c} \right) \quad (1)$$

$$T_4 = T_3 \left[1 - n_T \left(1 - r_T^{-k_{g34}} \right) \right] \quad (2)$$

Σταθερές ισεντροπικής μεταβολής :

$$k_{a12} = \frac{(\gamma_a)_{.12} - 1}{(\gamma_a)_{.12}} \quad (3)$$

$$k_{g34} = \frac{(\gamma_g)_{.34} - 1}{(\gamma_g)_{.34}} \quad (4)$$

Λόγος καυσίμου/αέρα

$$f_B = \frac{(C_{pg})_{.03} (T_3 - T_0) - (C_{pa})_{.02} (T_2 - T_0)}{H_u \eta_\beta - (C_{pg})_{.03} (T_3 - T_0)}$$

(5)

Η ισχύς στον άξονα του συμπιεστή και τον άξονα του στροβίλου αντίστοιχα είναι :

$$W_C = \frac{m_a (C_{pa})_{.12}}{\eta_{mc}} (T_2 - T_1) \quad (6)$$

$$W_T = (1 + f_B) m_a (C_{pg})_{.34} (T_3 - T_4) \eta_{mt} \quad (7)$$

Ανά μονάδα μάζας αέρα είναι :

$$W_c = (C_{pa}) \cdot 12 T_1 \frac{r_c^{ka12} - 1}{\eta_c} \quad (8)$$

$$W_{t=} (1 + f) \cdot \eta_T (C_{pg}) \cdot 34 T_3 (1 - r_T^{-Kg34}) \quad (9)$$

Η καθαρή ισχύς του συστήματος και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι, αντίστοιχα, (χρησιμοποιώντας τον μηχανικό βαθμό απόδοσης):

$$W_N = \eta_m [W_g (C_{pg}) \cdot 34 (T_3 - T_4) - W_a (C_{pa}) \cdot 12 (T_2 - T_1)] \quad (10)$$

$$\eta = \frac{W_N}{w_{f_B} H_u} \quad (11)$$

Ανά μονάδα μάζας αέρα είναι:

$$W_i = \eta_m \cdot (W_T - W_C) \quad (12)$$

$$\eta = \frac{W_i}{f_B H_u} \quad (13)$$

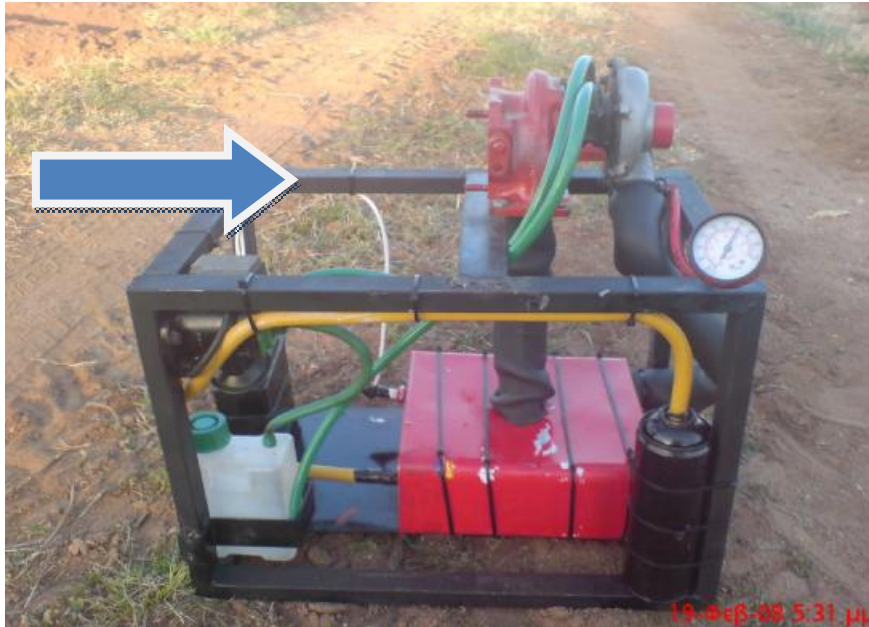
3 Κατασκευαστικό μέρος μοντέλου

Το μοντέλο είχε ως βάση κατασκευής του ένα κοινό στροβιλοσυμπιεστή αυτοκινήτου(TURBO). Έχει γίνει προσαρμογή του σε πλαίσιο, το οποίο είναι ικανό να φέρει και τα υπόλοιπα μέρη του μοντέλου για την θεωρητική λειτουργία του. Με την βοήθεια των εικόνων θα γίνει η περιγραφή όλων των μερών του μοντέλου τα οποία είναι τα εξής:

- i. Πλαίσιο
- ii. Στροβιλοσυμπιεστής
- iii. Θάλαμος καύσης
- iv. Σωληνώσεις συστήματος
- v. Κύκλωμα λίπανσης – δοχείο λιπαντικού
- vi. Ηλεκτρικό κύκλωμα – σύστημα έναυσης
- vii. Κύκλωμα καυσίμου – δοχείο καυσίμου
- viii. Όργανο πίεσεως εισερχόμενου αέρα

Με τα μπλε βέλη στις εικόνες θα επισημαίνονται τα επιμέρους τμήματα που αναλύουμε.

Πλαίσιο

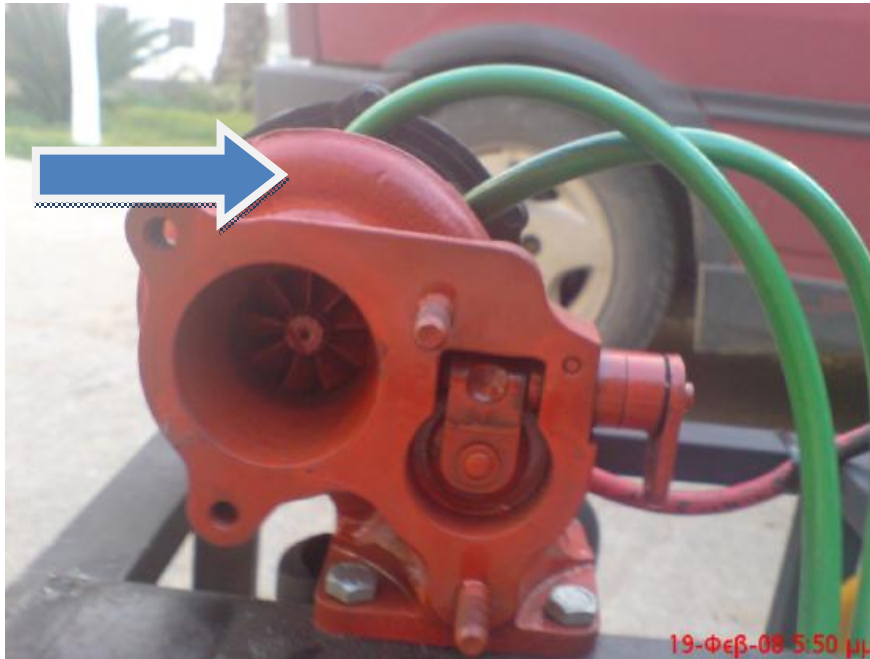


Είναι το δικτύωμα με μαύρο χρώμα

Στροβιλοσυμπιεστής



Ο συμπιεστής είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο. Διακρίνονται τα πτερύγια



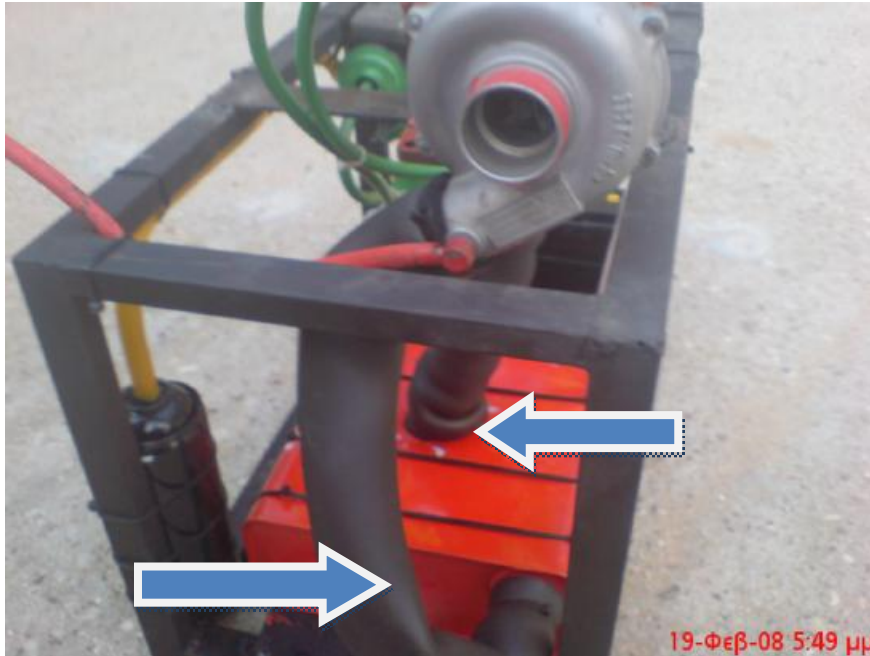
Με το κόκκινο χρώμα είναι ο στρόβιλος.

Θάλαμος καύσης



Είναι το κόκκινο δοχείο. Διακρίνεται από τα δεξιά του η εισαγωγή του συμπιεσμένου αέρα και από επάνω η εξαγωγή των καυσαερίων.

Σωληνώσεις συστήματος



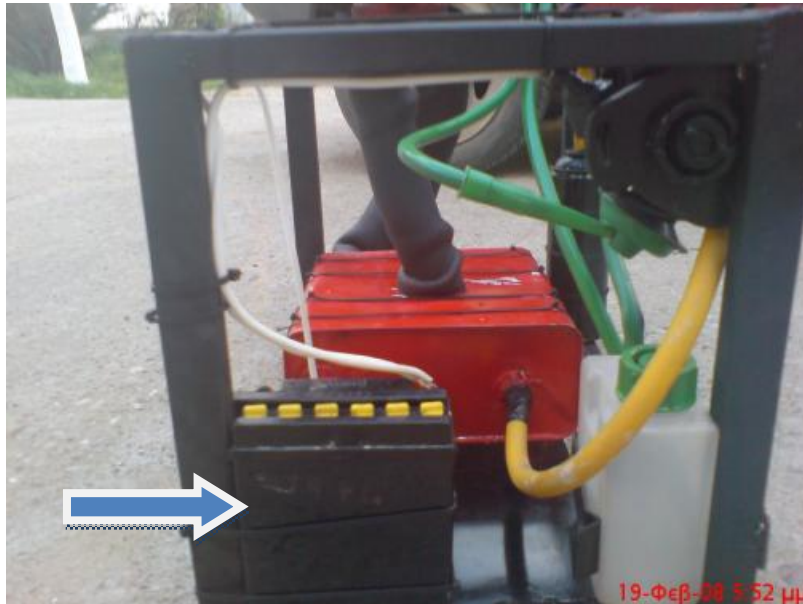
Οι μαύροι αγωγοί κατευθύνουν τον συμπιεσμένο αέρα στο θάλαμο καύσης και από εκεί τα καυσαέρια στον στρόβιλο.

Κύκλωμα λίπανσης – δοχείο λιπαντικού

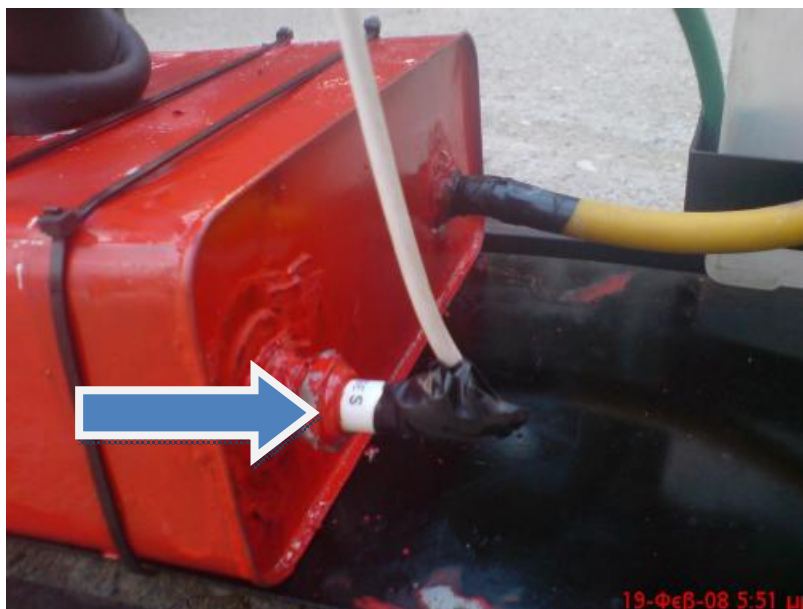


Η αντλία λαδιού και οι αγωγοί από και προς το στροβιλοσυμπιεστή

Ηλεκτρικό κύκλωμα – σύστημα έναυσης



Η μπαταρία που τροφοδοτεί την αντλία λαδιού και το μπουζί

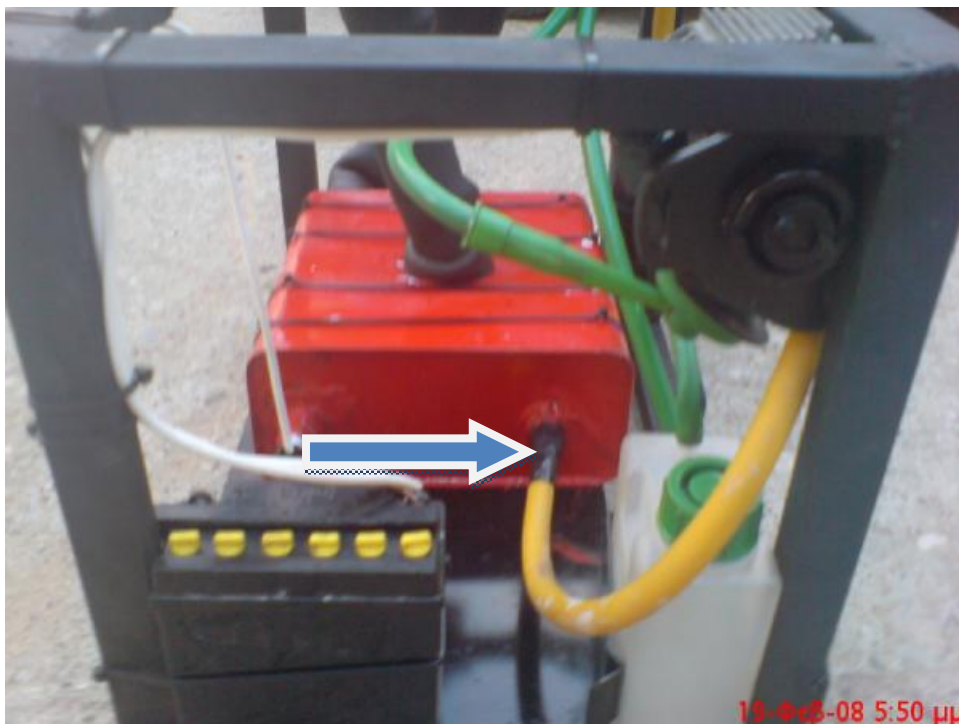


Το μπουζί προσαρμοσμένο στο θάλαμο καύσης

Κύκλωμα τροφοδοσίας – δοχείο καυσίμου

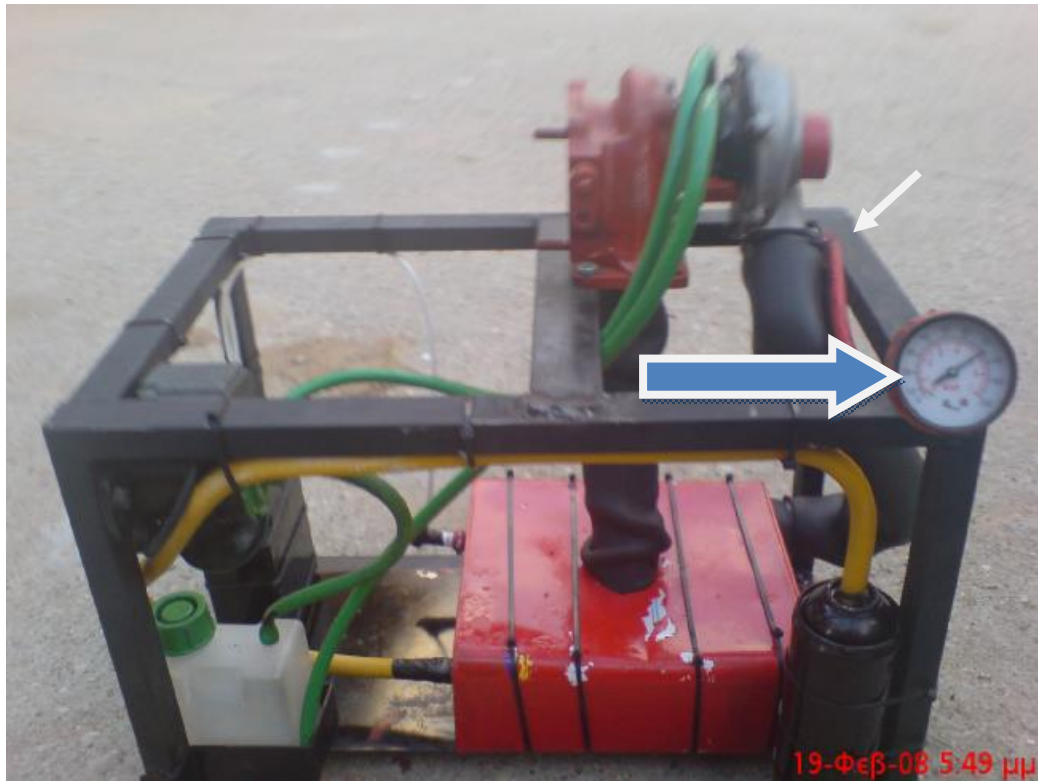


Το μαύρο δοχείο καυσίμου συνδέεται με τον κίτρινο αγωγό στο μπέκ ψεκασμού στο θάλαμο καύσης



Το μπέκ ψεκασμού καυσίμου

Όργανο πίεσεως εισερχόμενου αέρα



Το όργανο μετρά σε bar την πίεση του εισερχόμενου αέρα στον συμπιεστή.
Μετρώντας την διατομή μπορούμε να υπολογιστεί η παροχή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Saravanamuttoo, Rogers and Cohen “Gas Turbine Theory” 5TH ed.
2. Φραγκόπουλος, Χ. Α. (2002) «Προηγμένα Ναυτικά και Θαλάσσια Ενεργειακά Συστήματα» Δ.Π.Μ.Σ «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη» Ε.Μ.Π.
3. Φραγκόπουλος, Χ. Α. (2005) «Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου Τεύχος Β'» Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.
4. Γεωργίου, Δ. Π. (2003-2004) «Εισαγωγή στους Θερμοκινητήρες» Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών.
5. Παπαγεωργίου, Τσίτουρας, Φαμέλης (2003-2004) «Εισαγωγή και Εφαρμογές στο Mathematica & Matlab».
6. . McBride, Zehe, and Gordon (2002) “NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species”.
7. Καούρης, Ι. (2002) «Ψύξη-κλιματισμός» Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών.
8. Zhou,Jefferson “The Perfomance of Marine Propulsion Gas Turbines under Variable Atmospheric Conditions” 22nd CIMAC 1998.
9. Korakianitis “Marine gas turbines: cycle-parameter choices and shaft arrangement effects on performance.
10. Τσιρίκογλου, Θ. Ι. «Εφαρμογές Ρευστοδυναμικών Μηχανών και Θερμοδυναμικής» Τμήμα Μηχανολογίας Τ.Ε.Ι Λάρισας.