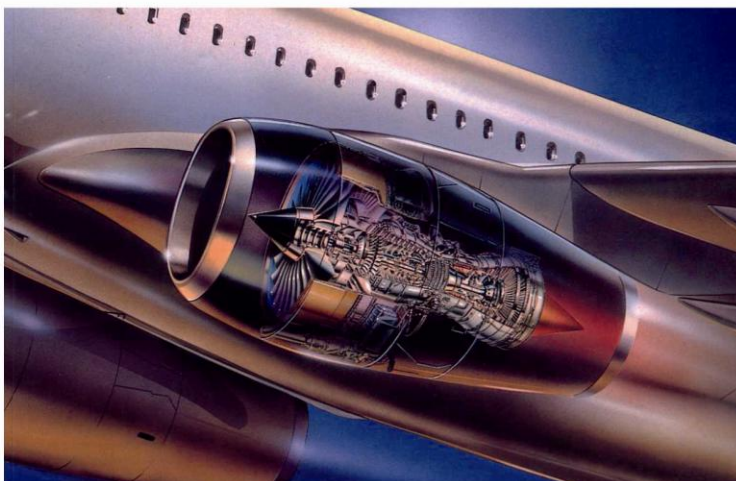




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ
ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
ΤΥΠΟΥ JET



ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΚΑΡΑΒΑΝΑΣ
ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΣΤΕΡΓΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

*Στον υιό μου
Αλέξανδρο*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς του βιβλίου αισθάνονται την υποχρέωση να ευχαριστήσουν θερμά όλους όσοι βοήθησαν και συμπαραστάθηκαν κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Αρχικά θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον επιβλέποντα Αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Αντωνιάδη Αριστομένη, για την εμπιστοσύνη που τους επέδειξε με την ανάθεση της εργασίας, καθώς και για την εν συνεχεία αμέριστη συμπαραστάσή του σε θέματα διοικητικής μέριμνας.

Επίσης ιδιαίτερως μεγάλη ήταν και η συμβολή του τεχνικού προσωπικού του Συνεργείου Κινητήρων της 120ης Πτέρυγας Εκπαίδευσης Αέρος όσον αφορά στην προετοιμασία, στην εκτέλεση εργασιών συντήρησης και τέλος στην κατάλληλη συσκευασία προς μεταφορά του αεροκινητήρα από την Καλαμάτα στα Χανιά.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί η σημαντικότερη βοήθεια την οποία παρείχε το Γενικό Επιτελείο Αεροπορίας όσον αφορά στην έγκριση παραχώρησης του κινητήρα J-69 T-25 στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
2. ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ	
2.1 Ιστορική εξέλιξη κινητήρων αεροσκαφών	6
2.2 Βασικές αρχές αεροστροβίλου (gas turbine engine)	10
2.3 Οι τύποι των αεροστροβίλων	13
2.4 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα αεροστροβίλων	18
2.5 Χαρακτηριστικά αεροσκάφους T-37 κινητήρα J-69 T25	20
3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	
3.1 Αποσυναρμολόγηση του κινητήρα στα επιμέρους τμήματα	22
3.2 Δημιουργία τομών των κυριότερων τμημάτων του κινητήρα	25
3.3 Καθαρισμός και Βαφή όλων των εξαρτημάτων του κινητήρα καθώς και της κλίνης συντήρησης	27
3.4 Συναρμολόγηση του κινητήρα	30
4. ΣΥΝΟΨΗ	31
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	32

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε προσέγγιση των κινητήρων αεροσκαφών τόσο θεωρητικά αναφέροντας τις αρχές οι οποίες διέπουν τη λειτουργία των επικρατέστερων κινητήρων των σύγχρονων αεροσκαφών όσο και πρακτικά με την τροποποίηση ενός κινητήρα τύπου J-69 T25 προκειμένου να αποτελέσει μαθησιακό εργαλείο επίδειξης του τρόπου λειτουργίας των κινητήρων τύπου turbojet στους φοιτητές του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Στα πλαίσια των ανωτέρω και προς ικανοποίηση των επιδιωκόμενων σκοπών, αρχικά έγινε ιστορική αναδρομή των κινητήρων των αεροσκαφών καθώς και των βασικών αρχών λειτουργίας των αεροστροβίλων βάσει των οποίων αναφέρθηκαν και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους έναντι των άλλων τύπων κινητήρων αεροσκαφών, ενώ τέλος αναφερθήκαν και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα J-69 T25 ο οποίος αποτελεί μέρος της ανωτέρω τεχνολογίας.

Στο κατασκευαστικό στάδιο της παρούσης, πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες εργασίες με χρονική σειρά:

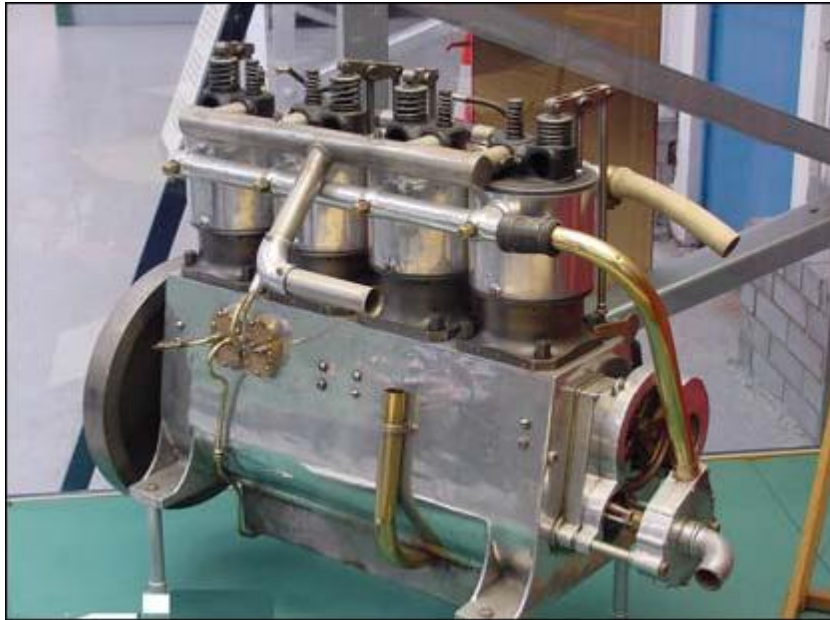
- Αποσυναρμολόγηση του κινητήρα στα επιμέρους τμήματά του
- Καθαρισμός των ανωτέρω εξαρτημάτων
- Βάψιμο όλων των επιφανειών
- Συναρμολόγηση του κινητήρα
- Καθαρισμός και βάψιμο της κλίνης συντήρησης του κινητήρα

2. ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

2.1 Ιστορική εξέλιξη κινητήρων αεροσκαφών

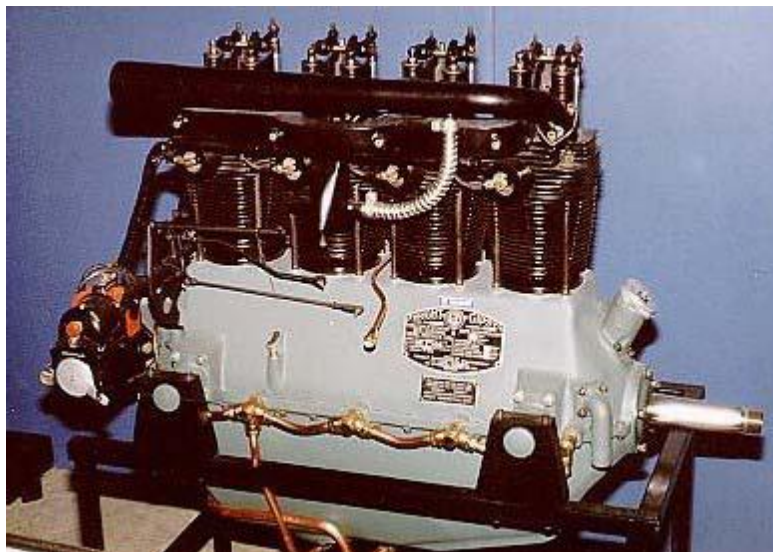
Από την αρχαιότητα ο άνθρωπος «ονειρεύτηκε» την πτήση του στον ουρανό όπως τα πουλιά. Παροιμιώδεις είναι οι αναφορές στην πτήση του Ικάρου και του Δαιδάλου. Οι πρώτες προσπάθειες βέβαια είχαν πλήρη αποτυχία. Ο λόγος για τον οποίο δεν κατέστη δυνατόν το επιθυμητό αποτέλεσμα, δεν ήταν απόρροια της έλλειψης εφαρμογής κατάλληλου αεροδυναμικού σχεδιασμού, όσο η έλλειψη τεχνογνωσίας όσον αφορά στην παραγωγή της απαραίτητης ισχύος που θα επέτρεπε την πραγματοποίηση μιας πτήσης.

- Το έτος 1483, ο **Leonardo daVinci** σχεδίασε μία «ιπτάμενη μηχανή», η οποία βέβαια δεν είχε καμία τύχη να πετάξει χωρίς την υποστήριξη της κατάλληλης μηχανικής ισχύος.
- Το 1678 ο Γάλλος **Abbe Hautefeuille** πρώτος ανέπτυξε τη βασική ιδέα της χρήσης μίας ύλης που εκρήγνυται ώστε να κινεί ένα έμβολο για την παραγωγή έργου. Χρειάστηκε όμως να περάσουν και οι πρώτες δεκαετίες του 19^{ου} αιώνα προκειμένου να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί εμβολοφόρος κινητήρας εσωτερικής καύσης, ένας εκ των οποίων περιγράφεται από τον **Reverend W. Cecil**, το 1820 στην Αγγλία. Ο εν λόγω κινητήρας χρησιμοποιούσε ως καύσιμο μείγμα υδρογόνου και αέρα.
- Το 1838 ο Άγγλος εφευρέτης **William Barnett** παρουσίασε έναν κινητήρα μονού κυλίνδρου, μέσα στον οποίο καιγόταν αέριο καύσιμο. Στην πράξη, ο πρώτος εμβολοφόρος κινητήρας εσωτερικής καύσης κατασκευάστηκε το 1860 από το Γάλλο εφευρέτη Jean Joseph Etienne Lenoir. Η έναυση πραγματοποιούνταν από μπαταρία ενώ ως καύσιμο χρησιμοποιούσε φωταέριο. Μέσα σε λίγα χρόνια κατασκευάστηκαν περίπου 400 τέτοιοι κινητήρες οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την κίνηση μηχανημάτων όπως τórνοι και εκτυπωτικά συστήματα.
- Το 1862, ο Γάλλος **Beau de Rocas** έθεσε τους βασικούς όρους που πρέπει να πληρούνται ώστε ένας εμβολοφόρος κινητήρας να λειτουργεί με μέγιστη απόδοση.
- Το 1876 οι Γερμανοί **August Otto** και **Eugen Langen** κατασκεύασαν τον πρώτο τετράχρονο κινητήρα. Για το λόγο αυτό ο κύκλος λειτουργίας του τετράχρονου κινητήρα εσωτερικής καύσης ονομάζεται κύκλος Otto. Οι Otto και Langen ήταν αυτοί που ανέπτυξαν και το δίχρονο κινητήρα εσωτερικής καύσης, βασισμένοι σε ιδέες των Άγγλων Barnett και Clerk (1878).
- Στις ΗΠΑ, το 1876, ο μηχανικός **George B. Brayton** κατασκεύασε έναν κινητήρα που χρησιμοποιούσε ως καύσιμο τη βενζίνη. Όμως, ο πρώτος βενζινοκινητήρας που λειτουργούσε σύμφωνα με τον κύκλο των τεσσάρων χρόνων αναπτύχθηκε από τους Γερμανούς **Gottlieb Daimler** και **Karl Benz** ξεχωριστά, το 1885. Ο τύπος κινητήρα αυτός έδωσε κίνηση στα πρώτα αυτοκίνητα, ενώ οι κινητήρες των σύγχρονων αυτοκινήτων έχουν διατηρήσει αρκετά χαρακτηριστικά του σε βασικά λειτουργικά τους σημεία.
- Το 1892, ο Γερμανός **Rudolph Diesel** πρότεινε έναν κινητήρα στον οποίο πραγματοποιούνταν αυτανάφλεξη του μείγματος αέρα – καυσίμου και αποτελεί τον πρόπομπό των σύγχρονων πετρελαιοκινητήρων.



Σχήμα 2.1. Κινητήρας Αδελφών Wright

Δεδομένου όμως του γεγονότος ότι, η πρώτη επιτυχής πτήση αεροσκάφους πραγματοποιήθηκε από τους αδελφούς **Wright** στις 17 Δεκεμβρίου 1903 εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο πρώτος «επιτυχημένος» κινητήρας αεροσκάφους ήταν αυτός που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την πτήση. Ο κινητήρας αυτός σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τους αδελφούς Wright και το συνεργάτη τους, μηχανικό Charles Taylor. Χρησιμοποιούσε βενζίνη ως καύσιμο, ήταν υγρόψυκτος, είχε τέσσερις κυλίνδρους, βάρος 82 κιλών και ιπποδύναμη 12 ίππων. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται μία φωτογραφία του κινητήρα των αδελφών Wright ενώ στο Σχήμα 2.2 φαίνεται μία μεταγενέστερη εξέλιξη του (Wright «Gipsy» L-320).



Σχήμα 2.2. Κινητήρας Wright «Gipsy» L-320

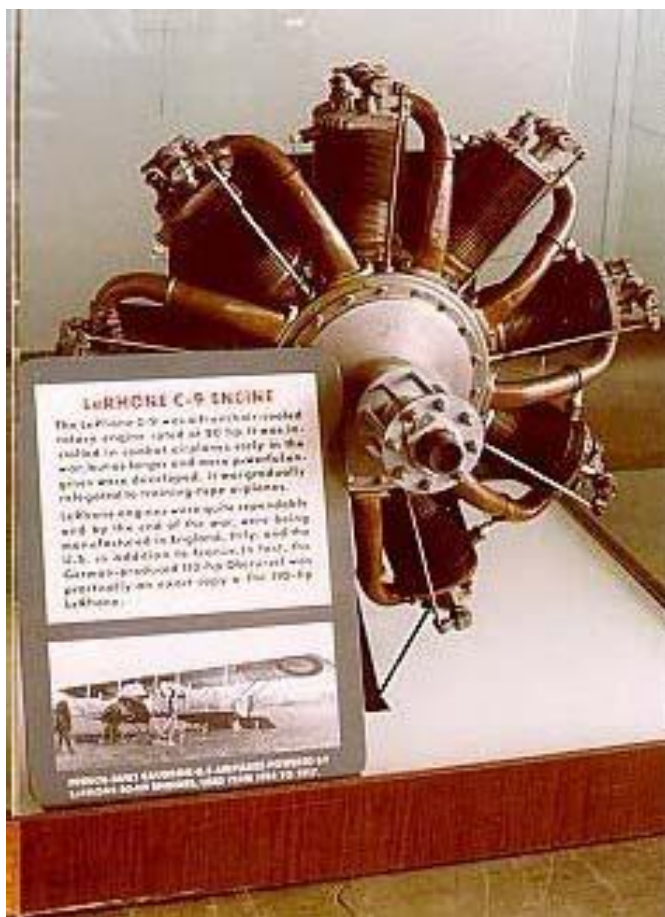
Κατά τη διάρκεια του 1ου Παγκοσμίου Πολέμου, σημειώθηκε πολύ μεγάλη πρόοδος στην ανάπτυξη και τη χρήση των αεροσκαφών, και ως εκ τούτου παρουσιάστηκε εντυπωσιακή

εξέλιξη των κινητήρων τους. Κατά συνέπεια αναπτύχθηκαν νέοι τύποι εμβολοφόρων κινητήρων δίνοντας ώση - κίνηση σε αεροσκάφη πρωτοπόρα για την εποχή τους.

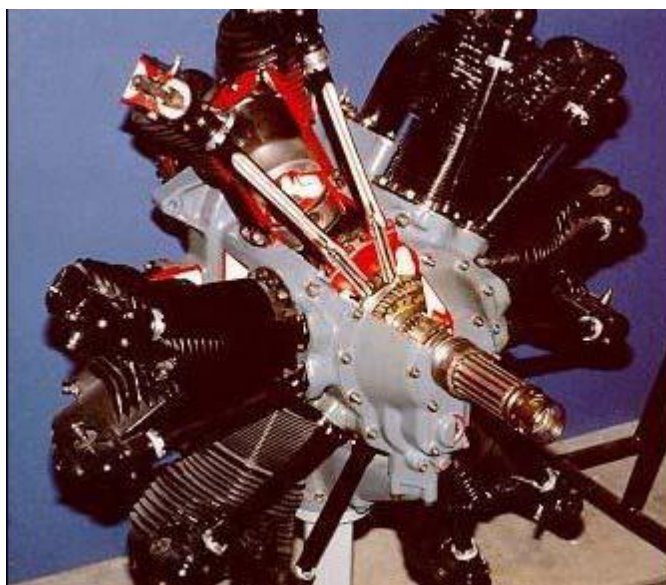
Τρεις τύποι κινητήρων, οι οποίοι αναπτύχθηκαν την περίοδο εκείνη, έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην περαιτέρω διάδοση των εμβολοφόρων κινητήρων:

- ο ακτινικός κινητήρας
- ο κινητήρας εν σειρά και
- ο κινητήρας τύπου V.

Ο ακτινικός κινητήρας παράγει τη μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με το βάρος του. Οι κύλινδροί του βρίσκονται τοποθετημένοι ακτινικά γύρω από ένα μικρό στροφαλοθάλαμο. Χαρακτηριστικά δείγματα του τύπου αυτού αποτελούν οι κινητήρες που φαίνονται στο [Σχήμα 2.3](#) και [2.4](#).



Σχήμα 2.3. Κινητήρας LeRhône-C9

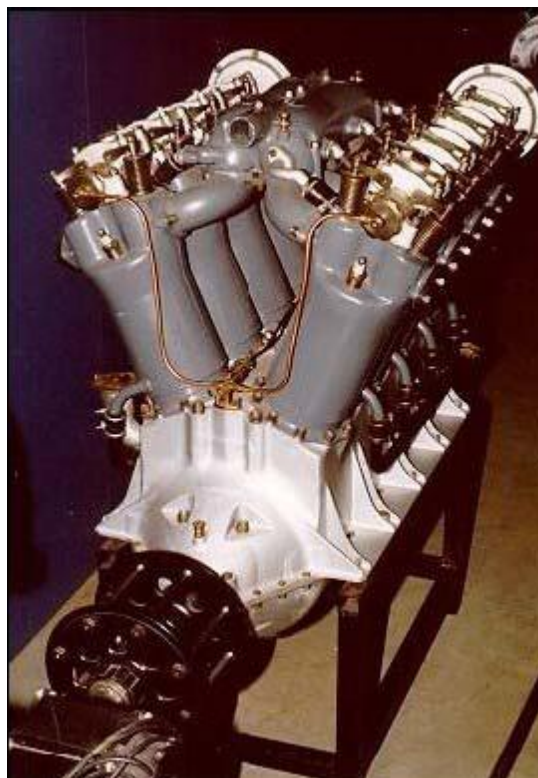


Σχήμα 2.4. Κινητήρας Curtiss R-600

Ο κινητήρας εν σειρά (Σχήμα 2.5.α) έχει όλους τους κυλίνδρους του παραταγμένους σε σειρά και παρουσιάζει πολύ μεγάλη αξιοπιστία. Όμως εμφανίζει το μειονέκτημα του αυξημένου βάρους λόγω του μεγάλου στροφαλοφόρου άξονά του.



(α)



(β)

Σχήμα 2.5. (α) Κινητήρας εν σειρά (Benz BZ-4), (β) Κινητήρας τύπου V (Liberty L-8)

Τέλος, ο κινητήρας τύπου V χρησιμοποιεί ένα μικρότερο στροφαλοφόρο άξονα αποτελώντας ένα συμβιβασμό μεταξύ ελαφριάς κατασκευής και ικανοποιητικής απόδοσης. Στο τέλος του 1ου παγκοσμίου πολέμου καθιερώθηκε η χρήση κινητήρων τύπου V και κυριότερα των Curtiss K-12, Hispano – Suiza και Liberty L-8 (Σχήμα 2.5.β).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1920, στην Αμερική, αναπτύχθηκε μία σειρά από ακτινικούς αεροπορικούς κινητήρες με μεγάλη αξιοπιστία στη λειτουργία τους. Ήταν τότε που πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες υπερατλαντικές πτήσεις οι οποίες καθιέρωσαν το αεροπλάνο ως πρακτικό μέσο μεταφοράς.

Το 1927, το αεροπλάνο «Spirit of Saint Louis» πραγματοποίησε την πρώτη υπερατλαντική πτήση έχοντας τον κινητήρα της Σχήμα 2.6.

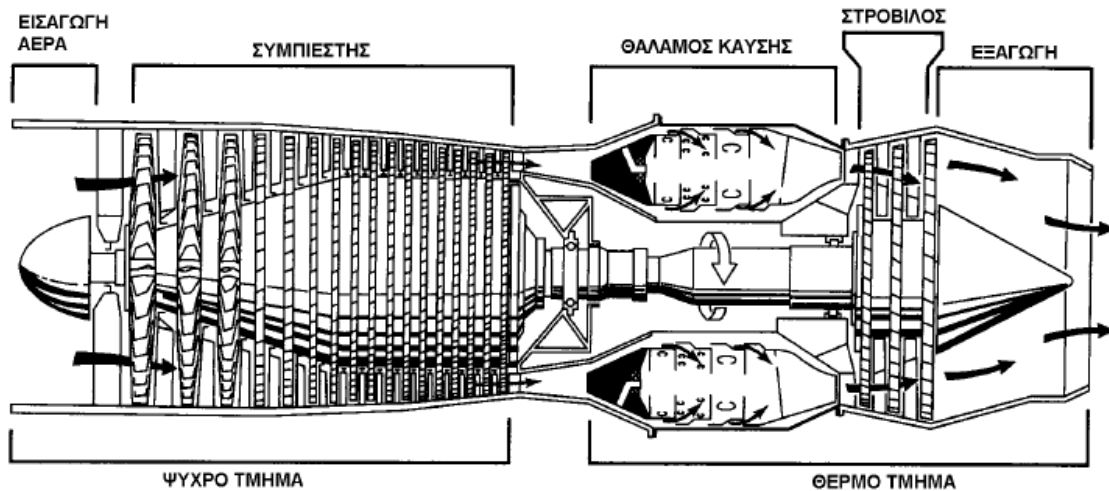


Σχήμα 2.6 Κινητήρας Wright R-790

Η εν συνεχεία ραγδαία ανάπτυξη και εξάπλωση των αεροστροβίλων κατά τη δεκαετία του 1950 περιόρισε τη χρήση των εμβολοφόρων κινητήρων στις αεροπορικές εφαρμογές. Σήμερα, οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται σε μικρά αεροσκάφη χωρίς, βέβαια, να έχουν εκλείψει οι μεγάλοι εμβολοφόροι κινητήρες που κινούν με μεγάλη αξιοπιστία παλαιότερα αεροσκάφη τα οποία βρίσκονται σε κανονική λειτουργία.

2.2 Βασικές αρχές αεροστροβίλου (gas turbine engine)

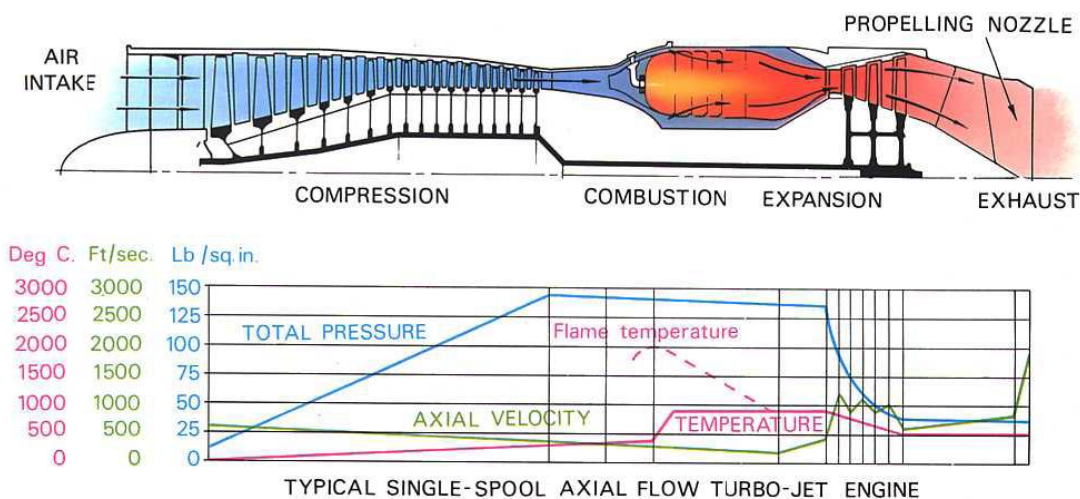
Ο αεροστρόβιλος θεωρείται ως ο πιο αποτελεσματικός κινητήρας αερίωθησης που βρίσκεται σε χρήση στην εποχή μας. Βρίσκει ευρεία χρήση σε όλους τους τύπους αεροσκαφών όπως σε επιβατικά, εμπορικά και στρατιωτικά. Τα βασικά του μέρη είναι ο **συμπιεστής**, ο **θάλαμος κάυσης**, ο **στρόβιλος** και το **ακροφύσιο εξαγωγής**, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7. Τα βασικά μέρη του αεροστρόβιλου

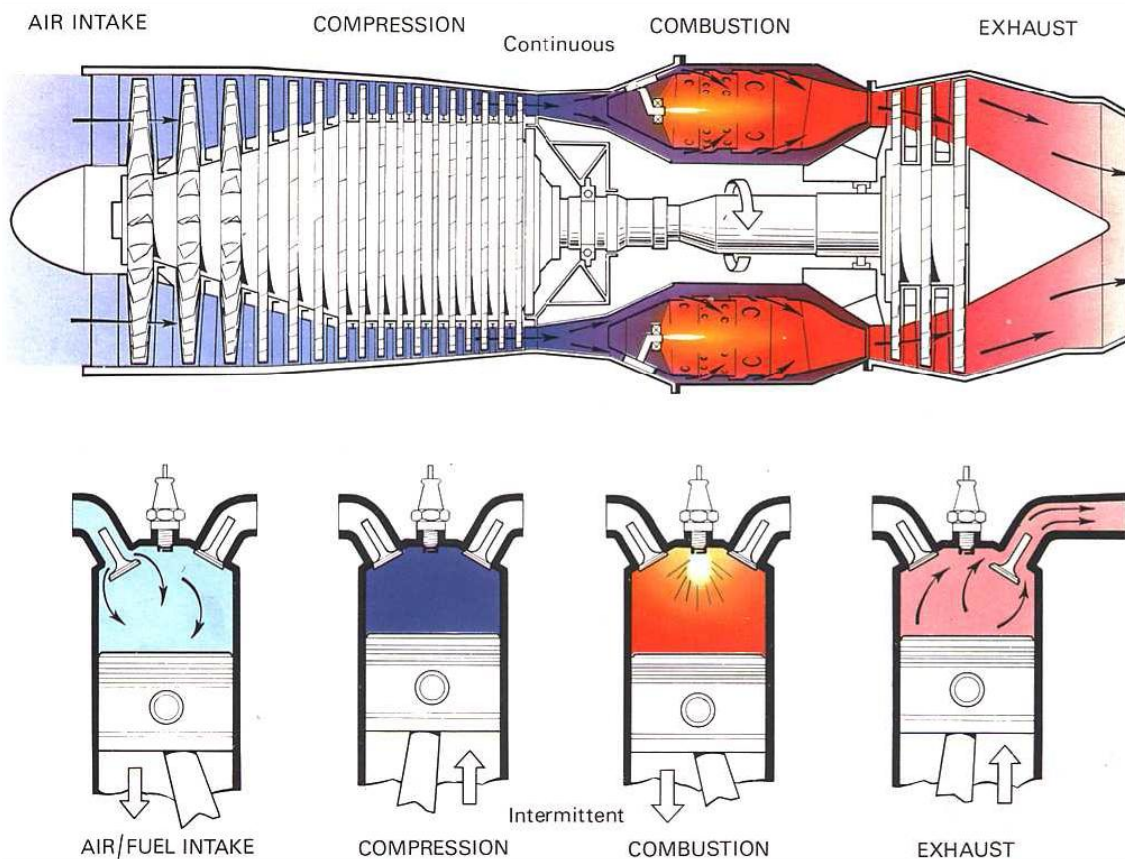
Επίσης έχει επικρατήσει ο διαχωρισμός ενός κινητήρα σε δύο τμήματα το ψυχρό και το θερμό. Ως ψυχρό τμήμα ενός κινητήρα θεωρείται ο συμπιεστής ενώ ως θερμό τμήμα ενός κινητήρα ο θάλαμος καύσης με το στρόβιλο.

Μία μάζα αέρα οδηγείται από το αεραγωγό εισαγωγής στο συμπιεστή. Εκεί συμπιέζεται και οδηγείται στο θάλαμο καύσης. Στη συνέχεια αναμιγνύεται με κατάλληλη ποσότητα καυσίμου στο θάλαμο καύσης και με την κατάλληλη έναυση μέσω σπινθηριστών επιτυγχάνεται καύση. Τα παραγόμενα θερμά καυσαέρια εκτονώνονται και κατά συνέπεια αυξάνεται η κινητική τους ενέργεια και οδηγούνται προς την εξαγωγή. Στη διαδρομή αυτήν προκαλούν την περιστροφή του στρόβιλου ο οποίος συνδέεται με το συμπιεστή με κοινό άξονα. Στη συνέχεια, τα καυσαέρια συνεχίζουν την εκτόνωσή τους και περνώντας από το ακροφύσιο εξόδου, εξέρχονται από τον κινητήρα έχοντας πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτήν της εισερχόμενης μάζας αέρα (Σχήμα 2.8). Η διαφορά αυτή μεταξύ των δύο ταχυτήτων προκαλεί την παραγόμενη ώση.



Σχήμα 2.8. Παράμετροι λειτουργίας αεροστρόβιλου

Ο αεροστρόβιλος κινητήρας παρουσιάζει λειτουργικές ομοιότητες με τον εμβολοφόρο. Οι φάσεις λειτουργίας είναι οι ίδιες: εισαγωγή, συμπίεση, καύση, εκτόνωση - εξαγωγή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9.

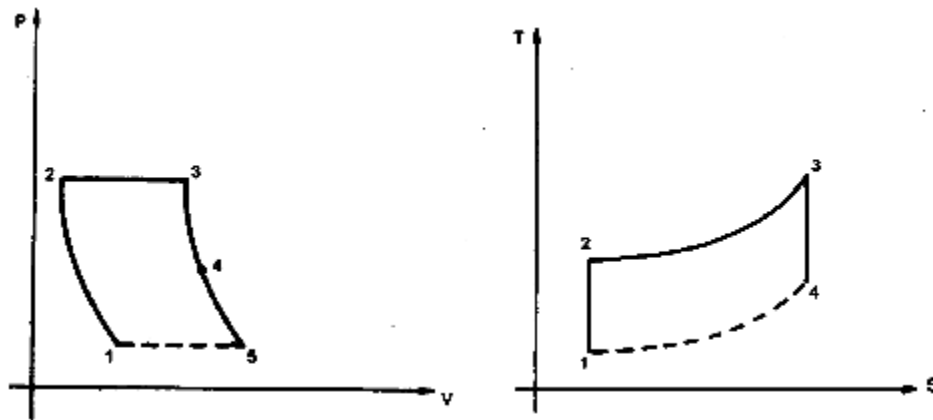


Σχήμα 2.9 Σύγκριση φάσεων λειτουργίας αεροστρόβιλου και εμβολοφόρου κινητήρα

Ο κύκλος λειτουργίας του αεροστρόβιλου κινητήρα στηρίζεται στο **θερμοδυναμικό κύκλο του Μπράιτον (Brayton)** όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Η ανάλυση των διεργασιών του κύκλου στηρίζεται στον 1ο και 2ο νόμο της θερμοδυναμικής.

Οι υποθέσεις πάνω στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία του ιδανικού κύκλου είναι οι εξής:

- Οι διαδικασίες συμπίεσης και εκτόνωσης είναι αντιστρεπτές και αδιαβατικές, δηλαδή ισεντροπικές.
- Η μεταβολή της κινητικής ενέργειας του εργαζόμενου μέσου μεταξύ εισόδου και εξόδου από κάθε συνιστώσα του κύκλου είναι αμελητέα.
- Σε κανένα σημείο του κύκλου δεν εμφανίζονται απώλειες πίεσης.
- Το εργαζόμενο μέσο είναι ιδανικό αέριο και διατηρεί την ίδια σύσταση εντός του κύκλου.
- Δεν υπάρχουν ενεργειακές απώλειες λόγω τριβών στα μηχανικά μέρη του συγκροτήματος.



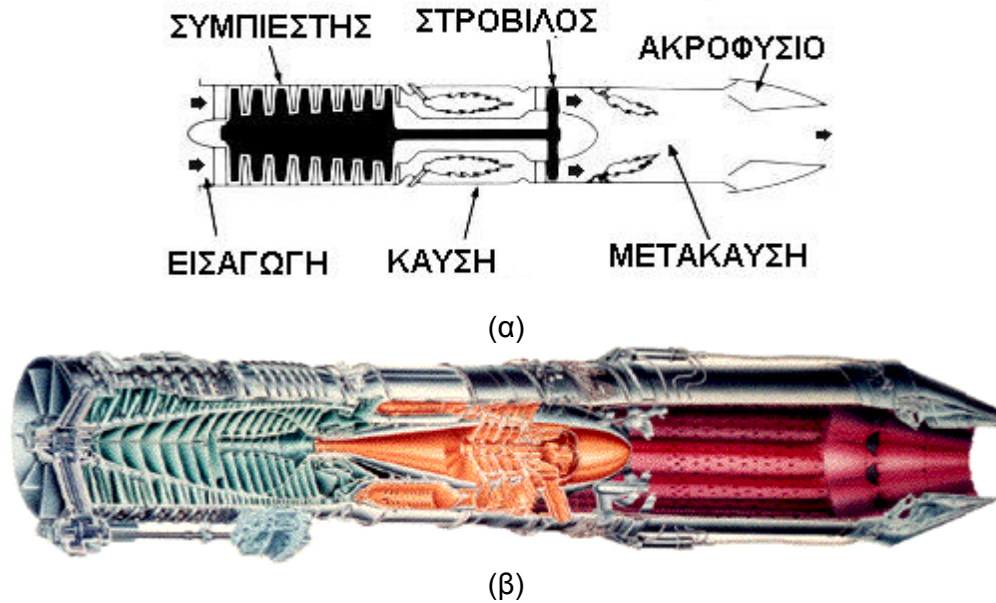
Σχήμα 2.10. Το διάγραμμα του κύκλου Μπράιτον σε συντεταγμένες $p-v$ και $T-s$

- 1-2** *Αδιαβατική συμπίεση.* Ο αέρας εισάγεται μέσω της εισαγωγής στον κινητήρα. Αναρροφάται από το συμπιεστή, ο οποίος αυξάνει τη στατική του πίεση. Παράλληλα, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας και πτώση του όγκου του.
- 2-3** *Ισοβαρής καύση.* Η μεταβολή αυτή παριστάνει τις αλλαγές που πραγματοποιούνται κατά την καύση του μείγματος αέρα – καυσίμου στο θάλαμο καύσης υπό σταθερή πίεση. Η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μείωση της πυκνότητας με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας των καυσαερίων, καθώς η διατομή του κινητήρα σε αυτό το σημείο δεν παρουσιάζει ουσιαστική μεταβολή.
- 3-4** *Αδιαβατική εκτόνωση.* Τα καυσαέρια εξέρχονται από το θάλαμο καύσης. Περνούν από τα περύγια του στροβίλου. Η στατική πίεση και η θερμοκρασία τους μειώνεται ενώ ο όγκος τους συνεχίζει να αυξάνεται. Ο στρόβιλος περιστρέφεται και παρέχει κίνηση στο συμπιεστή, μέσω του κοινού τους άξονα. Έτσι, μέρος της ισχύος των καυσαερίων διατίθεται για τη διεργασία της συμπίεσης.
- 4-5** *Αδιαβατική εκτόνωση.* Στη συνέχεια, μετά το στρόβιλο, παρουσιάζεται μικρή αντίσταση στη ροή των καυσαερίων. Αυτά εκτονώνονται στο ακροφύσιο εξαγωγής, όπου παρατηρείται μεγάλη αύξηση της ταχύτητάς τους με παράλληλη μείωση της πίεσης και της θερμοκρασίας τους.
- 5-1** *Ισοβαρής αποβολή θερμότητας.* Η αποβολή της θερμότητας των καυσαερίων πραγματοποιείται στην ατμόσφαιρα.

2.3 Οι τύποι των αεροστροβίλων

Ο αεροστρόβιλος κινητήρας διακρίνεται σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους. Όλοι αποτελούνται από τα βασικά μέρη που είδαμε παραπάνω. Οι διαφορές τους βρίσκονται στον τύπο και τη διάταξη των βασικών αυτών μερών.

Στροβιλοκινητήρας (turbojet engine)

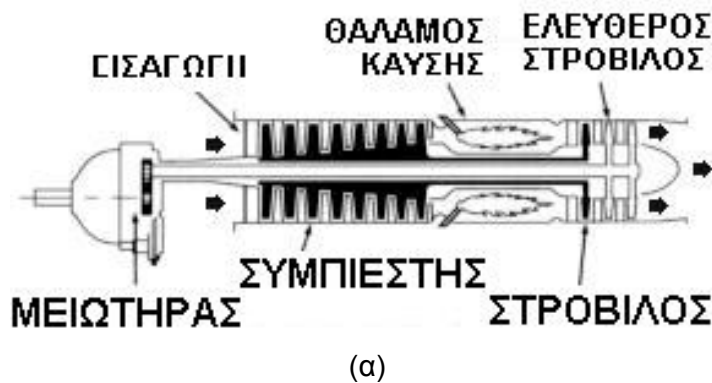


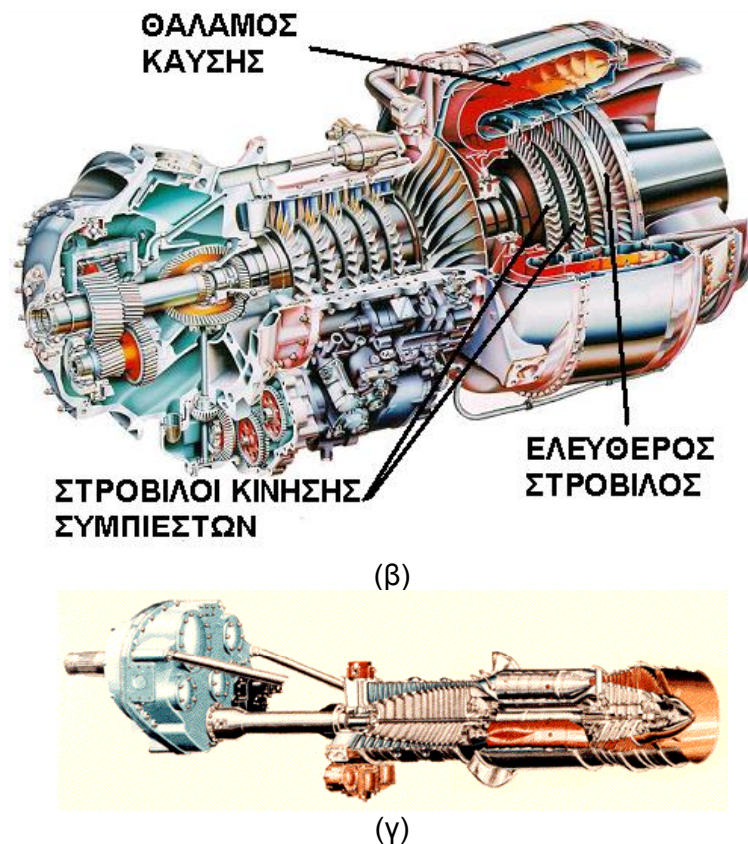
Σχήμα 2.11 (α) Τα βασικά μέρη ενός στροβιλοκινητήρα
(β) Ο στροβιλοκινητήρας GE J79

Ο στροβιλοκινητήρας (Σχήμα 2.11) αποτελεί την απλούστερη μορφή αεροστρόβιλου κινητήρα. Χρησιμοποιεί τη ροή των καυσαερίων που σχηματίζεται στο ακροφύσιο εξαγωγής ως το μοναδικό μέσο παραγωγής ώσης για την κίνηση του αεροσκάφους. Η παραγωγή ώσης επιτυγχάνεται με την επιτάχυνση μικρών, σχετικά, μαζών αέρα σε υψηλές ταχύτητες.

Μία χαρακτηριστική παράμετρος του στροβιλοκινητήρα είναι ο λόγος συμπίεσης ή λόγος πίεσης μηχανής (engine pressure ratio – EPR). Το μέγεθος αυτό αποτελεί την αιτία της πίεσης εξαγωγής των καυσαερίων από το στρόβιλο προς την πίεση του εισερχόμενου αέρα στον κινητήρα. Η τιμή του EPR αποτελεί ένδειξη της παραγόμενης ώσης για μία συγκεκριμένη παροχή ισχύος.

Ελικοστρόβιλος (turboprop engine)

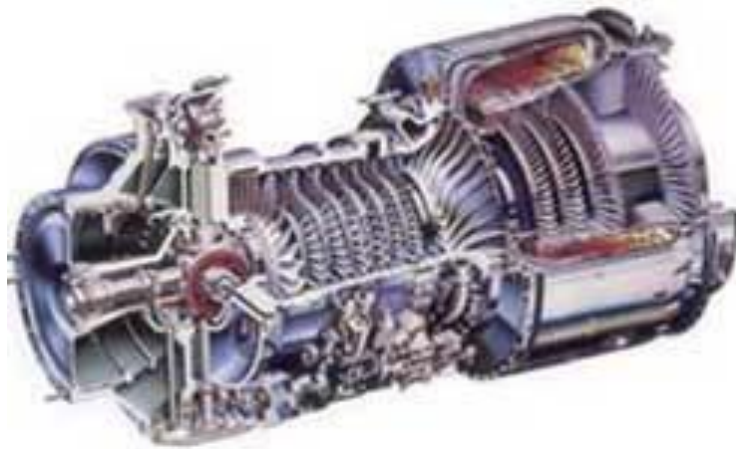




Σχήμα 2.12 (α) Τα βασικά μέρη του ελικοστρόβιλου
 (β) οελικοστρόβιλος T-53
 (γ) ο ελικοστρόβιλος κινητήρας T-56

Ο κινητήρας αυτός (Σχήμα 2.12) έχει ευρεία εφαρμογή. Ουσιαστικά, είναι όμοιος με το στροβιλοκινητήρα με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται ένα σύστημα γραναζιών ως μειωτήρας στροφών για τη μετάδοση κίνησης σε έναν έλικα. Στον ελικοστρόβιλο, σχεδόν όλη η ενέργεια των καυσαερίων χρησιμοποιείται για την κίνηση του έλικα. Κατά συνέπεια, η προσφερόμενη από τα καυσαέρια ώση είναι πολύ μικρή. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια των καυσαερίων ενός ελικοστρόβιλου κινητήρα αποδίδεται -σε ποσοστό έως 90%- ως ισχύς στον άξονα που κινεί τον έλικα. Μόνο το υπόλοιπο 10% της ενέργειας των καυσαερίων παρέχεται υπό μορφή ώσης. Σε ορισμένους ελικοστρόβιλους χρησιμοποιείται ξεχωριστός στρόβιλος για την κίνηση του έλικα. Αυτός ονομάζεται ελεύθερος στρόβιλος (free turbine ή power turbine) και είναι συνδεδεμένος με ξεχωριστό άξονα με το μειωτήρα στροφών (Σχήμα 2.12.α & 2.12.β). Τα άλλα μέρη του κινητήρα (συμπιεστής, θάλαμος καύσης και στρόβιλος καυσαερίων) λειτουργούν για να παρέχουν καυσαέρια με υψηλή ενέργεια για την περιστροφή του ελεύθερου στρόβιλου. Σε άλλους ελικοστρόβιλους δεν υπάρχει ξεχωριστός ελεύθερος στρόβιλος και η κίνηση του έλικα επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση μέρους της ενέργειας των καυσαερίων που εκτονώνονται σε στρόβιλο, ο οποίος κινεί και το συμπιεστή (Σχήμα 2.12.γ)

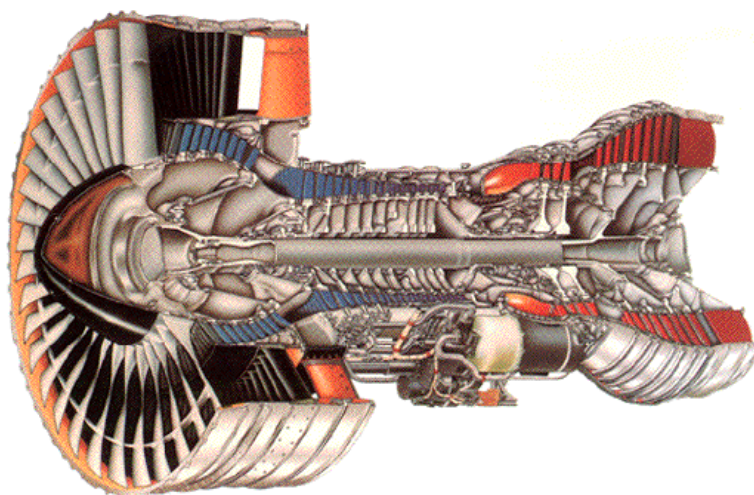
Αξονοστρόβιλος (turboshaft engine)



Σχήμα 2.13 Τομή αξονοστρόβιλου κινητήρα

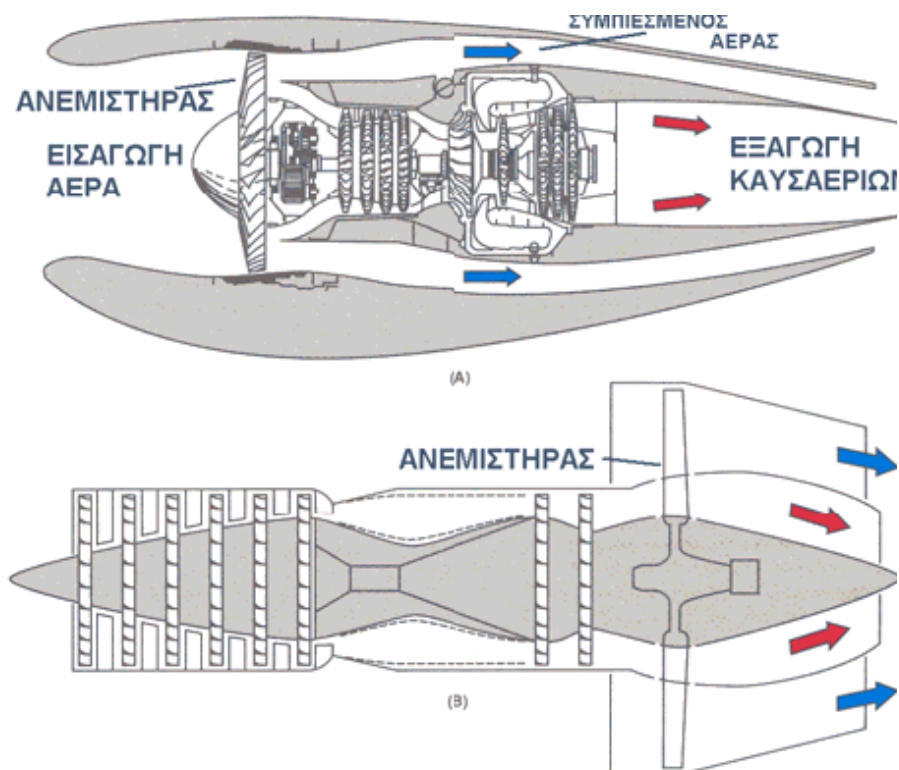
Αυτός ο τύπος αεροστροβίλου (Σχήμα 2.13) παρέχει ισχύ σχεδόν αποκλειστικά στον άξονά του ενώ ελάχιστη είναι η παραγωγή ώσης. Κατά συνέπεια, η ομοιότητα με τον ελικοστρόβιλο είναι μεγάλη. Στην περίπτωση που ο ελεύθερος στρόβιλος του ελικοστρόβιλου κινητήρα δε συνδέεται με έλικα αεροσκάφους, αλλά με τον άξονα του στροφείου ενός ελικοπτέρου τότε έχουμε τον αξονοστρόβιλο. Επίσης, ο κινητήρας αυτός χρησιμοποιείται, σε κάποιες περιπτώσεις, και ως εναλλακτικό μέσο παροχής ισχύος (Auxiliary Power Unit, APU) σε ένα αεροσκάφος. Βέβαια, ξεχωριστά από τις αεροπορικές εφαρμογές, ο ελεύθερος στρόβιλος μπορεί να συνδεθεί και με τον άξονα στροφείου πλοίου, αυτοκινήτου, ηλεκτρογεννήτριας. Η έξοδος του αξονοστρόβιλου ορίζεται από την παραγόμενη ισχύ στον άξονα (αξονική ισχύς) του ελεύθερου στρόβιλου.

Turbofan engine



Σχήμα 2.14 Τυπικός κινητήρας turbofan σε τομή

Ουσιαστικά, ο κινητήρας turbofan είναι ένας ελικοστρόβιλος με την έλικα – δηλαδή τον ανεμιστήρα (fan) – μέσα στον κινητήρα. Μια ή περισσότερες βαθμίδες του fan βρίσκονται στο μπροστινό (Σχήμα 2.15.α) ή στο οπίσθιο τμήμα του κινητήρα (Σχήμα 2.15.β).

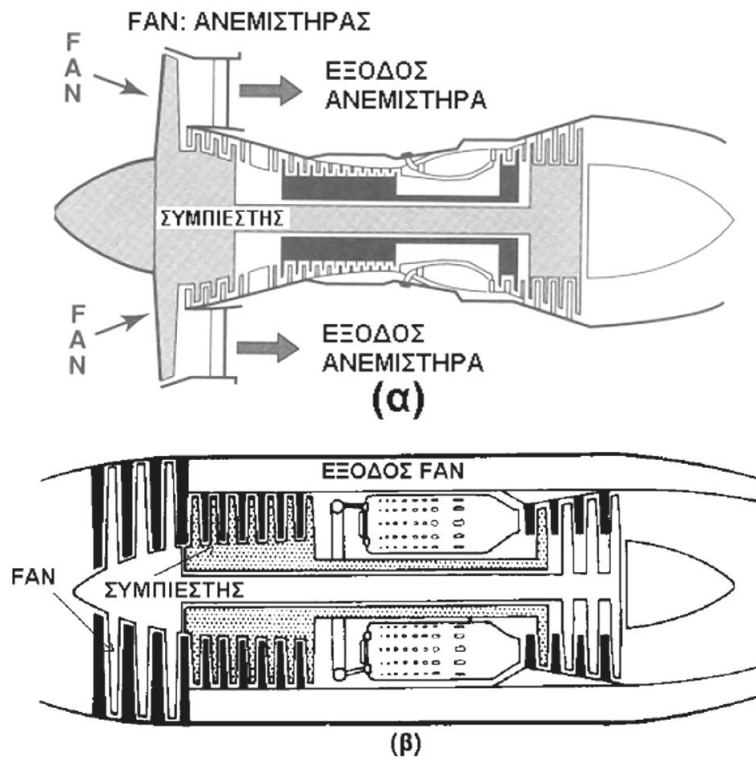


Σχήμα 2.15 Θέσεις του fan στον κινητήρα turbofan

Η ροή του αέρα εισαγωγής διασπάται σε δύο ρεύματα: το θερμό και το ψυχρό. Το θερμό ρεύμα διέρχεται μέσα από τον κινητήρα. Το ψυχρό ρεύμα περνά περιφερειακά του σώματος του κινητήρα, με την ίδια, βέβαια, αξονική διεύθυνση (ροή παράκαμψης - bypass). Το ρεύμα αυτό συνεισφέρει στην παραγωγή του 80% της ώσης του κινητήρα. Ο ανεμιστήρας επιταχύνει ψυχρό αέρα προς το οπίσθιο τμήμα του κινητήρα, χωρίς αυτός να αναμειγνύεται με καύσιμο και να καίγεται. Έτσι, παράγεται ώση που προστίθεται στην ολική ώση του κινητήρα. Ο λόγος του ψυχρού ρεύματος προς το θερμό ρεύμα αέρα καλείται λόγος παράκαμψης (bypass ratio) και είναι χαρακτηριστικό του κινητήρα turbofan. Οι τιμές του κυμαίνονται από 2:1 έως 10:12. Ανάλογα με τις τιμές του λόγου, ένας κινητήρας turbofan χαρακτηρίζεται ως υψηλού ή χαμηλού λόγου παράκαμψης. Χαρακτηριστικά δείγματα φαίνονται στο Σχήμα 2.16.α και 2.16.β αντίστοιχα.

Η έξοδος του αέρα παράκαμψης πραγματοποιείται από ειδικό αγωγό (duct) που βρίσκεται περιφερειακά του κύριου σώματος του κινητήρα. Το μήκος του αγωγού είναι μικρό – συνήθως στην περίπτωση χρήσης ανεμιστήρα μεγάλης διαμέτρου ή μεγάλο - ο αγωγός εκτείνεται σε όλο το μήκος του κινητήρα – κατά περίπτωση (Σχήμα 2.16).

Στις περισσότερες μορφές κινητήρα turbofan, χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας στρόβιλοι για την κίνηση αποκλειστικά και μόνον του fan. Ο συμπιεστής – ή οι συμπιεστές – του κινητήρα κινούνται από άλλο ή άλλους στρόβιλους.



Σχήμα 2.16. Κινητήρας τύπου Turbofan (α) υψηλού και (β) χαμηλού λόγου παράκαμψης

Στις μέρες μας οι κινητήρες turbofan θεωρούνται ως οι πιο αξιόλογοι τύποι κινητήρων αεριώθησης για μεγάλα αεροσκάφη.

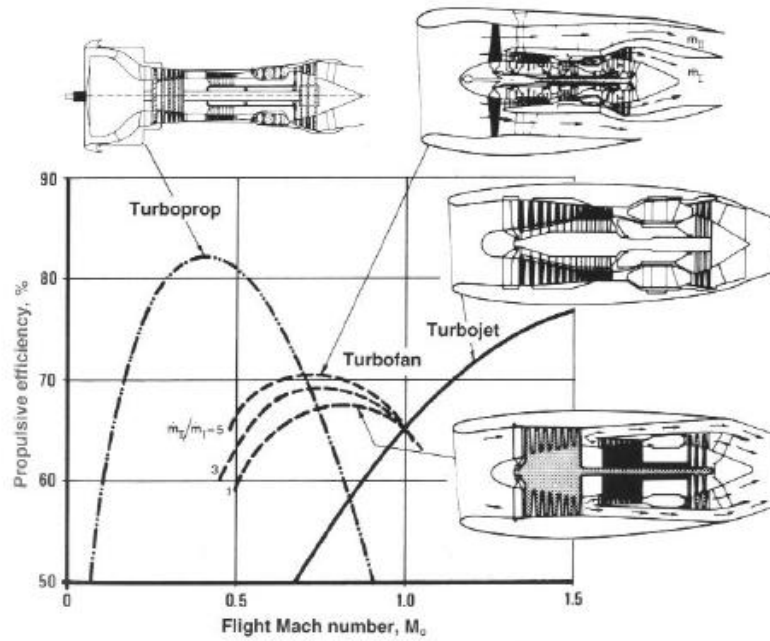
2.4 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα αεροστροβίλων

Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που συγκεντρώνουν οι ανωτέρω τύποι κινητήρων διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

Στις αεροπορικές εφαρμογές, ο τύπος του κινητήρα αεριώθησης που έχει επικρατήσει είναι ο αεροστρόβιλος. Ο τελευταίος έχει περιορίσει, επίσης, εδώ και κάποιες δεκαετίες, τη χρήση του εμβολοφόρου κινητήρα στα αεροσκάφη. Βασικά πλεονεκτήματα του αεροστρόβιλου κινητήρα, έναντι του παλινδρομικού θεωρούνται:

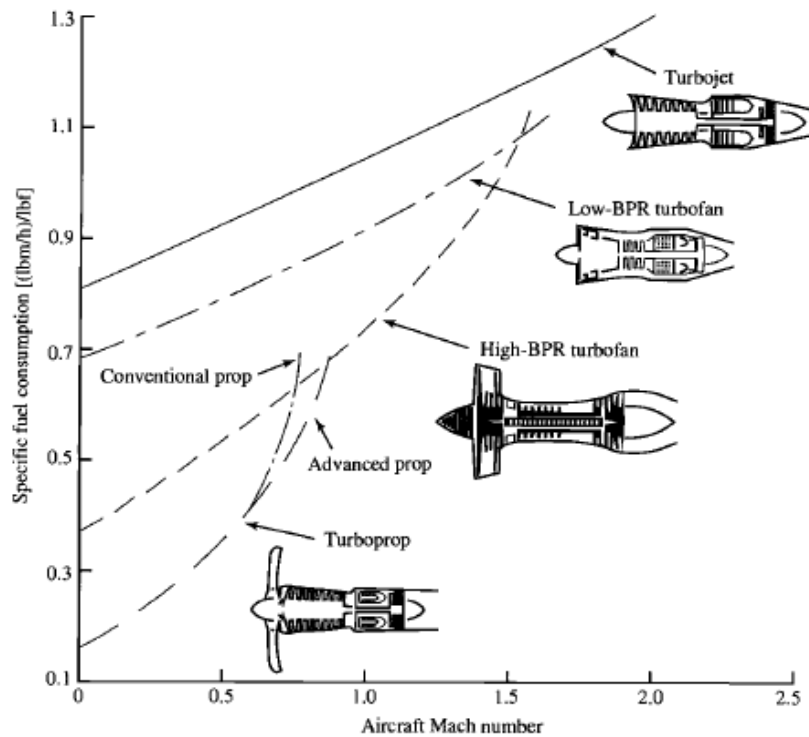
- ο μικρότερος όγκος και το μικρότερο βάρος του,
- η περιστροφική λειτουργία του, που μειώνει τις απώλειες από τριβές
- και την πιθανότητα εμφάνισης κραδασμών,
- η απλούστερη κατασκευή και οι πιο εύκολες διαδικασίες συντήρησης
- και ελέγχων, και
- η δυνατότητα επίτευξης διηχητικών και υπερηχητικών πτήσεων.
- η επίτευξη πολύ μεγαλύτερων λόγων παραγόμενης ώσης ανά μονάδα βάρους

Συγκριτικά με έναν ελικοφόρο κινητήρα, ο στροβιλοκινητήρας επιτυγχάνει μικρότερη απόδοση σε ταχύτητες πτήσης κάτω των 750km/h. Επιπλέον, η απόδοση του έλικα που συνεργάζεται με τον ελικοφόρο κινητήρα μειώνεται σε ταχύτητες πτήσης άνω των 550km/h. Το εν λόγω «κενό» όσον αφορά στο εύρος των ταχυτήτων μεταξύ 550 και 750 km/h κάλυψε η αναπτυξη των τύπων αεροστροβίλων turbofan. Τα ανωτέρω συμπεράσματα αποτυπώνονται στο [Σχήμα 2.17](#).



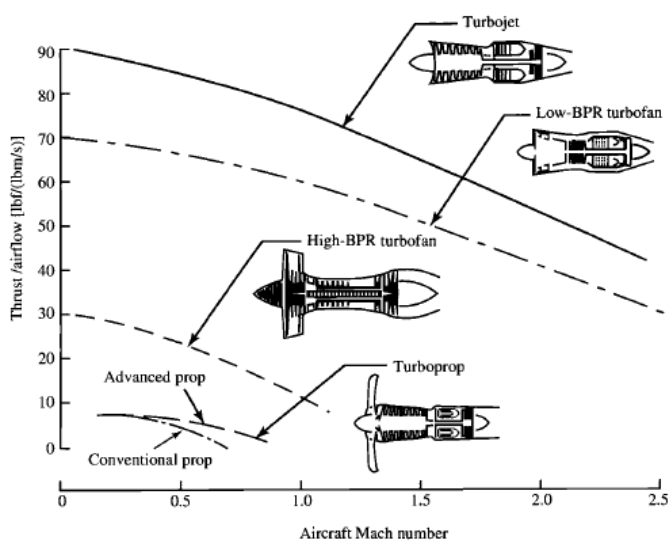
Σχήμα 2.17. Συγκριτικό διάγραμμα απόδοσης κινητήρων turboprop, turbofan & turbojet

Όσον αφορά στην κατανάλωση καυσίμου οι αεροστρόβιλοι παρουσιάζουν αυξημένη ειδική κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους κινητήρων αεροσκαφών. Στο κάτωθι Σχήμα 2.18 φαίνεται η κατανάλωση καυσίμου αναλόγως του τύπου κινητήρα.



Σχήμα 2.18. Συγκριτικό διάγραμμα κατανάλωσης καυσίμου κινητήρων turboprop, turbofan & turbojet

Στο Σχήμα 2.19 φαίνεται η δυνατότητα παροχής ώσης για τον κάθε τύπο κινητήρα.



Σχήμα 2.19. Συγκριτικό διάγραμμα ώσης κινητήρων turboprop, turbofan & turbojet

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, οι αεροστρόβιλοι κινητήρες παρουσιάζουν μεγάλο κόστος κατασκευής, ενώ αυξημένος θεωρείται και ο κίνδυνος της ανεπανόρθωτης ζημίας σε ζωτικά μέρη τους λόγω αναρρόφησης ξένων σωμάτων (Foreign Object Damage, FOD) κατά τη λειτουργία τους.

2.5 Χαρακτηριστικά αεροσκάφους T-37 και κινητήρα J-69 T-25

Το αεροσκάφος T-37 υπήρξε ένα εκπαιδευτικό αεροσκάφος το οποίο κατασκευάστηκε με σκοπό την εντρυφήση των βασικών χαρακτηριστικών ενός αεροσκάφους τύπου jet σε πιλότους. Το κάθε αεροσκάφος είχε δύο στροβιλοκινητήρες τύπου J-69 T-25.

Το πρωτότυπο XT-37 πραγματοποίησε την πρώτη του πτήση στις 12 Οκτ. 1954 ενώ επιχειρησιακά εντάχθηκε στην πολεμική αεροπορία των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής το 1957.

Στα τέλη της δεκαετίας '70 σταμάτησε η παραγωγή του έχοντας κατασκευαστεί περίπου 1300 αεροσκάφη.

Στην ελληνική πολεμική αεροπορία εντάχθηκε το 1971 και παρέμεινε εν ενεργεία μέχρι τα τέλη του 2000 όταν ο στόλος των ελληνικών T-37 αποσύρθηκε.

Στον κάτωθι Πίνακα 2.1 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα J-69 T-25 καθώς και του αεροσκάφους τύπου T-37.



Jet Trainer

Crew		2
Propulsion		2 Turbojet Engines
Engine Model		Continental J-69-T-25
Engine Power (each)	4,6 kN	1034 lbf
Speed	685 km/h	370 kts 426 mph
Service Ceiling	10.668 m	35.000 ft
Rate of climb	1027 m/min	3370 ft/min
Range	1.500 km	810 NM 932 mi.
Empty Weight	2.982 kg	6.574 lbs
max. Takeoff Weight	3.946 kg	8.699 lbs
Wing Span	10,30 m	33,8 ft
Wing Area	17,1 m ²	184 ft ²
Length	8,62 m	28,3 ft
Height	2,90 m	9,5 ft
First Flight		12.10.1954
Production Status		out of production
Total Production		1268
ICAO Code		T37
Data for (Version)		Cessna T-37B (A-37B)

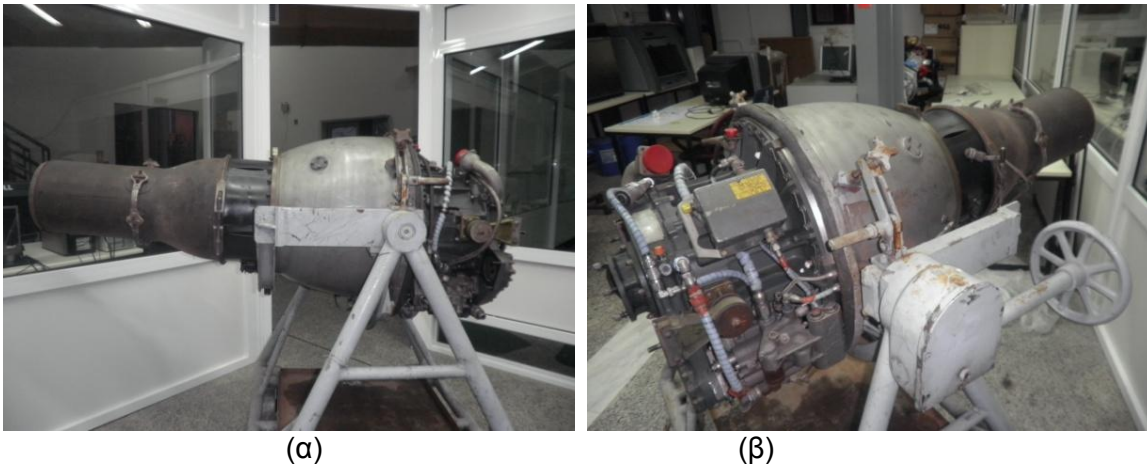
Πίνακας 2.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά αεροσκάφους T-37 και κινητήρα J-69 T-25

3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Στα πλαίσια της τροποποίησης του κινητήρα σε μορφή ώστε να καλύπτει τις εκπαιδευτικές ανάγκες του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης πραγματοποιήθηκαν οι κάτωθι εργασίες:

- i) Αποσυναρμολόγηση του κινητήρα στα επιμέρους τμήματα
- ii) Δημιουργία τομών των κυριότερων τμημάτων του κινητήρα
- iii) Καθαρισμός και Βάψιμο όλων των εξαρτημάτων του κινητήρα καθώς και της κλίνης συντήρησης
- iv) Συναρμολόγηση του κινητήρα

Αξίζει να σημειωθεί ότι, ο κινητήρας παραλήφθηκε από την πολεμική αεροπορία έχοντας μείνει ανενεργός περίπου οχτώ χρόνια από την χρονολογία απόσυρσης των αεροσκαφών T-37 το 2002. Το παρακάτω Σχήμα 3.1 αποτυπώνει την κατάσταση του κινητήρα κατά την παραλαβή του.



Σχήμα 3.1. Όψεις του κινητήρα κατά την παραλαβή

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα ο κινητήρας κατά την παραλαβή έχριζε συντήρησης καθώς στο διάστημα των οχτώ ετών που είχαν παρέλθει είχαν εμφανιστεί έντονες διαβρώσεις, τόσο στο εξωτερικό περίβλημα του κινητήρα, όσο και στην κλίνη συντήρησης.

3.1 Αποσυναρμολόγηση του κινητήρα στα επιμέρους τμήματα

Ξεκινώντας της διαδικασίες συντήρησης – τροποποίησης, αρχικά πραγματοποιήθηκαν οι εργασίες αποσυναρμολόγησης με την ακόλουθη χρονική σειρά:

- Αφαίρεση της αντλίας καυσίμου του κινητήρα



Σχήμα 3.2. Αντλία καυσίμου

- Αφαίρεση του συγκροτήματος κιβωτίου παρελκομένων (gear box) ρυθμιστή καυσίμου, αντλίας καυσίμου, αντλίας λαδιού.



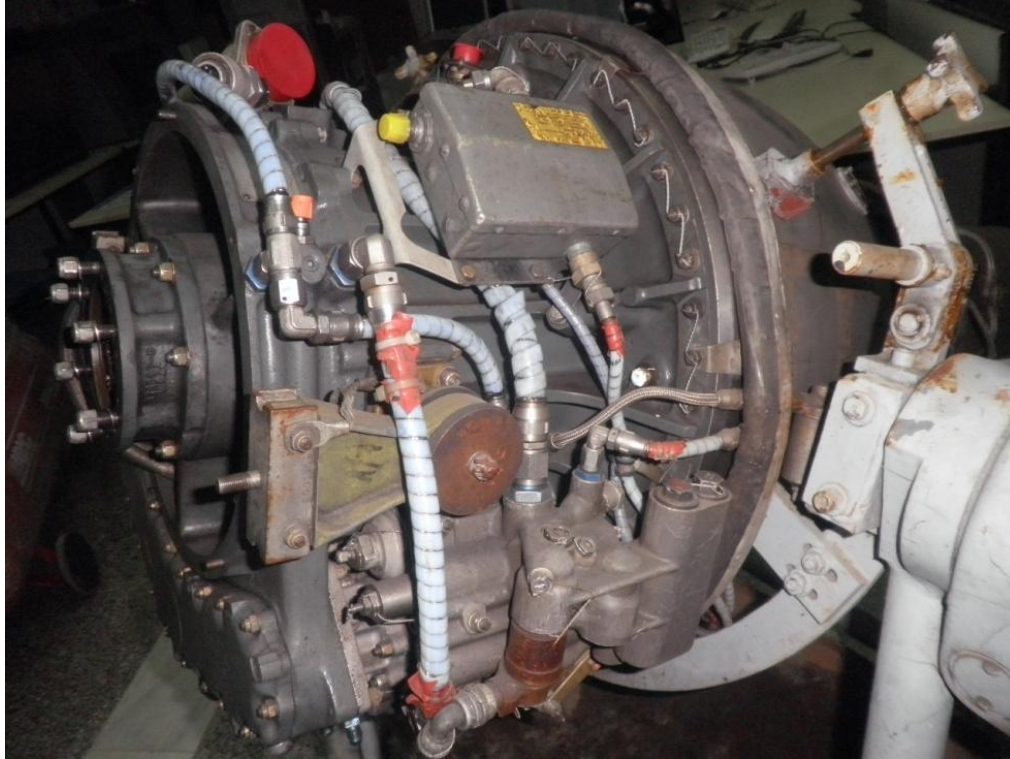
Σχήμα 3.3. Συγκρότημα κιβωτίου παρελκομένων ρυθμιστή καυσίμου, αντλίας καυσίμου και λαδιού

- Αφαίρεση του αγωγού εξόδου των καυσαερίων



Σχήμα 3.4. Αγωγός εξόδου των καυσαερίων

- Αφαίρεση όλων των παρελκομένων τα οποία ήταν τοποθετημένα επάνω στο εξωτερικό περίβλημα του συμπιεστή όπως ignition exciter, αντικραδασμικές βάσεις στήριξης του κινητήρα καθώς και καλωδιώσεις ρεύματος και σωληνώσεων καυσίμου και λαδιού περιφερειακά του περιβλήματος του συμπιεστή.



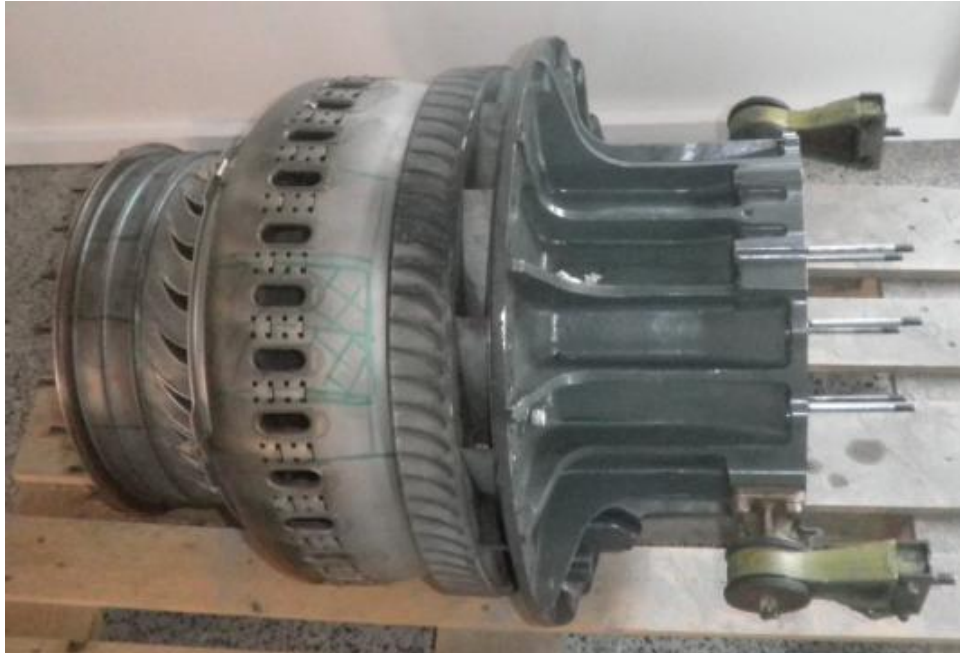
Σχήμα 3.5. Παρελκόμενα περιφερικά του περιβλήματος του συμπιεστή

- Αφαίρεση του συγκροτήματος του διαχύτη καυσαερίων και οπίσθιου τριβέα



Σχήμα 3.6. Συγκρότημα διαχύτη καυσαερίων και οπίσθιου τριβέα

- Αφαίρεση του συγκροτήματος συμπιεστή, θαλάμου καύσης και στροβίλου από το εξωτερικό περίβλημα του στροβίλου.

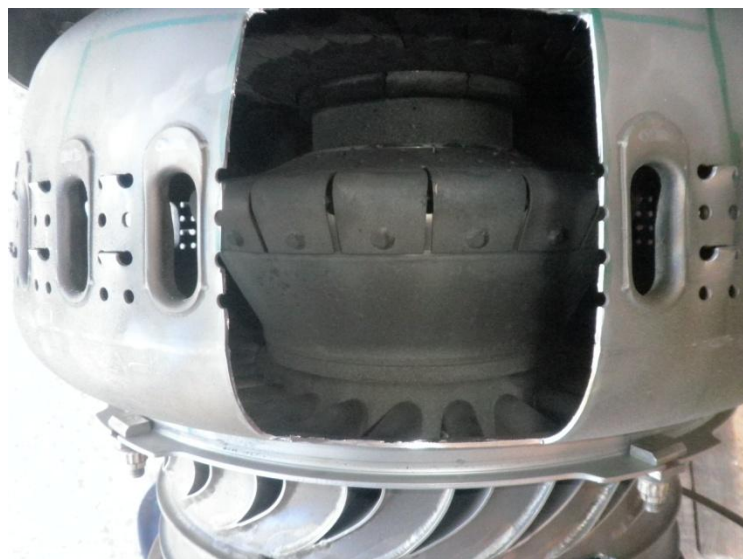


Σχήμα 3.7. Συγκρότημα συμπιεστή, θαλάμου καύσης και στροβίλου

3.2 Δημιουργία τομών των κυριότερων τμημάτων του κινητήρα

Στα πλαίσια της τροποποίησης του κινητήρα για εκπαιδευτικούς λόγους πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω τομές ώστε να καταστεί εφικτή η οπτική επαφή οιοδήποτε φοιτητή στα κύρια τμήματα ενός κινητήρα jet και έτσι να γίνει κατανοητή η λειτουργία του κινητήρα στο σύνολό του.

- Τετράγωνη τομή στην περιοχή του θαλάμου καύσης



Σχήμα 3.8. Τομή του Θαλάμου καύσης

- Τομή της επιφάνειας του εξωτερικού περιβλήματος του συμπιεστή



Σχήμα 3.9. Τομή εξωτερικού περιβλήματος συμπιεστή

- Τομή του περιβλήματος του στροβίλου



Σχήμα 3.10. Τομή περιβλήματος στροβίλου

- Τομή στην περιοχή του εξωτερικού περιβλήματος του στροβίλου - θαλάμου καύσης



Σχήμα 3.11. Τομή περιβλήματος στροβίλου - θαλάμου καύσης

3.3 Καθαρισμός και Βαφή όλων των εξαρτημάτων του κινητήρα καθώς και της κλίνης συντήρησης

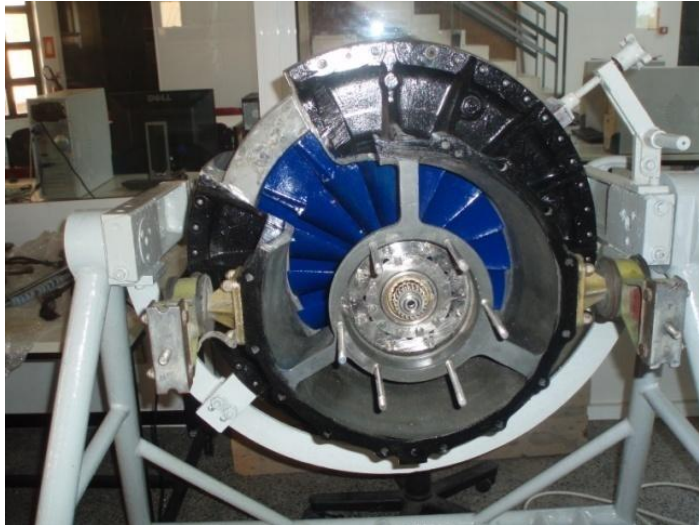
Κατόπιν των ανωτέρω τεχνικών εργασιών επί του κινητήρα, ήταν αναγκαία η εκτέλεση ανάλογων εργασιών καθαρισμού και βαφής των επιφανειών του κινητήρα καθώς και της κλίνης συντήρησης ως ακολούθως:

- Καθαρισμός και Βαφή της κλίνης συντήρησης



Σχήμα 3.12. Κλίνη συντήρησης κατόπιν βαφής

- Ομοίως των πτερυγίων του συμπιεστή. Η βαφή πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση μπλε χρώματος το οποίο βιβλιογραφικά και θεωρητικά συμβολίζει το ψυχρό τμήμα.



Σχήμα 3.13. Συμπιεστής κατόπιν βαφής

- Ομοίως των πτερυγίων του στροβίλου. Η βαφή έγινε με κόκκινο χρώμα, το οποίο συμβολίζει το θερμό τμήμα.



Σχήμα 3.14. Στρόβιλος κατόπιν βαφής

- Ομοίως του θαλάμου καύσης. Η βαφή έγινε με χρώμα κίτρινο δείχνοντας έτσι ότι στο χώρο αυτό πραγματοποιείται καύση.



- Σχήμα 3.15. Θάλαμος καύσης κατόπιν βαφής
- Ομοίως του Περιβλήματος του στροβίλου – θαλάμου καύσης



Σχήμα 3.16. Περίβλημα στροβίλου – θαλάμου καύσης κατόπιν βαφής

- Ομοίως του συγκροτήματος του διαχύτη καυσαερίων και οπίσθιου τριβέα



Σχήμα 3.17. Συγκρότημα διαχύτη καυσαερίων – οπίσθιου τριβέα κατόπιν βαφής

- Ομοίως του Αγωγού εξόδου των καυσαερίων.



Σχήμα 3.18. Αγωγός καυσαερίων κατόπιν βαφής

3.4 Συναρμολόγηση του κινητήρα

Τελικά, πραγματοποιήθηκαν οι εργασίες συναρμολόγησης του κινητήρα στην τελική του μορφή.



Σχήμα 3.19. Κινητήρας κατόπιν εργασιών τροποποίησης

4. ΣΥΝΟΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την μετέπειτα χρησιμοποίηση του κινητήρα τύπου jet J-69 T-25 από το τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης στα πλαίσια του μαθήματος Στοιχεία Μηχανών.

Η εν λόγω εργασία αποτελείται από δύο τμήματα, το θεωρητικό και το κατασκευαστικό.

Στο θεωρητικό τμήμα της εργασίας πραγματοποιήθηκε ιστορική αναδρομή όσον αφορά στην εξέλιξη των κινητήρων των αεροσκαφών με παράλληλη επεξήγηση των βασικών αρχών λειτουργίας αυτών. Εν συνεχεία, οι συγγραφείς επικεντρώθηκαν στην παροχή στοιχείων για στροβιλοκινητήρες καθώς η κινητήρας ο οποίος παρασχέθηκε στο Πολυτεχνείο Κρήτης αφορά στην εν λόγω κατηγορία κινητήρων. Τέλος, παρατεθήκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα καθώς και του αεροσκάφους T-37 το οποίο τον χρησιμοποιούσε. Σκοπός του υπόψη τμήματος αποτέλεσε η κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας ενός κινητήρα τύπου turbojet.

Στο κατασκευαστικό τμήμα, πραγματοποιήθηκαν τεχνικές εργασίες συντήρησης που συνίστανται σε εργασίες αποσυναρμολόγησης, κοπής επιφανειών, καθαρισμού και βαφής των επιφανειών και τέλος συναρμολόγησης του κινητήρα.

Κατόπιν των ανωτέρω, η παρούσα αποτελεί παρακαταθήκη στις επόμενες γενιές των σπουδαστών του τμήματος και ως εκ τούτου για άλλη μια φορά η ομάδα εργασίας αισθάνεται την ανάγκη να ευχαριστήσει τον Καθηγητή κ. Αντωνιάδη Αριστομένη, το Γενικό Επιτελείο Αεροπορίας καθώς και το τεχνικό προσωπικό του Συνεργείου κινητήρων της 120 Πτέρυγας Αεροπορικής Εκπαιδύσεως για την πολύτιμη ανά φορέα προσφορά τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ROLLS ROYCE plc, “ the jet engine”, fifth ed. Derby England, 1996.
- Jack D. Mattingly, “ Elements of propulsion: Gas Turbines and Rockets”, second ed. AIAA, 2006.
- Klaus Hunecke, “Jet Engines FUNDAMENTALS OF THEORY, DESIGN AND OPERATION”, 6th ed. motorbooks international, 2003.
- Ευάγγελος Καρελάς, Ιωάννης Τριαντάφυλλος, Γρηγόριος Φρέσκος, «Κινητήρες Αεροσκαφών Ι», ΟΕΔΒ, 2004.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

<http://www.marchfield.org/t37.htm>

http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_t37_en.php