

Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ, ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ & ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ
ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΓΑΛΑΝΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΤΑΤΣΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΡΚΑΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ
(ΔΡ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ – ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΟΣ)

ΠΑΤΡΑ 2008

Περιεχόμενα

Εισαγωγή & Σκοπός Πτυχιακής Εργασίας	4
Ιστορική Εξέλιξη	5
Κεφ 1: Περίληψη Πτυχιακής Εργασίας κάθε Κεφαλαίου	10
Κεφ 2: Είδη Κινητήρων Εσωτερικής Καύσης	12
2.1: Τύποι Εμβολοφόρων Κινητήρων	13
Κεφ 3: Αρχές Αεριώθησης	15
3.1: Τύποι Κινητήρων Αεριώθησης	15
3.2: Πύραυλος (Rocket)	16
3.3: Αθόδουλος (Ram Jet)	17
3.4: Υπερηχητικός Αθόδουλος (Scram Jet)	18
3.5: Παλμικός Αθόδουλος (Pulse Jet)	19
Κεφ 4: Ο Αεριοστρόβιλος Κινητήρας	21
4.1: Βασικές Αρχές Αεριοστρόβιλων Κινητήρων	21
4.2: Τύποι Αεριοστρόβιλων Κινητήρων	23
4.3: Στροβιλοαντιδραστήρας (Turbojet Engine)	24
4.4: Ελικοστρόβιλος (Turboprop Engine)	25
4.5: Αξονοστρόβιλος (Turbo shaft Engine)	28
4.6: Στροβιλοανεμιστήρας (Turbofan Engine)	29
4.7: Στροβιλο-αθόδουλος (Turbo Ramjet)	32
4.8: Πυραυλοστρόβιλος (Turbo Rocket)	33
Κεφ 5: Χαρακτηριστικά Κινητήρων Αεριώθησης	35
5.1: Σχεδίαση, Κατασκευή & Υλικά Κατασκευής	35
5.2: Κύκλος Λειτουργίας Αεριοστρόβιλων Κινητήρων	37

5.2.1: Θεωρητικός Κύκλος Λειτουργίας	38
5.2.2: Πραγματικός Κύκλος Λειτουργίας	42
5.3: Εισαγωγή Αέρα	46
5.3.1: Γενικά	46
5.3.2: Είδη Αεραγωγών Εισαγωγής	47
5.3.3: Φίλτρα Κατακράτησης Σωματιδίων	50
5.4: Συμπιεστές	50
5.4.1: Γενικά	50
5.4.2: Φυγόκεντροι Συμπιεστές	51
5.4.3: Αξονικοί Συμπιεστές	53
5.4.4: Υλικά Κατασκευής	59
5.5: Θάλαμοι Καύσης	59
5.5.1: Γενικά	59
5.5.2: Τύποι Θαλάμων Καύσης	60
5.6: Στρόβιλος	60
5.6.1: Γενικά	60
5.6.2: Περιγραφή & Λειτουργία του Στροβίλου	61
5.7: Εξαγωγή	62
5.8: Μετάκαυση	64
Κεφ 6: Σύγκριση μεταξύ Ειδών & Τύπων των Κινητήρων	67
6.1: Παλινδρομικοί Κινητήρες & Κινητήρες Αεριώθησης	67
6.2: Σύγκριση Αεριοστρόβιλων με Αθόδουλους & Πυραύλους	68
6.3: Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα των Αεριοστρόβιλων Κινητήρων	69
Κεφ 7: Χρήσεις & Εφαρμογές των Κινητήρων Αεριώθησης	71
Κεφ 8: Συντήρηση Αεριοστρόβιλων Κινητήρων	73
8.1: Τύποι Συντήρησης	73
8.1.1: Συντήρηση Επιπέδου Γραμμής	74
8.1.2: Συντήρηση Επιπέδου Συνεργείου	76

8.1.3: Συντήρηση Επιπέδου Εργοστασίου	76
8.2: Συντήρηση, Ρύθμιση & Αποκατάσταση Βλαβών σε Τμήματα Αεριοστρόβιλων Κινητήρων	78
8.2.1: Συντήρηση & Επισκευή Ψυχρού Τμήματος	79
8.2.2: Συντήρηση & Επισκευή Θερμού Τμήματος	81
8.3: Λίπανση-Συστήματα Λίπανσης	83
8.3.1: Φυσικές Ιδιότητες & Τεχνικά Χαρακτηριστικά Λιπαντικών	84
8.3.2: Τύποι Συστημάτων Λίπανσης Αεριοστρόβιλων Κινητήρων	85
8.3.3: Έλεγχοι & Διερεύνηση Βλαβών Συστήματος Λίπανσης	87
8.4: Σύστημα Ψύξης	88
8.4.1: Περιφερειακή Ψύξη στο Εσωτερικό Περίβλημα του Κινητήρα	88
8.4.2: Εσωτερική Ψύξη του Κινητήρα	89
8.5: Σύστημα Καυσίμου & Καύσιμα	91
8.5.1: Είδη & Ιδιότητες Καυσίμων	91
8.5.2: Τύποι Αεροπορικών Καυσίμων	93
Κεφ 9: Συμπεράσματα Πτυχιακής Εργασίας	96
Βιβλιογραφία	98

Εισαγωγή & Σκοπός

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι οι αεριοστρόβιλοι κινητήρες αεροσκαφών. Αναλυτικότερα θα μάθουμε για την εξέλιξη των κινητήρων, πώς ξεκίνησαν και τα μεγάλα βήματα προόδου που έχουν γίνει μέχρι σήμερα.

Η εργασία αυτή ασχολείται με τους διάφορους τύπους κινητήρων που υπάρχουν, τις βασικές αρχές λειτουργίας τους, τον θεωρητικό κύκλο λειτουργίας των κινητήρων κατα Μπράϊτον αλλά και τον πραγματικό κύκλο λειτουργίας. Ακόμη, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κινητήρων όπως τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διαφόρων τμημάτων των κινητήρων, τα συστήματα που λειτουργούν κατά την λειτουργία του κινητήρα όπως τα συστήματα λίπανσης, ψύξης και καυσίμων, το ρόλο που παίζουν αλλά και τον τρόπο λειτουργίας τους.

Σημαντικό ρόλο για την σωστή λειτουργία των αεριοστρόβιλων κινητήρων παίζει η συντήρησή τους η οποία γίνεται με διάφορους τρόπους, αλλά θα δούμε και τις πιο συνήθεις βλάβες που προκαλούνται στον κινητήρα. Επίσης υπάρχουν πολλά είδη καυσίμων και λιπαντικών τα οποία χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά τους.

Τέλος, υπάρχει η σύγκριση μεταξύ των κινητήρων, τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη σύγκριση τους, οι χρήσεις και οι εφαρμογές των κινητήρων στα αεροσκάφη και ειδικότερα θα δούμε ποίους κινητήρες χρησιμοποιούν τα Ελληνικά μαχητικά και επιβατικά αεροσκάφη.

Ο σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι να μάθουμε για την αρχή λειτουργίας των αεριοστρόβιλων κινητήρων, τις κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται οι αεριοστρόβιλοι κινητήρες, τους τρόπους που υπάρχουν για να γίνει η συντήρησή τους και τέλος τις εφαρμογές των αεριοστρόβιλων κινητήρων και των κατηγοριών τους στους διάφορους τύπους αεροσκαφών.

Ιστορική Εξέλιξη

Η αρχή της εμμονής της ανθρωπότητας με την πτήση είναι τυλιγμένη στο μύθο. Οι αρχαίες ιστορίες μιλούν περί κτηνών ή ημι-πτηνών που πετούσαν μέσω του αέρα. Η ελληνική μυθολογία λέει για την ιστορία του Πήγασου, ενός ιπτάμενου αλόγου, και του αγγελιοφόρου Θεού Ερμή που στα φτερωτά σανδάλια του πετά σε όλο τον κόσμο. Ο αρχαίος ελληνικός μύθος του Δαίδαλου και του Ίκαρου λέει την ιστορία για το πώς ο Δαίδαλος έφτιαξε φτερά από κεριά και πούπουλα έτσι ώστε αυτός και ο γιός του Ίκαρος να μπορούν να δραπέτευσουν από την αιχμαλωσία. Παρ'όλες όμως τις δυσκολίες που συνάντησε στην πορεία, η θέληση και η ανάγκη του ανθρώπου για να πετάξει ήταν τόσο μεγάλες που τελικά τα κατάφερε. Ξεκινώντας από απλά μηχανικά μέσα και φτάνοντας μέχρι και τη σύγχρονη τεχνολογία, η ιστορική εξέλιξη των αεροπορικών κινητήρων από την αρχαιότητα μέχρι την εποχή μας ακολούθησε τα παρακάτω βήματα:

150 π.Χ. – Ένας Έλληνας φιλόσοφος και μαθηματικός, ο Ήρωνας, επινόησε και κατασκεύασε μία μηχανή, γνωστή ως **μηχανή του Ήρωνα** ή **αιολοπύλη (Heron's aeolipile)**, η οποία θεωρείται πρόδρομος των αεριοστρόβιλων κινητήρων. Ένα κλειστό δοχείο με νερό θερμαινόταν ώστε να παραχθεί ατμός. Αυτός μεταφερόταν μέσω δύο κάθετων σωλήνων σε μία σφαίρα, η οποία έφερε αυλούς (ακροφύσια) στη διεύθυνση της ακτίνας της. Καθώς η σφαίρα γέμιζε με ατμό, περιστρέφονταν και ο ατμός εύρισκε οδό διαφυγής από τους ακτινικούς αυλούς.

1505 - Ο **Leonardo Da Vinci** σχεδίασε ένα σκίτσο μιας συσκευής, το γρύλο καπνοδόχων, ο οποίος περιστρεφόταν εξαιτίας των καυτών αερίων που έρεαν μέσα σε μια καπνοδόχο. Ο καυτός αέρας προερχόταν από την φωτιά και υψωνόταν προς τα πάνω για να περάσει μέσω μιας σειράς λεπίδων ανεμιστήρα που γύριζαν τον ψημένο οβελό.

1629 - Ο Ιταλός μηχανικός **Giovanni Branca** σχεδίασε τον πρώτο, ουσιαστικά, στρόβιλο. Ατμός, παραγόμενος σε θερμαινόμενο δοχείο, περιέστρεφε δίσκο που έφερε κοιλότητες στην περιφέρειά του. Η περιστροφή του δίσκου μεταφερόταν μέσω συστήματος γραναζιών σε άλλον άξονα για τον χειρισμό διάφορων μηχανημάτων.

1687 - Ο **Sir Isaac Newton** αναγγέλλει τους τρεις νόμους της κίνησης. Αυτοί αποτελούν τη βάση για τη σύγχρονη θεωρία προώθησης:

1. Κάθε αντικείμενο σε μια κατάσταση της ομοιόμορφης κίνησης τείνει να παραμείνει σε εκείνη την κατάσταση της κίνησης εκτός αν μια εξωτερική δύναμη εφαρμοστεί σε αυτήν.

2. Η σχέση μεταξύ της μάζας m ενός αντικειμένου, της επιτάχυνσής της a , και της εφαρμοσμένης δύναμης F είναι $F = ma$. Η επιτάχυνση και η δύναμη είναι διανύσματα σε αυτόν τον νόμο που η κατεύθυνση του διανύσματος δύναμης είναι η ίδια με την κατεύθυνση του διανύσματος επιτάχυνσης.

3. Για κάθε δράση υπάρχει μια ίση και αντίθετη αντίδραση.

1791 - Ο **John Barber** έλαβε το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια βασική μηχανή στροβίλων. Σχεδίασε ένα σύστημα το οποίο λειτουργούσε με το θερμοδυναμικό κύκλο του σύγχρονου αεριοστρόβιλου κινητήρα. Ο στρόβιλος σχεδιάστηκε με έναν συμπιεστή παλινδρομικού τύπου οδηγούμενο με αλυσίδα. Είχε έναν συμπιεστή, έναν θάλαμο καύσης, και έναν στρόβιλο.

1808 - Ο Άγγλος **John Bumbell** κατασκεύασε έναν αεριοστρόβιλο παρόμοιο με τους σημερινούς, μα χωρίς σταθερά πτερύγια. Αρκετές ομοιότητες με τους αεριοστρόβιλους της εποχής μας παρουσίαζε και ο κινητήρας που κατασκεύασε το 1837 ο Γάλλος **Bresson**.

1850 - Ο **Fernihough** επινόησε τον πρώτο αεριοστρόβιλο κινητήρα που είχε τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί ως εργαζόμενα μέσα ατμό ή αέρα.

1872 - Ο **Δρ. F. Stoltz** σχεδίασε την πρώτη αληθινή αεριοστροβίλη μηχανή ξεφεύγοντας από τη χρήση του ατμού. Η μηχανή του χρησιμοποίησε ένα πολυβάθμιο τμήμα στροβίλων και έναν συμπιεστή ροής. Αυτή η μηχανή δεν λειτούργησε ποτέ κάτω από τη δική της ισχύ.

Ο **Οττο Daimler**, προς το τέλος του 1800 εφηύρε την πρώτη μηχανή βενζίνης.

1894 - Ο Αμερικανός **Hiram Maxim** προσπάθησε να τροφοδοτήσει το τριπλό διπλό του με δύο ατμομηχανές καίγοντας άνθρακα. Πέταξε μόνο για μερικά δευτερόλεπτα.

1896 – Ο Αμερικανός **Samuel Langley** επέτυχε στο πέταγμα ενός τηλεκατευθυνόμενου αεροπλάνου με μια ατμο-τροφοδοτούμενη μηχανή, αποκαλούμενη *Αεροδρόμιο*. Πέταξε περίπου 1 μίλι προτού να τελειώσει ο ατμός. Προσπάθησε έπειτα να φτιάξει ένα πλήρες μεγέθους αεροπλάνο, το *Αεροδρόμιο Α*, με μια μηχανή τροφοδοτημένη με αέριο. Το 1903, συνέτριβει αμέσως μετά την απογείωση από ένα πλωτό σπίτι.

1900 - Ο **Stanford Moss** κατέθεσε αρκετές νέες ιδέες πάνω στη λειτουργία των αεριοστροβίλων. Αργότερα, δουλεύοντας για την **General Electric** εφάρμοσε τις ιδέες του πάνω στη σχεδίαση των στροβίλο-υπερπληρωτών (turbo-superchargers), βασιζόμενος σε κάποιες ιδέες του Γάλλου μηχανικού **Rateau**.

1903 - Οι **αδελφοί Wright** πέταξαν το, *The Flyer*, με μια μηχανή τροφοδοτημένη με αέριο, δύναμης 12 αλόγων. Από το 1903, το έτος της πρώτης πτήσης αδελφών Wright, έως τα τέλη της δεκαετίας του '30 η τροφοδοτημένη με αέριο παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης με έναν προωστήρα ήταν ο μόνος τρόπος που χρησιμοποιήθηκε για να ωθήσει τα αεροσκάφη.

1918 - Η επιχείρηση της General Electric ξεκίνησε ένα τμήμα στροβίλων αερίου. Ο **Δρ. Stanford A. Moss** ανέπτυξε κατά τη διάρκεια του 1^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου τη στροβιλομηχανή υπερπληρωτών (turbo-supercharger) η οποία χρησιμοποιούσε τα καυσαέρια από μια παλινδρομική μηχανή για να οδηγήσει

ένα τροχό στροβίλων ο οποίος οδηγούσε στη συνέχεια έναν φυγοκεντρικό συμπιεστή που χρησιμοποιόταν για υπερφόρτωση.

1930 - Ο **Sir Frank Whittle** στην Αγγλία, κατοχύρωσε ένα σχέδιο για έναν αεριοστρόβιλο για την αεριοθούμενη προώθηση. Η πρώιμη εργασία του για τη θεωρία της προώθησης αερίου βασίστηκε στις συνεισφορές των περισσότερων από τους προγενέστερους πρωτοπόρους αυτού του τομέα. Αυτή η μηχανή αποτελούνταν από έναν πολυβάθμιο συμπιεστή, έναν θάλαμο καύσης, έναν μονοφασικό στρόβιλο και ένα ακροφύσιο.

1936 - Ταυτόχρονα με το Frank Whittle που εργαζόταν στην Μεγάλη Βρετανία, ο **Hans von Ohain** και ο **Max Hahn**, σπουδαστές στην Γερμανία ανέπτυξαν και κατοχύρωσαν το δικό τους σχέδιο μηχανής.

1939 (Αύγουστος) - Η γερμανική επιχείρηση αεροσκαφών **Ernst Heinkel Aircraft** πραγματοποίησε την πρώτη πτήση ενός αεριοθούμενου αεροπλάνου στροβίλων αερίου με το αεροπλάνο HE-178 χρησιμοποιώντας τον κινητήρα HES 3B που κατασκευάστηκε από τον von Ohain. Ήταν η πρώτη παγκόσμια πτήση στην οποία χρησιμοποιήθηκε στροβιλωθητής.

1941 - Ο **Sir Frank Whittle** σχεδίασε το πρώτο επιτυχές αεροπλάνο στροβιλωθητών, το Gloster Meteor G.40, που πέταξε επάνω από την Μεγάλη Βρετανία στις 15 Μαΐου, με τον κινητήρα W.1.

1942 - Ο **Δρ. Franz Anslem** ανέπτυξε το στροβιλωθητή με αξονική ροή, Junkers Jumo 004, που χρησιμοποιήθηκε στο Messerschmitt Me-262, το πρώτο παγκόσμιο επιχειρησιακό αεριοθούμενο μαχητικό της Γερμανικής Πολεμικής Αεροπορίας.

Μετά από τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο η ανάπτυξη των αεριοθούμενων μηχανών κατευθύνθηκε από διάφορες εμπορικές επιχειρήσεις. Οι κινητήρες αερίωσης έγιναν σύντομα οι δημοφιλέστερες μέθοδοι κίνησης των αεροπλάνων. Στην εποχή μας πλέον, τα επιβατικά, εμπορικά και στρατιωτικά αεροσκάφη χρησιμοποιούν στην πλειοψηφία τους κινητήρες αερίωσης.

Κεφάλαιο 1^ο Περίληψη Πτυχιακής Εργασίας κάθε Κεφαλαίου

Αρχικά αναφέρεται ο σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας ενώ στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια μικρή αναφορά στο κάθε κεφάλαιο αυτής της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο υπάρχει ο ορισμός της ‘**θερμικής μηχανής**’ καθώς επίσης αναλύονται τα είδη των μηχανών εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ) με βάση το πώς μετατρέπουν την θερμότητα σε μηχανική ενέργεια, αν το εργαζόμενο μέσο ταυτίζεται με το προϊόν της καύσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύετε τι είναι η προωθητική δύναμη ή ώση και πώς λειτουργεί. Ακόμη αναφέρονται οι διάφοροι τύποι αεριοστροβίλων που υπάρχουν (π.χ ο πύραυλος, ο αεριοστρόβιλος), τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και ο τρόπος λειτουργίας τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές αρχές των αεριοστροβίλων κινητήρων δηλαδή τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένας αεριοστρόβιλος κινητήρας και η βασική αρχή λειτουργίας τους. Ακόμη αναφέρονται οι διάφοροι τύποι αεριοστροβίλων κινητήρων που υπάρχουν (π.χ ο στροβιλοαντιδραστήρας, ο στροβιλο-αθόδυλος κ.α.) καθώς επίσης ο τρόπος λειτουργίας τους και κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται πώς γίνεται η ανάπτυξη και βελτίωση ενός νέου κινητήρα καθώς επίσης και οι έλεγχοι που γίνονται ώστε να αποτραπούν τυχόν προβλήματα που μπορεί να προκύψουν. Ακόμη αναφέρεται ο θεωρητικός κύκλος λειτουργίας κατά Μπράϊτον αλλά και πραγματικός κύκλος λειτουργίας των αεριοστροβίλων κινητήρων αλλά και για ποιο λόγο δεν είναι εφικτός ο θεωρητικός κύκλος λειτουργίας κατά Μπράϊτον.

Στην συνέχεια αναφέρονται και αναλύονται τα βασικά μέρη των κινητήρων αεριοστροβίλων όπως: η **εισαγωγή αέρα** (το ρόλο που παίζει, τα είδη που υπάρχουν), οι **συμπιεστές** (αρχή λειτουργίας, διάφορους τύπους συμπιεστών, υλικά κατασκευής), οι **θάλαμοι καύσης** (το ρόλο που παίζει, τα είδη που

υπάρχουν), ο **στροβίλος** (αρχή λειτουργίας, τα μέρη που αποτελείται), την **εξαγωγή** (το ρόλο που παίζει, τα βασικά τμηματά του), η **μετάκαυση** (για ποιό λόγο χρειαζόμαστε μεγαλύτερη προωθητική δύναμη, τα μέρη που τον αποτελούν).

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μία σύγκριση μεταξύ των διαφόρων ειδών και τύπων κινητήρων που αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής, δηλαδή αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε κινητήρα.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναφέρονται οι χρήσεις και οι εφαρμογές των κινητήρων αεριώθησης και ειδικότερα αναφέρονται σε ποίους τύπους αεροσκαφών (μαχητικών – επιβατικών) χρησιμοποιούνται οι παραπάνω τύποι κινητήρων στην **Ελλάδα**.

Το όγδοο κεφάλαιο αναφέρεται στην συντήρηση των αεριοστροβίλων κινητήρων. Αναφέρονται οι διάφοροι τύποι συντήρησης που υπάρχουν (π.χ συντήρηση επιπέδου γραμμής, συντήρηση επιπέδου συνργείου, συντήρηση επιπέδου εργοστασίου). Ακόμη αναφέρεται η σπουδαιότητα των συστημάτων λίπανσης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των λιπαντικών. Επίσης γίνεται αναφορά στα συστήματα καυσίμων, στα είδη και ιδιότητες που πρέπει να έχουν τα καύσιμα αλλά και στις κατηγορίες που χωρίζονται τα αεροπορικά καύσιμα.

Στο ένατο κεφάλαιο αναφέρονται τα γενικά συμπεράσματα για τους κινητήρες αλλά και για την εργασία κατά την διάρκεια της συγγραφής της.

Τέλος, αναφέρονται οι διάφορες πηγές (π.χ βιβλία, ηλεκτρονικές διευθύνσεις στο διαδίκτυο) που συμβουλευτήκαμε για την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Κεφάλαιο 2^ο Είδη κινητήρων εσωτερικής καύσης

Οι πρώτες προσπάθειες για τη δημιουργία του αεροπορικού κινητήρα βασίστηκαν στις αρχές λειτουργίας των **θερμικών μηχανών**. Ως **θερμική μηχανή** ορίζουμε τη μηχανή η οποία μετατρέπει τη θερμότητα σε μηχανική ενέργεια. Η θερμότητα μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές, όπως κάρβουνο, πετρέλαιο, υγραέριο αλλά και από τον ήλιο ή από πυρηνική αντίδραση. Στην περίπτωση της καύσης, η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε θερμότητα και στη συνέχεια σε μηχανική ενέργεια:

- μέσω ενός εμβόλου, σε εμβολοφόρο κινητήρα, ή,
- μέσω ενός στρόβιλου, σε αεριοστρόβιλο κινητήρα.

Ο θερμοκινητήρας που χρησιμοποιεί καύσιμο, χαρακτηρίζεται ανάλογα με το αν το εργαζόμενο μέσο ταυτίζεται με το προϊόν της καύσης ή είναι διαφορετικό από αυτό:

- Στην περίπτωση των μηχανών εσωτερικής καύσης ή Μ.Ε.Κ., το καύσιμο καίγεται με το κατάλληλο ποσοστό αέρα μέσα στον ίδιο τον κινητήρα και το εργαζόμενο μέσο είναι το ίδιο το καυσαέριο.

- Στους κινητήρες εξωτερικής καύσης, το καύσιμο καίγεται σε ιδιαίτερη συσκευή (π.χ. λέβητας), έξω από τον θερμοκινητήρα. Σε αυτήν την περίπτωση το εργαζόμενο μέσο είναι διαφορετικό από το καυσαέριο.

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανικό έργο, οι θερμοκινητήρες με καύσιμο διακρίνονται σε παλινδρομικούς (εμβολοφόροι) και περιστροφικούς (στρόβιλοι).

Στους εμβολοφόρους κινητήρες τα καυσαέρια που παράγονται από την καύση καυσίμου και αέρα δίνουν κίνηση σε έμβολα που είναι συνδεδεμένα με κατάλληλο μηχανισμό ώστε η παλινδρομική κίνηση που εκτελούν να μετατρέπεται σε περιστροφική. Με τον τρόπο αυτό περιστρέφεται ο έλικας του αεροσκάφους.

Οι περιστροφικοί κινητήρες έχουν μόνο περιστρεφόμενα μέρη και τέτοιοι είναι οι αεριοστρόβιλοι.

Οι κινητήρες Βάνκελ (Wankel) στηρίζουν τη λειτουργία τους σε περιστρεφόμενο «έμβολο».

2.1 Τύποι εμβολοφόρων κινητήρων

Οι εμβολοφόροι κινητήρες διακρίνονται ανάλογα με κατασκευαστικά και λειτουργικά κριτήρια. Έτσι, ξεχωρίζουμε τους ακόλουθους τύπους κινητήρων ανάλογα με:

1) τον τρόπο έναυσης:

- α) κινητήρες με σπινθηριστή (μπουζί) ή βενζινοκινητήρες ή κινητήρες Otto.
- β) κινητήρες με έναυση λόγω συμπίεσης ή πετρελαιοκινητήρες ή κινητήρες Diesel.

2) τον αριθμό των χρόνων λειτουργίας: α) δίχρονοι / β) τετράχρονοι.

3) τον τρόπο ψύξης των κυλίνδρων: α) υγρόψυκτοι / β) αερόψυκτοι.

4) τον αριθμό των κυλίνδρων: α) μονοκύλινδροι. / β) πολυκύλινδροι (δικύλινδροι, τετρακύλινδροι, κλπ).

5) τη διάταξη των κυλίνδρων:

- α) εν σειρά (μονοί ή δίδυμοι),
- β) ακτινικοί (radial) ή αστεροειδείς,
- γ) αντιτιθέμενων εμβόλων (opposed),
- δ) τύπου V ή W,
- ε) πολυγωνικού τύπου – στην περίπτωση που οι κύλινδροι διατάσσονται σε σχήμα τριγώνου, τετραγώνου, κλπ.),
- στ) διπλών εμβόλων,
- ζ) Βάνκελ (Wankel),

6) την ταχύτητα περιστροφής του άξονα:

- α) ολιγόστροφοι,

- β) μέσης ταχύτητας,
 - γ) ταχύστροφοι.
- 7) τη διαδικασία εισαγωγής του αέρα που θα αναμειχθεί με το καύσιμο:
- α) εισαγωγή και χρήση μόνο αέρα αναρροφούμενου απευθείας από την ατμόσφαιρα,
 - β) χρήση αέρα από υπερπλήρωση.

Κεφάλαιο 3^ο Αρχές αεριώθησης

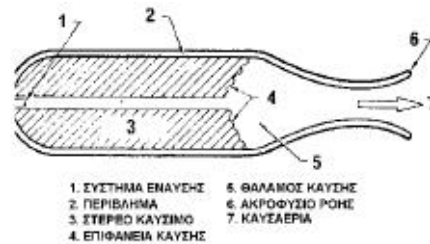
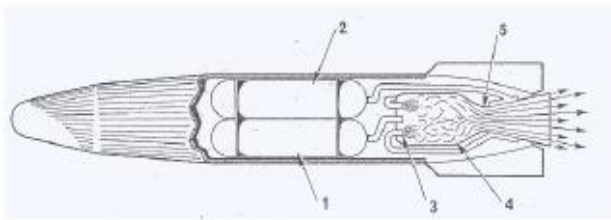
Ο κινητήρας αεριώθησης παράγει **προωθητική δύναμη (ώση, thrust)**, προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, εξαναγκάζοντας μία μάζα αερίου να κινηθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση. Εφαρμόζει, δηλαδή, τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, που αναφέραμε παραπάνω. Ως δράση θεωρούμε τη δύναμη που εξασκείται σε μία μάζα καυσαερίων προς το οπίσθιο τμήμα του κινητήρα του αεροσκάφους. Ως αντίδραση στην έξοδο της μάζας αυτής λαμβάνεται μία δύναμη (ώση) προς το εμπρόσθιο τμήμα του κινητήρα και του αεροσκάφους. Το μέγεθος της δύναμης αυτής εξαρτάται από την ποσότητα της μάζας αερίου (ή αέρα) που εισέρχεται στον κινητήρα και το βαθμό της επιτάχυνσης που θα αποκτήσουν τα εξερχόμενα αέρια.

3.1 Τύποι αεριώθησης – Τύποι αεριωθητών

Διάφορα είδη αεροπορικών κινητήρων αεριώθησης χρησιμοποιούν το νόμο «δράσης – αντίδρασης». Όλοι χρησιμοποιούν τον ίδιο τρόπο για την παραγωγή ώσης, επιταχύνουν μάζα αερίων στο εσωτερικό τους. Τα είδη αυτά είναι: ο **πύραυλος**, ο **αθόδυλος** ή **αυλωθητής**, ο **υπερηχητικός αθόδυλος**, ο **παλμικός αθόδυλος** ή **παλμοθητής**, ο **αεριοστρόβιλος**, ο **στροβιλο-αθόδυλος** και ο **πυραυλοστρόβιλος**. Όλα τα είδη, εκτός από τον πύραυλο, χρησιμοποιούν ατμοσφαιρικό αέρα για την καύση του καυσίμου. Τα καυσαέρια εξωθούνται στο οπίσθιο μέρος του κινητήρα. Ανάλογα με το είδος του κινητήρα, τμήμα της παραγόμενης ενέργειας χρησιμοποιείται για την περιστροφή στροβίλου που δίνει κίνηση σε έλικες, ανεμιστήρες ή άξονες.

3.2 Πύραυλος (rocket)

Ο πύραυλος δε χρησιμοποιεί ατμοσφαιρικό αέρα για την καύση. Μεταφέρει στο εσωτερικό του φιάλες οξυγόνου (ή άλλου οξειδωτικού μέσου), το οποίο αναμειγνύεται με το καύσιμο και παράγουν την απαιτούμενη ποσότητα καυσαερίων για την κίνησή του. Έτσι, έχει τη δυνατότητα να κινείται σε οποιοδήποτε ύψος, μέσα και έξω από την ατμόσφαιρα. Διακρίνουμε δύο τύπους πυραύλων: υγρών καυσίμων (Σχήμα 3.1) και στερεών καυσίμων (Σχήμα 3.2). Στον πρώτο τύπο, σύνηθες καύσιμο είναι η υδραζίνη (N_2H_4) και συνηθέστερο οξειδωτικό το υγρό οξυγόνο ή το νιτρικό οξύ (HNO_3).



Σχήμα 3.1 Πύραυλος υγρών καυσίμων

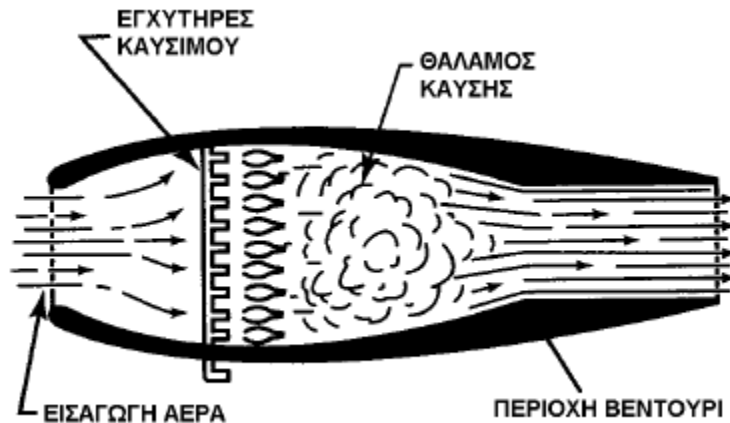
Σχήμα 3.2 Πύραυλος στερεών καυσίμων

Ο δεύτερος τύπος έχει αντικαταστήσει τον πύραυλο υγρών καυσίμων σε αρκετές εφαρμογές, όπως στην κίνηση βλημάτων, διαστημικών οχημάτων και στην παροχή περίσσειας ισχύος σε αεροσκάφη κατά την απογείωση. Συνήθως χρησιμοποιείται βαλιστίτης ως στερεό καύσιμο και είναι αναμειγμένος με το οξειδωτικό.

3.3 Αθόδυλος (ram jet)

Ο αθόδυλος (ram jet) ονομάζεται αλλιώς και **αερο-θερμοδυναμικός αυλός (aerothermodynamic duct)**. Αυτού του είδους οι κινητήρες χρησιμοποιούνται σε περίπτωση που το αεροσκάφος πρέπει να ξεπεράσει σε ταχύτητα τα 2 Mach (Mach = η ταχύτητα του ήχου). Αποτελεί τον απλούστερο κινητήρα αεριώθησης διότι δεν έχει κινητά μέρη (έλικες) που να αναλαμβάνουν την συμπίεση του εισερχόμενου αέρα. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται από την ίδια την κίνηση του αεροσκάφους, αφού σε υπερηχητικές ταχύτητες πτήσης ο αέρας εισέρχεται με τεράστια ορμή στον κινητήρα και "αυτοσυμπιέζεται". Ουσιαστικά αποτελείται από τους **ψεκαστήρες** και το **μετρητή καυσίμου**, τους **συγκρατητές της φλόγας (flame holders)**, τα οποία βρίσκονται μέσα σε σωλήνα με αποκλίνουσα εισαγωγή και αποκλίνουσα – συγκλίνουσα (ή απλή συγκλίνουσα) εξαγωγή (Σχήμα 3.3).

Η απουσία περιστρεφόμενου συμπιεστή δεν επιτρέπει την εισαγωγή επαρκούς ποσότητας αέρα στον αθόδυλο στις χαμηλές ταχύτητες. Πρέπει, έτσι, να κινηθεί με μεγάλη ταχύτητα προτού να είναι σε θέση να παράσχει ώση (ram effect). Όταν εισέλθει αέρας στον κινητήρα, εγχύεται καύσιμο και παράγονται τα απαιτούμενα καυσαέρια που επιταχύνονται και παράγουν ώση. Η ιδιομορφία αυτή του αθόδουλου επιβάλλει την τοποθέτησή του πάνω σε πύραυλο ή αεροσκάφος. Στη συνέχεια, υποβοηθά με την ώση που παράγει τον ίδιο το φορέα του ή αποσπάται από αυτόν και προωθεί άλλο σκάφος ή βαλλιστικό βλήμα, με τα οποία συνδέεται.



Σχήμα 3.3 Τα τμήματα του αθόδουλου

Ο αθόδουλος αποτελεί το αποδοτικότερο είδος κινητήρα σε ταχύτητες 3000 Km/h και άνω.

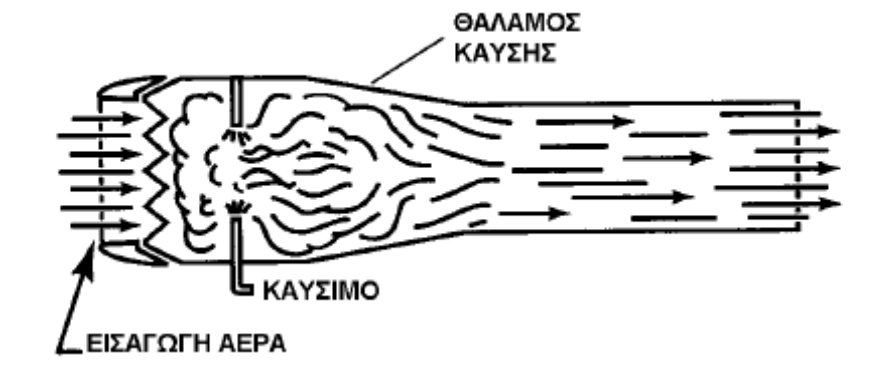
3.4 Υπερηχητικός αθόδουλος (Scram Jet)

Όπως είναι φυσικό, οι κινητήρες "ramjet" δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε μικρές ταχύτητες πτήσης και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως για την προώθηση πυραύλων, που αρχικά εκτοξεύονται με συμβατικές μεθόδους. Παρόλο που ο συγκεκριμένος τύπος κινητήρα αρκεί για να επιτύχει ταχύτητες έως και 4 Mach, από εκεί και πέρα η απόδοσή του μειώνεται δραματικά. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αέρας που διέρχεται μέσα από τον κινητήρα θα πρέπει να επιβραδυνθεί σε υποχηχητικές ταχύτητες μέσω κατάλληλων διατάξεων, έτσι ώστε η ανάφλεξη του μίγματος με καύσιμο που ακολουθεί να είναι αποδοτική. Λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα δίνουν οι κινητήρες "scramjet" ("supersonic combustion ramjet"), όπου η ταχύτητα του αέρα μέσα στον κινητήρα παραμένει υπερηχητική. Παρόλο που η σχεδίαση αυτή υπόσχεται ταχύτητες έως και 10 Mach, ο έλεγχος του μίγματος αέρα και καυσίμου υπό αυτές τις συνθήκες είναι εξαιρετικά δύσκολος και αποτελεί μία πραγματική μηχανολογική πρόκληση. Οι κινητήρες "scramjet" είναι σημαντικά ελαφρύτεροι σε σχέση με τους συμβατικούς,

ενώ το μεγαλύτερο μέρος του προωστικού υλικού, με τη μορφή οξυγόνου, προέρχεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Το οξυγόνο αυτό εισέρχεται στον κινητήρα, συμπιέζεται και αναμιγνύεται κατάλληλα με μικρή ποσότητα υδρογόνου. Η διαδικασία αυτή αποδεικνύεται αποδοτική μόνο στην περίπτωση που το αεροσκάφος κινείται με ταχύτητα που υπερβαίνει τα 5 Mach, γεγονός που σημαίνει ότι θα πρέπει κάποιος άλλος κινητήρας να αναλάβει την πρόωσή του μέχρι την ταχύτητα αυτή.

3.5 Παλμικός αθόδυλος (Pulse jet)

Ο παλμικός αθόδυλος διαφέρει από τον αθόδυλο μόνο στην κατασκευή της εισαγωγής του αέρα. Εκεί, τοποθετούνται **βαλβίδες εισαγωγής** που διατηρούνται στην ανοικτή θέση με **ελατήρια** (Σχήμα 3.4). Έτσι, διέρχεται αέρας όπου αναμειγνύεται με το καύσιμο και το μείγμα καίγεται στο **θάλαμο καύσης**. Τα παραγόμενα καυσαέρια εκτονώνονται και εξαναγκάζουν τις βαλβίδες εισαγωγής να κλείσουν, οπότε και τα καυσαέρια επιταχύνονται προς την εξαγωγή. Τότε παράγουν την απαιτούμενη ώση. Τα ελατήρια ανοίγουν ξανά τις βαλβίδες εισαγωγής και ο κύκλος λειτουργίας επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 3.4 Τα τμήματα του παλμικού αθόδουλου

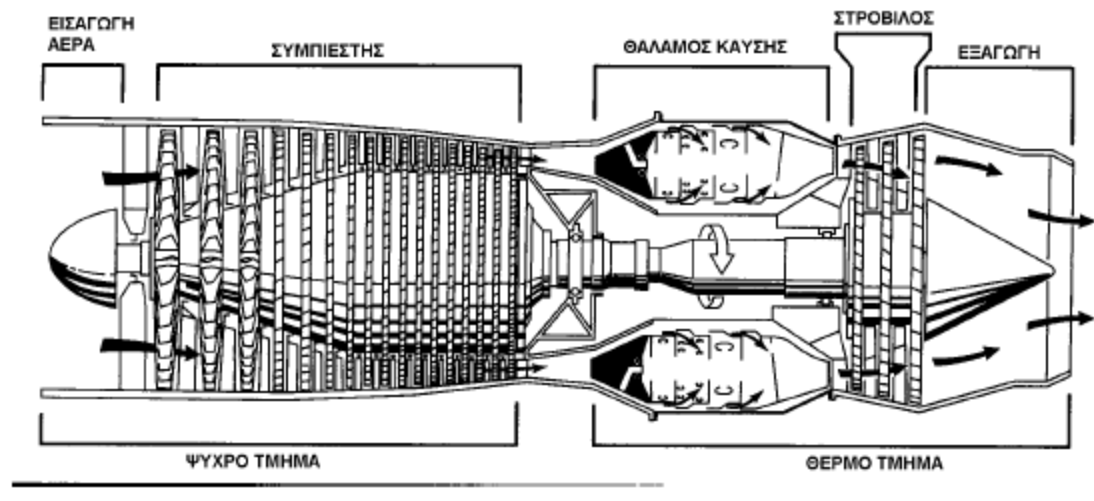
Σε αντίθεση με τον αθόδυλο όπου η παροχή ισχύος είναι συνεχής, στον παλμικό αθόδυλο είναι διακεκομμένη. Ο κινητήρας αυτός είναι θορυβώδης και

έχει μικρή απόδοση, όμως μπορεί να λειτουργήσει από την ακινησία. Χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία από τη γερμανική αεροπορία κατά το 2^ο Παγκόσμιο πόλεμο με την ονομασία «ιπτάμενη βόμβα». Βρίσκει κάποιες εφαρμογές στην περιστροφή πτερυγίων ελικοπτέρων.

Κεφάλαιο 4^ο Ο αεριοστρόβιλος κινητήρας - Gas Turbine Engine

4.1 Βασικές αρχές αεριοστρόβιλου

Ο αεριοστρόβιλος θεωρείται ως ο πιο αποτελεσματικός κινητήρας αεριώθησης που βρίσκεται σε χρήση στην εποχή μας. Χρησιμοποιείται σε αεροσκάφη επιβατικά, εμπορικά και στρατιωτικά. Συνήθως, στα επιβατικά και εμπορικά αεροσκάφη οι κινητήρες τοποθετούνται εξωτερικά της ατράκτου, ενώ στα στρατιωτικά, στο εσωτερικό της ατράκτου. Τα βασικά του μέρη είναι ο **συμπιεστής**, ο **θάλαμος κάυσης**, ο **στρόβιλος** και το **σύστημα εξαγωγής**, ενδεχομένως σε συνδυασμό με μετακαυστήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 .



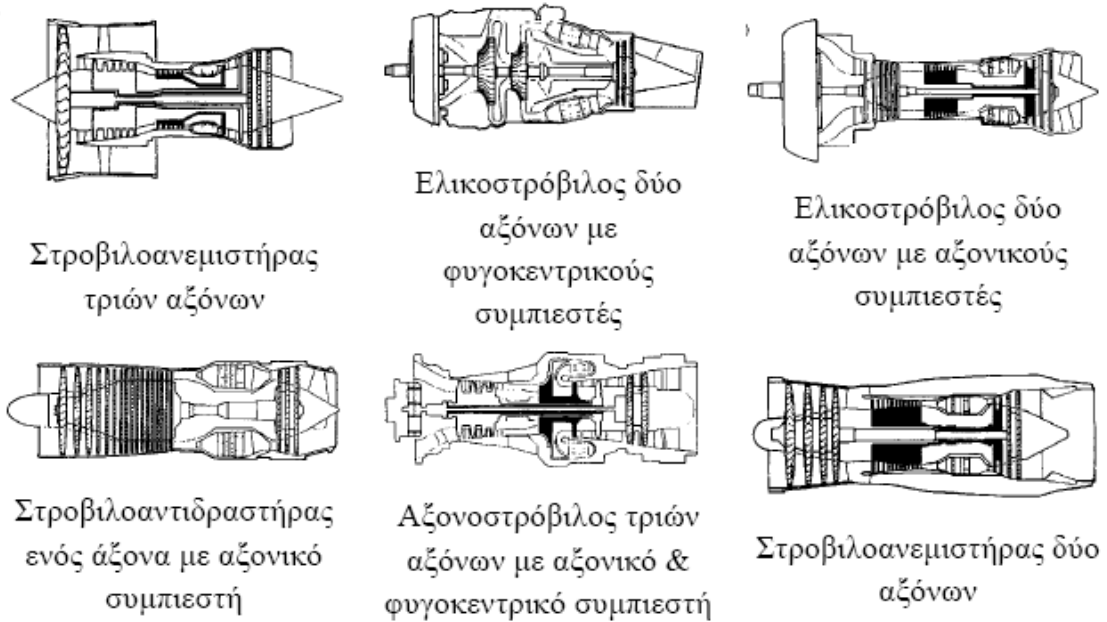
Σχήμα 4.1 Τα βασικά μέρη του αεριοστρόβιλου

Γενικά, ο συμπιεστής αποτελεί το **ψυχρό τμήμα** του κινητήρα και ο θάλαμος καύσης με το στρόβιλο, το **θερμό τμήμα**. Μία μάζα αέρα οδηγείται από το τμήμα εισαγωγής στο συμπιεστή. Εκεί συμπιέζεται και οδηγείται στο θάλαμο καύσης. Αναμιγνύεται με εγχυόμενο καύσιμο και επιτυγχάνεται καύση. Τα παραγόμενα θερμά καυσαέρια εκτονώνονται 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. Η διαφορά αυτή μεταξύ των δύο ταχυτήτων προκαλεί την παραγόμενη ώση.

Ανάλογα με τον τύπο του αεριοστρόβιλου, όπως θα δούμε στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται **περισσότεροι από ένας στρόβιλοι**. **Ο καθένας συνδέεται με τον αντίστοιχο συμπιεστή μέσω ξεχωριστού άξονα**. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δύο ή τρεις συμπιεστές και στρόβιλοι, αυτοί συνδέονται με συγκεντρικούς άξονες. Οι αεριοστρόβιλοι δηλαδή μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, ανάλογα με τον αριθμό των αξόνων τους, σε: **αεριοστρόβιλους απλού, διπλού και τριπλού άξονα ή τυμπάνου**. Στον αεριοστρόβιλο, η παραγωγή ισχύος είναι ανάλογη του ποσού της θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση. Η θερμότητα αυτή δε μπορεί να μετρηθεί αλλά υπολογίζεται από τρεις άλλες, γνωστές παραμέτρους: τη θερμοκρασία, τη μάζα (ή το βάρος) και την ειδική θερμότητα. Η διαφορά του ρόλου της θερμότητας και της θερμοκρασίας στη λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου φαίνεται από το ακόλουθο παράδειγμα: υποθέστε τη λειτουργία δύο αεριοστρόβιλων από τους οποίους ο ένας καταναλώνει τη δεκαπλάσια ποσότητα καυσίμου από τον άλλον. Και οι δύο κινητήρες λειτουργούν με την ίδια θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο.

Όμως, ο μεγαλύτερος κινητήρας είναι σε θέση να αποδώσει περίπου δέκα φορές μεγαλύτερη ισχύ από το μικρότερο. Και αυτό διότι σε αυτόν εκλύεται δέκα φορές μεγαλύτερο ποσό θερμότητας από ότι στο μικρότερο, ενώ λειτουργούν στην ίδια θερμοκρασία. Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας καύσης οδηγεί σε μεγαλύτερη εκτόνωση των καυσαερίων. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας ώσης. Όμως, παρουσιάζεται ο περιορισμός της αντοχής των υλικών κατασκευής του θαλάμου καύσης και του στρόβιλου.

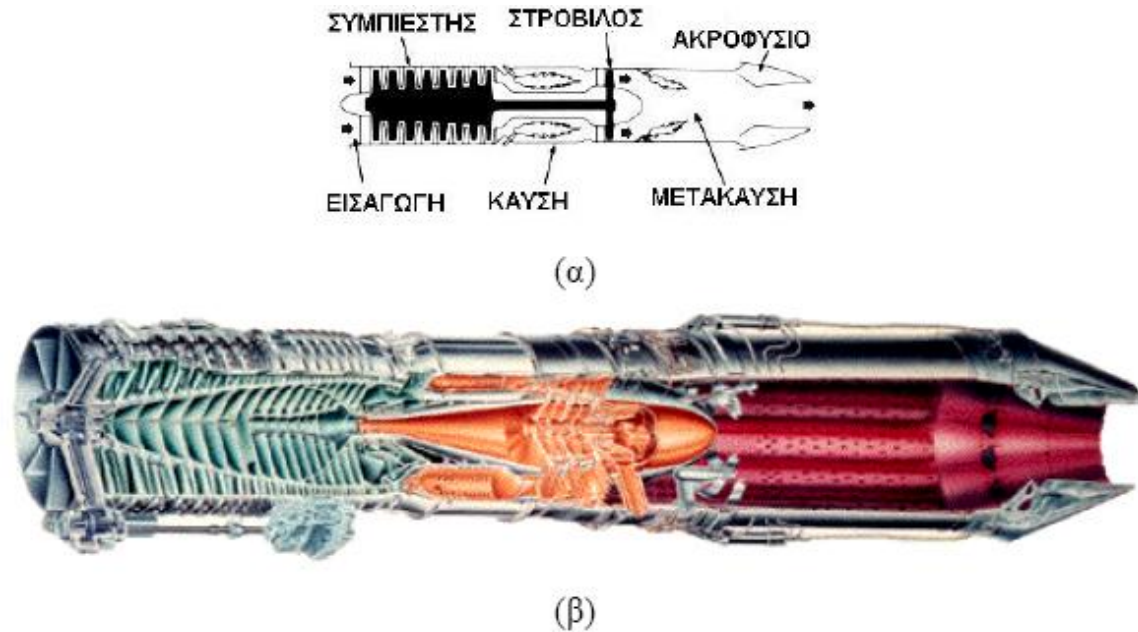


Σχήμα 4.2 Διάφοροι τύποι αεριοστροβίλων

4.2 Οι τύποι του αεριοστροβίλου

Ο αεριοστροβίλος 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. Στο Σχήμα 4.2 διακρίνονται αεριοστροβίλοι με διαφορετικές διατάξεις των βασικών τους μερών. Όλοι οι άλλοι τύποι κινητήρων προέκυψαν από τροποποιήσεις του στροβιλοκινητήρα απλής ροής, που έχει δομικά και την απλούστερη κατασκευή. Αυτός ήταν ο πρώτος που χρησιμοποιήθηκε, στα χρόνια του Β΄ Παγκόσμιου πολέμου και παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση στις μεγάλες ταχύτητες και τα μεγάλα ύψη.

4.3 Στροβιλοαντιδραστήρας (turbojet engine)



Σχήμα 4.3 (α) Τα βασικά μέρη ενός στροβιλοαντιδραστήρα, (β) Ο στροβιλοαντιδραστήρας GE J79

Ο στροβιλοαντιδραστήρας (Σχήμα 4.3) αποτελεί την απλούστερη μορφή αεριοστροβίλου 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 στροβιλοαντιδραστήρα είναι ο **λόγος συμπίεσης ή λόγος πίεσης μηχανής (engine pressure ratio – EPR).**

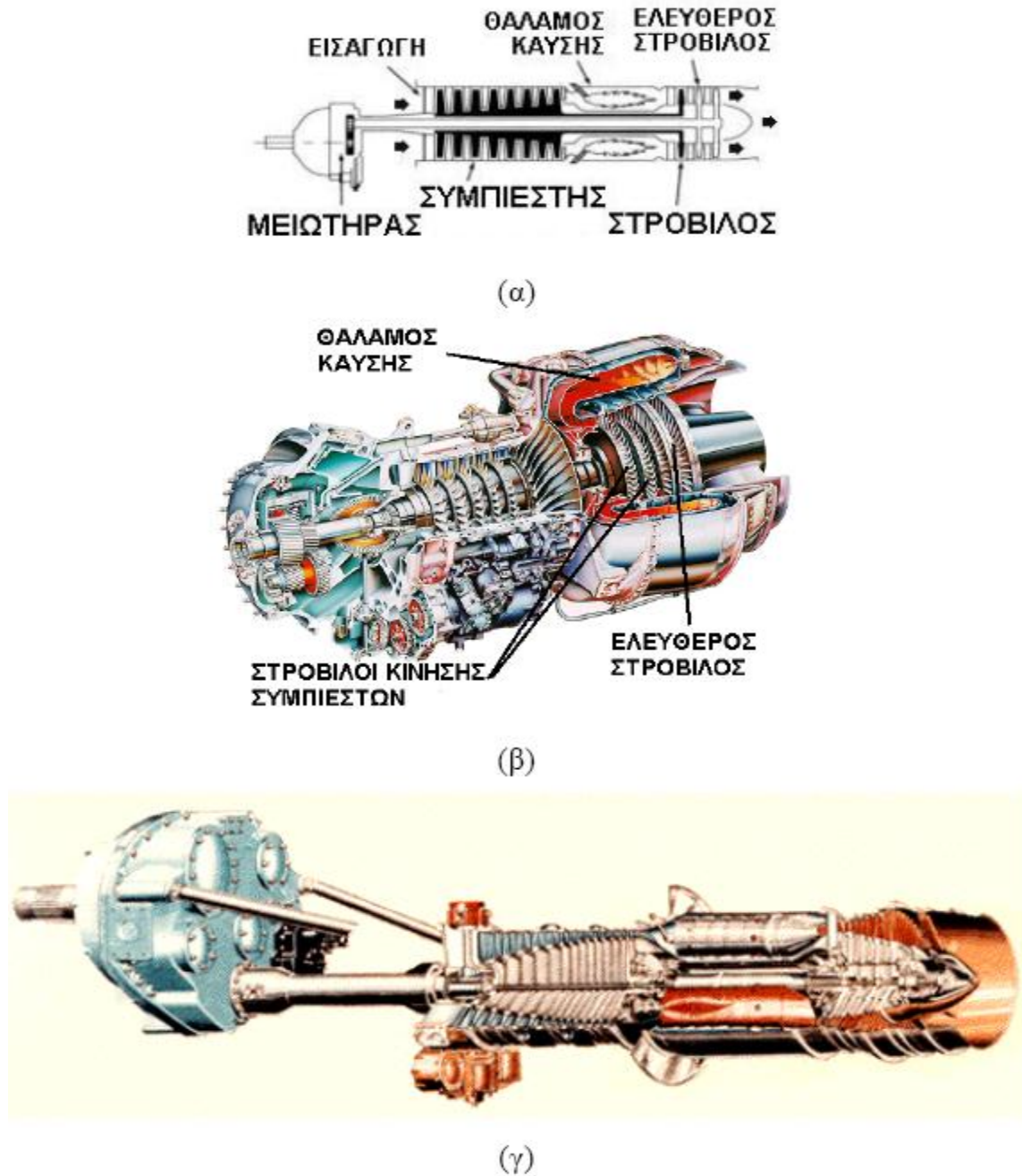
Το μέγεθος αυτό αποτελεί το λόγο της πίεσης εξαγωγής των καυσαερίων από το στρόβιλο προς την πίεση του εισερχόμενου αέρα στον κινητήρα. **Η τιμή του EPR αποτελεί ένδειξη της παραγόμενης ώσης για μία συγκεκριμένη παροχή ισχύος.** Ένα σχετικό μειονέκτημα του στροβιλοαντιδραστήρα είναι ότι στις χαμηλές ταχύτητες πτήσης η παραγόμενη ώση είναι αναλογικά μικρή. Ο λόγος είναι ότι απαιτείται ικανοποιητική πίεση εισαγωγής αέρα (ram effect) στο

συμπιεστή και τελικά, ταχύτητα. Για το λόγο αυτό **ένας στροβιλοαντιδραστήρας χρειάζεται μεγάλο διάδρομο απογείωσης** ώστε να αυξηθεί ικανοποιητικά η πίεση εισαγωγής και συνεπώς, η ώση κατά την απογείωση του αεροσκάφους. Επίσης, η αυξημένη κατανάλωση καυσίμου αποτελεί ένα χαρακτηριστικό μειονέκτημα του στροβιλοαντιδραστήρα. Τέλος, συγκριτικά με έναν ελικοφόρο κινητήρα, ο στροβιλοαντιδραστήρας επιτυγχάνει μικρότερη απόδοση σε ταχύτητες πτήσης κάτω των 750km/h.

Καθώς η απόδοση του έλικα που συνεργάζεται με τον ελικοφόρο κινητήρα μειώνεται σε ταχύτητες πτήσης άνω των 550km/h, αναπτύχθηκαν νέοι τύποι αεριοστροβίλων για την πιο αποτελεσματική λειτουργία σε αυτό το εύρος των ταχυτήτων πτήσης.

4.4 Ελικοστρόβιλος (turboprop engine)

Ο κινητήρας αυτός (Σχήμα 4.4) έχει ευρεία εφαρμογή. Ουσιαστικά, είναι όμοιος με το στροβιλοαντιδραστήρα με τη διαφορά ότι **χρησιμοποιείται ένα σύστημα γρاناζιών ως μειωτήρας στροφών για τη μετάδοση κίνησης σε έναν έλικα**. Στον ελικοστρόβιλο, **σχεδόν όλη η ενέργεια των καυσαερίων χρησιμοποιείται για την κίνηση του έλικα**. Για το λόγο αυτό, η προσφερόμενη από τα καυσαέρια ώση είναι πολύ μικρή. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια των καυσαερίων ενός ελικοστροβίλου 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.



Σχήμα 4.4 (α) Τα βασικά μέρη του ελικοστρόβιλου, (β) ο ελικοστρόβιλος T-53, (γ) ο ελικοστρόβιλος T-56

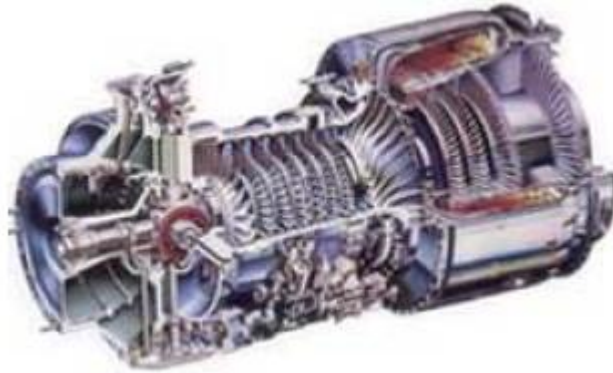
Σε ορισμένους ελικοστρόβιλους χρησιμοποιείται ξεχωριστός στρόβιλος για την κίνηση του έλικα. Αυτός ονομάζεται **ελεύθερος στρόβιλος (free turbine** ή

power turbine) και είναι συνδεδεμένος με ξεχωριστό άξονα με το μειωτήρα στροφών (Σχήμα 4.4 (α, β)). Τα άλλα μέρη του κινητήρα (συμπιεστής, θάλαμος καύσης και **στρόβιλος καυσαερίων - gas turbine)** λειτουργούν για να παρέχουν καυσαέρια με υψηλή ενέργεια για την περιστροφή του ελεύθερου στροβίλου. 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 4.4 (γ)).

Το μεγάλο **πλεονέκτημα του ελικοστρόβιλου κινητήρα** είναι ότι επιτυγχάνει την **καλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου** συγκριτικά με οποιονδήποτε αεριοστρόβιλο κινητήρα άλλου τύπου. Η συμβολή του έλικα επιτρέπει την επιτάχυνση μεγάλων μαζών αέρα σε μικρές, σχετικά, ταχύτητες. Η παραγόμενη ώση είναι μεγάλη και το αεροσκάφος έχει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά στην απογείωση (μικρός διάδρομος) και στην άνοδο. Επιπλέον, η απόδοση του είναι ικανοποιητική ακόμη και σε σχετικά μεγάλα ύψη πτήσεων (6.000 m). Τα παραπάνω πλεονεκτήματα μειώνονται όταν αυξάνεται η ταχύτητα (άνω των 650km/h) και το ύψος της πτήσης (άνω των 7.000 m). Ακόμη, ένα μειονέκτημα του ελικοστρόβιλου κινητήρα είναι η πολυπλοκότητα της κατασκευής του που, κάποιες φορές, επιφέρει προβλήματα και στη συντήρησή του. Τέλος, το βάρος του είναι μεγαλύτερο από ένα στροβιλοαντιδραστήρα με ανάλογη ώση.

4.5 Αξονοστρόβιλος (turboshaft engine)

Αυτός ο τύπος αεριοστρόβιλου (Σχήμα 4.5) παρέχει ισχύ σχεδόν αποκλειστικά στον άξονά του ενώ ελάχιστη είναι η παραγωγή ώσης.

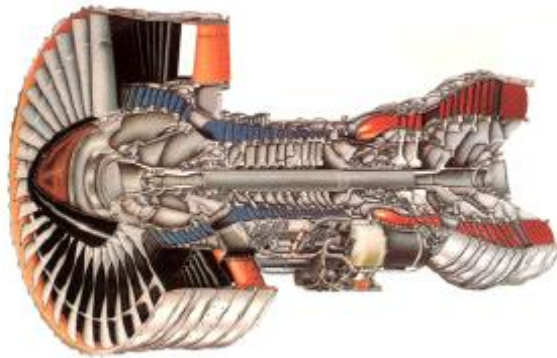


Σχήμα 4.5 Τομή αξονοστρόβιλου κινητήρα

Όπως εύκολα καταλαβαίνει κάποιος, 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 στροβίλου.

4.6 Στροβιλοανεμιστήρας (turbofan engine)

Η παραλλαγή αυτή του στροβιλοαντιδραστήρα (φαίνεται σε τομή στο Σχήμα 4.6) αποτελεί μία από τις σπουδαιότερες τεχνικές εξελίξεις του αεριοστρόβιλου. Ο κινητήρας αυτός **συνδυάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του στροβιλοαντιδραστήρα και ελικοστρόβιλου.**

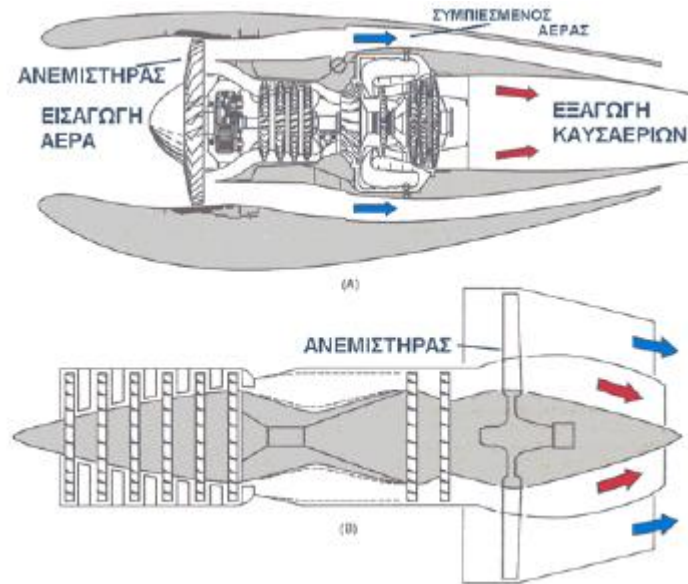


Σχήμα 4.6 Τυπικός στροβιλοανεμιστήρας σε τομή

Ο στροβιλοανεμιστήρας **επιταχύνει μικρότερη μάζα αέρα από τον ελικοστρόβιλο αλλά μεγαλύτερη από το στροβιλοαντιδραστήρα.** Αναπτύσσει **μεγάλες ταχύτητες πτήσης** και σε **μεγάλα ύψη** (όπως ο στροβιλοαντιδραστήρας) ενώ, παράλληλα, **δεν απαιτεί** μεγάλο διάδρομο για την απογείωση (όπως και ο ελικοστρόβιλος). Επιπρόσθετα, ο περιορισμός της ταχύτητας πτήσης του ελικοστρόβιλου σε τιμές 550 έως 650km/h δεν ισχύει. Τα πτερύγια του ανεμιστήρα σε αυτήν την περίπτωση είναι σχεδιασμένα με τρόπο τέτοιο ώστε να μην επηρεάζονται ιδιαίτερα από την ταχύτητα του αεροσκάφους. Σημαντικά πλεονεκτήματα, επίσης, θεωρούνται η αυξημένη παροχή ισχύος ανά μονάδα βάρους, η καλή ειδική κατανάλωση καυσίμου και μειωμένος θόρυβος κατά την απογείωση και την προσγείωση.

Ουσιαστικά, ο στροβιλοανεμιστήρας είναι ένας ελικοστρόβιλος με τον έλικα – δηλαδή τον ανεμιστήρα (fan) – μέσα στον κινητήρα. Ο ανεμιστήρας

βρίσκεται στο μπροστινό (Σχήμα 4.7α) ή στο οπίσθιο τμήμα του κινητήρα (Σχήμα 4.7β).



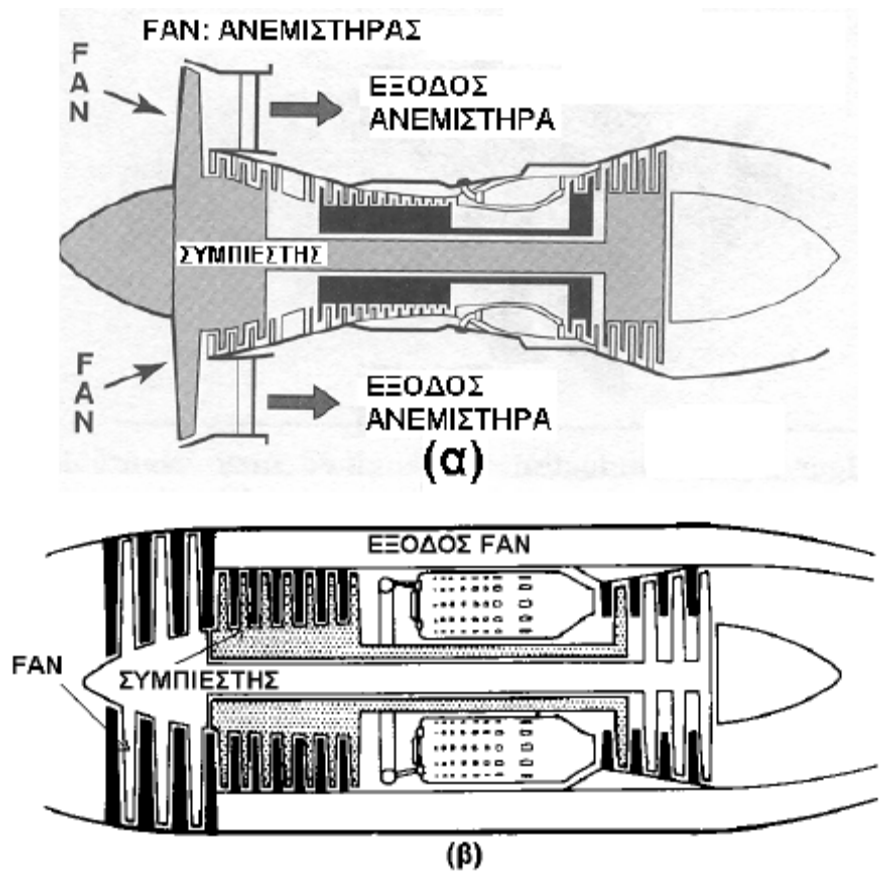
Σχήμα 4.7 Θέσεις του ανεμιστήρα στο στροβιλοανεμιστήρα

Η ροή του αέρα εισαγωγής διασπάται σε δύο ρεύματα: το θερμό και το ψυχρό. Το πρώτο ρεύμα διέρχεται μέσα από τον κινητήρα, κατά τα γνωστά. 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 στροβιλοανεμιστήρα. Οι τιμές του κυμαίνονται από 2:1 έως 10:1. Ανάλογα με τις τιμές του λόγου, ένας στροβιλοανεμιστήρας χαρακτηρίζεται ως υψηλού ή χαμηλού λόγου παράκαμψης. Χαρακτηριστικά δείγματα φαίνονται στο Σχήμα 4.8 (α) και (β), αντίστοιχα.

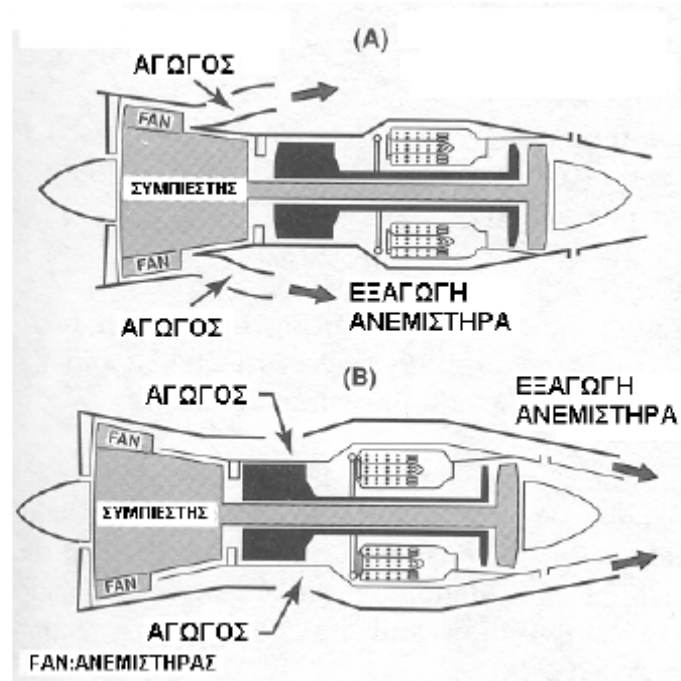
Η έξοδος του αέρα παράκαμψης πραγματοποιείται από **ειδικό αγωγό (duct)** που βρίσκεται περιφερειακά του κύριου σώματος του κινητήρα. Το μήκος

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 4.9).

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



Σχήμα 4.8 Στροβιλοανεμιστήρας (α) υψηλού και (β) χαμηλού λόγου παράκαμψης



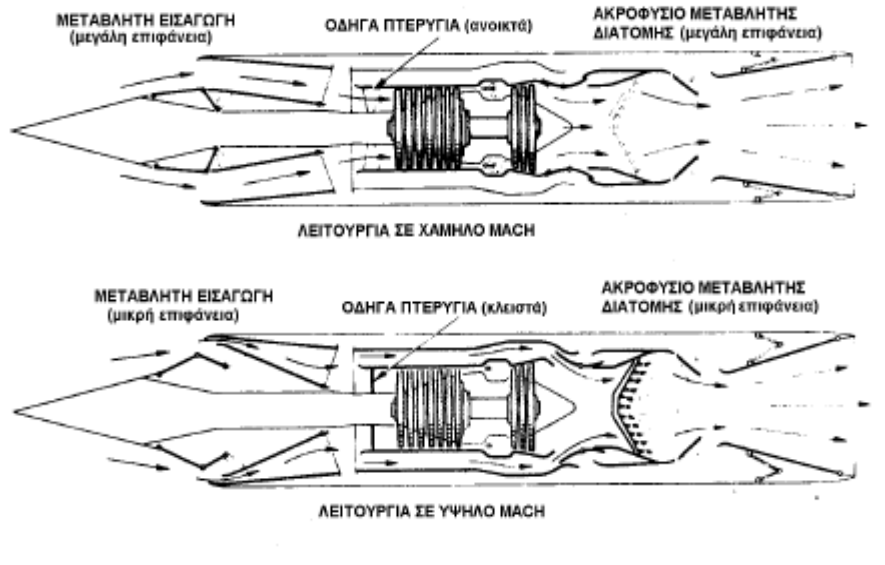
Σχήμα 4.9 Έξοδος αέρα παράκαμψης από αγωγό (A) μικρού και (B) μεγάλου μήκους

Στις μέρες μας οι στροβιλοανεμιστήρες θεωρούνται ως οι **πιο αξιόλογοι** τύποι κινητήρων αεριώθησης για **μεγάλα αεροσκάφη**.

4.7 Στροβιλο-αθόδυλος (turbo ramjet)

Αποτελεί συνδυασμό του στροβιλοαντιδραστήρα και του αθόδουλου. Ο κινητήρας διαθέτει **αγωγό μεταβλητού ανοίγματος εισαγωγής, μετακαυστήρα και ακροφύσιο μεταβλητής διατομής**, εκτός από τη διάταξη του στροβιλοαντιδραστήρα (Σχήμα 4.10). Κατά την απογείωση και την προσγείωση ο κινητήρας λειτουργεί ως στροβιλοαντιδραστήρας με μετακαυστήρα. Σε ταχύτητες έως και τριπλάσιες της ταχύτητας του ήχου (Mach 3), όπου ο στροβιλοαντιδραστήρας έχει καλή απόδοση, ο στροβιλοαντιδραστήρας λειτουργεί χωρίς τη βοήθεια του μετακαυστήρα.

Όταν η ταχύτητα υπερβεί το Mach 3, ο στροβιλοαντιδραστήρας σταματά να λειτουργεί, η ροή του αέρα κατευθύνεται στο μετακαυστήρα και η λειτουργία του κινητήρα είναι αυτή του αθόδουλου.



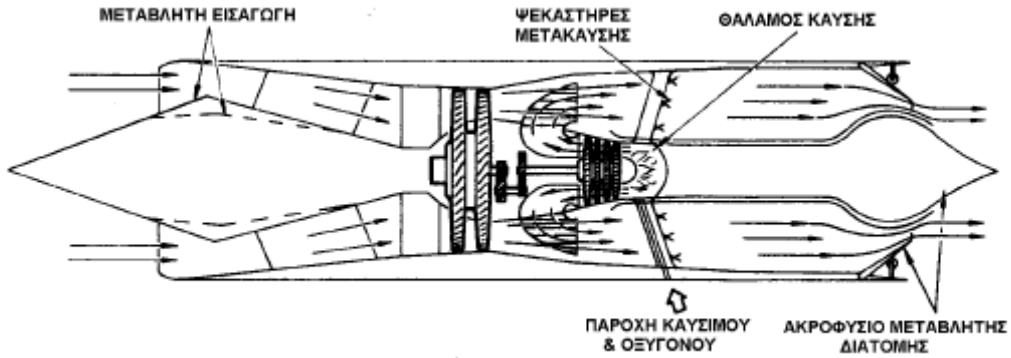
Σχήμα 4.10 Ο στροβιλο-αθόδουλος

4.8 Πυραυλοστρόβιλος (turborocket)

Αποτελεί εναλλακτική λύση του στροβιλο-αθόδουλου. Μεταφέρει υγρό οξυγόνο σε φιάλες για την καύση, οπότε και δε χρησιμοποιεί ατμοσφαιρικό αέρα. Ο κινητήρας αποτελείται από έναν **πολυβάθμιο στρόβιλο** ο οποίος δίνει κίνηση σε ένα **συμπιεστή χαμηλής πίεσης** (Σχήμα 4.11). Ο στρόβιλος κινείται από τα καυσαέρια της καύσης κηροζίνης και υγρού οξυγόνου σε **θάλαμο καύσης** όπως στους πυραύλους. **Βασικό πλεονέκτημα του πυραυλοστρόβιλου είναι ο μικρός όγκος και το μικρό του βάρος.**

Παρουσιάζει, όμως, ιδιαίτερα υψηλή ειδική κατανάλωση καυσίμου. Χρησιμοποιείται όταν απαιτείται πτήση μικρής διάρκειας σε πολύ μεγάλα ύψη

(έως 30.000 m) ώστε να μην απαιτηθεί κατανάλωση τεράστιας ποσότητας προωθητικής ύλης, όπως στους πυραύλους.



Σχήμα 4.11 Ο πυραυλο-στρόβιλος

Κεφάλαιο 5^ο

Χαρακτηριστικά κινητήρων αεριώθησης

5.1 Σχεδίαση, κατασκευή, υλικά κατασκευής

Η σχεδίαση – μελέτη και κατασκευή ενός κινητήρα αεριώθησης είναι χρονοβόρα. Με την προσθήκη της κατασκευής και της δοκιμής του πρότυπου κινητήρα, ο συνολικός χρόνος ανάπτυξης του ως προϊόν μπορεί να φτάσει τα δέκα χρόνια. Ας ληφθεί, επίσης, υπόψη ότι ακόμη και μετά τη έναρξη της λειτουργίας του νέου κινητήρα στο αεροσκάφος, οι επιδόσεις και, γενικά, η λειτουργία του παρακολουθούνται. Με τον τρόπο αυτόν, εξασφαλίζεται ο εντοπισμός και η βελτίωση πιθανών αδύνατων λειτουργικών χαρακτηριστικών. Σε αυτήν τη διαδικασία, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει το γεγονός ότι η σχεδίαση του νέου κινητήρα έχει βασιστεί σε πολύ μεγάλο βαθμό σε προγενέστερο κινητήρα (ίδια οικογένεια κινητήρων, όπως συνηθίζεται να λέγεται).

Οι κινητήρες της ίδιας οικογένειας έχουν την ίδια βασική σχεδίαση, οπότε και οι τεχνικοί υπεύθυνοι γνωρίζουν σε ποιους λειτουργικούς παράγοντες πρέπει να δώσουν ιδιαίτερη προσοχή κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του κινητήρα ως έτοιμου προϊόντος.

Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του κινητήρα αεριώθησης συναντώνται τεχνικά θέματα αεροδυναμικής, θερμοδυναμικής και γενικής μηχανολογικής φύσεως. Μερικά από αυτά είναι:

- οι **συνθήκες ροής** του αέρα και των καυσαερίων κατά την πτήση,
- οι **υψηλοί βαθμοί συμπίεσης** στις βαθμίδες των συμπιεστών,
- οι **υψηλές θερμοκρασίες** που επιφέρουν απαιτήσεις βέλτιστων μεθόδων απαγωγής θερμότητας και επιλογής κατάλληλων υλικών κατασκευής,
- **καταπονήσεις των μερών του κινητήρα** από αεροδυναμικές και φυγοκεντρικές δυνάμεις,
- **υψηλές ταχύτητες περιστροφής και ταχύτητες ροής αερίων** που απαιτούν βέλτιστες κατασκευαστικές ανοχές,

• **υψηλός βαθμός αξιοπιστίας** των επιμέρους τμημάτων του κινητήρα. Κάθε ένα από τα τμήματα του κινητήρα ελέγχεται, μετά την κατασκευή του, ξεχωριστά και, στη συνέχεια, ως μέρος του κινητήρα. Οι δοκιμές επί του εδάφους πραγματοποιούνται σε **δοκιμαστήρια (test cells)**. Αυτά διαθέτουν τον απαραίτητο εξοπλισμό για τη λειτουργία του κινητήρα σε συνθήκες όμοιες με αυτές που επικρατούν κατά τη διάρκεια της πτήσης ενός αεροσκάφους. Εκεί, πραγματοποιούνται οι μετρήσεις όλων των λειτουργικών μεγεθών που κρίνονται απαραίτητα για την καλή λειτουργία του κινητήρα στο αεροσκάφος. Η δοκιμή του κινητήρα επί του αεροσκάφους ακολουθεί τον επιτυχή έλεγχο στο δοκιμαστήριο. Σε κάθε δοκιμή καταγράφονται όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και οι τυχόν παρατηρήσεις, σε ειδικό βιβλίο για κάθε έναν κινητήρα ξεχωριστά.

Για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης ενός κινητήρα αεριώθησης κάτω από τις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας του παρουσιάστηκε η ανάγκη χρησιμοποίησης υλικών ιδιαίτερα ανθεκτικών σε αυτές. Τα υλικά αυτά απαιτείται να έχουν υψηλή αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, να έχουν υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος και να επιδεικνύουν ιδιαίτερη αντοχή στην οξειδωση και τα διάφορα είδη διάβρωσης. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από χάλυβες οι οποίοι υπόκεινται σε συγκεκριμένες διεργασίες ώστε να βελτιώνονται κάποια χαρακτηριστικά τους. Επίσης, έχουν δημιουργηθεί κράματα χαλύβων με συγκεκριμένα στοιχεία τα οποία προσδίδουν στο χάλυβα τις ιδιότητες εκείνες που απαιτούνται για τη βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά τους κατά τη λειτουργία ενός κινητήρα αεριώθησης. Τα στοιχεία αυτά είναι ο χαλκός, το χρώμιο, το νικέλιο, το κοβάλτιο, το μαγνήσιο, το μολυβδένιο και το βολφράμιο. Ακόμη, χρησιμοποιούνται για τον ίδιο λόγο και μη σιδηρούχα υλικά, σε αντικατάσταση των παραπάνω κραμάτων. Αυτά είναι ιδιαίτερα ελαφρά και οικονομικά. Τέτοια είναι το αλουμίνιο και διάφορα σύνθετα υλικά. Οι συνεχώς βελτιωμένες τεχνικές σχεδίασης και κατασκευής των κινητήρων αεριώθησης, καθώς και η χρήση όλο και πιο ανθεκτικών υλικών σε αυτούς, διευρύνει τις προοπτικές της χρήσης τους. Οι προσπάθειες εστιάζονται σε τομείς όπως:

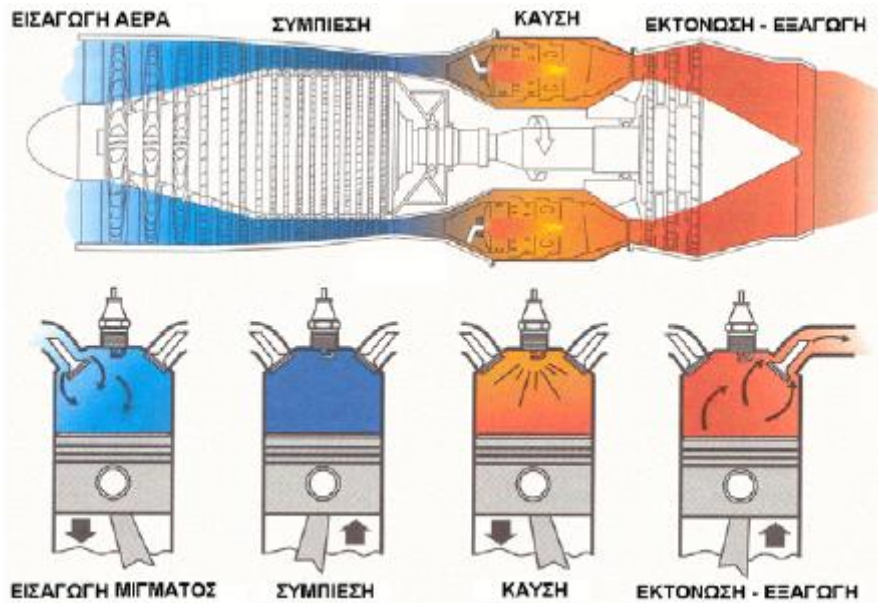
• η **βελτίωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου** και του **λόγου παραγόμενης ώσης προς βάρος**,

- η **αύξηση της παραγόμενης ώσης, του λόγου συμπίεσης και της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης** (με παράλληλη χρήση πιο ανθεκτικών υλικών κατασκευής του θαλάμου καύσης και του στροβίλου),
- η **μείωση της στάθμης θορύβου λειτουργίας και των εκπομπών καυσαερίων** στην ατμόσφαιρα.

5.2 Κύκλος λειτουργίας αεριοστροβίλων

Ο αεριοστροβίλος κινητήρας παρουσιάζει λειτουργικές ομοιότητες με τον εμβολοφόρο. Όπως είδαμε και παραπάνω, και οι δύο τύποι κινητήρων στηρίζουν τη λειτουργία τους στην επιτάχυνση προς τα πίσω μίας μάζας αέρα. Ο έλικας του εμβολοφόρου κινητήρα προσδίδει μία μικρή επιτάχυνση σε μία μεγάλη μάζα αέρα. Αντίθετα, ο αεριοστροβίλος κινητήρας προσδίδει μεγάλη επιτάχυνση σε μία μικρή μάζα αέρα. Η κίνηση του αεροσκάφους με τη χρήση εμβολοφόρου κινητήρα επιτυγχάνεται από τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων σε μηχανική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την περιστροφή του έλικα. Από την άλλη πλευρά, ο αεριοστροβίλος κινητήρας παράγει την προωθητική δύναμη και τη χρησιμοποιεί κατευθείαν.

Οι φάσεις λειτουργίας είναι οι ίδιες: εισαγωγή, συμπίεση, καύση, εκτόνωση-εξαγωγή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Σύγκριση φάσεων λειτουργίας αεριοστρόβιλου και εμβολοφόρου κινητήρα

Η σημαντική διαφορά είναι ότι στον εμβολοφόρο κινητήρα οι φάσεις πραγματοποιούνται διαδοχικά, η μία μετά την άλλη, επειδή το έμβολο συμμετέχει σε όλες. Αντίθετα, στον αεριοστρόβιλο, οι ίδιες φάσεις λειτουργίας πραγματοποιούνται ταυτόχρονα και συνεχώς, από ένα εξάρτημα αποκλειστικά η κάθε μία. Με τον τρόπο αυτόν, ο αεριοστρόβιλος επιτυγχάνει ομαλή λειτουργία και συνεχή παραγωγή ισχύος.

5.2.1 Θεωρητικός κύκλος λειτουργίας

Ο κύκλος λειτουργίας του αεριοστρόβιλου κινητήρα στηρίζεται στο **θερμοδυναμικό κύκλο του Μπράιτον (Brayton)**. 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:

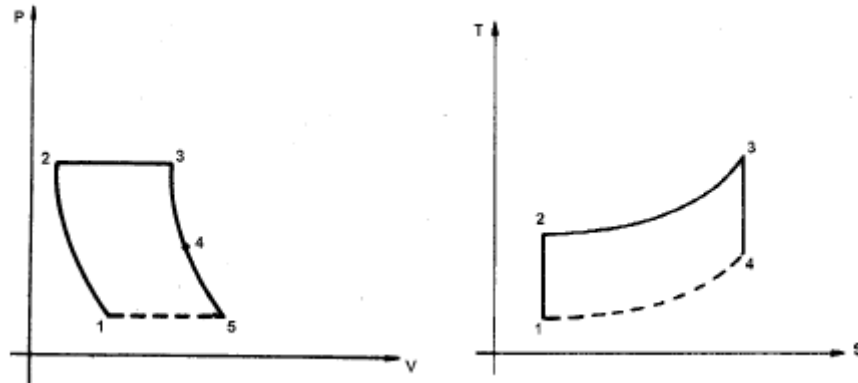
- Οι διαδικασίες συμπίεσης και εκτόνωσης είναι αντιστρεπτές και αδιαβατικές, δηλαδή ισεντροπικές.

- 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.

Ο κύκλος αυτός είναι παρόμοιος, σε θεωρητικό επίπεδο, με τον κύκλο λειτουργίας του τετράχρονου εμβολοφόρου βενζινοκινητήρα. Έχοντας δεδομένη τη συγκρότηση του αεριοστρόβιλου, από 1) την εισαγωγή, 2) το συμπιεστή, 3) το θάλαμο καύσης, 4) το στρόβιλο και 5) το ακροφύσιο εξαγωγής καυσαερίων (Σχήμα 5.1), ας εξετάσουμε με περισσότερη λεπτομέρεια τις φάσεις του θεωρητικού κύκλου λειτουργίας του (όπως φαίνονται στο Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2 Τα μέρη του αεριοστρόβιλου κινητήρα



Σχήμα 5.3 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 πτερύγια 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.

- 4-1 Ισοβαρής αποβολή θερμότητας: Η αποβολή της θερμότητας των καυσαερίων πραγματοποιείται στην ατμόσφαιρα.

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι βασική διαφορά μεταξύ του αεριοστρόβιλου και του εμβολοφόρου κινητήρα είναι ότι στον πρώτο, η καύση πραγματοποιείται υπό σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) πίεση. Αντίθετα, στον τετράχρονο εμβολοφόρο βενζινοκινητήρα η διεργασία της καύσης είναι ισόχωρη και οι πολύ υψηλές πιέσεις που αναπτύσσονται, βοηθούν στην επίτευξη μεγάλης ποσότητας έργου από συγκεκριμένη ποσότητα καυσίμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή θερμική απόδοση του εμβολοφόρου κινητήρα.

Οι πιέσεις λειτουργίας του αεριοστρόβιλου είναι σχετικά χαμηλές οπότε κατασκευάζονται θάλαμοι καύσης χαμηλού βάρους και χρησιμοποιούνται καύσιμα με χαμηλό βαθμό οκτανίων. Όμως, η θερμική απόδοση του αεριοστρόβιλου περιορίζεται από την ικανότητα του συμπιεστή να αναπτύξει υψηλό λόγο συμπίεσης χωρίς παράλληλη υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα. Η επιφάνεια που σχηματίζεται από τον κύκλο του διαγράμματος (1-2-3-4-5-1, Σχήμα 5.3) παριστάνει το ωφέλιμο έργο που παράγεται από τον αεριοστρόβιλο κινητήρα. Η οποιαδήποτε αύξηση της επιφάνειας αυτής υποδηλώνει και τη διαθεσιμότητα μεγαλύτερου ποσού ενέργειας προς παραγωγή έργου, και συνακόλουθα ώσης. Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία του αεριοστρόβιλου απαιτούν τη χρήση ειδικών υλικών κατασκευής στο θερμό τμήμα του κινητήρα.

Συγκρίνοντας τους κύκλους λειτουργίας του αεροπορικού αεριοστρόβιλου και του αεριοστρόβιλου αξονικής ισχύος παρατηρούμε ότι, στον πρώτο, ένα μέρος ή το σύνολο της αποδιδόμενης ισχύος παράγεται ως αποτέλεσμα εκτόνωσης σε ακροφύσιο πρόωσης (Σχήμα 6.3, γραμμή 4-5). Επίσης, στον υπολογισμό της απόδοσης του αεροπορικού αεριοστρόβιλου πρέπει να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της ταχύτητας του αεροσκάφους καθώς και το ύψος πτήσης.

5.2.2 Πραγματικός κύκλος λειτουργίας

Οι προϋποθέσεις λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου ώσης (αλλά και ισχύος) σύμφωνα με το θεωρητικό κύκλο του Μπράιτον δεν μπορούν να εκπληρωθούν. Οι λόγοι είναι οι ακόλουθοι:

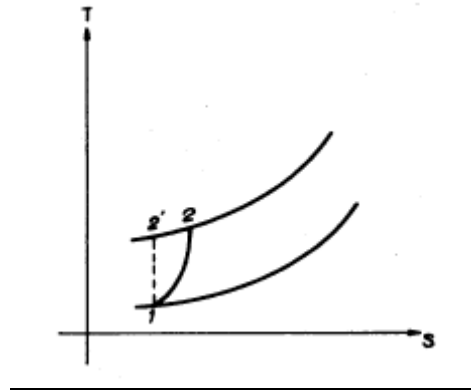
- Τα παρελκόμενα συστήματα του κινητήρα (αντλία ελαίου, αντλία καυσίμου, γεννήτρια ρεύματος κ.λ.π.) λαμβάνουν για τη λειτουργία τους ένα ποσοστό από την ενέργεια που παράγεται στο στρόβιλο.

- Η συμπίεση του εισερχόμενου ρεύματος αέρα στο συμπιεστή καθώς και η εκτόνωση των καυσαερίων στο στρόβιλο δεν αποτελούν αδιαβατικές διαδικασίες. Υπάρχουν πάντα απώλειες θερμότητας.

- Η διαδικασία της καύσης δεν είναι ισοβαρής. Η πίεση ελαττώνεται λόγω των αντιστάσεων στη ροή των καυσαερίων στο θάλαμο καύσης.

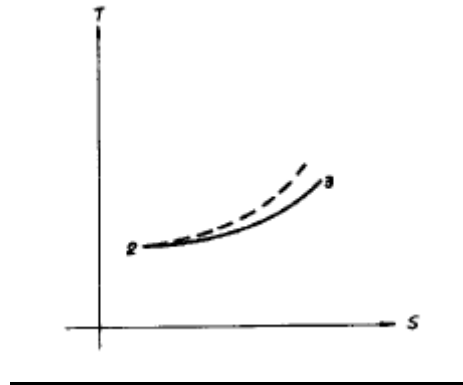
- Η ενέργεια που υπολογίζεται θεωρητικά για την κίνηση του συμπιεστή από το στρόβιλο, είναι μικρότερη από αυτήν που απαιτείται πραγματικά. Πριν παρουσιάσουμε τη μορφή του πραγματικού κύκλου λειτουργίας, ας εξετάσουμε τις μορφές απώλειας ενέργειας που αναφέραμε παραπάνω.

- **Απώλειες στο συμπιεστή:** η ενέργεια που μεταφέρεται από το στρόβιλο στο συμπιεστή, διαμέσου του κοινού τους άξονα, μετατρέπεται σε μεγάλο μέρος της, σε θερμότητα λόγω τριβών. Η θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα - Σημείο 2, έτσι, είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται θεωρητικά – Σημείο 2' (Σχήμα 5.4). Η απώλεια αυτή της ενέργειας υπολογίζεται από το βαθμό απόδοσης συμπίεσης. Αυτός ισούται με το λόγο του θεωρητικού έργου συμπίεσης προς το πραγματικό έργο συμπίεσης. Οι τιμές που λαμβάνει ο λόγος απόδοσης συμπίεσης κυμαίνονται από 0.80 έως 0.85.



Σχήμα 5.4 Απώλειες συμπίεσής στο διάγραμμα Μπράιτον

• **Απώλειες στο θάλαμο καύσης:** κατά μήκος του θαλάμου καύσης παρουσιάζεται πτώση της πίεσης των καυσαερίων της τάξης του 10% (Σχήμα 5.5, γραμμή 2-3). Η πτώση αυτή οφείλεται στις διατάξεις που τοποθετούνται στο θάλαμο καύσης ώστε να επιτύχουν το βέλτιστο βαθμό ανάμιξης του εισερχόμενου αέρα με το καύσιμο.



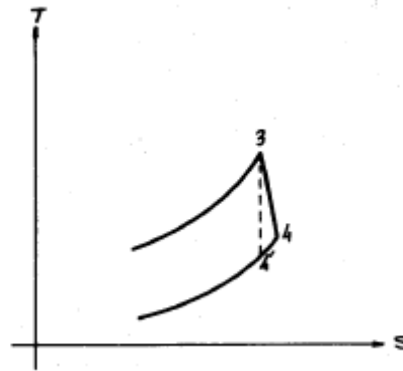
Σχήμα 5.5 Οι απώλειες στο θάλαμο καύσης όπως φαίνονται στο διάγραμμα Μπράιτον

• **Απώλειες κατά την εκτόνωση:** λόγω των τριβών που αναπτύσσονται κατά την εκτόνωση των καυσαερίων στο στρόβιλο και το ακροφύσιο εξαγωγής, το παραγόμενο από αυτά έργο είναι μικρότερο από το θεωρητικό. Η θερμοκρασία μετά την εκτόνωση - Σημείο 4, λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές από τη θεωρητική – Σημείο 4' (Σχήμα 5.6). Οι απώλειες κατά την εκτόνωση

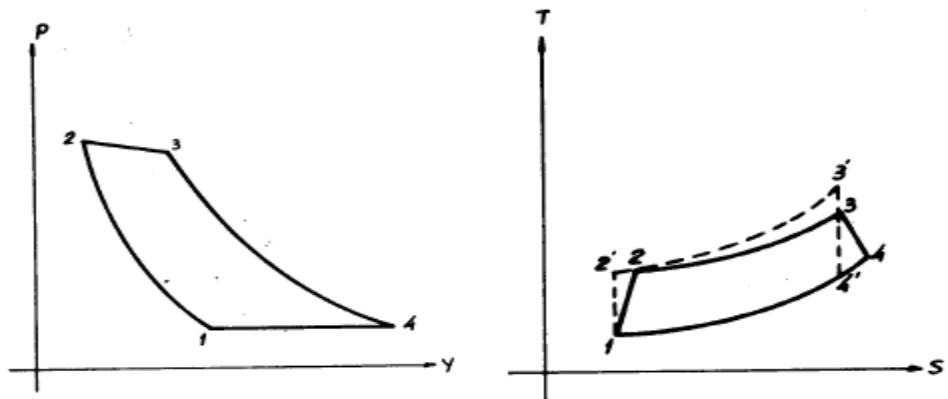
υπολογίζονται από το βαθμό απόδοσης της εκτόνωσης. Αυτός ισούται με το λόγο του πραγματικού έργου εκτόνωσης προς το θεωρητικό.

• **Μηχανικές απώλειες:** κατά τη μεταφορά της ισχύος από το στρόβιλο στο συμπιεστή αναπτύσσονται τριβές στα έδρανα του κοινού τους άξονα, οι οποίες αποτελούν περίπου το 1% της συνολικής ισχύος που μεταφέρεται. Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης, λοιπόν, που καθορίζεται από αυτές, είναι της τάξης του 99%.

Τα διαγράμματα του πραγματικού κύκλου λειτουργίας παίρνουν τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 5.7 (τα τονούμενα σημεία αντιστοιχούν στη θεωρητική λειτουργία), αν συνυπολογίσουμε τις προαναφερόμενες απώλειες και τις αλλαγές που επιφέρουν στο θεωρητικό κύκλο λειτουργίας.



Σχήμα 5.6 Απώλειες κατά την εκτόνωση

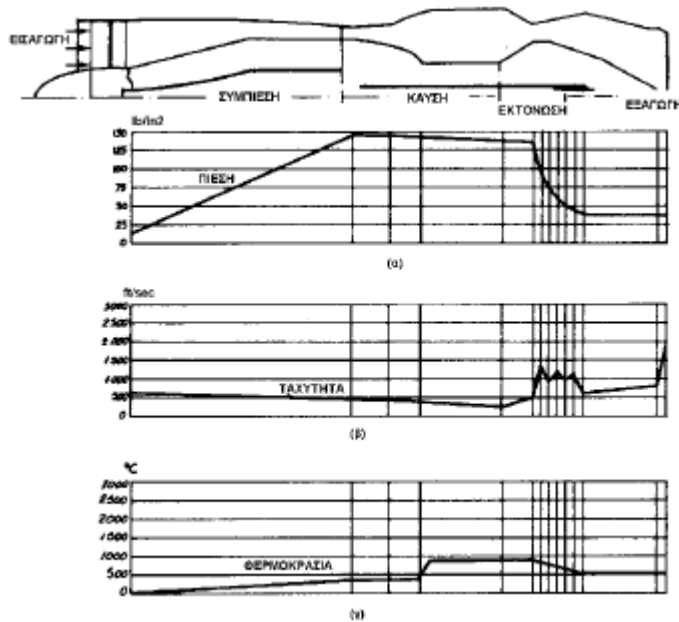


Σχήμα 5.7 Το διάγραμμα πραγματικής λειτουργίας του κύκλου Μπράιτον σε συντεταγμένες $p-v$ και $T-s$

Θα κλείσουμε την παρουσίαση του κύκλου λειτουργίας του αεριοστροβίλου κινητήρα με μία συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας που λαμβάνει χώρα σε πραγματικές συνθήκες. Αρχικά, παρέχεται εξωτερική ισχύς και πραγματοποιείται η εισαγωγή ρεύματος αέρα. Το ρεύμα αυτό συμπιέζεται, περνώντας από το συμπιεστή, και οδηγείται προς το θάλαμο καύσης. Εκεί, εγχύεται το καύσιμο από κατάλληλους εγχυτήρες σε υψηλή πίεση. Δημιουργείται το καύσιμο μείγμα και αναφλέγεται, αρχικά (κατά την εκκίνηση) μέσω σπινθήρα και στη συνέχεια, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν εκεί. Η θερμοκρασία της καύσης ανέρχεται έως τους 1.800°C. Στη συνέχεια, όμως, περίσσεια αέρα αναμιγνύεται με τα καυσαέρια και η θερμοκρασία μειώνεται στους 1.000°C περίπου. Μετά την έξοδό τους από το θάλαμο καύσης, τα καυσαέρια συναντούν το στρόβιλο.

Εκεί, αποδίδεται μέρος της ενέργειάς τους για την κίνηση του συμπιεστή (ή το σύνολό της αν πρόκειται για ελικοστροβίλο κινητήρα). Στη συνέχεια, τα καυσαέρια εκτονώνονται και οδηγούνται στο ακροφύσιο εξαγωγής, όπου λαμβάνουν ταχύτητες της τάξης των 1.400 mph.

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζονται ενδεικτικές μεταβολές των πιέσεων, ταχυτήτων και θερμοκρασιών που λαμβάνουν το ρεύμα του αέρα και των καυσαερίων στις διάφορες φάσεις της λειτουργίας του αεριοστροβίλου.



Σχήμα 5.8 Ενδεικτικές μεταβολές πίεσης, ταχύτητας και θερμοκρασίας στο εσωτερικό του αεριοστόβιλου κινητήρα

Γενικά, σε έναν κοινό αεριοστρόβιλο εισάγεται μία λίβρα αέρα ανά δευτερόλεπτο ώστε να παραχθούν 50 λίβρες ώσης. Για τη συμπίεση αυτής της ποσότητας αέρα απαιτείται ισχύς 100 HP, περίπου.

5.3 Εισαγωγή αέρα

5.3.1 Γενικά

Η εισαγωγή του αέρα, που πραγματοποιείται από ειδικό αεραγωγό εισαγωγής (air inlet duct), ουσιαστικά αποτελεί τμήμα του αεροσκάφους και όχι του κινητήρα. Καθώς, όμως, η παροχή του αέρα είναι πολύ σημαντική για τη λειτουργία του αεριοστροβίλου, τα συστήματα εισαγωγής του αέρα αναλύονται μαζί με τους κινητήρες. Σκοπός του αεραγωγού είναι να κατευθύνει το ρεύμα του εισερχόμενου αέρα προς το συμπιεστή με τις λιγότερες δυνατές απώλειες, λόγω τριβών και στροβιλισμών, και με ομοιόμορφη ροή. Ο σκοπός αυτός πρέπει να επιτυγχάνεται σε όλες τις ταχύτητες και καταστάσεις πτήσης. Στο τελευταίο τμήμα

του αεραγωγού, ακριβώς μπροστά από το συμπιεστή, η ροή πρέπει να επιβραδυνθεί ώστε να αυξηθεί η στατική της πίεση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ανάκτηση πίεσης (ram recovery)**. Για το λόγο αυτό, η διατομή του αεραγωγού αυξάνεται κατά μήκος του τμήματος αυτού.

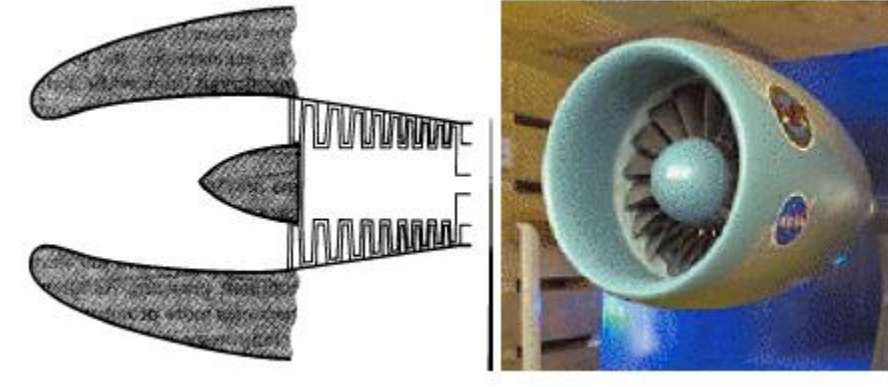
Το σχήμα και η θέση του αεραγωγού εισαγωγής εξαρτάται από τον τύπο του αεροσκάφους (σχήμα, αριθμός κινητήρα κ.λ.π.). Ο αεραγωγός αποτελεί το πρόσθιο τμήμα του ατρακτίδιου των κινητήρων, όταν αυτοί βρίσκονται έξω από το αεροσκάφος ενώ όταν είναι τοποθετημένοι στο εσωτερικό της ατράκτου - όπως στα περισσότερα μαχητικά αεροπλάνα - υπάρχει ένας αεραγωγός στην άκρη του ρύγχους ή κάτω από την άτρακτο, συνηθέστερα όμως δύο πλευρικοί αεραγωγοί, σε κάποια απόσταση από το κύριο σώμα της ατράκτου, για να αποφεύγονται τα κύματα κρούσης από το πρόσθιο τμήμα της. Σε ορισμένες εισαγωγές τοποθετούνται **οδηγά πτερύγια (Inlet Guide Vanes - IGV)** ώστε να ομαλοποιείται η ροή του εισερχόμενου ρεύματος αέρα πριν την είσοδό του στο συμπιεστή. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται **πτερύγια μεταβλητής γεωμετρίας (Variable geometry Guide Vanes – VGV)**.

5.3.2 Είδη αεραγωγών εισαγωγής

- **Αεραγωγός ως τμήμα της ατράκτου** του αεροσκάφους, στον ίδιο άξονα με το κινητήρα.

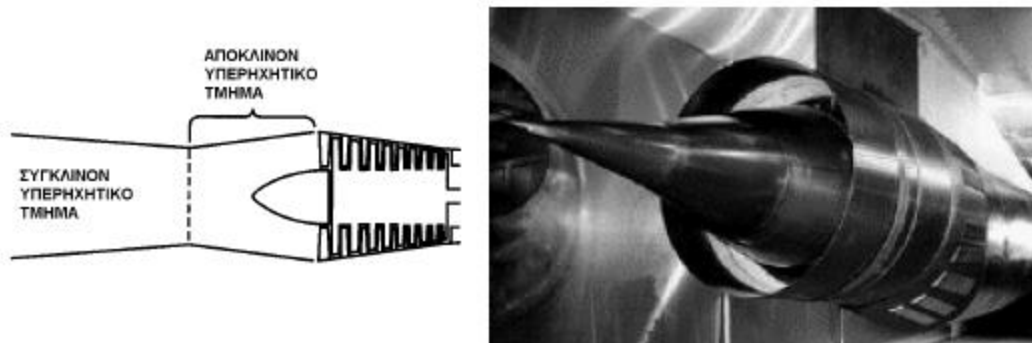
- **Διαιρετή εισαγωγή**. Αποτελείται από δύο εισαγωγές στα πλευρά της ατράκτου ή στις ρίζες των πτερύγων που ενώνονται σε κοινή εισαγωγή στην περίπτωση μονοκινητήριου αεροσκάφους.

- **Υποηχητική εισαγωγή**. Χρησιμοποιείται σε κινητήρες που κινούν αεροσκάφη υψηλών υποηχητικών ταχυτήτων. Η διάμετρος του αεραγωγού αυξάνεται καθώς αυξάνεται το μήκος του, δίνοντάς του τη μορφή διαχύτη (Σχήμα 5.9). Η μορφή αυτή βοηθά τον αεραγωγό να λειτουργεί ως σωλήνας Βεντούρι. Η ταχύτητα του αέρα μειώνεται με παράλληλη αύξηση της πίεσης. Γενικά, η ταχύτητα του αέρα ακριβώς πριν το συμπιεστή λαμβάνει τιμές 0,5 Mach περίπου.



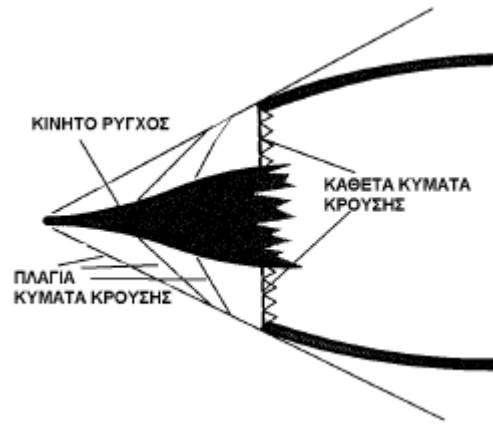
Σχήμα 5.9 Υποηχητική εισαγωγή

• **Υπερηχητική εισαγωγή.** Ο αεραγωγός σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να έχει τη μορφή συγκλίνοντος – αποκλίνοντος αγωγού (Σχήμα 5.10). Στο συγκλίνον τμήμα, η υπερηχητική ροή του εισερχόμενου αέρα επιβραδύνεται σε διηχητική και στη συνέχεια, το αποκλίνον τμήμα λειτουργεί όπως είδαμε στην προηγούμενη περίπτωση, ως διαχύτης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι αεραγωγοί υπερηχητικών αεροσκαφών φέρουν λαιμό μεταβλητής διατομής, ώστε να έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν αποδοτικά σε διαφορετικές συνθήκες ταχύτητας του αεροσκάφους. Σε άλλες περιπτώσεις, η γεωμετρία της εισαγωγής είναι τέτοια, ώστε να δημιουργούνται διαδοχικά πλάγια κύματα κρούσης, πριν από την είσοδο του αέρα στον αγωγό εισαγωγής (Σχήμα 5.11). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται εξωτερική συμπίεση της ροής, λόγω της ανάπτυξης πλαγίων κυμάτων κρούσης.



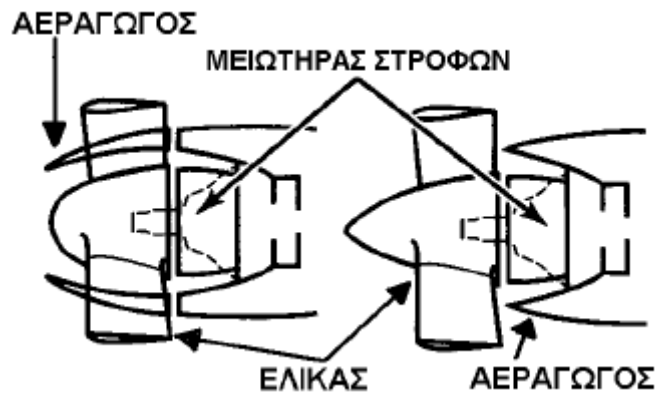
Σχήμα 5.10 Υπερηχητική εισαγωγή

• **Εισαγωγές μεταβλητής διατομής.** Χρησιμοποιούνται όπως είδαμε παραπάνω σε υπερηχητικά αεροσκάφη (Σχήμα 5.11). Υπάρχουν και υποηχητικές εφαρμογές.



Σχήμα 5.11 Εισαγωγή εξωτερικής συμπίεσης και μεταβλητής διατομής

• **Αεραγωγοί ελικοστροβίλων κινητήρων.** Αυτοί έχουν ειδικό σχήμα λόγω της ύπαρξης του έλικα του κινητήρα. Συνηθισμένοι τύποι είναι αυτοί που φαίνονται στο Σχήμα 5.12.



Σχήμα 5.12 Μορφές αεραγωγών ελικοστροβίλων κινητήρων

5.3.3 Φίλτρα κατακράτησης σωματιδίων

Για την προσπάθεια αποφυγής της αναρρόφησης ξένων σωμάτων από τον κινητήρα, χρησιμοποιούνται φίλτρα στην είσοδο του αεραγωγού εισαγωγής. Η χρήση τους αφορά κατά κύριο λόγο κινητήρες ελικοπτέρων. Όμως, τα φίλτρα αυτά επιφέρουν πρόσθετο βάρος στον κινητήρα, αυξάνουν τις απώλειες πίεσης στην εισαγωγή του αέρα, είναι ιδιαίτερα ευπαθή σε παγοποίηση και, όταν φθαρούν, υπάρχει πιθανότητα να αποτελέσουν τα ίδια ένα ξένο σώμα που ίσως αναρροφηθεί από τον κινητήρα. Για τους λόγους αυτούς τα φίλτρα χρησιμοποιούνται μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (απογείωση, προσγείωση, πτήση σε περιοχές με σμήνη πουλιών).

5.4 Συμπιεστές

5.4.1 Γενικά

Η αρχή λειτουργίας του κινητήρα αερίωθησης συνδέει την ποσότητα του εισερχόμενου αέρα σε αυτόν με την παραγωγή της απαιτούμενης για την πτήση του αεροσκάφους ώσης. Το εξάρτημα που παροχετεύει τις κατάλληλες ποσότητες αέρα στον κινητήρα είναι ο συμπιεστής. Βρίσκεται ακριβώς μετά τον αεραγωγό εισαγωγής, από τον οποίο και παραλαμβάνει τον εισερχόμενο αέρα. Η λειτουργία του συμπιεστή έχει άμεση επίδραση στη συνολική απόδοση του κινητήρα. Η εργασία που επιτελεί είναι να συμπιέζει τον εισερχόμενο αέρα ώστε κατά την έξοδό του από το συμπιεστή να έχει αποκτήσει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα. Με τον τρόπο αυτόν, η παραγόμενη ώση θα είναι μεγάλη αφού ο κινητήρας θα μπορεί να χειρίζεται πάρα πολύ μεγάλες ποσότητες αέρα, σε σύγκριση με το μικρό όγκο του. Στις μέρες μας, οι συμπιεστές έχουν λόγο συμπίεσης έως και 30:1 ενώ οι ταχύτητες του αέρα κατά τη συμπίεση φτάνουν τα 150-200m/sec.

Εκτός από το έργο της συμπίεσης του εισερχόμενου αέρα, το τμήμα του συμπιεστή επιτελεί και συγκεκριμένες δευτερεύουσες διεργασίες, όπως:

- η παροχή αέρα για την ψύξη του τμήματος του στροβίλου,
- η παροχή αέρα για τη λειτουργία του συστήματος αντιπάγωσης,
- η παροχή αέρα για τις ανάγκες της καμπίνας πληρώματος ή / και επιβατών,
- η παροχή αέρα για τη λειτουργία κάποιων εξαρτημάτων που λειτουργούν πνευματικά.

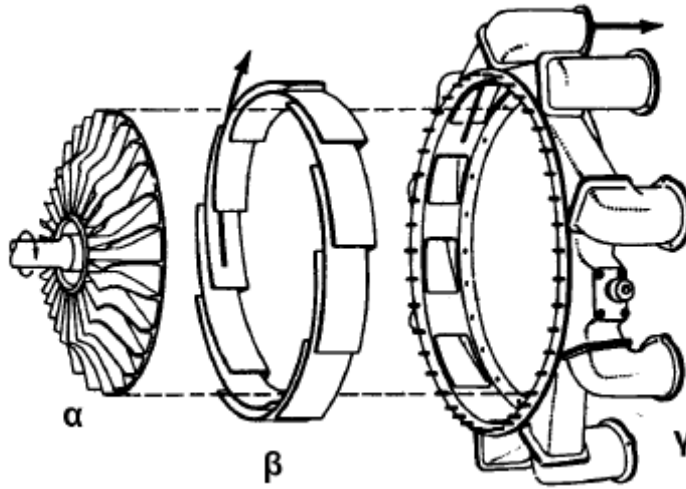
Η ποσότητα του αέρα που συμπιέζεται καθώς και η αύξηση της πίεσης εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Όσο αυτή αυξάνεται, επιτυγχάνεται και μεγαλύτερη συμπίεση. Βέβαια, η αύξηση της πίεσης εξαρτάται και από τη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής. Όταν αυτή λαμβάνει χαμηλές τιμές, τότε η συμπίεση είναι μεγαλύτερη. Οι τύποι των συμπιεστών που χρησιμοποιούνται στους αεριοστρόβιλους κινητήρες είναι:

- **φυγοκεντρικής ροής,**
- **αξονικής ροής και**
- **φυγοκεντρικής – αξονικής ροής.**

Ο κάθε τύπος λαμβάνει το όνομά του σύμφωνα με τη διεύθυνση της ροής του αέρα μέσα στο συμπιεστή. Ο τελευταίος τύπος αποτελεί συνδυασμό των δύο άλλων και συνδυάζει τα χαρακτηριστικά τους.

5.4.2 Φυγοκεντρικοί συμπιεστές

Ο **φυγοκεντρικός συμπιεστής (centrifugal compressor)**, ή συμπιεστής φυγοκεντρικής ροής, χρησιμοποιήθηκε στους πρώτους κινητήρες αεριώθησης. Αποτελείται από τρία μέρη: τον **πτερυγιοφόρο δίσκο** (στροφείο ή ρότορας, **impeller**), το **διαχύτη (diffuser)** και, σε ορισμένες περιπτώσεις, την **πολλαπλή σωλήνωση (manifold) εξαγωγής** του συμπιεσμένου αέρα στο επόμενο τμήμα του κινητήρα (Σχήμα 5.13).

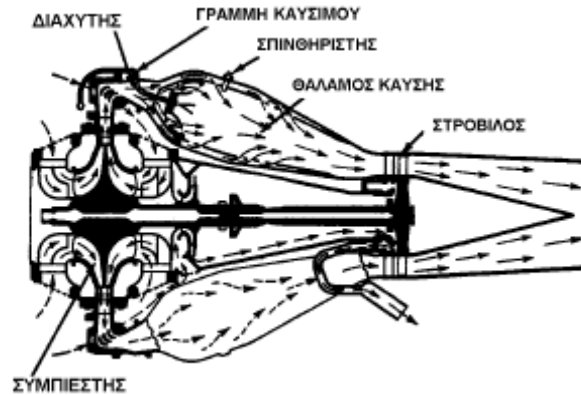


Σχήμα 5.13 Τα μέρη του φυγοκεντρικού συμπιεστή: α) το στροφέιο, β) ο διαχύτης, γ) η πολλαπλή σωλήνωση εξαγωγής

Το στροφέιο φέρει **πτερύγια (blades)** που βρίσκονται στη μπροστινή ή και στις δύο πλευρές του. Με την περιστροφή του, η οποία πραγματοποιείται από το στρόβιλο μέσω του κοινού άξονα, δημιουργείται υποπίεση στην περιοχή γύρω από τον άξονα και αναρροφάται ο εισερχόμενος αέρας. Οι επικρατούσες **φυγόκεντρες δυνάμεις** ωθούν τον αέρα κατά την **ακτινική διεύθυνση** (κατά το μήκος των πτερυγίων) προς την εξωτερική περιφέρεια του στροφέιου. Με αυτήν την κίνηση επιτυγχάνεται **σημαντική αύξηση της ταχύτητας του αέρα** και **μικρή αύξηση στην (στατική) πίεση**, λόγω της διόδου από τα πτερύγια του στροφέιου. Καθώς αφήνει το στροφέιο, ο αέρας εισέρχεται στους **διαχύτες**. Εκεί, η αύξηση της διατομής μετατρέπει την υψηλή ταχύτητα (και υψηλή κινητική ενέργεια) σε χαμηλή (και υψηλή ενέργεια πίεσης), δηλαδή σε αύξηση της στατικής πίεσης. Στη συνέχεια, ο αέρας εισέρχεται στην πολλαπλή σωλήνωση που λειτουργεί ως μέσο παραλαβής και διάθεσης του συμπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης. Αυτή είναι, συνήθως, κατασκευασμένη από κράματα μαγνησίου, αλουμινίου ή χάλυβα.

Ο άξονας που συνδέει το φυγοκεντρικό συμπιεστή με το στρόβιλο, που του παρέχει την κίνηση, εδράζεται σε **τριβείς κύλισης** (σφαιρικούς ή / και κυλινδρικούς). Σε αρκετές περιπτώσεις αποτελείται από δύο τμήματα που

ενώνονται με ειδικό σύνδεσμο, κατάλληλο για εύκολη αποσυναρμολόγηση. Στο Σχήμα 5.14 φαίνεται η τομή αεριοστρόβιλου κινητήρα με φυγοκεντρικό συμπιεστή.



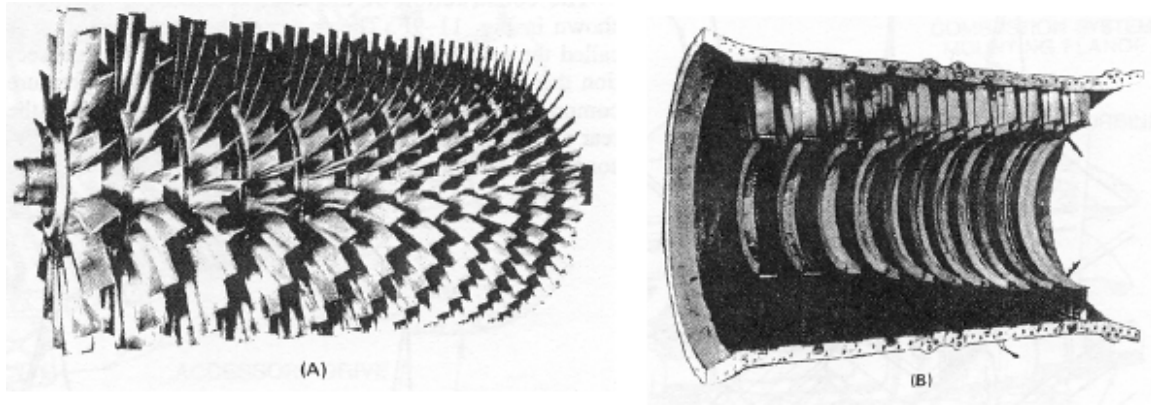
Σχήμα 5.14 Αεριοστρόβιλος κινητήρας με φυγοκεντρικό συμπιεστή διπλής εισόδου

Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής έχει ως κύριο **πλεονέκτημα** την **απλότητα της κατασκευής** του, την **αντοχή** του, το **μικρό του κόστος** και το **μεγάλο σχετικά λόγο συμπίεσης** που παρέχει με την χρήση μίας μόνο βαθμίδας. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρούς ελικοστρόβιλους κινητήρες. Κύριο μειονέκτημά του είναι η **μειωμένη απόδοση**. Δε χρησιμοποιείται σε μεγάλους κινητήρες οι οποίοι λειτουργούν με **υψηλούς (συνολικά) λόγους συμπίεσης**.

5.4.3 Αξονικοί συμπιεστές

Ο αξονικός συμπιεστής (**axial flow compressor**), ή συμπιεστής **αξονικής ροής**, αποτελείται από δύο βασικά μέρη: ένα περιστρεφόμενο, που ονομάζεται **ρότορας (rotor)**, και ένα σταθερό, που ονομάζεται **στάτορας (stator)**. Ο ρότορας αποτελείται από ένα **στροφείο (spindle)** πάνω στο οποίο είναι προσαρμοσμένα, με κατάλληλο τρόπο, τα **κινητά πτερύγια (blades)**, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.15Α. Ο στάτορας είναι συνήθως διαιρεμένος σε δύο ημικυκλικά τμήματα στην εσωτερική περιφέρεια των οποίων προσαρμόζονται τα

σταθερά πτερύγια (vanes), Σχήμα 5.15B. Μία σειρά κινητών με την ακολουθούσα σειρά σταθερών πτερυγίων ονομάζεται **βαθμίδα**. Ο αξονικός συμπιεστής αποτελείται από πολλές βαθμίδες (ανάλογα το μέγεθος του κινητήρα) γιατί η αύξηση της πίεσης που επιτυγχάνει η κάθε μία είναι μικρή – της τάξης του 1.25:1.

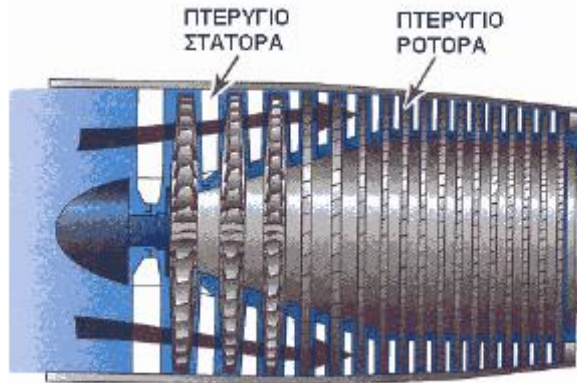


Σχήμα 5.15 (α) Τα κινητά και (β) τα σταθερά πτερύγια του αξονικού συμπιεστή

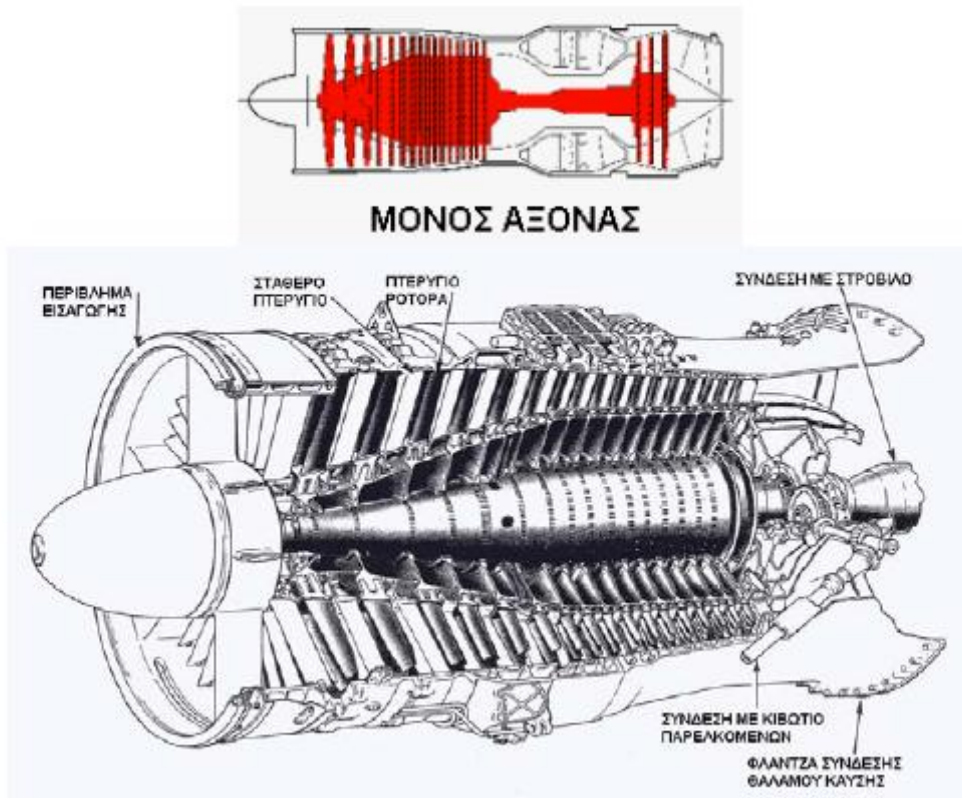
Τα κινητά και τα σταθερά πτερύγια έχουν την αεροδυναμική μορφή της πτέρυγας ή του έλικα ενός αεροσκάφους. Για το λόγο αυτόν, η λειτουργία και η απόδοση τους βασίζεται στα αεροδυναμικές αρχές που διέπουν τις πτέρυγες των αεροσκαφών, με ορισμένες πρόσθετες λειτουργικές συνθήκες, όπως η επίδραση της περιστροφής των άλλων πτερυγίων και η ύπαρξη των σταθερών πτερυγίων.

Όπως στις πτέρυγες των αεροσκαφών το παραγόμενο ωφέλιμο μέγεθος είναι η άνωση, στα πτερύγια του αξονικού συμπιεστή είναι η πίεση. Αυτή παράγεται, γενικά, κατά τον ίδιο τρόπο που μία πτέρυγα παράγει άνωση. Από το μπροστινό προς το οπίσθιο τμήμα του συμπιεστή (δηλαδή από το χαμηλή προς την υψηλή πίεση) δημιουργείται μία σταδιακή μείωση της διατομής ανάμεσα στο στοροφείο και το περίβλημα. Η μείωση αυτή του δακτυλίου ροής βοηθά την αξονική ταχύτητα του αέρα να διατηρείται σταθερή, καθώς η πίεση και η πυκνότητά του αυξάνονται κατά μήκος του συμπιεστή (Σχήμα 5.16). Η μείωση

της διατομής επιτυγχάνεται με την εφαρμογή κωνικότητας στο περίβλημα ή / και στο στροφέιο.



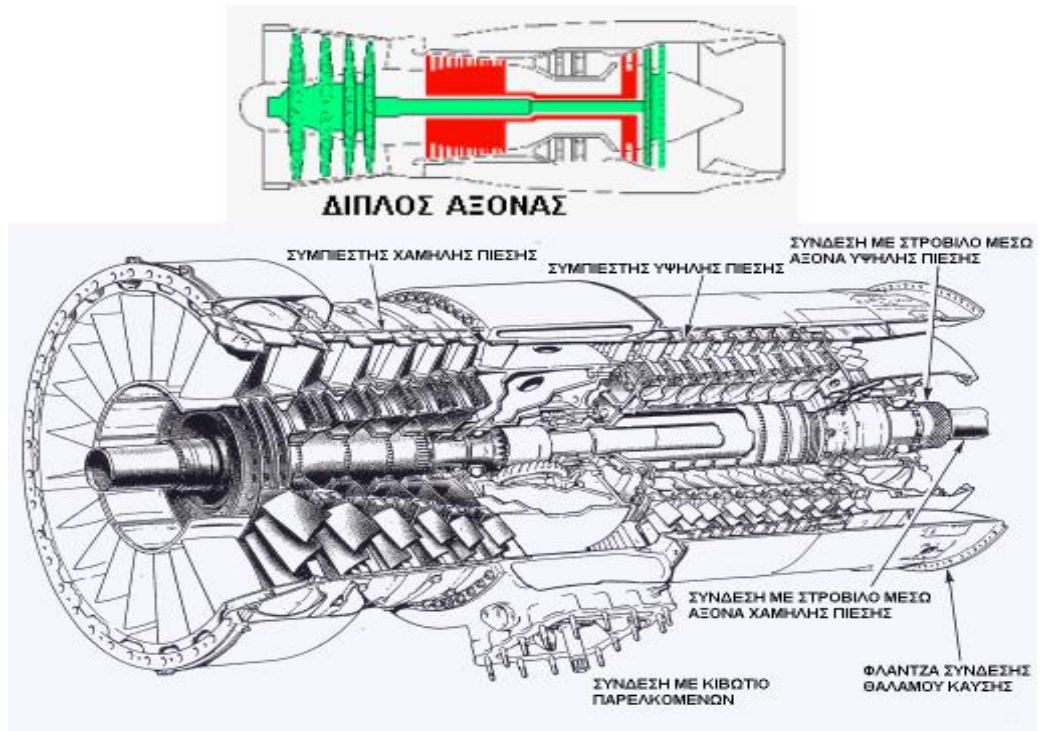
Σχήμα 5.16 Μείωση δακτυλίου ροής κατά μήκος του αξονικού συμπιεστή



Σχήμα 5.17 Μονός αξονικός συμπιεστής (single spool)

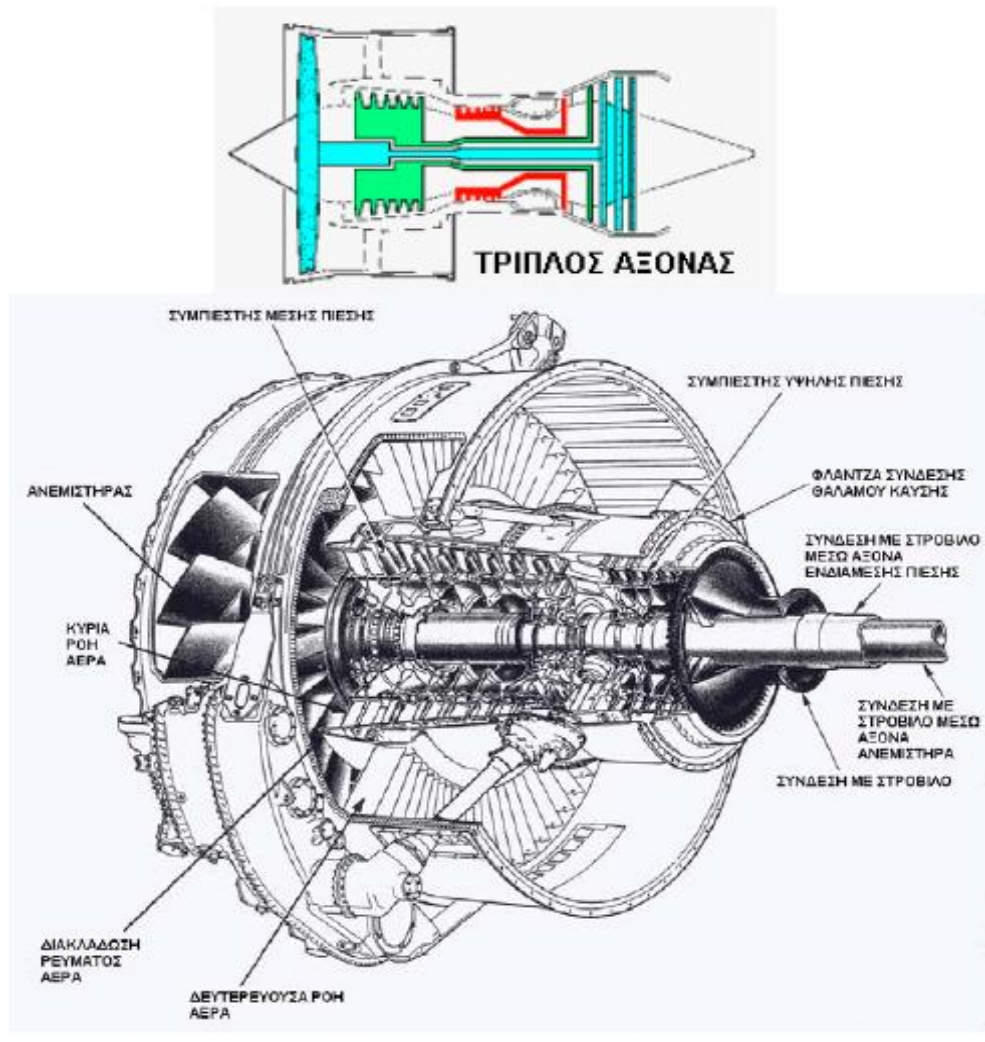
Ο αξονικός συμπιεστής **μονού άξονα ή απλού τυμπάνου (single spool)** αποτελείται από ένα στροφέιο, τα κινητά πτερύγια που στηρίζονται πάνω του και σειρές σταθερών πτερυγίων. Είναι συνδεδεμένος μέσω ενός άξονα με το στρόβιλο από τον οποίο παίρνει κίνηση. Ο αριθμός των βαθμίδων καθορίζεται από την επιθυμητή αύξηση της πίεσης. Το σύνολο της ροής του αέρα πραγματοποιείται μέσα από το συμπιεστή (Σχήμα 5.17). Παρότι αυτός ο τύπος αξονικού συμπιεστή είναι σχετικά απλός στην κατασκευή του και όχι ιδιαίτερα υψηλού κόστους, παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα:

- Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται πολλές βαθμίδες (στο ίδιο στροφέιο), αυτές που βρίσκονται στην περιοχή της αυξημένης πίεσης λειτουργούν με μειωμένη απόδοση, ενώ αυτές που βρίσκονται στις αρχικές θέσεις, συνήθως, υπερφορτίζονται.
- Εξαιτίας της μεγάλης αδρανειακής του μάζας, αντιδρά σχετικά αργά σε απότομες μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας (π.χ. εξαιτίας εντολών του χειριστή). Ο τρόπος για να ξεπεραστούν τα προβλήματα αυτά ήταν η διαίρεση του συμπιεστή σε δύο ή τρία τμήματα. Σε ανάλογο αριθμό τμημάτων χωρίζεται και ο στρόβιλος. Τα τμήματα του συμπιεστή συνδέονται με τα αντίστοιχα του στρόβιλου με άξονες στην ίδια ευθεία, που ο ένας βρίσκεται μέσα στον άλλον.



Σχήμα 5.18 Διπλός αξονικός συμπιεστής (double-spool compressor)

Ο διαιρούμενος σε δύο τμήματα συμπιεστής ονομάζεται **διπλού άξονα** ή **διπλού τυμπάνου** (**dual spool, twin spool compressor**). Η διάταξή του φαίνεται στο Σχήμα 5.18. Το πρώτο τμήμα ονομάζεται **συμπιεστής χαμηλής πίεσης** (**low pressure compressor**) ή **συμπιεστής N₁**. Αυτός συνήθως περιστρέφεται από ένα στρόβιλο με δύο βαθμίδες στο οπίσθιο τμήμα της περιοχής του στροβίλου. Το δεύτερο τμήμα ονομάζεται **συμπιεστής υψηλής πίεσης** (**high pressure compressor**) ή **συμπιεστής N₂** και, συνήθως, περιστρέφεται από ένα **μονοβάθμιο στρόβιλο υψηλής πίεσης** που βρίσκεται στο μπροστινό τμήμα της περιοχής του στροβίλου. Σε κάποιες περιπτώσεις, στο συμπιεστή χαμηλής πίεσης συνδέεται και εμπρόσθιος ανεμιστήρας, οπότε και περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Συνήθως, η ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή υψηλής πίεσης διατηρείται σχεδόν σταθερή από το ρυθμιστή καυσίμου. Ανάλογα με τις συνθήκες πτήσης (υψόμετρο, ελιγμοί) η ταχύτητα του συμπιεστή χαμηλής πίεσης αυξάνεται ή μειώνεται.



Σχήμα 5.19 Ο τριπλός αξονικός συμπιεστής (triple-spool compressor)

Σε αρκετούς στροβιλοανεμιστήρες κινητήρες ο συμπιεστής διαιρείται σε τρία τμήματα και ονομάζεται **τριπλός (triple-spool compressor)**, Σχήμα 5.19). Στην περίπτωση αυτή, ο ανεμιστήρας είναι ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης και συνδέεται με έναν πολυβάθμιο στρόβιλο χαμηλής πίεσης. Το επόμενο τμήμα ονομάζεται **ενδιάμεσος συμπιεστής (intermediate compressor)** και το τρίτο τμήμα είναι ο **συμπιεστής υψηλής πίεσης**. Οι δύο αυτοί συμπιεστές παίρνουν κίνηση από μονοβάθμιους στρόβιλους. Αυτός ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης έχει **μεγάλες βαθμίδες** και συμπιέζει πολύ **μεγαλύτερη μάζα αέρα** από τους δύο άλλους. Το μεγάλο ποσοστό του αέρα – το ψυχρό ρεύμα – παρακάμπτει τους

δύο άλλους συμπιεστές και εξέρχεται στην ατμόσφαιρα από ένα **ιδιαίτερο δακτυλιοειδές ακροφύσιο**. Η υπόλοιπη μάζα του αέρα – το **θερμό ρεύμα** – συμπιέζεται από τους άλλους συμπιεστές και οδηγείται στο θάλαμο καύσης.

5.4.4 Υλικά κατασκευής

Γενικά, τα υλικά κατασκευής των τμημάτων του συμπιεστή πρέπει να παρουσιάζουν αντοχή στις υψηλές πιέσεις συμπίεσης και την άνοδο της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά τη συμπίεση. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται και στην αντοχή των υλικών κατασκευής για την αντιμετώπιση της αναρρόφησης ξένου σώματος. Το περίβλημα του συμπιεστή κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου ή μαγνησίου στο μπροστινό τμήμα του, ενώ για το οπίσθιο χρησιμοποιείται, συνήθως, χάλυβας. Για τα **κινητά** και τα **σταθερά πτερύγια** χρησιμοποιούνται **κράματα αλουμινίου, χάλυβας, νικέλιο ή τιτάνιο**, ανάλογα με τη θέση και τις συνθήκες λειτουργίας τους. Σε κάποιες εφαρμογές, σε χαμηλές θερμοκρασίες συμπίεσης, χρησιμοποιούνται **πτερύγια από συνθετικό υλικό**, οπότε επιτυγχάνεται εξοικονόμηση βάρους.

5.5 Θάλαμοι καύσης

5.5.1 Γενικά

Η βέλτιστη απόδοση κατά τη διαδικασία της καύσης του μείγματος αέρα – καυσίμου σε έναν αεριοστρόβιλο είναι επιτακτική. Και τούτο διότι από αυτήν καθορίζονται η συνολική απόδοση του κινητήρα, το λειτουργικό κόστος του αεροσκάφους, αλλά και η επιβάρυνση που θα επιφέρουν στο περιβάλλον οι εκπεμπόμενοι ρύποι από την κάθε πτήση του.

Σήμερα, η ανάπτυξη των **θαλάμων καύσης (combustion chambers)** βασίζεται στην εμπειρία που αποκτήθηκε από τη χρήση τους σε αεροκινητήρες

που λειτούργησαν με περισσότερη ή λιγότερη επιτυχία στο παρελθόν. Είναι σύνηθες, όσο και επιβεβλημένο, να προτείνονται διαφορετικές λύσεις για ένα δεδομένο σύστημα καύσης, όμως κάποιες βασικές σχεδιαστικές αρχές απαντώνται σε κάθε θάλαμο καύσης. Η διαρκώς αυξανόμενη χρήση των αεροσκαφών, που σημειώνεται με την πάροδο των χρόνων, επιφέρει ταυτόχρονα σημαντική αύξηση στη μόλυνση του περιβάλλοντος. Το γεγονός αυτό εντείνει τις προσπάθειες σχεδιασμού βελτιωμένων θαλάμων καύσης με μειωμένες εκπομπές καυσαερίων.

5.5.2 Τύποι θαλάμων καύσης

Η κατηγοριοποίηση των θαλάμων καύσης γίνεται σύμφωνα με τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Διακρίνουμε τρεις βασικούς τύπους:

- Τον πολλαπλό,
- Το δακτυλιοειδή, και το
- Σώληνο-δακτυλιοειδή.

5.6 Στρόβιλος

5.6.1 Γενικά

Ο πρωταρχικός σκοπός του στρόβιλου (turbine) σε έναν αεριωθούμενο κινητήρα είναι να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ για την περιστροφή του συμπιεστή. Συμπληρωματικά, ο στρόβιλος εξασφαλίζει την κίνηση των **παρελκομένων (accessories)**. Στον ελικοστρόβιλο και τον αξονοστρόβιλο κινητήρα, ο στρόβιλος δίνει κίνηση και στον έλικα. Η ισχύς που παρέχει ο στρόβιλος κατά τη λειτουργία του μπορεί να πάρει τιμές της τάξης των 50.000 Hp. Η ισχύς αυτή λαμβάνεται από την ενέργεια των εξερχόμενων, από το θάλαμο καύσης, καυσαερίων. Ένα και μόνο πτερύγιο του στρόβιλου μπορεί να παράγει

ισχύ έως και 250 Hp! Και ας μην ξεχνάμε ότι η μετατροπή της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων σε μηχανική ισχύ πραγματοποιείται μέσα στον περιορισμένο χώρο που κατέχει ο στρόβιλος ενός αεριοστρόβιλου κινητήρα. Επίσης, αξιοσημείωτες είναι οι θερμοκρασίες λειτουργίας στην είσοδο του στροβίλου, οι οποίες μπορούν να φτάσουν και τους 1650°C! Βέβαια, η ανάπτυξη νέων υλικών κατασκευής των στροβίλων, καθώς και βελτιωμένων μεθόδων ψύξης τους, επιτρέπουν τη λειτουργία υπό αυτές τις συνθήκες και την παροχή ολοένα και μεγαλύτερων τιμών ισχύος.

5.6.2 Περιγραφή και λειτουργία του στροβίλου

Ο συμπιεστής προσθέτει ενέργεια στο εισερχόμενο ρεύμα αέρα μετατρέποντας τη μηχανική του ενέργεια σε δυναμική του ρεύματος αέρα. Αντίθετα, ο στρόβιλος απορροφά ενέργεια από το ρεύμα των θερμών καυσαερίων, κατά την έξοδό τους από το θάλαμο καύσης, και τη μετατρέπει σε μηχανική ενέργεια για την παραγωγή ισχύος ή ροπής. Σε αντίθεση με τη λειτουργία των συμπιεστών, όπου τα στροφεία φυγοκεντρικού τύπου βρίσκουν αρκετές εφαρμογές, οι **ακτινικοί στρόβιλοι (radial inflow turbines)** χρησιμοποιούνται σε ελάχιστες περιπτώσεις καθώς δεν είναι αποδοτικοί όσο οι αξονικοί. Ωστόσο, συγκεντρώνουν πλεονεκτήματα όπως η στιβαρή κατασκευή και το σχετικά μικρό κόστος τους. Στους αεριοστρόβιλους κινητήρες χρησιμοποιείται αποκλειστικά ο στρόβιλος αξονικού τύπου καθώς έχει την ικανότητα να διαχειριστεί μεγάλη παροχή καυσαερίων και σε υψηλό αριθμό στροφών. Όπως ο συμπιεστής, και ο στρόβιλος απαντάται σε μονοβάθμιο και πολυβάθμιο.

Η βαθμίδα του στροβίλου αποτελείται από:

- **Μία σειρά σταθερών πτερυγίων (vanes)**, γνωστά και ως στάτορας ή στάτης (stator), τα οποία ακολουθούνται από:
- **Μία σειρά κινητών πτερυγίων (blades)**, γνωστά και ως ρότορας (rotor) ή στροφείο.

Γενικά, ο στρόβιλος αποτελείται από:

- **το περίβλημα (casing)**, το οποίο περιβάλλει το στάτορα και το ρότορα. Συνήθως, φέρει φλάντζες στα δύο του άκρα για τη σύνδεση του τμήματος του στρόβιλου με τα τμήματα του θαλάμου καύσης και του ακροφυσίου εξαγωγής.
- **το στάτορα,**
- **το δακτύλιο (shroud)**, που τοποθετείται στην εσωτερική και εξωτερική περιφέρεια των σταθερών πτερυγίων του στάτορα.
- **το ρότορα.**

Ο αριθμός των βαθμίδων και των στρόβιλων που τοποθετούνται στο στρόβιλο εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Τον αριθμό των αξόνων που θα χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση του συμπιεστή με το στρόβιλο,
- Το ποσό της ενέργειας που θα εξαχθεί από τα καυσαέρια και την απαιτούμενη ισχύ,
- Τον αριθμό των στροφών λειτουργίας (RPM),
- Τη μέγιστη διάμετρο την οποία μπορεί να λάβει το τροφείο του στρόβιλου, και
- Τις θερμοκρασίες και πιέσεις στην είσοδο και την έξοδο του στρόβιλου.

5.7 Εξαγωγή

Το σύστημα εξαγωγής στους αεριοστρόβιλους οδηγεί τα καυσαέρια, μετά την τελευταία κινητή βαθμίδα του στρόβιλου στην ατμόσφαιρα. Τα καυσαέρια, μετά το στρόβιλο βρίσκονται σε μία κατάσταση υψηλής, σχετικά, πίεσης (ως προς την ατμοσφαιρική) και χαμηλής ταχύτητας. Σε ένα στροβιλοαντιδραστήρα, είναι απαραίτητη, για την παραγωγή ώσης, η αύξηση της ταχύτητας των καυσαερίων, τα οποία εξωθούνται στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς το σύστημα εξαγωγής σε έναν στροβιλοαντιδραστήρα, έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της κινητικής ενέργειας των καυσαερίων στην έξοδο, με αντίστοιχη μείωση της πίεσης στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής. Αντίθετα, σε έναν ελικοφόρο

στροβιλοαντιδραστήρα, όπου δεν υπάρχει απαίτηση παραγωγής ώσης και για τον οποίο η κύρια παραγωγή έργου πραγματοποιείται μέσω της εκτόνωσης των καυσαερίων στις βαθμίδες του στροβίλου, η βασική λειτουργία του συστήματος εξαγωγής, είναι να οδηγήσει τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα, με τη μικρότερη δυνατή ταχύτητα.

Ο σχεδιασμός της εξαγωγής καυσαερίων σε αεριοστροβίλους, έχει πολύ μεγάλη σημασία για τις επιδόσεις του κινητήρα. Το σχήμα και το μέγεθος της εξαγωγής, επηρεάζουν τόσο τη **θερμοκρασία εισαγωγής των καυσαερίων στο στρόβιλο (Turbine Inlet Temperature – TIT)**, την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα και φυσικά την πίεση και την ταχύτητα του ρεύματος καυσαερίων, που εξωθούνται στην ατμόσφαιρα. Ως εκ τούτου, η αναπτυσσόμενη ώση, καθορίζεται, σε ένα βαθμό, από τη διαμόρφωση της εξαγωγής.

Το σύστημα εξαγωγής σε έναν αεριοστροβίλο κινητήρα κατασκευάζεται από ειδικά κράματα χάλυβα, ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων. Για την αποφυγή της απαγωγής θερμότητας προς τα γειτονικά μέρη του αεροσκάφους προβλέπεται η ροή αέρα περιφερειακά του σωλήνα εξαγωγής ή η επένδυση των τμημάτων της εξαγωγής με ειδικό μονωτικό υλικό. Το σύστημα εξαγωγής εκτείνεται από το τέλος του τμήματος του ή των στροβίλων μέχρι την έξοδο των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα. Ένα τυπικό σύστημα εξαγωγής καυσαερίων περιλαμβάνει τρία βασικά συκροτήματα:

- **τον κώνο εξαγωγής (exhaust cone),**
- **τον αγωγό εξαγωγής (exhaust duct ή jet pipe ή tailpipe),**
- **το ακροφύσιο εξαγωγής (exhaust nozzle).**

5.8 Μετάκαυση

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις είναι αναγκαία αυξημένη τιμή ώσης, μεγαλύτερη από αυτήν που είναι σε θέση να προσφέρει ο κινητήρας. Η απαίτηση αυτή αφορά μικρά χρονικά διαστήματα και περιπτώσεις όπως η μείωση του χρόνου και του μήκους που είναι αναγκαίο για την απογείωση, η αύξηση του ρυθμού ανόδου του αεροσκάφους ή η παροχή μεγάλης ισχύος σε μαχητικά αεροσκάφη όταν εκτελούν ελιγμούς μάχης. Στις περιπτώσεις αυτές δεν ενδείκνυται η χρήση ενός μεγάλου κινητήρα ο οποίος θα επιβαρύνει το αεροσκάφος με μεγαλύτερη μετωπική επιφάνεια, επιπρόσθετο βάρος και μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου. Η βέλτιστη λύση είναι η χρησιμοποίηση ενός **μετακαυστήρα (afterburner)**. Σε αυτόν πραγματοποιείται η **μετάκαυση (afterburning, reheating)** η οποία είναι μία πολύ αποτελεσματική μέθοδος αύξησης της ώσης ενός αεριοστροβίλου κινητήρα σε ποσοστό έως και 100%. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στους κινητήρες των υπερηχητικών μαχητικών αεροσκαφών. Με μετακαυστήρες ήταν εφοδιασμένοι και οι κινητήρες των πολιτικών αεροσκαφών Concorde και Tu-144. Οι περιορισμοί θορύβου κάνουν απαγορευτική τη χρήση μετάκαυσης σε πολιτικά και εμπορικά αεροσκάφη.

Ο μετακαυστήρας τοποθετείται στο χώρο μεταξύ του στροβίλου και του ακροφυσίου εξαγωγής. Εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι τα καυσαέρια, μετά την εκτόνωσή τους στο στρόβιλο, περιέχουν ακόμη αρκετή ποσότητα οξυγόνου (θυμηθείτε ότι μόνο ένα ποσοστό 25% περίπου από το εισερχόμενο ρεύμα αέρα στον κινητήρα χρησιμοποιείται κατά τη διεργασία της καύσης, το υπόλοιπο 75% χρησιμοποιείται για λόγους ψύξης). Με τη παροχή καυσίμου στο μετακαυστήρα, γίνεται ανάμειξή του με την υπολειπόμενη ποσότητα αέρα και πραγματοποιείται καύση, η μετάκαυση. Με τον τρόπο αυτόν, τα παραγόμενα καυσαέρια αποκτούν περισσότερη ενέργεια η οποία θα αξιοποιηθεί κατά την εκτόνωσή τους στο ακροφύσιο εξαγωγής. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της ταχύτητας εξαγωγής των καυσαερίων και, συνακόλουθα, της παραγόμενης ώσης από τον κινητήρα. Κατά το χρονικό διάστημα της λειτουργίας του μετακαυστήρα, η φλόγα από την

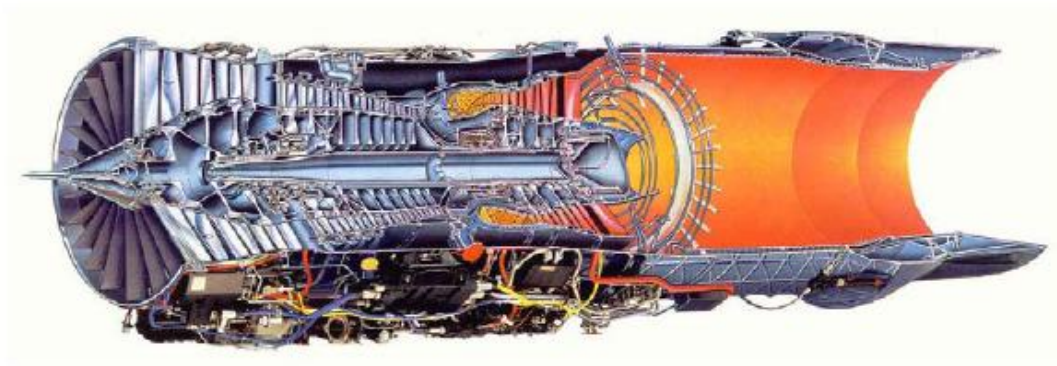
καύση είναι ορατή στην εξαγωγή του κινητήρα (Σχήμα 5.20α). Τα επίπεδα του θορύβου ξεπερνούν κατά πολύ τις ήδη αυξημένες τιμές που λαμβάνουν κατά τη λειτουργία χωρίς μετάκαυση. Το Σχήμα 5.20β δείχνει την τομή ενός κινητήρα με σύστημα μετάκαυσης.

Θεωρητικά, ο μετακαυστήρας είναι ένας αθόδουλος κινητήρας προσαρμοσμένος στην εξαγωγή ενός αεριοστρόβιλου (στροβιλοαντιδραστήρα ή στροβιλοανεμιστήρα). Το ρεύμα αέρα υψηλής ταχύτητας που απαιτείται αρχικά για την εκκίνηση και λειτουργία του αθόδουλου κινητήρα παρέχεται από τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου. Ο μετακαυστήρας προκαλεί ιδιαίτερη εντύπωση λόγω της απλότητας στην κατασκευή του. Ουσιαστικά, αποτελεί έναν αγωγό τοποθετημένο μετά το στρόβιλο, το εμπρόσθιο μέρος του οποίου έχει τη μορφή διαχύτη (ώστε να μειώνεται η ταχύτητα της ροής των καυσαερίων και να επιτυγχάνεται ανάφλεξη). Τα μέρη που τον αποτελούν είναι:

- Ο **αγωγός εξαγωγής (flame duct)** ο οποίος περιέχει το **φλογοθάλαμο (flame tube)**,
- Το **σύστημα έγχυσης** του καυσίμου,
- Ο **σταθεροποιητής** της φλόγας (**flame holder**) και
- Το **μεταβλητής γεωμετρίας ακροφύσιο εξαγωγής**.



(α)



(β)

Σχήμα 5.20 (α) Σύστημα μετάκαυσης σε λειτουργία, (β) Τομή κινητήρα με σύστημα μετάκαυσης

Κεφάλαιο 6^ο Σύγκριση μεταξύ των ειδών και των τύπων των κινητήρων

Στο σημείο αυτό, ας συνοψίσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που συγκεντρώνουν οι κινητήρες με τους οποίους ασχοληθήκαμε παραπάνω.

6.1 Παλινδρομικοί κινητήρες και κινητήρες αεριώθησης

Στις αεροπορικές εφαρμογές, ο τύπος του κινητήρα αεριώθησης που έχει επικρατήσει είναι ο αεριοστρόβιλος. Ο τελευταίος έχει περιορίσει, επίσης, εδώ και κάποιες δεκαετίες, τη χρήση του παλινδρομικού κινητήρα στα αεροσκάφη. Τα βασικά **πλεονεκτήματα** του αεριοστρόβιλου 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**.

Αν κάποιος εξετάσει με καθαρά λειτουργικά κριτήρια τα είδη αυτά των αεροπορικών κινητήρων, θα κάνει την πολύ σημαντική παρατήρηση ότι οι αεριοστρόβιλοι κινητήρες επιτυγχάνουν πολύ μεγαλύτερους λόγους παραγόμενης ώσης ανά μονάδα βάρους από τους παλινδρομικούς (8 φορές μεγαλύτερος λόγος για τον στροβιλοαντιδραστήρα και 5 φορές για τον ελικοστρόβιλο). Επίσης, από την ταχύτητα των 800km/h και άνω, η απόδοση των ελικοφόρων αεροσκαφών με παλινδρομικό κινητήρα είναι ουσιαστικά μηδενική (λόγω της αδυναμίας του έλικα να επιτύχει ικανοποιητική ώση για την πτήση), οπότε και επιβάλλεται η χρήση στροβιλοαντιδραστήρα ή στροβιλοανεμιστήρα.

Μειονεκτήματα των αεριοστρόβιλων κινητήρων θεωρούνται η **αυξημένη ειδική κατανάλωση καυσίμου** σε σχέση με τους παλινδρομικούς κινητήρες.

Βέβαια, η λειτουργία των στροβιλοελικοφόρων κινητήρων, με τις αρκετά μειωμένες τιμές ειδικής κατανάλωσης, έχει επιφέρει κάποια ισορροπία στο ζήτημα αυτό. Επίσης, οι αεριοστρόβιλοι 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.

6.2 Σύγκριση αεριοστρόβιλων με αθόδουλους και πυραύλους

Ο αεριοστρόβιλος, γενικά, παρουσιάζει καλύτερη απόδοση και ικανοποιητικά λειτουργικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τον αθόδυλο και τον πύραυλο, στην περιοχή των σημερινών ταχυτήτων πτήσης.

Ειδικότερα, ο αθόδυλος σε ταχύτητες έως Mach 2,6 περίπου παρουσιάζει χειρότερη απόδοση από τον αεριοστρόβιλο. Επίσης, δεν είναι σε θέση να εκκινήσει από μηδενική ταχύτητα αλλά χρειάζεται τη συνδρομή άλλου μέσου. Βέβαια, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της απλότητας στην κατασκευή και του μικρού βάρους ανά μονάδα παραγόμενης ώσης.

Ο πύραυλος παρέχει επίσης μεγάλη ποσότητα ώσης ανά μονάδα βάρους. Παρουσιάζει, όμως, όπως και ο αθόδυλος, χαμηλότερη απόδοση από τον αεριοστρόβιλο. Επιπρόσθετα, η εγκατάσταση αποθήκευσης οξειδωτικού μέσου προσδίδει όγκο και βάρος στον κινητήρα. Ένα ακόμη μειονέκτημά του είναι η αδυναμία μεταβολής της ώσης κατά τη διάρκεια της πτήσης. Για τους λόγους αυτούς, η χρήση του περιορίζεται στις περιπτώσεις όπου απαιτείται συμπληρωματική ώση για σύντομο χρονικό διάστημα. Αποτελεί, όμως, το μοναδικό κινητήρα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόωση βλημάτων και αέρο-οχημάτων έξω από την ατμόσφαιρα.

6.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεταξύ τύπων αεριοστροβίλων

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως οι τύποι των αεριοστροβίλων κινητήρων παρουσιάζουν μεταξύ τους κάποια πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα. Αυτά συνοπτικά είναι τα εξής:

Ο στροβιλοαντιδραστήρας αποτελεί την απλούστερη μορφή αεριοστροβίλου κινητήρα, πού σημαίνει ευκολία στην κατασκευή και στην συντήρηση, με χαμηλότερο κόστος. Όμως, έχουν τα μειονέκτηματα ότι **στις χαμηλές ταχύτητες πτήσης η παραγόμενη ώση είναι αναλογικά μικρή, χρειάζονται μεγάλο διάδρομο απογείωσης, ενώ απαιτούν αυξημένη κατανάλωση καυσίμου**. Επίσης, συγκριτικά με έναν ελικοφόρο κινητήρα, ο στροβιλοαντιδραστήρας επιτυγχάνει μικρότερη απόδοση σε ταχύτητες πτήσης κάτω των 750km/h.

Οι ελικοστροβίλοι έχουν το μειονέκτημα ότι **όλη σχεδόν η ενέργεια των καυσαερίων χρησιμοποιείται για την κίνηση του έλικα**. Για το λόγο αυτό, η προσφερόμενη από τα καυσαέρια ώση είναι πολύ μικρή. Ακόμη, ένα μειονέκτημα του ελικοστροβίλου κινητήρα είναι η πολυπλοκότητα της κατασκευής του που, κάποιες φορές, επιφέρει προβλήματα και στη συντήρησή του. Επιπλέον, το βάρος του είναι μεγαλύτερο από ένα στροβιλοαντιδραστήρα με ανάλογη ώση.

Ωστόσο, το μεγάλο **πλεονέκτημα του ελικοστροβίλου κινητήρα** είναι ότι επιτυγχάνει την **καλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου** συγκριτικά με οποιονδήποτε αεριοστροβίλο κινητήρα άλλου τύπου. Η παραγόμενη ώση λόγω της συμβολής του έλικα είναι μεγάλη και το αεροσκάφος έχει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά στην απογείωση (μικρός διάδρομος) και στην άνοδο. Επιπλέον, η απόδοση του είναι ικανοποιητική ακόμη και σε σχετικά μεγάλα ύψη πτήσεων (6.000 m). Τα παραπάνω πλεονεκτήματα μειώνονται όταν αυξάνεται η ταχύτητα (άνω των 650km/h) και το ύψος της πτήσης (άνω των 7.000 m).

Όσον αφορά τον αξονοστροβίλο, έχει ελάχιστη παραγωγή ώσης διότι παρέχει ισχύ σχεδόν αποκλειστικά στον άξονά του και παρουσιάζει τα ίδια

σχεδόν πλεονεκτήματα και μειονέκτηματα με τον ελικοστρόβιλο λόγω της μεγάλης ομοιότητας των δύο κινητήρων.

Ο στροβιλοανεμιστήρας **επιταχύνει μικρότερη μάζα αέρα από τον ελικοστρόβιλο αλλά μεγαλύτερη από το στροβιλοαντιδραστήρα.** Αναπτύσσει **μεγάλες ταχύτητες πτήσης** και σε **μεγάλα ύψη** (όπως ο στροβιλοαντιδραστήρας) ενώ, παράλληλα, **δεν απαιτεί** μεγάλο διάδρομο για την απογείωση (όπως και ο ελικοστρόβιλος). Επιπρόσθετα, ο περιορισμός της ταχύτητας πτήσης του ελικοστροβίλου σε τιμές 550 έως 650km/h δεν ισχύει. Σημαντικά πλεονεκτήματα, επίσης, θεωρούνται η αυξημένη παροχή ισχύος ανά μονάδα βάρους, η καλή ειδική κατανάλωση καυσίμου και μειωμένος θόρυβος κατά την απογείωση και την προσγείωση.

Τέλος, το **βασικό πλεονέκτημα του πυραυλοστροβίλου είναι ο μικρός όγκος και το μικρό του βάρος,** ενώ το μειονέκτημα του είναι ότι παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή ειδική κατανάλωση καυσίμου.

Κεφάλαιο 7^ο Χρήσεις και εφαρμογές των κινητήρων αεριώθησης

Η θεαματική εξέλιξη των κινητήρων αεριώθησης μετά το 2^ο παγκόσμιο πόλεμο, έχει επιβάλλει τη χρήση τους σχεδόν σε όλους τους τομείς των αεροπορικών πτήσεων. **Στις καθημερινές εφαρμογές, οι αεριοστροβίλοι έχουν τη μεγαλύτερη χρήση.** Όπως είδαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, κάθε τύπος τους συγκεντρώνει ορισμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά που τον καθιστούν κατάλληλο για τη χρήση συγκεκριμένων τύπων αεροσκαφών.

Οι **ελικοστροβίλοι** συνδυάζουν **μικρό βάρος** και **υψηλή απόδοση**, επιτυγχάνοντας **πολύ καλή ειδική κατανάλωση καυσίμου**. Χρησιμοποιούνται για την κίνηση μεταφορικών αεροσκαφών, μέσης και μεγάλης εμβέλειας, σε υψηλές υποηχητικές ταχύτητες. Το ανώτατο όριο της ταχύτητάς τους καθορίζεται από την απόδοση του έλικα.

Στην Ελλάδα, τέτοιου τύπου κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε αεροσκάφη όπως τα στρατιωτικά μεταγωγικά C-130, τα επιβατικά Bombardier Dash 8 / Q Series, τα επιβατικά ATR-42, ATR-72 και τα πυροσβεστικά τύπου Canadair.

Οι **στροβιλοαντιδραστήρες** και οι **στροβιλοανεμιστήρες** χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη που απαιτούν **δηχητικές** και **υπερηχητικές ταχύτητες**. Σε μικρότερες ταχύτητες χρησιμοποιούνται στροβιλοανεμιστήρες οι οποίοι παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα των ελικοστροβίλων χωρίς να περιορίζονται λειτουργικά από το σχεδιασμό του έλικα.

Στην χώρα μας, οι στροβιλοαντιδραστήρες, χρησιμοποιούνται κυρίως στα ελληνικά μαχητικά F-4E Phantom II και F-5 Freedom Fighter A/B, ενώ οι στροβιλοανεμιστήρες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα επιβατικά, τύπου Airbus και Boeing της Ολυμπιακής Αεροπορίας αλλά και στα μαχητικά Mirage 2000, F16 Fighting Falcon C/D και A-7 H/E Corsair II.

Πολύ διαδεδομένη, επίσης, είναι **η χρήση αεριοστροβίλων και συγκεκριμένα των αξονοστροβίλων για την κίνηση ελικοπτέρων**. Απαιτείται, βέβαια, ένα πολύπλοκο σύστημα μετάδοσης της κίνησης και

υποπολλαπλασιασμού των στροφών του κινητήρα για την κανονική λειτουργία του έλικα.

Μία άλλη συνήθης **χρήση των αεριοστροβίλων** είναι ως **βοηθητική πηγή ενέργειας (APU)**, κατά την παραμονή του αεροσκάφους στο έδαφος, ή σε περίπτωση ανάγκης. Χρησιμοποιούν καύσιμο από τις δεξαμενές του αεροσκάφους και παρέχουν ενέργεια για το σύστημα κλιματισμού και, γενικά, ηλεκτρική ενέργεια για οποιαδήποτε χρήση.

Τέλος, **αεριοστροβίλοι ανύψωσης** χρησιμοποιούνται στα **αεροσκάφη κάθετης απογείωσης και προσγείωσης** όπως για παράδειγμα στα μαχητικά τύπου Harrier.

Κεφάλαιο 8^ο Συντήρηση αεριοστρόβιλων κινητήρων

8.1 Τύποι Συντήρησης

Ο όρος συντήρηση, όταν αναφερόμαστε σε αεροπορικούς κινητήρες, είναι τόσο γενικός, που καλύπτει καθημερινές εργασίες, διάρκειας λίγων λεπτών, μέχρι και τη γενική επισκευή του κινητήρα, η οποία πραγματοποιείται σε βιομηχανικό περιβάλλον και διαρκεί, εν γένει, αρκετούς μήνες. Η διάκριση του τύπου της συντήρησης, η οποία πραγματοποιείται σε έναν κινητήρα, βασίζεται στο εάν ο κινητήρας βρίσκεται ή όχι στο αεροσκάφος. Έτσι, η συντήρηση γραμμής (line maintenance) πραγματοποιείται χωρίς να απομακρυνθεί ο κινητήρας από αυτό. Αντίθετα, για τις συντηρήσεις επιπέδου συνεργείου (shop maintenance) και τη γενική επισκευή (overhaul), απαιτείται η αφαίρεση του κινητήρα από το σκάφος. Οι συντηρήσεις επιπέδου συνεργείου γίνονται σε κατάλληλα εξοπλισμένο χώρο, κοντά εν γένει, στη γραμμή πτήσης. Αντίθετα, οι εργασίες γενικής επισκευής απαιτούν την αποστολή του κινητήρα σε ειδικά εξουσιοδοτημένο και κατάλληλα εξοπλισμένο επισκευαστικό κέντρο. Σε πολλές περιπτώσεις, μέρος των συντηρήσεων επιπέδου συνεργείου, πραγματοποιείται στα κέντρα γενικής επισκευής. Βασική αιτία γι'αυτό αποτελεί συνήθως η έλλειψη επαρκούς εξοπλισμού και εξειδικευμένου προσωπικού.

Οι παραπάνω τύποι συντήρησης είναι επίσης γνωστοί και ως:

- Συντήρηση "οργανωτικού" επιπέδου (organizational ή O-level Maintenance), για τη συντήρηση γραμμής.
- Συντήρηση "μέσου" επιπέδου (intermediate ή I-level maintenance), για τη συντήρηση επιπέδου συνεργείου.
- Συντήρηση εργοστασιακού επιπέδου (depot ή D-level maintenance), για τη γενική επισκευή.

8.1.1 Συντήρηση Επιπέδου Γραμμής

Η συντήρηση επιπέδου γραμμής αναφέρεται στις καθημερινές εργασίες που γίνονται στον κινητήρα. Εξασφαλίζει την καλή κατάσταση του κινητήρα, ενώ εντοπίζει πιθανές ενδείξεις δυσλειτουργίας. Περιλαμβάνει τις εργασίες γραμμής πτήσης (επιθεωρήσεις, αλλαγή λιπαντικών, κλπ.) καθώς επίσης και ορισμένες περιοδικές επιθεωρήσεις και απλές δοκιμές. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν επίσης και απλές, γενικά, επισκευές και ρυθμίσεις, οι οποίες δεν απαιτούν πάγιο εξοπλισμό συνεργείου, καθώς επίσης και αντικαταστάσεις εξαρτημάτων.

Ένας από τους βασικούς σκοπούς της επιθεώρησης γραμμής, είναι η έγκαιρη αναγνώριση δυσλειτουργιών, πριν αυτές προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές στον κινητήρα (fault isolation - troubleshooting). Τα εγχειρίδια συντήρησης γραμμής περιλαμβάνουν πίνακες, οι οποίες αναφέρουν πιθανές αιτίες για δυσλειτουργίες, οι οποίες προκύπτουν κατά την χρήση του κινητήρα. Οι ίδιοι πίνακες προτείνουν και διορθωτικές ενέργειες. Δεν είναι φυσικά δυνατόν να καλυφθούν όλα τα πιθανά προβλήματα σε αυτούς τους πίνακες. Αποτελούν όμως ένα σημαντικό βοήθημα, το οποίο αν συνδυασθεί με καλή γνώση του κινητήρα και των συστημάτων του και την εμπειρία του τεχνικού μπορεί να οδηγήσει γρήγορα στον εντοπισμό και την αποκατάσταση της δυσλειτουργίας.

Οι σύγχρονοι κινητήρες παρέχουν συνήθως αυτόματα, ενδείξεις σφαλμάτων. Αυτό γίνεται με την χρήση αισθητήρων, μετατροπέων και καταγραφικών. Η επεξεργασία των μετρήσεων γίνεται από υπολογιστή, ο οποίος παρέχει συνήθως και κάποια διάγνωση. Μία από τις κύριες διαγνωστικές μεθόδους, είναι η παρακολούθηση της επίδοσης του κινητήρα, σε συνάρτηση με τις ώρες λειτουργίας του. Οι μετρήσεις του υπολογιστή του αεροσκάφους μεταφέρονται σε υπολογιστή στη γραμμή πτήσης, όπου επεξεργάζονται με την χρήση ειδικού λογισμικού (Engine Condition Trend Monitoring Software). Η σύγκριση με μετρήσεις αναφοράς επιτρέπει την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, αναφορικά με την κατάσταση του κινητήρα και πιθανά προβλήματα που αυτός παρουσιάζει.

Ο καθαρισμός του κινητήρα αποτελεί από τα κύρια καθήκοντα της συντήρησης γραμμής. Με τον καθαρισμό απομακρύνονται υπολείμματα λιπαντικού, επικαθήσεις κ.ά., με αποτέλεσμα τη βελτίωση των επιδόσεων του κινητήρα. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις κατά τις οποίες ο κινητήρας λειτουργεί κοντά σε θάλασσα, ο συχνός καθαρισμός είναι ιδιαίτερα απαραίτητος για την αποφυγή φαινομένων διάβρωσης, τα οποία προκαλούνται από το αλάτι. Ο καθαρισμός γίνεται συνήθως με απιονισμένο νερό ή άλλο καθαριστικό υγρό συγκεκριμένων προδιαγραφών. Ο τρόπος καθαρισμού διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα: σε ελικοφόρους κινητήρες γίνεται σε χαμηλές στροφές χωρίς τη λειτουργία του κινητήρα (motoring), ενώ σε μεγάλους στροβιλοαντιδραστήρες (turbojet ή turbofan) ο καθαρισμός απαιτεί τη λειτουργία του κινητήρα στο 60% περίπου των ονομαστικών στροφών του.

Σε περιπτώσεις εκτεταμένων επικαθήσεων στο συμπιεστή, οι οποίες δε μπορούν να απομακρυνθούν με "υγρό" καθαρισμό, αυτός γίνεται με την χρήση στερεών σωματιδίων (abrasive grit blasting). Το υλικό καθαρισμού περιέχει συνήθως κατεργασμένα κελύφη καρυδιών ή και πυρήνες βερύκοκων.

Μία οικογένεια συσκευών, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την εξέταση της κατάστασης του κινητήρα είναι γνωστή ως Jetcal Analyzers. Οι συσκευές αυτές μετρούν βασικές παραμέτρους του κινητήρα, όπως θερμοκρασία (EGT) και πίεση εξόδου καυσαερίων, ταχύτητες περιστροφής, παροχή καυσίμου, κ.ά. Περιλαμβάνουν συνήθως τις απαραίτητες καλωδιώσεις και όργανα, τα οποία επιτρέπουν τη γρήγορη σύνδεση και λήψη μετρήσεων από τον κινητήρα στη γραμμή πτήσης. Ανάλυση των μετρήσεων επιτρέπει μεταξύ άλλων:

- Έλεγχο του συστήματος μέτρησης της EGT.
- Άμεσο προσδιορισμό ελαττωματικών θερμοστοιχείων.
- Έλεγχο της συνέχειας των καλωδιώσεων.
- Έλεγχο του συστήματος μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής.

8.1.2 Συντήρηση Επιπέδου Συνεργείου

Η συντήρηση επιπέδου συνεργείου περιλαμβάνει εργασίες, οι οποίες απαιτούν την αφαίρεση του κινητήρα από το αεροσκάφος, όχι όμως την προώθησή του σε εργοστάσιο γενικής επισκευής: οι απαιτήσεις μπορούν να καλυφθούν από τον πάγιο εξοπλισμό ενός συνεργείου που βρίσκεται "κοντά" στη γραμμή πτήσης. Οι βασικές εργασίες περιλαμβάνουν επισκευές και δοκιμές εξαρτημάτων, ή και ολόκληρου του κινητήρα. Όπως προαναφέρθηκε, σε πολλές περιπτώσεις τμήμα ή και το σύνολο της συντήρησης συνεργείου, πραγματοποιείται στο εργοστάσιο γενικής επισκευής.

8.1.3 Συντήρηση Επιπέδου Εργοστασίου

Η αφαίρεση του κινητήρα από το αεροσκάφος και η αποστολή του σε εργοστάσιο γενικής επισκευής είναι γενικά μία χρονοβόρα διαδικασία, η οποία φυσικά πρέπει να περιορίζεται κατά το δυνατόν, μια και σημαίνει πολλές φορές αδυναμία πραγματοποίησης πτητικού έργου από το αεροσκάφος. Οι λόγοι για αφαίρεση του κινητήρα μπορεί να συνοψισθούν ως εξής:

- **Ολοκλήρωση του χρόνου λειτουργίας μεταξύ γενικών επισκευών (Time Between Overhaul - TBO):** Στους στροβιλοκινητήρες ο κατασκευαστής δεν καθορίζει για όλο τον κινητήρα, αλλά παρέχει διαφορετικούς χρόνους για κάθε **υποσυγκρότημα (module)** του κινητήρα. Έτσι το θερμό τμήμα έχει διαφορετικούς χρόνους γενικής επισκευής από το συγκρότημα των παρελκομένων (Accesory drive GearBox - AGB). Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης μπορεί να συνεχίσει την εκμετάλλευση του κινητήρα, αντικαθιστώντας μόνο το υποσυγκρότημα που έχει προσεγγίσει τον χρόνο γενικής επισκευής. Ορισμένοι σύγχρονοι κινητήρες, δεν έχουν προδιαγεγραμμένο χρόνο γενικής επισκευής. Αυτή εκτελείται μόνο στην περίπτωση ιδιαίτερων ευρημάτων κατά τις προδιαγεγραμμένες επιθεωρήσεις. Αυτή η πολιτική συντήρησης είναι γνωστή και ως **On-Condition**.

- **Ζημιά από εξωτερικό αντικείμενο (Foreign Object Damage - FOD):**

Οι ζημιές που προκαλούνται από την αναρρόφηση στερεών αντικειμένων στον κινητήρα ποικίλουν σημαντικά. Μόνο η επιθεώρηση του κινητήρα μπορεί να δείξει το μέγεθος και την έκταση της ζημιάς. Σε πολλές περιπτώσεις ή αποκατάσταση της ζημιάς μπορεί να γίνει επί του αεροσκάφους (π.χ. όταν αυτή είναι μικρή και περιορίζεται στις πρώτες βαθμίδες των συμπιεστών). Σε περιπτώσεις εκτεταμένων ζημιών απαιτείται η αφαίρεση και αποστολή του κινητήρα στο εργοστάσιο γενικής επισκευής.

- **Θερμή εκκίνηση:** Κατά τη διάρκεια θερμής εκκίνησης, είναι πιθανόν οι αυξημένες θερμοκρασίες των καυσαερίων να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές στο θερμό τμήμα του κινητήρα, γεγονός το οποίο μπορεί να αποτελέσει αιτία εκτεταμένης αποσυναρμολόγησης του κινητήρα (ή τουλάχιστον του θερμού τμήματος), η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο στο κέντρο γενικής επισκευής.

Η γενική επισκευή ενός στροβιλοκινητήρα απαιτεί εκτεταμένο εξοπλισμό ειδικών εργαλείων, ιδιοσυσκευών μέτρησης και μέσων επιθεώρησης και επισκευής. Αυτά συνήθως παρέχονται σε εξειδικευμένα κέντρα (εργοστάσια γενικής επισκευής), τα οποία διαθέτουν και το απαραίτητο επιστημονικό και τεχνικό προσωπικό υποστήριξης. Τα κέντρα αυτά είναι εξουσιοδοτημένα και συνεργάζονται με τον κατασκευαστή του κινητήρα.

8.2 Συντήρηση, Ρύθμιση και Αποκατάσταση Βλαβών σε τμήματα Αεριοστροβίλων Κινητήρων

Η αποσυναρμολόγηση των αεριοστροβίλων μπορεί να γίνει σε οριζόντια ή σε κατακόρυφη κλίση. Η οριζόντια κλίση χρησιμοποιείται συνήθως για μικρότερους κινητήρες (Σχήμα 9.1). Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πιθανόν η κλίση να φέρει τροχούς, οι οποίοι επιτρέπουν τη μετακίνησή της, ενώ και ο κινητήρας μπορεί να περιστρέφεται (rollover) για ευκολότερη πρόσβαση στα διάφορα εξαρτήματά του. Μεγαλύτεροι κινητήρες τοποθετούνται σε κατακόρυφες σταθερές κλίνες, με το ψυχρό τμήμα προς τα κάτω (Σχήμα 8.2). Η πρόσβαση σε όλα τα σημεία του κινητήρα επιτυγχάνεται με σκαλωσιές. Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις, όπου η κατακόρυφη κλίση είναι τοποθετημένη σε ανελκυστήρα. Ο κινητήρας αποσυναρμολογείται στα κύρια υποσυγκροτήματά του, τα οποία τοποθετούνται σε ειδικές κλίνες, πριν την περαιτέρω αποσυναρμολόγησή τους (εάν απαιτείται). Για την ανύψωση των υποσυγκροτημάτων χρησιμοποιείται κατά κανόνα γερανός.



Σχήμα 9.1 Κινητήρας T56 στην οριζόντια κλίση αποσυναρμολόγησης

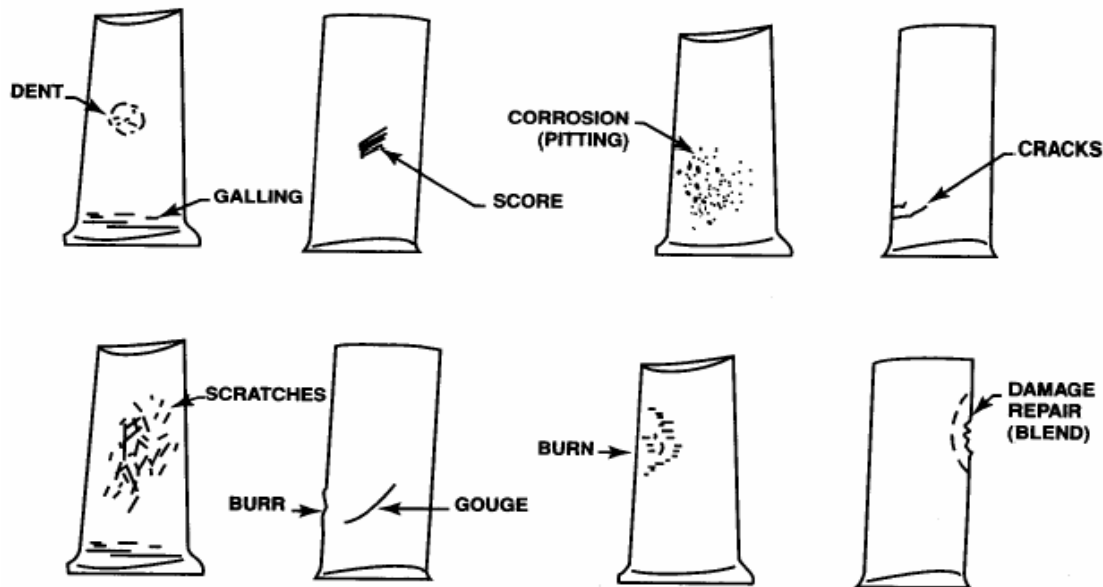


Σχήμα 8.2 Κινητήρας J79 στην κατακόρυφη κλίση αποσυναρμολόγησης

8.2.1 Συντήρηση και Επισκευή Ψυχρού τμήματος

Οι πρώτες βαθμίδες του συμπιεστή είναι ιδιαίτερα ευπαθείς σε ζημιές, οι οποίες μπορούν να προκληθούν από την αναρρόφηση αντικειμένων (FOD) αλλά και άμμου, ή άλλων μικρών σωματιδίων (erosion). Τα συνήθη ευρήματα είναι ρωγμές και διαφόρων ειδών αμυχές (nicks, dents, κλπ.) (Σχήμα 8.3). Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ζημιές μπορούν να επισκευασθούν με αφαίρεση υλικού και εν συνεχεία κατεργασία της περιοχής, έτσι ώστε να αποκτήσει λεία μορφή. Η διαδικασία της αφαίρεσης υλικού (blending) πρέπει να γίνεται με βάση τις οδηγίες του κατασκευαστή. Εκτελείται συνήθως σε εφαρμοστήριο, με την

χρήση ειδικών «πετρών» για την αφαίρεση του υλικού και ψηλού γυαλόχαρτου για την ανάκτηση του φινιρίσματος της επιφάνειας. Δεν πρέπει εν γένει να χρησιμοποιούνται ηλεκτροκίνητα εργαλεία, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν αυξημένη συγκέντρωση τάσεων ή και να οδηγήσουν σε φθορές σε γειτονικές περιοχές. Η επισκευή ολοκληρώνεται με την επιθεώρηση της κατεργασμένης περιοχής, με κάποια μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου (συνήθως MPI ή FPI), έτσι ώστε να εξασφαλισθεί η απουσία ρωγμών. Σε περίπτωση φυσικά κατά την οποία η αρχικώς διαπιστωθείσα φθορά υπερβαίνει τα προβλεπόμενα από τον κατασκευαστή όρια, το πτερύγιο απορρίπτεται.



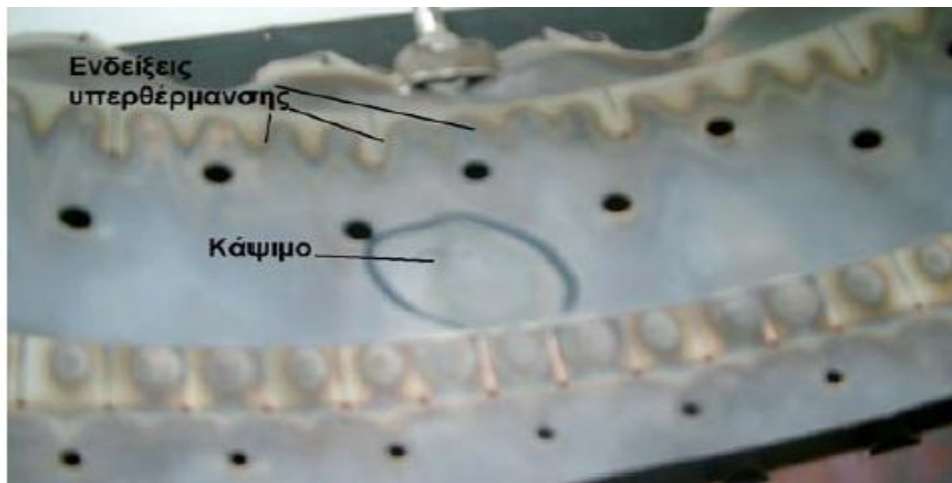
Σχήμα 8.3 Συνήθη ευρήματα σε πτερύγια συμπιεστή

Εκτός από τα πτερύγια, πιθανές φθορές είναι πιθανόν να παρουσιασθούν και στους δίσκους των συμπιεστών. Αν και η επιθεώρηση των δίσκων ελέγχει όλη την επιφάνειά τους, είναι σύνηθες να εμφανίζονται προβλήματα στις περιοχές τοποθέτησης των πτερυγίων (τις ονομαζόμενες «περιστεροουρές» – dovetail slots). Η επαφή του πτερυγίου με το δίσκο είναι πιθανόν να προκαλεί φθορές στην επιφάνεια του δίσκου (fretting wear). Συνήθης επισκευή σε αυτή την περίπτωση είναι ο «βομβαρδισμός» της περιοχής με σφαιρίδια (shot-peening).

8.2.2 Συντήρηση και Επισκευή Θερμού τμήματος

α) Θάλαμος Καύσης

Τα συνήθη ευρήματα κατά την επιθεώρηση των θαλάμων καύσης περιλαμβάνουν ρωγμές, «καψίματα» (burns), ενδείξεις υπερθέρμανσης (hot spots), στρεβλώσεις (warpage) και μηχανική διάβρωση (erosion). Σε ορισμένες περιπτώσεις οι συγκολλήσεις κατά την κατασκευή του θαλάμου είναι πιθανόν να είναι ατελείς (π.χ. μεγάλη ποσότητα του υλικού συγκόλλησης γύρω από τη ραφή), οπότε απαιτείται η επανασυγκόλληση της περιοχής. Η επισκευασιμότητα ενός ρωγματογμένου θαλάμου καύσης, εξαρτάται από την έκταση, την θέση και τον αριθμό των ρωγμών (Σχήμα 8.4). Η αποκατάσταση των ρωγμών γίνεται συνήθως με συγκόλληση (**inert gas, electron beam** ή **akku-welding**). Σε κάθε περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιείται υλικό (σύρμα) συγκόλλησης συμβατό με το υλικό του εξαρτήματος, ενώ συνήθως απαιτείται θερμική κατεργασία πριν και μετά την επισκευή.



Σχήμα 8.4 Συνήθη ευρήματα στον εσωτερικό δακτύλιο (inner liner) θαλάμου καύσης

Οι θάλαμοι καύσης «κινδυνεύουν» επίσης από τους ψεκαστήρες καυσίμου. Διαταραχή της ροής καυσίμου σε έναν ψεκαστήρα, μπορεί να οδηγήσει σε ανάφλεξη του καυσίμου πολύ κοντά ή και σε άμεση επαφή με τους

δακτύλιους (liners) του θαλάμου καύσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να προκληθεί επέκταση της φλόγας στην περιοχή του στροβίλου, με καταστρεπτικές φυσικά συνέπειες για τη σταθερή βαθμίδα ή και τα κινητά πτερύγια του στροβίλου.

β) Τμήμα Στροβίλων

Το τμήμα του ή των στροβίλων ενός αεριοστροβίλου, λειτουργεί σε ψηλές θερμοκρασίες και κάτω από σημαντικές τάσεις. Είναι λοιπόν σύνηθες να παρουσιάζει ρωγμές, καψίματα, στρεβλώσεις, μηχανική αλλά και χημική διάβρωση. Τα πτερύγια των σταθερών βαθμίδων λειτουργούν κάτω από πολύ υψηλές θερμοκρασίες ιδιαιτέρως βέβαια η πρώτη βαθμίδα, η οποία βρίσκεται αμέσως μετά τον θάλαμο καύσης.

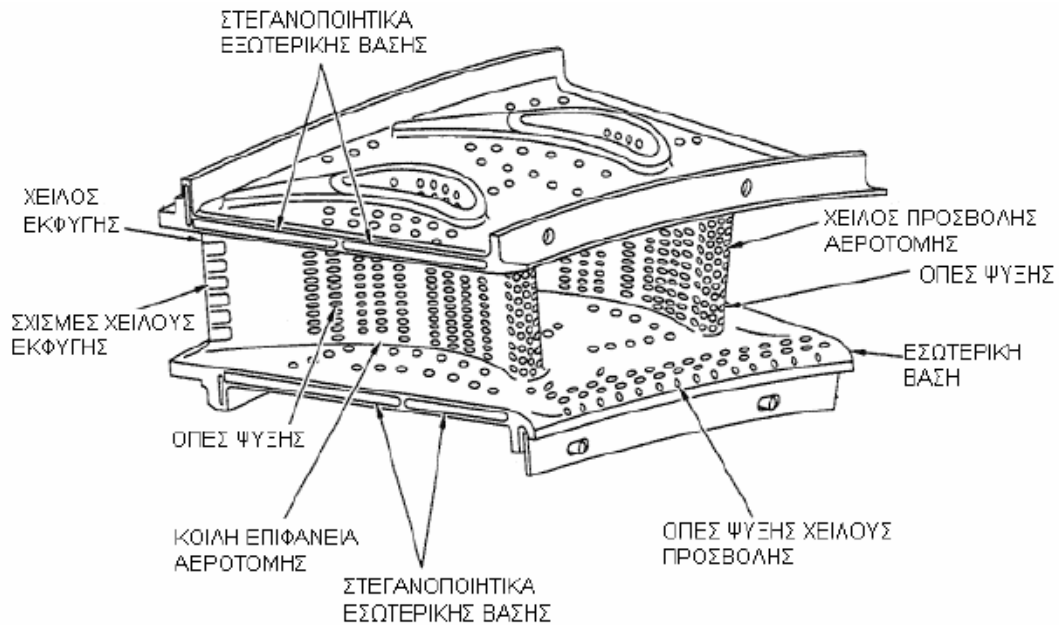
Για την προφύλαξη των βαθμίδων, χρησιμοποιούνται θερμοπροστατευτικές επιστρώσεις (Thermal Barrier Coatings).

Ρωγμές, οι οποίες πιθανόν εντοπίζονται στα σταθερά πτερύγια (Σχήμα 8.5), μπορούν να γίνουν αποδεκτές, εφόσον ικανοποιούν συγκεκριμένα κριτήρια αποδοχής (π.χ. «μικρές» ρωγμές, οι οποίες δεν συγκλίνουν). Αμυχές και σχισίματα συνήθως επισκευάζονται με τρόχισμα και εξομάλυνση της μορφής της περιοχής. Αποφραγμένες οπές ψύξης καθαρίζονται με την χρήση λεπτού σύρματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, πτερύγια τα οποία έχουν υποστεί μηχανική διάβρωση, μπορεί να επισκευασθούν με τη μέθοδο της επικάλυψης πλάσματος (plasma coating).

Η επιθεώρηση των δίσκων των στροβίλων είναι ιδιαίτερα απαιτητική, εξαιτίας των μεγάλων τάσεων που αυτοί υφίστανται λόγω της περιστροφής τους. Ένδειξη ρωγμής αποτελεί αιτία απόρριψης του δίσκου. Σημειώνεται, ότι ειδικά στην περίπτωση στρατιωτικών στροβιλοκινητήρων έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια ειδικές αυτοματοποιημένες επιθεωρήσεις με δινορεύματα, για την ανίχνευση ρωγμών πολύ μικρού μεγέθους.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το φαινόμενο του ερπυσμού (creep) το οποίο παρατηρείται στα περιστρεφόμενα πτερύγια. Ο συνδυασμός των φυγοκεντρικών

τάσεων με τις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας προκαλεί επιμήκυνση του πτερυγίου σε κάθε κύκλο λειτουργίας². Αν και αυτή η επιμήκυνση είναι απειροελάχιστη σε κάθε κύκλο, το αθροιστικό αποτέλεσμα πολλών κύκλων λειτουργίας μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση του διακένου μεταξύ πτερυγίου και περιβλήματος.



Σχήμα 8.5 Περιοχές επιθεώρησης σταθερού πτερυγίου 1ης βαθμίδας στροβίλου

8.3 Λίπανση – Συστήματα Λίπανσης

Η χρήση των λιπαντικών και κατ' επέκταση των συστημάτων λίπανσης στους αεριοστρόβιλους κινητήρες είναι απαραίτητη για να επιτύχουμε τη **μείωση των τριβών** των κινούμενων μερών του όπως οι **τριβείς**, τα **γρανάζια** μετάδοσης κίνησης και οι διατάξεις στεγανοποίησης (**λαβύρινθοι – seals**), καθώς και την **ψύξη** αυτών. Η επαφή των κινουμένων μερών σε ένα κινητήρα, η οποία στην πλειοψηφία των περιπτώσεων πραγματοποιείται κάτω από υψηλές δυνάμεις, δημιουργεί **δύναμη τριβής**. Η δύναμη αυτή έχει πάντοτε αντίθετη

διεύθυνση από αυτή της κινούμενης επιφάνειας. Για να υπερνικήσουμε τις δυνάμεις αυτές χρειάζεται να καταναλώσουμε έργο, κάτι που συνεπάγεται απώλεια από το ωφέλιμο έργο που λαμβάνουμε από τον κινητήρα. Όσο μικρότερες είναι οι δυνάμεις τριβής τόσο μεγαλύτερο είναι το έργο που παίρνουμε.

Εκτός από την κατανάλωση έργου, η τριβή που δημιουργείται μεταξύ των κινουμένων μερών προκαλεί και **φθορές** στις επιφάνειες των εξαρτημάτων που έρχονται σε επαφή. Όσο λείες και ομοιόμορφες να φαίνονται οι επιφάνειες ενός τριβέα ή των δοντιών ενός γραναζιού με γυμνό μάτι σε μικροσκοπική κλίμακα είναι αρκετά ανώμαλες και τραχιές. Η άμεση επαφή μεταξύ τους επιφέρει φθορά και στις δύο επιφάνειες, με συνέπεια τη μεταβολή των διαστάσεών τους από σταδιακή απώλεια υλικού και αύξηση της θερμοκρασίας που δημιουργείται από την μεταξύ τους τριβή.

Ο ρόλος του λιπαντικού είναι να αποτρέψει την επαφή και συνεπώς την τριβή μεταξύ των κινούμενων μερών δημιουργώντας ένα προστατευτικό στρώμα ανάμεσά τους. Με αυτό τον τρόπο έχουμε τριβή των κινούμενων μερών με το λιπαντικό και όχι μεταξύ τους. Μια δεύτερη λειτουργία που επιτελεί το λιπαντικό είναι η απαγωγή της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας από τις περιοχές που έρχονται σε επαφή. Παρόλο που η χρήση λιπαντικού μειώνει δραστικά την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στις περιοχές τριβής, τα επίπεδα της θερμοκρασίας μπορεί να φθάσουν αρκετά υψηλά.

8.3.1 Φυσικές Ιδιότητες και Τεχνικά Χαρακτηριστικά Λιπαντικών

Τα λιπαντικά χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες σύμφωνα με τις οποίες διαχωρίζονται και κατηγοριοποιούνται για συγκεκριμένες εφαρμογές και για την απόδοσή τους σε δεδομένες συνθήκες λειτουργίας. Τα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται σε αεριοστρόβιλους κινητήρες θα πρέπει να επίσης να ικανοποιούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ποιότητας και απόδοσης, τα οποία εξασφαλίζονται με κατάλληλες δοκιμές τους.

Χημική συμβατότητα με τα ελαστικά παρεμβύσματα που χρησιμοποιούνται για τη στεγανοποίηση του συστήματος λίπανσης. Το λιπαντικό θα πρέπει να προκαλεί την ελάχιστη δυνατή διόγκωση και συνεπώς παραμόρφωση των ελαστικών παρεμβυσμάτων και φυσικά να μην τα φθείρει αντιδρώντας χημικά μαζί τους.

Θερμική σταθερότητα είναι η ικανότητα του λιπαντικού να μην καίγεται σε υψηλές θερμοκρασίες σχηματίζοντας ενανθρακώσεις και ίζημα από υπολείμματα των πρόσθετων του λιπαντικού.

Το λιπαντικό δεν θα πρέπει να παγιδεύει **φουσαλίδες αέρα** και να σχηματίζει **αφρό** καθώς κυκλοφορεί στο σύστημα λίπανσης. Ειδικά πρόσθετα βοηθούν στο διαχωρισμό των φουσαλίδων αέρα από το λιπαντικό σε μικρό χρονικό διάστημα, αποτρέποντας την εισροή μείγματος αέρα-λιπαντικού στο κύκλωμα λίπανσης.

8.3.2 Τύποι Συστημάτων Λίπανσης Αεριοστρόβιλων Κινητήρων

Οι τύποι των συστημάτων λίπανσης αεριοστρόβιλων κινητήρων διαφέρουν ανάλογα με τη φιλοσοφία σχεδίασης και την εφαρμογή του κινητήρα. Γενικά τα συστήματα λίπανσης διακρίνονται σε **κλειστού τύπου** συστήματα στα οποία το λιπαντικό επιστρέφει στη δεξαμενή αφού ολοκληρώσει τον κύκλο λίπανσης και επαναχρησιμοποιείται, και **ανοικτού τύπου** όπου το λιπαντικό δεν επιστρέφει στη δεξαμενή αλλά απορρίπτεται στην ατμόσφαιρα.

α) Σύστημα με ανακουφιστική βαλβίδα πίεσης κυσίδας τριβέα (κλειστού τύπου)

Με το σύστημα αυτό η πίεση παροχής στα **ακροφύσια ψεκασμού** του λιπαντικού ρυθμίζεται με τη βοήθεια μιας ρυθμιζόμενης **ανακουφιστικής βαλβίδας** η οποία είναι ρυθμισμένη να λειτουργεί πάνω από μια ορισμένη πίεση.

Όταν η πίεση του λιπαντικού από την αντλία υπερβεί το όριο αυτό, η βαλβίδα ανοίγει και επιστρέφει την επιπρόσθετη ποσότητα στην εισαγωγή της αντλίας, ή στη δεξαμενή λιπαντικού, διατηρώντας έτσι σταθερή την πίεση παροχής προς τα ακροφύσια και συνεπώς ομοιόμορφο σχήμα ψεκασμού. Καθώς οι στροφές του αυξάνονται, η πίεση στις κυστίδες των τριβέων αυξάνεται ανάλογα, αφού η πίεση αυτή παρέχεται από τον αέρα του συμπιεστή του κινητήρα. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη μείωση της διαφοράς πίεσης που υπάρχει μεταξύ της κυστίδας των τριβέων και του λιπαντικού με αποτέλεσμα την μείωση του παρεχόμενου λιπαντικού σε υψηλές στροφές λειτουργίας. Το πρόβλημα αυτό αντισταθμίζεται από κάποια συστήματα, χρησιμοποιώντας την πίεση της κυστίδας για να επαυξήσουν το φορτίο του ελατηρίου της βαλβίδας παράκαμψης αυξάνοντας έτσι τη ροή προς τα ακροφύσια.

β) Σύστημα Λίπανσης ανοικτού τύπου

Αυτό το είδος συστήματος λίπανσης χρησιμοποιείται σε κινητήρες που λειτουργούν για μικρό χρονικό διάστημα ή είναι **κινητήρες «μιας χρήσης»**. Ένα τέτοιο σύστημα δεν απαιτεί ανακυκλοφορία του λιπαντικού, αφού αυτό απορρίπτεται στο περιβάλλον μετά τη λίπανση των τριβέων του και συνεπώς δεν χρησιμοποιεί εναλλάκτη, αντλίες επιστροφής και φίλτρο λιπαντικού, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο το βάρος και το κόστος του κινητήρα. Οι κινητήρες, η χρήση των οποίων απαιτείται για μικρό χρονικό διάστημα είναι δευτερεύοντες ενισχυτικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένες φάσεις πτήσης συνήθως μεταγωγικών αεροσκαφών, όπως για παροχή επιπρόσθετης ώσης για απογείωση σε διαδρόμους μικρού μήκους. Αυτού του είδους οι κινητήρες επίσης χρησιμοποιούνται και σε αεροσκάφη κάθετης απογείωσης όπου λειτουργούν μέχρι ένα ορισμένο ύψος όπου μετέπειτα τίθενται εκτός λειτουργίας αφού αναλαμβάνουν το έργο της πρόωσης του σκάφους οι κύριοι κινητήρες του.

8.3.3 Έλεγχοι και Διερεύνηση βλαβών συστήματος λίπανσης

Οι έλεγχοι που γίνονται στο σύστημα λίπανσης αφορούν τη στάθμη της δεξαμενής λιπαντικού, τον έλεγχο του φίλτρου και την αλλαγή ή τον καθαρισμό του, ανάλογα με τον τύπο που χρησιμοποιείται και τον έλεγχο των ανιχνευτών ρινισμάτων. Ένας έλεγχος που γίνεται μετά την επιθεώρηση του φίλτρου ή του ανιχνευτή ρινισμάτων σε περίπτωση που εντοπιστούν ρινίσματα μεγαλύτερου μεγέθους και ποσότητας από αυτά που έχει προδιαγράψει ο κατασκευαστής είναι ο φασματοσκοπικός έλεγχος λιπαντικού.

Οι συνήθεις βλάβες που παρουσιάζει το σύστημα λίπανσης ενός αεριοστρόβιλου κινητήρα είναι οι ακόλουθες :

1. **Απώλεια πίεσης λαδιού (χωρίς ίχνη διαρροής):** Μπορεί να οφείλεται εκτός από εμφανή διαρροή σε ελαττωματικό όργανο ένδειξης στο χειριστήριο ή ελαττωματικό αισθητήρα, χαμηλή στάθμη λιπαντικού, φραγμένη έξοδο ελαίου στη δεξαμενή και τέλος βλάβη στην αντλία..
2. **Χαμηλή πίεση λαδιού:** Μπορεί να οφείλεται εκτός από μία από τις παραπάνω αιτίες και στις ακόλουθες : ελαττωματική βαλβίδα παράκαμψης όπου στην περίπτωση αυτή η βαλβίδα ανοίγει σε μικρότερη πίεση από την προβλεπόμενη.
3. **Υψηλή πίεση λαδιού:** Η ένδειξη υψηλής πίεσης λαδιού εκτός από βλάβη στον αισθητήρα και το όργανο ένδειξης μπορεί να οφείλεται σε φραγμένο σωλήνα παράκαμψης λαδιού.
4. **Διακύμανση πίεσης λαδιού:** Οφείλεται συνήθως σε βλάβη στο σύστημα ένδειξης, όπως σε κομμένο καλώδιο, χαλαρή σύνδεση κάποιους από τους συνδέσμους καλωδίωσης ή βλάβη στον αισθητήρα πίεσης. Επίσης διακύμανση στη πίεση μπορεί να προκαλέσει ελαττωματική βαλβίδα παράκαμψης η οποία δεν μπορεί να παραμείνει σε ανοικτή θέση σε ενδεχόμενη αύξηση της πίεσης, και καθώς ταλαντεύεται μεταξύ ανοικτής και κλειστής θέσης, δημιουργεί αυχομοιώσεις στη πίεση.
5. **Ένδειξη αυξημένης ποσότητας λαδιού:** Μπορεί να οφείλεται σε εισροή καυσίμου μέσα στο κύκλωμα λίπανσης. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να εμφανιστεί

σε κινητήρες που χρησιμοποιούν εναλλάκτη λιπαντικού-καυσίμου για τη ψύξη του λιπαντικού. Στη περίπτωση που υπάρξει κάποια θραύση αγωγού μέσα στον εναλλάκτη, τότε το καύσιμο μπορεί να περάσει μέσα στο κύκλωμα λίπανσης και να παρουσιαστεί ένδειξη αυξημένης ποσότητας λαδιού.

8.4 Σύστημα Ψύξης

Είναι δεδομένο από τον κύκλο λειτουργίας του αεριοστρόβιλου κινητήρα ότι για να λειτουργήσει αποδοτικά ένας κινητήρας και να παράγει το μέγιστο έργο με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση καυσίμου θα πρέπει να λειτουργεί με τη μεγαλύτερη δυνατή θερμοκρασία εισαγωγής στροβίλου. Όμως, η αύξηση της θερμοκρασίας αυτής δεν είναι απεριόριστη καθώς συνδέεται άμεσα με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν εξαρτήματα όπως οι θάλαμοι καύσης και τα σταθερά πτερύγια της πρώτης βαθμίδας στροβίλου: η θερμοκρασία των καυσαερίων σε αυτά πλησιάζει ή και υπερβαίνει τη θερμοκρασία τήξης των μετάλλων κατασκευής τους.

Για το λόγο αυτό είναι προφανής η αναγκαιότητα ψύξης ευαίσθητων περιοχών και εξαρτημάτων ενός αεριοστρόβιλου κινητήρα. Αυτή επιτυγχάνεται με την κυκλοφορία αέρα, τόσο στο δακτύλιο μεταξύ του εξωτερικού περιβλήματος και του αεροδυναμικού καλύμματος του κινητήρα, όσο και στο εσωτερικό του. Ο αέρας αυτός απομαστεύεται από το συμπιεστή.

8.4.1 Περιφερειακή Ψύξη στο Εξωτερικό Περιβλήμα του Κινητήρα

Η περιφερειακή ψύξη του κινητήρα διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα. Στους στροβιλοαντιδραστήρες παλαιότερης τεχνολογίας η ψύξη του περιβλήματος επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τον αέρα που εισρέει στον κινητήρα από την εισαγωγή του (Σχήμα 8.7) λόγω διαφοράς πίεσης μεταξύ της

εισαγωγής και του ακροφυσίου εξαγωγής. Στους περισσότερους τύπους στρατιωτικών στροβιλοαντιδραστήρων δεν χρησιμοποιείται ψύξη του περιβλήματος, αλλά προστατεύεται ο χώρος του σκάφους περιφερειακά του θερμού τμήματος του κινητήρα με επένδυση από ειδικό πυρίμαχο υλικό.

Στους στροβιλοανεμιστήρες χαμηλού λόγου παράκαμψης η ψύξη πραγματοποιείται από το ρεύμα αέρα παράκαμψης το οποίο διέρχεται μεταξύ του εξωτερικού περιβλήματος του κινητήρα και του περιβλήματος του συμπιεστή, του θαλάμου καύσης, του στροβίλου (και αν υπάρχει μετακαυστήρας του περιβλήματος θερμικής προστασίας του) προτού εξέλθει στην ατμόσφαιρα μέσω του ακροφυσίου εξαγωγής.

Στους στροβιλοανεμιστήρες μεγάλου λόγου παράκαμψης όπως οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε σύγχρονα πολιτικά αεροσκάφη, η ψύξη του περιβλήματος του κινητήρα γίνεται πάλι με χρήση του αέρα παράκαμψης.

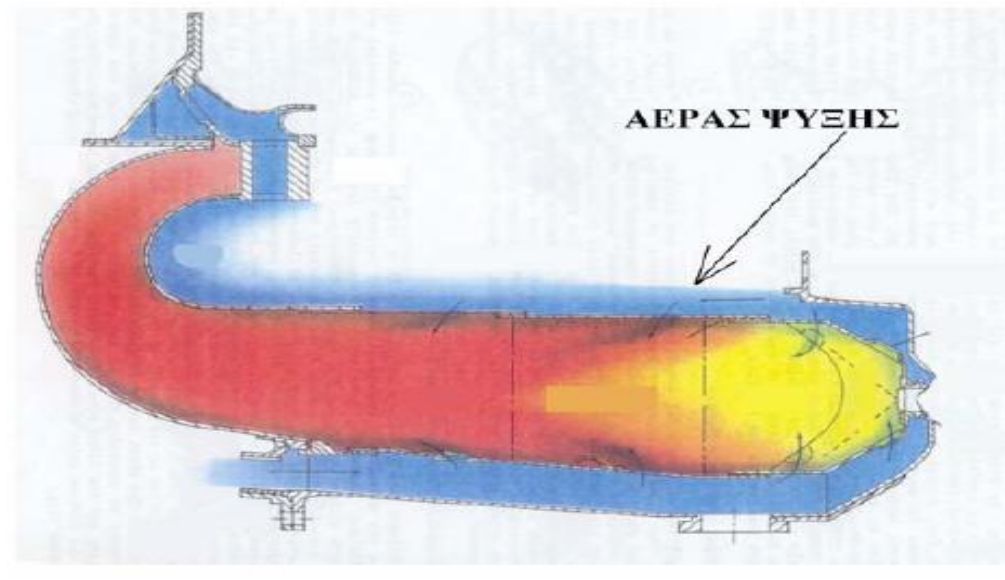


Σχήμα 8.7 Ροή αέρα ψύξης περιβλήματος του κινητήρα

8.4.2 Εσωτερική Ψύξη του Κινητήρα

Θάλαμος καύσης: Ο θάλαμος καύσης του αεριοστροβίλου κινητήρα, ανεξάρτητα από τον τύπο του (πολλαπλού τύπου, δακτυλιοειδής, ή σωληνοδακτυλιοειδής), είναι ένα εξάρτημα που δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει χωρίς ψύξη από τον αέρα που εισέρχεται από το διαχύτη του κινητήρα. Οι θερμοκρασίες των καυσαερίων στο θάλαμο καύσης είναι οι μέγιστες

θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στον κινητήρα, και μπορούν να φθάσουν τους 2000°C, θερμοκρασία στην οποία θα έλιωνε πολύ γρήγορα το λεπτό έλασμα από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο θάλαμος καύσης. Για τη ψύξη του θαλάμου καύσης χρησιμοποιείται ένα μέρος του αέρα που εισέρχεται από το διαχύτη του κινητήρα στον θάλαμο καύσης. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε, ότι το ποσοστό του αέρα που συμμετέχει στην καύση ανέρχεται σε 15-20%, ενώ το υπόλοιπο χρησιμοποιείται ως αέρας ψύξης και αραίωσης.



Σχήμα 8.8 Ροή αέρα ψύξης θαλάμου καύσης

Σταθερά και κινητά πτερυγία στροβίλου: Τα καυσαέρια εξέρχονται από το θάλαμο καύσης με θερμοκρασία που φτάνει, σε ορισμένους κινητήρες, ακόμα και τους 1550°C. Η θερμοκρασία αυτή είναι αρκετά μικρότερη της μέγιστης που επικρατεί μέσα στο θάλαμο καύσης. Παρ'όλη την πτώση αυτή, η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή και σε κάποιους κινητήρες υψηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης των μετάλλων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των σταθερών και κινητών πτερυγίων της πρώτης βαθμίδας του στροβίλου. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται αέρας από τον συμπιεστή για ψύξη των σταθερών και των κινητών πτερυγίων του στροβίλου. Η ψύξη των πτερυγίων επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους, οι οποίοι έχουν να κάνουν με τη διαθέσιμη τεχνολογία, το

κόστος κατασκευής αλλά και τη μέγιστη θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί ο στρόβιλος του συγκεκριμένου κινητήρα.

Δίσκοι στρόβιλου: Οι δίσκοι του στρόβιλου είναι ένα επιπλέον εξάρτημα του κινητήρα που απαιτεί ψύξη. Οι δυνάμεις που δέχεται λόγω της περιστροφής του με υψηλές ταχύτητες σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες, στις οποίες υπόκειται προκαλούν ερπυσμό, φαινόμενο που δημιουργεί αύξηση των διαστάσεων του δίσκου και μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες δεδομένου του πολύ μικρού διάκενου που έχουν τα άκρα των πτερυγίων με το περίβλημα.

8.5 Σύστημα Καυσίμου και Καύσιμα

8.5.1 Είδη και Ιδιότητες Καυσίμων

Οι **ιδιότητες** που απαιτείται να έχει ένα **καύσιμο** για να καταστεί κατάλληλο για χρήση σε έναν αεριοστρόβιλο αεροπορικό κινητήρα είναι πολλές και οι προδιαγραφές παραγωγής που πρέπει να πληροί αυστηρές. Οι ιδιότητες αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Θα πρέπει να έχουν **χαμηλό ιξώδες** σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών οι οποίες συναντώνται σε συνθήκες πτήσης ενός αεροσκάφος (-50°C – 60°C), έτσι ώστε να μπορούν να ρέουν ικανοποιητικά μέσα στο σύστημα καυσίμου.

- Θα πρέπει να επιτρέπουν την **εκκίνηση** του κινητήρα κάτω από όλες τις συνθήκες πτήσης και να διατηρούν αποδοτική και σταθερή καύση του μείγματος αέρα καυσίμου όπως εκκίνηση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και επανεκκίνηση στον αέρα όπου η θερμοκρασία μπορεί να είναι πολύ χαμηλή και η περιεκτικότητα του αέρα σε οξυγόνο μικρή.

- Να έχουν τη μέγιστη δυνατή **θερμογόνο δύναμη (FCV – fuel calorific value)**.

- Θα πρέπει να παρέχει **λίπανση** στα κινούμενα μέρη των εξαρτημάτων του συστήματος καυσίμου.

Μια από τις πιο βασικές ιδιότητες ενός καυσίμου και πολύ περισσότερο ενός αεροπορικού καυσίμου, είναι η υψηλή **θερμογόνος δύναμή** του, δηλαδή το ποσό της θερμότητας που εκλύει μια δεδομένη ποσότητα καυσίμου. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τιμή, τόσο μικρότερη είναι η ποσότητα καυσίμου που χρειάζεται για δεδομένη απόσταση πτήσης, άρα και μέγιστο το φορτίο που μπορεί να μεταφερθεί ή τόσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα δράσης του αεροσκάφους για δεδομένη χωρητικότητα των δεξαμενών του.

Η **περιεκτικότητα του σε θείο (sulphur content)** θα πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή, δεδομένου ότι κατά τη διάρκεια της καύσης παράγεται θειικό οξύ καθώς αντιδρά το θείο με τους υδρατμούς των καυσαερίων και προκαλεί οξείδωση στα μέρη του κινητήρα που βρίσκονται στο ρεύμα των καυσαερίων. Επιπλέον, το περιεχόμενο σε θείο έχει οξειδωτική δράση και στα μέρη του συστήματος καυσίμου με τα οποία έρχεται σε επαφή το καύσιμο.

Το σημείο πήξης του καυσίμου είναι επίσης πολύ σημαντική παράμετρος λόγω των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών που επικρατούν κατά τη διάρκεια της πτήσης σε μεγάλα ύψη, αλλά και σε χρήση σε κρύα κλίματα. Όταν το καύσιμο βρεθεί σε συνθήκες κοντά στο σημείο πήξης του, σχηματίζονται στερεά σωματίδια, με συνέπεια την απόφραξη φίλτρων και τμημάτων του συστήματος καυσίμου. Το σημείο πήξης των καυσίμων αεριοστρόβιλων κινητήρων κυμαίνεται από -40°C έως -60°C .

Τα χαρακτηριστικά της **ανάφλεξης** και **καύσης** του καυσίμου είναι αντικείμενο διεξοδικής μελέτης για την ομαλή και χωρίς προβλήματα λειτουργία του κινητήρα. Το κατάλληλο καύσιμο θα πρέπει να καίγεται πλήρως χωρίς να δημιουργεί καπνό και ενανθρακώσεις στους εγχυτήρες καυσίμου, στον θάλαμο καύσης και τα πτερύγια του στρόβιλου. Όσο μεγαλύτερο είναι το μοριακό βάρος του καυσίμου και το ποσοστό των ατόμων άνθρακα σε σχέση με το ποσοστό των ατόμων υδρογόνου, τόσο μεγαλύτερος είναι ο σχηματισμός καπνού και ενανθρακώσεων.

8.5.2 Τύποι Αεροπορικών Καυσίμων

Τα αεροπορικά καύσιμα είναι υδρογονάνθρακες, προϊόντα διύλισης του αργού πετρελαίου και ονομάζονται **κηροζίνες (kerosene)**. Στη διαδικασία διύλισης παράγονται σε σειρά μετά από το πετρέλαιο και πριν από τη βενζίνη καθώς είναι πιο πτητικά καύσιμα από το πετρέλαιο, δηλαδή εξαερώνονται σε μικρότερη θερμοκρασία αλλά είναι λιγότερο πτητικά από τη βενζίνη.

Στην προσπάθεια παραγωγής καυσίμων με ικανοποιητική απόδοση και σε επαρκείς ποσότητες για τις εκάστοτε ανάγκες της αγοράς και των τύπων των αεριοστρόβιλων κινητήρων έχουν παραχθεί αρκετοί τύποι καυσίμων. Ευρύτερα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα καύσιμα με κωδικό **JP-**(), που αναπτύχθηκαν για χρήση σε στρατιωτικούς κινητήρες της Αμερικανικής Πολεμικής Αεροπορίας και τα καύσιμα με κωδικό **Jet-**() που αναπτύχθηκαν για χρήση σε πολιτικούς κινητήρες.

α) Καύσιμα κατηγορίας JP

JP-1: Το πρώτο καύσιμο τύπου κηροζίνης με χαμηλό σημείο πήξης (**freezing point**) και υψηλότερο σημείο ανάφλεξης από το τότε διαθέσιμο καύσιμο, την αεροπορική βενζίνη, και συνεπώς πιο ασφαλές. Είχε όμως τα μειονεκτήματα της δυσκολίας ανάφλεξης σε χαμηλές θερμοκρασίες, τη διακοπή της καύσης σε μεγάλα ύψη και τη δημιουργία πάγου στο σύστημα καυσίμου.

JP-2: Το καύσιμο αυτό ήταν μια απόπειρα βελτίωσης του JP-1 προσθέτοντάς του ένα μικρό ποσοστό βενζίνης.

JP-3: Το καύσιμο που αντικατέστησε το JP-1, ήταν ένα μείγμα 65-70% αεροπορικής βενζίνης και 30-35% κηροζίνης. Η ανάφλεξη του κινητήρα σε χαμηλές θερμοκρασίες βελτιώθηκε, καθώς και η ευκολία επανεκκίνησης σε μεγάλα ύψη. Το μειονέκτημά του ήταν η υψηλή πτητικότητά του, η οποία δημιουργούσε απώλειες καυσίμου σε μεγάλα ύψη από την ατμοσφαιρική

αποκατάσταση των δεξαμενών. Επίσης δεν παρείχε ικανοποιητική λίπανση λόγω της μεγάλης του περιεκτικότητας σε βενζίνη.

JP-4: Ο πιο διαδεδομένος τύπος καυσίμου αεριοστρόβιλων κινητήρων ο οποίος είναι σε (περιορισμένη) χρήση έως και σήμερα. (Σταδιακά αντικαθίσταται από το JP-8). Είναι ένα καύσιμο ευρείας απόσταξης, περιέχει δηλαδή και ποσοστά των καυσίμων που παράγονται κατά τη διύλιση πριν και μετά από την κηροζίνη όπως η νάφθα και η βενζίνη. Είναι λιγότερο πτητικό από το JP-3 και συνεπώς παρουσιάζει λιγότερες απώλειες καυσίμου από εξαέρωση, αλλά έχει χαμηλότερη απόδοση σε λειτουργία και επανεκκίνηση σε μεγάλα ύψη.

JP-5: Το καύσιμο αυτό αναπτύχθηκε για χρήση σε αεροπλανοφόρα. Ήταν το τελικό προϊόν ανάμειξης αεροπορικής βενζίνης και βαρέως αποστάγματος κηροζίνης.

JP-6/JP-7: Αναπτύχθηκαν για εφαρμογές σε υπερηχητικά αεροσκάφη, όπου υπήρχε απαίτηση για χαμηλό σημείο πήξης λόγω πτήσεων σε μεγάλα ύψη.

JP-8: Το καύσιμο αυτό είναι μια βελτίωση του πιο ευρέως χρησιμοποιούμενου JP-4. Οι βελτιώσεις που εισάγει είναι: **υψηλότερο σημείο ανάφλεξης** και **μικρότερη πτητικότητα** χαρακτηριστικά που το κάνουν πιο ασφαλές.

β) Καύσιμα κατηγορίας Jet

Jet A, Jet A-1 και Jet B: Τα καύσιμα αυτά χρησιμοποιούνται στην πολιτική αεροπορία. Οι τύποι Jet A και Jet A-1 είναι αυτοί που βρίσκονται σε ευρεία χρήση και ανήκουν στην κατηγορία των κηροζινών, με χαρακτηριστικά τη μικρή πτητικότητα και μικρή τάση να δημιουργούν μείγμα αέρα και ατμών καυσίμου στις δεξαμενές του σκάφους. Το Jet B είναι καύσιμο ευρείας διύλισης και ανήκει στην κατηγορία των βενζινών. Αποτελείται από μείγμα κηροζίνης και βενζίνης και έχει χαμηλό σημείο πήξης (-60°C), ενώ το ιξώδες του παραμένει μικρό σε χαμηλές θερμοκρασίες, γεγονός που δεν ευνοεί το σχηματισμό στερεοποιημένου καυσίμου στα φίλτρα και τις αντλίες καυσίμου. Το Jet-B είναι

κατάλληλο για χρήση σε μεγάλα ύψη και ψυχρά κλίματα. Είναι λιγότερο πτητικά καύσιμα από τη βενζίνη, αλλά περισσότερο από τις κηροζίνες με συνέπεια να παράγουν εύφλεκτους ατμούς αέρα, καυσίμου σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών.

Κεφάλαιο 9^ο Συμπεράσματα

Η πρόοδος που έχει σημειωθεί στους αεριοστρόβιλους κινητήρες όλα αυτά τα χρόνια είναι τεράστια και όσο εξελίσσεται η τεχνολογία θα υπάρχει και μεγαλύτερη βελτίωση. Μέσα απο την παρούσα εργασία αποδείχθηκε το πόσο πολύπλοκη είναι η κατασκευή και η λειτουργία των αεριοστρόβιλων κινητήρων, την τεράστια χρησιμότητα που έχουν στα αεροσκάφη αλλά και το πόσο μεγάλη προσοχή και οργάνωση απαιτεί η συντηρησή τους. Αυτό σημαίνει οτι απαιτείται ιδιαίτερη εμπειρία και γνώση απο τους μηχανικούς που είναι υπεύθυνοι για τη σωστή λειτουργία, τον έλεγχο και τη συνεχή βελτίωση των κινητήρων αυτών.

Η εργασία αυτή γράφτηκε με σκοπό να βοηθήσει μελλοντικά τους αναγνώστες της να αναπτύξουν, όσο πιο γρήγορα γίνεται, μια γενική άποψη πάνω στους αεριοστρόβιλους κινητήρες αεροσκαφών, κυρίως όσον αφορά τη λειτουργία, τις εφαρμογές, και την συντήρηση τους. Ειδικότερα παρουσιάστηκαν οι εξής τύποι αεριοστρόβιλων κινητήρων: ο **στροβιλοαντιδραστήρας**, ο **ελικοστρόβλιος**, ο **αξονοστρόβιλος**, ο **στροβιλοανεμιστήρας**, ο **στροβιλο-αθόδυλος** και ο **πυραυλοστρόβιλος**. Έτσι, μετά το πέρας της μελέτης της πτυχιακής αυτής εργασίας ο αναγνώστης θα έχει αποκτήσει αρκετές γνώσεις ώστε να είναι ικανός:

- Να γνωρίζει την ιστορική εξέλιξη των κινητήρων αεριώθησης, τις κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται, τις αρχές λειτουργίας τους και τα χαρακτηριστικά τους.
- Να περιγράφει τον κύκλο λειτουργίας των κινητήρων και τις διεργασίες που πραγματοποιούνται κατά τις διάφορες φάσεις του.
- Να αναγνωρίζει τα κύρια χαρακτηριστικά των αεριοστρόβιλων κινητήρων και τις κατηγορίες στις οποίες αυτοί διακρίνονται.
- Να αναφέρει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεταξύ των τύπων των κινητήρων.
- Να διακρίνει τα κύρια εξαρτήματα των κινητήρων και να περιγράφει τη λειτουργία τους.

- Να διακρίνει τα διάφορα συστήματα (λίπανσης, ψύξης κλπ) των κινητήρων και να περιγράφει τη λειτουργία τους.
- Να αναφέρει τα είδη και τα στάδια συντηρήσης των αεριοστρόβιλων αεροπορικών κινητήρων.
- Να περιγράφει τις συνήθεις επισκευές που εκτελούνται στα εξαρτήματα των αεριοστρόβιλων αεροπορικών κινητήρων.

Βιβλιογραφία

1. Γεωργίου, Δ., «Εισαγωγή στους Θερμοκινητήρες», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 1993.
2. Κακάτσιος, Ξ., «Στροβιλοαντιδραστήρες Αεροσκαφών».
3. Δανιήλ, Γ., Φ., Ρεβίδης, Φ., Κ., «Κινητήρια Μηχαναί», Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα, 1992.
4. Καρκανιάς, Κ., «Αεριοστρόβιλοι κινητήρες», Εκδόσεις ΑΛΦΑ, Αθήνα.
5. Καρκανιάς, Κ., Γούλιος, Γ., «Εμβολοφόροι Αεροπορικοί Κινητήρες», Εκδόσεις ΑΛΦΑ, Αθήνα.
6. Καρέλας, Ε., Τριαντάφυλλος, Ι., Φρέσκος, Γ., «Κινητήρες Αεροσκαφών Ι, ΙΙ», Ο.Ε.Δ.Β., Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, Αθήνα 2004.
7. Κούτμος, Π., «Θεωρία Μηχανών Εσωτερικής Καύσης», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 1993.
8. Κούτμος, Π., «Θεωρία Αεριοστρόβιλων», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 1992.
9. Παπαηλιού, Κ., Μαθιουδάκης, Κ., Γιαννάκογλου, Κ., «Εισαγωγή στις Θερμικές Στροβιλομηχανές», Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1996.
10. Τομπόπουλος, Μ., «Κινητήρες Τζετ (Αεριοστρόβιλοι)», Τεχνικές Σχολές Κρόνος.
11. Hellenic Aerospace Industry, Technical Directorate, "Technical Publications Course", Τανάγρα, 2002.

Διαδικτυακοί Τόποι

1. http://www.ellinikos-stratos.com/technologia/scramjet_1.asp
2. <http://www.haf.gr/el/>
3. <http://www.centennialofflight.gov>
4. <http://www.defencenet.gr/>
5. http://en.wikipedia.org/wiki/Jet_engines