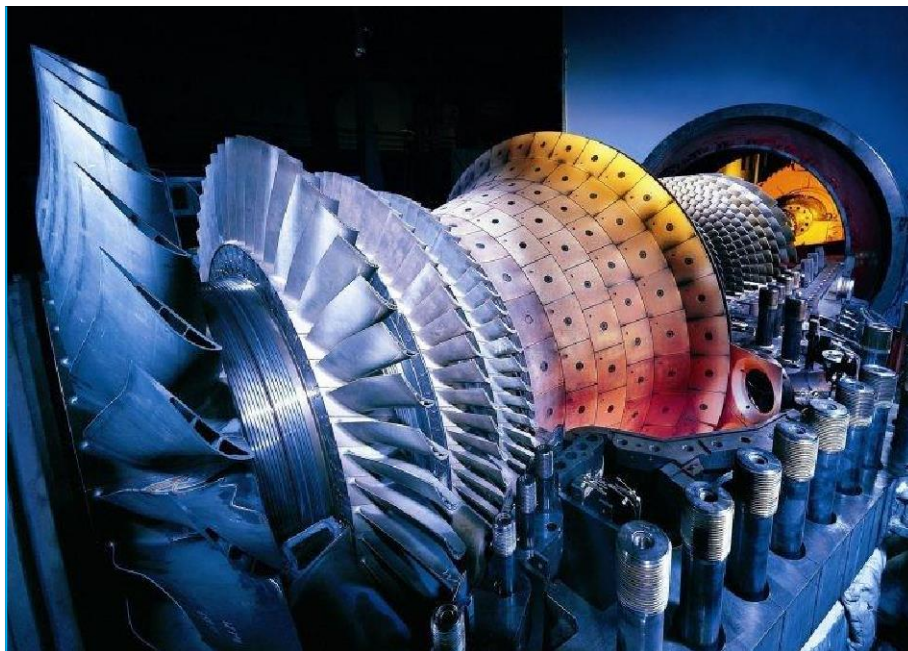


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΩΣΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΑΧΗΤΙΚΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ



ΦΟΙΤΗΤΕΣ: ΚΑΛΑΝΤΖΗΣ ΦΩΤΙΟΣ (Α.Μ. 7142)

ΜΑΓΚΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ (Α.Μ. 6938)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΟΛΥΖΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2020

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την διπλωματική μας εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου με σκοπό να γνωρίσουμε την αρχή λειτουργίας των αεριοστρόβιλων κινητήρων, τις κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται αυτοί οι κινητήρες και τους τρόπους που υπάρχουν για να γίνει η συντήρησή τους, καθώς και τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα των κινητήρων.

Αρχικά, η εργασία μας κάνει μια εισαγωγή για τα αεροσκάφη και για την ιστορική τους αναδρομή, αναλύει τα βασικά μέρη ενός αεροσκάφους, την περιγραφή και λειτουργία των συστημάτων πρόωσής τους καθώς και τη συντήρησή τους.

Στη συνέχεια, η εργασία ασχολείται με τους διάφορους τύπους αεριοστρόβιλων κινητήρων (turbojet, turbofan, turboprop) και την αρχή λειτουργίας αυτών. Επιπλέον γίνεται η κατηγοριοποίηση αυτών με βάση κάποια κριτήρια καθώς και οι διαφορές που υπάρχουν μεταξύ τους. Επιπρόσθετα, ένα καθοριστικό κομμάτι για την σωστή λειτουργία των αεριοστρόβιλων κινητήρων είναι η συντήρησή τους η οποία αποτελείται από πολλά στάδια όπως θα δούμε παρακάτω. Ακόμα αναφέρονται οι πιο συνηθισμένες περιπτώσεις βλαβών του κινητήρα και η αποφυγή αυτών μέσω της πρόληψης. Ένα σημαντικό κομμάτι ακόμα είναι τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αεριοστρόβιλων κινητήρων όπως είναι τα συστήματα λίπανσης, ψύξης και καυσίμων και το ρόλο που παίζουν αυτά στον τρόπο λειτουργία τους. Τέλος, γίνεται μια εξονυχιστική περιγραφή της λειτουργίας των αεριοστρόβιλων και της συντήρησης των αεροσκαφών.

Από την θέση αυτή, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον αξιότιμο κ. Πολυζάκη Απόστολο, για την καθοδήγηση του, τις πολύτιμες συμβουλές του, την αμέριστη συμπαράστασή του καθώς και την κατανόηση του κατά την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας. Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τις οικογένειές μας, για την υπομονή και την στήριξη που μας έδωσαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά και καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μας.

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

Οι σπουδαστές

ΚΑΛΑΝΤΖΗΣ ΦΩΤΙΟΣ

ΜΑΓΚΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

.....

.....

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την περιγραφή και μελέτη των συστημάτων πρόωσης πολιτικών και μαχητικών αεροσκαφών με σκοπό την κατανόηση αυτών και τις διαφορές που έχουν μεταξύ τους.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε έξι Κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή στη λειτουργία των αεριοστρόβιλων και στους τύπους ως προς την χρήση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά των αεροσκαφών, στην ασφάλεια αυτών ως μέσο μεταφοράς και τα παραδείγματα ενός πολιτικού, μαχητικού αεροσκάφους καθώς και των καινοτόμων ειδών αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του συστήματος πρόωσης των αεροσκαφών, δηλαδή αναλυτικά τα εξαρτήματα που το αποτελούν, την αρχή λειτουργίας του, το κύκλο λειτουργίας του, το μηχανισμό της μετάκαυσης, τη σχεδιάσή του, τα υλικά κατασκευής του καθώς και τη σύγκριση μεταξύ των ειδών και των τύπων των κινητήρων αεριοστρόβιλων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο ακολουθεί η ανάλυση λειτουργίας στο σημείο σχεδιασμού του κύκλου του αεριοστρόβιλου. Συγκεκριμένα στο σημείο σχεδιασμού γίνεται η ανάλυση του κύκλου, των περιοχών λειτουργίας του τόσο για πολιτικό όσο για μαχητικό. Αναλύεται η λειτουργία του αεριοστρόβιλου κατά την εκκίνηση, τον έλεγχο πριν την εκκίνηση, την απογείωση, την άνοδο, την πλεύση, την κάθοδο, την προσέγγιση και προσγείωση, τη διακοπή λειτουργίας και τη διαδικασία ανάγκης .

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η συντήρηση των αεροσκαφών, ο εξοπλισμός τους, η εξακρίβωση πιθανών βλαβών, οι ρυθμίσεις τους και οι δοκιμές τους στο έδαφος.

Στο έκτο κεφάλαιο δίνονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς επίσης και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της.

Τα σπουδαιότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι (α) η καινοτομία που προσφέρουν τα νέα μοντέλα πολιτικών και μαχητικών αεροσκαφών, (β) τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών, (γ) τη σύγκριση μεταξύ των ειδών και των τύπων των κινητήρων αεριοστρόβιλων και (δ) την σπουδαιότητα της συντήρησης των αεροσκαφών.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iv

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	1
2. ΟΡΙΣΜΟΣ.....	3

## 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΕΡΟΠΛΑΝΩΝ

1.1 Τύποι αεροπλάνων ως προς την χρήση.....	4
1.2 Διάκριση αεροσκαφών ως προς το προωθητικό σύστημα.....	5
1.3 Λεπτομερής περιγραφή αεροσκάφους και μέρη από τα οποία αποτελείται ..	7
1.4 Τύπος μηχανής αεριοστροβίλου .....	15
1.5 Εισαγωγή των αεριοστροβίλων στην πρόωση των αεροσκαφών .....	17

## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

2.1 Δομικά χαρακτηριστικά αεροσκαφών. ....	19
2.2 Ασφάλεια αεροσκαφών ως μέσο μεταφοράς.....	32
2.3 Αισθητήρες διατάξεις αεροσκαφών.....	36
2.4 Τεχνικές προδιαγραφές αεροπλάνου .....	41
2.5 Πολιτικό αεροσκάφος .....	47
2.6 Μαχητικό αεροσκάφος.....	54
2.7 Καινοτόμα είδη αεροσκαφών.....	70

## 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

3.1 Εξαρτήματα προωθητικού συστήματος.....	80
3.2 Αρχή λειτουργίας αεριοστροβίλου .....	81
3.3 Βασικά μέρη του αεριοστροβίλου για επιβατηγό αεροσκάφος .....	84
3.4 Κύκλος λειτουργίας αεριοστροβίλων .....	91
3.4.1 Κριτήρια λειτουργικής απόδοσης αεριοστροβίλων .....	94
3.4.2 Πραγματικός κύκλος λειτουργίας.....	95
3.4.3 Σύστημα εισαγωγής αέρα .....	99
3.4.4 Συμπιεστές.....	102
3.4.5 Αξονικοί συμπιεστές.....	106

3.4.6	Θάλαμος καύσης.....	118
3.4.7	Αεροπορικά καύσιμα.....	126
3.4.8	Στρόβιλος.....	140
3.4.9	Σύστημα εξαγωγής.....	143
3.4.10	Θερμικοί εναλλάκτες αεροσκαφών.....	149
3.5	Βασικά μέρη του αεριοστρόβιλου για μαχητικό.....	150
3.6	Η μετάκαυση στους αεροπορικούς κινητήρες.....	153
3.7	Σχεδίαση, κατασκευή, υλικά κατασκευής.....	162
3.8	Σύγκριση μεταξύ των ειδών και των τύπων των κινητήρων αεριοστρόβιλων.....	163

## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

4.1	Γενικά.....	165
4.2	Περιοχές λειτουργίας.....	165
4.2.1	Περιοχές λειτουργίας πολιτικών αεριοστρόβιλων.....	165
4.2.2	Περιοχές λειτουργίας πολεμικών αεριοστρόβιλων.....	166
4.2.3	Χρονικοί περιορισμοί.....	167
4.2.4	Θερμοκρασιακοί περιορισμοί.....	168
4.2.5	Περιορισμοί στροφών.....	168
4.3	Παράμετρος προσδιορισμού ώσης.....	168
4.4	Λειτουργία αεριοστρόβιλου.....	169
4.4.1	Εκκίνηση και έλεγχος πριν την εκκίνηση.....	169
4.4.2	Απογείωση.....	170
4.4.3	Άνοδος.....	171
4.4.4	Πλεύση.....	172
4.4.5	Κάθοδος, προσέγγιση και προσγείωση.....	172
4.4.6	Διακοπή λειτουργίας.....	172
4.4.7	Διαδικασίες ανάγκης.....	173

## 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

5.1	Γενικά.....	173
5.2	Προγραμματισμένη συντήρηση.....	174
5.3	Μη προγραμματισμένη συντήρηση.....	175
5.4	Εξοπλισμός.....	175
5.5	Ευκολία συντήρησης.....	175
5.6	Λειτουργική παρακολούθηση.....	176
5.7	Προφυλάξεις κατά την συντήρηση.....	178
5.8	Εξακρίβωση βλαβών.....	179
5.9	Ρυθμίσεις.....	180
5.10	Δοκιμές στο έδαφος.....	180
5.11	Συσκευή ελέγχου καυσαερίων.....	182
5.12	Συντήρηση του συμπιεστή.....	182
5.12.1	Επιθεώρηση και καθαρισμός.....	183
5.12.2	Αιτίες βλαβών πτερυγίων.....	184
5.13	Συντήρηση θαλάμων καύσης.....	185

5.14 Συντήρηση στροβίλου.....	186
5.15 Συντήρηση εξαγωγής.....	187
5.16 Καθορισμός δίοδων αέρα .....	188

## **6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΥΤΩΝ**

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>190</b>
--------------------------	------------

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πάντα μας προκαλούσε εντύπωση το πέταγμα των πουλιών. Ανέκαθεν ο άνθρωπος κοιτούσε με θαυμασμό τα πουλιά. Η απορία του ήταν μεγάλη και εύλογη. Για πολλά χρόνια έμεινε προσκολλημένος στην Γη. Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν κατά την αρχαιότητα, από τις γνωστές πηγές της ιστορίας, από τον Αρχύτα τον Συρακούσιο. Η ιστορία μας περιγράφει την περίφημη, ξύλινη ιπτάμενη περιστερά του, η οποία πέταξε με την βοήθεια πεπιεσμένου αέρα ή ατμού. Φτάνουμε στο Μεσαίωνα με τα περίφημα σχέδια του Λεονάρντο Ντα Βίντσι τα οποία όμως παραμείναν στα χαρτιά. Αμέσως στο Μονπελιέ της Γαλλίας γίνονται προσπάθειες από τους αδερφούς Μογκοφλιέρι. Πειραματίζονται με αερόστατα, θερμού αέρα ο οποίος σαν ελαφρύτερος του κανονικού, αναγκάζει το όχημα με καλάθι και δύο επιβάτες να υπερυψωθεί. Έχουμε την πρώτη πραγματική πτήση ανθρώπου πάνω από το έδαφος. Τα αερόστατα κυριαρχούν στη Γαλλία και αργότερα σχεδόν σε όλη την Ευρώπη. Όμως μόνο πετούν δεν έχουν διεύθυνση και κατεύθυνση. Πάμε στο 1907. Έχουμε το πρώτο πραγματικό αεροπλάνο με κινητήρα εσωτερικής καύσεως και πηδάλιο. Οι αδερφοί Ράιτ μπαίνουν στην ιστορία με την πρώτη πετυχημένη πτήση. Έκτοτε ακολουθεί αλματώδης ανάπτυξη του αεροπλάνου. Στον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο έχουμε ανάπτυξη του αεροπλάνου με αερομαχίες. Στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο αναπτύσσονται ακόμα περισσότερο και πιάνουν ταχύτητες 300 km/h. Στα χρόνια μας τα επιβατικά αεροπλάνα ξεπερνούν τα 1200 km/h. Είναι μια από τις πιο θαυμάσιες κατακτήσεις του ανθρώπινου γένους. Χάρη στο αεροπλάνο οι αποστάσεις εκμηδενίστηκαν. Στον τομέα αυτό ο άνθρωπος είναι άξιος συγχαρητηρίων. Όταν η ασφάλεια προσμετράται με τους θανάτους ανά χιλιόμετρο, το ταξίδι μέσω αέρος είναι περίπου 10 φορές πιο ασφαλές από αυτό με λεωφορείο ή σιδηρόδρομο. Όταν όμως προσμετράται με θανάτους ανά ταξίδι, το ταξίδι μέσω αέρος είναι σε σημαντικό βαθμό πιο επικίνδυνο από ότι το ταξίδι με αυτοκίνητο, σιδηρόδρομο ή λεωφορείο. Η ασφάλιση των αεροπορικών ταξιδιών είναι σχετικά πιο ακριβή για αυτό το λόγο - οι ασφαλιστές γενικά χρησιμοποιούν τη στατιστική θάνατοι ανά ταξίδι. Υπάρχει σημαντική διαφορά από την ασφάλεια που παρέχουν οι αεροπορικές εταιρείες από την ασφάλεια των μικρότερων ιδιωτικών αεροπλάνων, με την ανά μίλι στατιστική να αποδεικνύει πως οι αεροπορικές εταιρείες είναι 8,3 φορές πιο ασφαλείς από τα μικρότερα αεροπλάνα

### 1. Ιστορική αναδρομή

**Ο Αρχύτας** (440-360 π.Χ.) ήταν ένας μαθηματικός από τον Τάραντα, μαθητής του Πυθαγόρα που ασχολήθηκε μεταξύ πολλών άλλων και με πτήσεις! Θεωρείται ο τελευταίος αλλά και ο σημαντικότερος των Πυθαγορείων. Γύρω στο 420 π.Χ. κατασκεύασε μία απ' τις πρώτες αυτοπροωθούμενες ιπτάμενες μηχανές. Ήταν ένα τεχνητό περιστερί! Με κάποιο μηχανισμό κι ένα βάρος που κρεμόταν από τροχαλία το ομοίωμα περιστεριού κουνούσε τα φτερά του. Όταν πια βρισκόταν στον αέρα για την προώθησή του χρησιμοποιούσε ένα μπαλόνι που ξεφούσκωνε αργά αλλά με δύναμη από μία μικρή τρύπα. Για μπαλόνι χρησιμοποίησε την ουροδόχο κύστη ενός γουρουνιού! Η κύστη του γουρουνιού χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα από

κάποιους λαούς φουσκωμένη σαν μπαλόνη σαν παιδικό παιχνίδι ή για πανάλαφρο αλλά ανθεκτικό δοχείο υγρών. Έτσι το πανάλαφρο ομοίωμα περιστεριού που είχε κατασκευάσει μπορούσε να πετάει σχεδόν 200 μέτρα μέχρι να ξεφουσκώσει εντελώς το μπαλόνη! Αναφορές στο περιστέρι αυτό κάνουν οι Λατίνοι ιστορικοί Φαβορίνους και Τζέλιου. Το ενδιαφέρον για τις πτητικές μηχανές καθώς και για την ανατομία των πτηνών και την ικανότητα τους να πετάνε ξεκίνησε τον 15ο αιώνα. Έτσι λοιπόν, από τον 15ο αιώνα ο **Λεονάρντο ντα Βίντσι** προσπάθησε να στηρίξει θεωρητικά τη δυνατότητα κατασκευής πτητικών μηχανών, μελετώντας προσεκτικά την πτήση των πουλιών. Όπως και μερικοί άλλοι, έτσι και ο Λεονάρντο ντα Βίντσι, πολυμήχανος και εφευρετικός καθώς ήταν προσπάθησε να λύσει το πρόβλημα της πτήσης του ανθρώπου σχεδιάζοντας περίπου 10 πρότυπα πτητικών μηχανών τα οποία έχουν πολυάριθμες ομοιότητες με τις σύγχρονες μηχανές. Μερικά από τα πιο επιτυχημένα κατασκευάσματα ήταν το αερόστατο, το πρότυπο ελικοπτερου και το ανεμόπτερο που βασιζόταν περισσότερο στην ανατομία του πουλιού. Παρατηρώντας το αερόστατο, βλέπουμε πως με βάση τις θεωρίες του ντα Βίντσι ένα αερόστατο πρέπει να είχε σκελετό σαν πυραμίδα με τετραγωνισμένη βάση. Επίσης πρέπει στο επάνω μέρος του αερόστατου να καλύπτεται με μία ενισχυμένη τέντα με πλάτος και ύψος 12 βραχίονες (μονάδα μέτρησης της τότε εποχής). Υποστήριζε πως με το αερόστατο κάποιος άνθρωπος μπορούσε να πηδήξει από οποιοδήποτε ύψος χωρίς να υποστεί κανένα απολύτως τραυματισμό. **Οι Πρωτοπόροι αδελφοί Ράιτ** (Orville Wright και Wilbur Wright) είναι οι δύο Αμερικανοί στους οποίους αποδίδεται η εφεύρεση και κατασκευή του πρώτου επιτυχημένου αεροπλάνου στον κόσμο και η πραγματοποίηση της πρώτης ελεγχόμενης, μηχανικά προωθούμενης και με διάρκεια, βαρύτερης από τον αέρα, ανθρώπινης πτήσης στις 17 Δεκεμβρίου 1903. Την ιστορική αυτή πτήση τους επιχείρησαν στο Κίτυ Χωκ στη Βόρεια Καρολίνα, με το διπλανό τους "Φλάιερ" που έφερε κινητήρα 12 ίππων που κινούσε δύο έλικες. Η πτήση εκτελέστηκε με τέσσερις δοκιμές, διάρκειας 12 έως 59 δευτερολέπτων. Κατά την τελευταία διανύθηκε απόσταση 264 μέτρα. Στα επόμενα δύο χρόνια τα αδέρφια εξέλιξαν την πτητική μηχανή τους στο πρώτο πρακτικό αεροσκάφος σταθερής πτέρυγας. Παρόλο που δεν υπήρξαν οι πρώτοι που κατασκεύασαν και πέταξαν πειραματικά αεροσκάφη, οι αδελφοί Ράιτ ήταν οι πρώτοι που εφηύραν τις επιφάνειες ελέγχου του αεροσκάφους, γεγονός που κατέστησε την πτήση αεροσκαφών σταθερής πτέρυγας εφικτή. Η θεμελιώδης ανακάλυψη των αδελφών Ράιτ ήταν η εφεύρεση του «Ελέγχου στους τρεις άξονες» που επέτρεπε στον πιλότο να κατευθύνει το αεροσκάφος αποτελεσματικά και να διατηρεί την ισορροπία του αεροσκάφους. Η μέθοδος αυτή έγινε και παραμένει μέχρι σήμερα η κύρια και βασικότερη μέθοδος ελέγχου των αεροσκαφών σταθερής πτέρυγας κάθε είδους. Από την αρχή της αεροναυτικής τους εργασίας οι αδελφοί Ράιτ εστίασαν στο να ξεκλειδώσουν τα μυστικά του ελέγχου για να κατακτήσουν το «πρόβλημα της πτήσης», παρά να εξελίξουν δυνατότερους κινητήρες όπως έκαναν άλλοι πειραματιστές. Οι προσεκτικές τους δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα απέφεραν καλύτερα αεροδυναμικά δεδομένα από κάθε άλλη φορά στο παρελθόν, επιτρέποντάς τους να σχεδιάσουν και να κατασκευάσουν πτέρυγες και προπέλες περισσότερο αποδοτικές από πριν. Οι αδελφοί Ράιτ απέκτησαν τις μηχανολογικές ικανότητές που ήταν απαραίτητες για την επιτυχία τους με το να εργάζονται για χρόνια στο κατάστημά τους με πρέσες εκτύπωσης, ποδήλατα, κινητήρες και άλλες μηχανές.



## 2. Ορισμός

Το αεροπλάνο είναι αεροσκάφος βαρύτερο από τον αέρα, με ακίνητες πτέρυγες, με τις οποίες αναπτύσσει ταχύτητα που βοηθά στην δημιουργία δύναμη άνωσης, που κρατά αυτή στον αέρα. Με άλλα λόγια το αεροπλάνο είναι όχημα το οποίο έχει τη δυνατότητα να ίππεται, αποκτώντας άνωση από την πίεση του ρεύματος αέρα, το οποίο διέρχεται από την κάτω παρειά (πλευρά) των πτερύγων ή των ελίκων του, με αποτέλεσμα την ώθησή του αντιθέτως της βαρυτικής έλξης της Γης. Συγκεκριμένα, η αντιστάθμιση της βαρύτητας προκύπτει είτε μέσω της στατικής άνωσης, είτε μέσω της δυναμικής άνωσης μιας αεροτομής, ή σε ελάχιστες περιπτώσεις μέσω της καθοδικής ώθησης από κινητήρες πρόωσης. Είναι ένα αρκετά ασφαλές μεταφορικό μέσο, το οποίο χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις, είτε για τις ανάγκες των απλών πολιτών (πολιτικά αεροπλάνα) είτε για πολεμικούς σκοπούς (στρατιωτικά αεροπλάνα). Επιπλέον η πρώτη μαρτυρία για την λέξη είναι στα Αγγλικά, στα τέλη του 19ου αιώνα (πριν από την πρώτη μηχανική πτήση), με τη λέξη *airplane*, όπως και *aeroplane*, που προέρχεται από την Γαλλική λέξη *aéroplane*, η οποία με τη σειρά της πηγάζει από την Ελληνική λέξη *αήρ*, («αέρας») και είτε από τη Λατινική λέξη *planus*, («επίπεδο»), ή την Ελληνική λέξη *πλάνος* («περιπλάνηση»). Η λέξη « *Αέροplane* » αναφερόταν αρχικά μόνο στο φτερό, καθώς είναι ένα επίπεδο που κινείται στον αέρα. Ως ένα παράδειγμα συνεκδοχής, η λέξη για το φτερό κατέληξε να αναφέρεται σε ολόκληρο το αεροσκάφος. Σε Ηνωμένες Πολιτείες και Καναδά, ο όρος "*airplane*" χρησιμοποιείται για τα μηχανοκίνητα αεροσκάφη σταθερών πτερύγων. Στο Ηνωμένο Βασίλειο και τις χώρες της Κοινοπολιτείας, ο όρος "*aeroplane*" είναι αυτός που χρησιμοποιείται συνήθως για τα αεροσκάφη αυτά.



# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΕΡΟΠΛΑΝΩΝ

## 1.1) ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΟΠΛΑΝΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ

Τα είδη των αεροπλάνων ανάλογα με την απόσταση που προορίζονται να εκτελέσουν και τον τρόπο χρήσης τους διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: 1) τα πολιτικά και 2) τα στρατιωτικά αεροπλάνα.

### 1) Τα πολιτικά διαιρούνται σε :

- αεροπλάνα εμπορικών μεταφορών: χρησιμεύουν στην μεταφορά φορτίων και επιβατών.
- αεροπλάνα βιομηχανικών μεταφορών: είναι μικρότερα συνήθως από τα προηγούμενα και χρησιμοποιούνται από βιομηχανίες για μεταφορά εμπορευμάτων/προσωπικού.
- αεροπλάνα ειδικής χρήσεως: είναι μικρά δίκινητήρια αεροσκάφη που χρησιμοποιούνται από ιδιώτες για προσωπικά τους εξυπηρέτηση ή διασκέδαση.
- εκπαιδευτικά αεροπλάνα: διαθέσιμα αεροσκάφη για εκπαίδευση ιδιωτών στο πιλοτάρισμα.

### 2) Τα στρατιωτικά διαιρούνται σε:

- μαχητικά: αυτά είναι ελαφρά, γρήγορα και ευέλικτα, οπλισμένα με αντιαεροπορικά όπλα.
- επιθετικά: παρόμοια με τα μαχητικά δρουν όμως σε χαμηλότερα ύψη.
- βομβαρδιστικά: βαριά και ογκώδη αεροσκάφη με κατάλληλη διαρρύθμιση και μηχανισμούς που τους επιτρέπουν να μεταφέρουν βόμβες και να τις ρίχνουν σε στόχους στο έδαφος

Επιπλέον, υπάρχουν και οι παρακάτω τύποι αεροπλάνων που διακρίνονται ανάλογα με το είδος των οργάνων προσγείωσης, σε αεροπλάνα και υδροπλάνα και ανάλογα με τις μορφές του προωθητικού συστήματος σε ελικοφόρα και αεριωθούμενα. Ένας άλλος διαχωρισμός είναι ανάλογα με την χρήση τους. Έτσι υπάρχουν αεροσκάφη ψεκαστικά (για πολλές αγροτικές διεργασίες), πυροσβεστικά, στρατιωτικά μαχητικά, διάφορα στρατιωτικά μεταφορικά, στρατιωτικά κατασκοπευτικά. Υπάρχουν επίσης αεροπλάνα νοσοκομειακά με ειδικά διαρρυθμισμένο χώρο για άμεση εξυπηρέτηση που όμως δεν είναι τόσο πρακτικά όσο τα ελικόπτερα γιατί χρειάζονται ειδικό χώρο προσγείωσης. Τα επιβατικά αεροπλάνα έφτασαν στον υψηλότερο ίσως βαθμό εξέλιξής τους με την κατασκευή του υπερηχητικού αεροπλάνου Κονκόρντ από τη γαλλική και βρετανική αεροπορική βιομηχανία, που μπορούσε να μεταφέρει

128 επιβάτες με ταχύτητα 2.170 χλμ. την ώρα. Το μήκος του είναι 61,66 μ. το ύψος του 12,19 μ. και μπορεί ν' ανέβει στα 15.000-18.000 μ.

## 1.2) ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΡΩΘΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

- **Ανεμόπτερα(Gliders)** : Απλού τύπου αεροσκάφος το οποίο πετά χωρίς μηχανικό προωθητικό σύστημα (Σχήμα 1.1)



- **Ελικοφόρα (Propeller aircraft)**: Τύπος αεροσκαφών που πετούν με τη βοήθεια έλικα και μηχανής εσωτερικής καύσης (Σχήμα 1.2).



- **Τζετ (Jet aircraft)**: Τύπος αεροσκαφών που πετούν με την χρήση τουρμπίνων(turbines) (Σχήμα 1.3)



- **Υπερηχητικά (Supersonic aircraft):** Τύπος υπερηχητικού επιβατηγού αεροσκάφους που χρησιμοποιεί ειδικές τουρμπίνες όπως το παλαιότερο μοντέλο Concorde (Σχήμα 1.4)



- **Αεροπλάνα τύπου Ρουκέτας:**

A) **Rocket-Powered aircraft:** Τύπος αεροσκάφους όπου συνδυάζει τη χρήση ρουκέτας και μηχανής τζετ.

B) **Ramjet:** Εξελιγμένη μηχανή τζετ που χρησιμοποιείται κυρίως σε τύπους αεροσκαφών που χρειάζονται μικρή μηχανή και μεγάλη ταχύτητα.

Γ) **Scramjet:** Τύπος αεροσκάφους με εξελιγμένη μηχανή τζετ. Βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο.



### 1.3) ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΜΕΡΗ ΑΠΟ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ.

Τα βασικά μέρη του αεροπλάνου είναι τα εξής:

1) Ο κορμός. Έχει ατρακτοειδές σχήμα (όπως το αδράχτι) για να διασχίζει τον αέρα με ευκολία.

2) Οι πτέρυγες. Στερεώνονται στον κορμό του αεροπλάνου και έχουν μεγάλη επιφάνεια για να δέχονται πίεση Από τον αέρα. Κάθε αεροπλάνο έχει δυο φτερά και σπανιότερα τέσσερα.

3) Τα πηδάλια αυτά διακρίνονται σε: **α)** πηδάλια διεύθυνσης, με τα οποία το αεροσκάφος αλλάζει διεύθυνση δεξιά-αριστερά **β)** Τα πηδάλια ύψους-βάθους με τα οποία το αεροπλάνο μπορεί να ανυψώνεται η να χαμηλώνει και **γ)** τα πηδάλια κλίσης όπου χρησιμεύουν για την κλίση του αεροπλάνου.

4) Η έλικα. αυτή περιστρέφεται και “βιδώνεται” στον αέρα όπως μια βίδα στο ξύλο.

5) Οι κινητήρες μηχανές με εσωτερική καύση.

6) Το σύστημα τροχών βρίσκεται στο κάτω μέρος του αεροπλάνου, κρατά το αεροπλάνο σε οριζόντια θέση και το βοηθάει στην προσγείωση και απογείωση του.



Σχήμα 1.6: Μέρη αεροπλάνου

## Μέρη του αεροσκάφους

- 1) **Άτρακτος:** Είναι το κύριο σώμα του αεροπλάνου. Μέσα σ' αυτήν βρίσκονται όλα τα εξαρτήματα πλοήγησης και ελέγχου και πάνω της προσκολλώνται οι πτέρυγες. Η άτρακτος πρέπει να έχει σχήμα αεροδυναμικό, έτσι που να παρουσιάζει τη μικρότερη δυνατή αντίσταση κατά την κίνηση στον αέρα. Όταν η ταχύτητα του αεροπλάνου είναι υποηχητική, η αντίσταση του αέρα δεν είναι πολύ μεγάλη. Έτσι τα περισσότερα μεταφορικά αεροσκάφη είναι υποηχητικά, γιατί μέσα στην άτρακτο μεταφέρονται τα εμπορεύματα και οι επιβάτες, γεγονός που απαιτεί άτρακτο με μεγάλες διαστάσεις. Στα υπερηχητικά αεροπλάνα, επιδιώκεται το μπροστινό μέρος να είναι κώνος με μικρή γωνία και το πισινό μέρος να καταλήγει σε κόψη, για να περιορίζει τις δίνες, που σχηματίζονται από την κίνηση της άτρακτου μέσα στον αέρα. Στο μπροστινό άκρο της άτρακτου, τοποθετείται σουβλερή μύτη που διευκολύνει τη μετάβαση από την ηχητική στην υπερηχητική ταχύτητα. Για την κατασκευή της άτρακτου χρησιμοποιούνται κράματα όσο το δυνατό πιο ανθεκτικά στη θερμοκρασία και στην μηχανική καταπόνηση, που αποτελούνται από τιτάνιο, αλουμίνιο, νικέλιο και πάνω από είκοσι άλλα στοιχεία σε πολύ μικρές ποσότητες. Η αναλογία των διαφόρων στοιχείων στο κράμα αποτελεί μυστικό και κτήμα της κάθε αεροναυπηγικής βιομηχανίας. Ακόμα η βάση των εξωτερικών μεταλλικών κατασκευών των υπερηχητικών αεροπλάνων είναι τέτοια, ώστε να μην παρασύρεται κατά την κίνηση του σκάφους.



Σχήμα 1.7: Άτρακτος πολιτικού αεροπλάνου

- 2) **Πτέρυγες:** Οι πτέρυγες είναι το κυριότερο τμήμα κάθε ιπτάμενης συσκευής βαρύτερης από τον αέρα, γιατί με αυτές κατορθώνεται η ανύψωση και η πτήση της. Τα αεροπλάνα διαιρούνται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τον αριθμό, το σχήμα και τη διάταξη των πτερύγων. Αυτά που έχουν τρεις παράλληλες σειρές πτερύγων τη μία πάνω στην άλλη ονομάζονται τριπτέρυγα ή τρίπλانا. Με τούτο το είδος εκτελούνται θαυμάσια ακροβατικά γυμνάσια. Αν αντί για τρεις έχουν δύο σειρές πτερύγων, ονομάζονται διπτέρυγα ή διπλάνα. Όταν η μία από τις δύο σειρές πτερύγων είναι λίγο πιο μπρος από την άλλη έχουμε προπορεία πτέρυγας. Θετική όταν προεξέχει η επάνω και προς τα εμπρός. Αρνητική όταν προεξέχει η από κάτω. Τα πρώτα αεροπλάνα ήταν κυρίως διπτέρυγα. Ο τρίτος τύπος που χρησιμοποιείται



σήμερα σχεδόν αποκλειστικά, είναι του μονοπλάνου, που έχει μόνο μια σειρά πτέρυγες. Αυτός ο τύπος έχει τεράστια πλεονεκτήματα από αεροδυναμικής άποψης. Τα μονοπτέρυγα διαιρούνται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη θέση της πτέρυγας στην άτρακτο.



**Σχήμα 1.8:** Πτέρυγα πολιτικού αεροπλάνου

- **Παρασόλ:** Η πτέρυγα βρίσκεται πάνω από την άτρακτο και στηρίζεται σε αυτή με μικρούς στύλους. Σήμερα ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται σπάνια κυρίως σε υδροπλάνα, με σκοπό να διατηρήσει τους κινητήρες όσο το δυνατό ψηλότερα από την επιφάνεια του νερού.



**Σχήμα 1.9:** Αεροπλάνο τύπου Παρασόλ

- **Υψηλοπτέρυγα:** Η πτέρυγα είναι κολλημένη στο επάνω μέρος της άτρακτου. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται κυρίως σε διθέσια και τετραθέσια αεροπλάνα ιδιωτικής χρήσης ελικοφόρα. Επίσης ένα μεγάλο μέρος των μαχητικών αεροσκαφών είναι κατασκευασμένο με αυτόν τον τρόπο.



**Σχήμα 1.10:** Αεροπλάνο υψηλοπτέρυγο

- **Μεσοπτέρυγο:** Η πτέρυγα είναι κολλημένη στο μέσο της ατράκτου. Χρησιμοποιείται σπάνια στα βομβαρδιστικά και ακόμα σπανιότερα στα καταδιωκτικά, αλλά καθόλου στα επιβατικά. Το μεσοπτέρυγο παρουσιάζει πολλά αεροδυναμικά πλεονεκτήματα αλλά είναι πολύ περίπλοκα τα προβλήματα του τρόπου κατασκευής του.



**Σχήμα 1.11:** Αεροπλάνο μεσοπτέρυγο

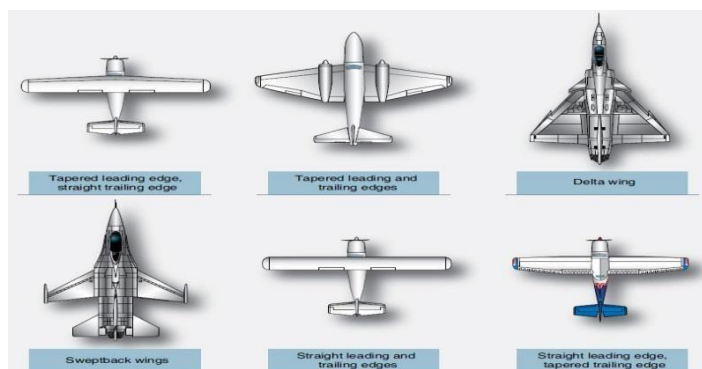
- **Χαμηλοπτέρυγο:** Ο πιο διαδεδομένος τύπος για τα πολεμικά και πολιτικά αεροπλάνα. Σχεδόν το σύνολο των πολιτικών και το μισό περίπου των στρατιωτικών αεροπλάνων είναι χαμηλοπτέρυγα. Σε αυτόν τον τύπο η πτέρυγα είναι κολλημένη στο κάτω μέρος της ατράκτου. Κατασκευάζεται εύκολα, έχει πολύ καλά αεροδυναμικά στοιχεία κι επιτρέπει πολύ καλή ορατότητα στο χειριστή. Οι πτέρυγες τοποθετούνται με κλίση προς τα πάνω, σε σχέση με το διαμήκη άξονα της ατράκτου. Το άκρο της πτέρυγας που είναι κολλημένο στην άτρακτο ονομάζεται ακροπτερύγιο.





**Σχήμα 1.12: Αεροπλάνο χαμηλοπτέρυγο.**

Ως προς το σχήμα τους οι πτέρυγες διακρίνονται σε ευθείες, κωνικές, κωνικές με βέλος και πτέρυγες σχήματος δέλτα. Στα σύγχρονα αεροπλάνα τα καύσιμα είναι μέσα στις πτέρυγες τους. Στα πολεμικά υπάρχουν και πρόσθετες δεξαμενές στερεωμένες κάτω από τις πτέρυγες, πράγμα που τους επιτρέπει να καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις χωρίς ανεφοδιασμό. Τα αεροσκάφη των αεροπλανοφόρων έχουν σπαστές πτέρυγες μεταβλητής γεωμετρίας, που επιτρέπουν προσγείωση με μικρή ταχύτητα και πτήση με μεγάλη υπερηχητική ταχύτητα. Αυτό πετυχαίνεται με έναν μηχανισμό που επιτρέπει τις πτέρυγες να μαζεύονται στο εσωτερικό της ατράκτου κι έτσι να παρουσιάζουν μικρότερη αντίσταση στις υψηλές ταχύτητες.



**Σχήμα 1.13: Σχήματα πτερύγων**

- 3) **Ουραίο πτερυγιακό συγκρότημα:** Επειδή οι πτέρυγες δεν αρκούν από μόνες τους για να εξασφαλίσουν την απαραίτητη ευστάθεια στο αεροσκάφος, προσαρμόζεται σε αυτό ένα πρόσθετο στοιχείο εξισορρόπησης. Το στοιχείο αυτό είναι το ουραίο πτερυγιακό συγκρότημα. Αποτελείται από βοηθητικές πτερυγιακές επιφάνειες, από τις οποίες είναι απαραίτητο, η μία να είναι συνδεδεμένη σταθερά μεταξύ τους. Η κάθετη επιφάνεια που εξασφαλίζει την εγκάρσια ευστάθεια του αεροπλάνου ονομάζεται κάθετο σταθερό, ενώ η οριζόντια επιφάνεια εξασφαλίζει τη διαμήκη ευστάθεια και ονομάζεται οριζόντιο σταθερό. Το ουραίο πτέρωμα τοποθετείται στο πίσω μέρος της ατράκτου, έτσι ώστε ο μοχλοβραχίονας του να είναι μεγάλος κι έτσι να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του σκάφους. Υπάρχουν διάφορα είδη διατάξεων

των επιφανειών του ουραίου πτερώματος. Οι επιφάνειες του ουραίου πτερώματος εφοδιάζονται με κατάλληλα κινητά τμήματα που ονομάζονται πηδάλια. Έτσι στο κάθετο σταθερό έχουμε το πηδάλιο διεύθυνσης και στο οριζόντιο σταθερό τα πηδάλια ύψους-βάρους.



**Σχήμα 1.14:** Ουραίο πτερυγικό συγκρότημα πολιτικού αεροσκάφους.

- 4) **Σύστημα προσγείωσης:** Είναι το σύστημα που επιτρέπει στο αεροπλάνο να στηρίζεται στο έδαφος καθώς και να κινείται κατά την προσγείωση. Αποτελείται από ένα σύνολο τροχιών με σαμπρέλα μεγάλου όγκου με χοντρό ελαστικό, έτσι ώστε να έχουν μεγάλη αντοχή. Συνήθως το σύστημα προσγείωσης είναι τοποθετημένο όσο το δυνατό πιο μπροστά, για να αποφεύγεται ο κίνδυνος ανατροπής. Επίσης κατά την πτήση του αεροσκάφους ανασύρεται, για να μη δημιουργεί αντίσταση κατά την πτήση. Περιλαμβάνει επίσης υδραυλικό αμορτισέρ για την απόσβεση των δονήσεων, κατά την προσγείωση και υδραυλικά φρένα για τους τροχούς. Για ειδικές χρήσεις έχουν αναπτυχθεί διάφορες μορφές συστημάτων προσγείωσης. Υπάρχουν συστήματα με δυνατότητα προσανατολισμού, σε περιπτώσεις πλάγιου ανέμου, αρθρωτά συστήματα, για να δίνεται η δυνατότητα για προσγείωση σε οποιοδήποτε έδαφος και συστήματα με σκι ή υδροπτερύγια για προσγείωση σε χιόνι ή νερό. Για την προσγείωση σε αεροπλανοφόρα χρησιμοποιούνται ειδικές διατάξεις για να ελαττώνεται το μήκος τροχοδρόμησης. Για το σκοπό αυτό το αεροπλάνο είναι εφοδιασμένο με έναν ανασυρόμενο γάντζο, που πιάνεται σε ειδικά καλώδια με μια σχετική ελαστικότητα. Τελευταία συνηθίζεται στο τέλος της διαδρομής προσγείωσης του αεροπλάνου να τοποθετούνται ειδικά ελαστικά φράγματα.
- 5) **Σύστημα χειρισμού κι ελέγχου:** Το πιλοτήριο, το οποίο βρίσκεται στο μπροστινό μέρος της ατράκτου, περιλαμβάνει όργανα μέτρησης ταχυτήτων (του αέρα, του αεροπλάνου), ενδεικτικά όργανα, όργανα ραδιοηλεκτρονικής, αυτόματο πιλότο, όργανα κλιματισμού. Ο δείκτης ταχύτητας ανέμου λειτουργεί

με βάση ένα σωλήνα Πίτοτ (Pitot), που δείχνει την ταχύτητα ανακοπής του αέρα, η οποία είναι ανάλογη με την ταχύτητα του αέρα. Απαραίτητα είναι και τα ενδεικτικά όργανα, που δείχνουν, αν το αεροπλάνο παρεκκλίνει από την πορεία του ή γλιστρά σε κάποια στροφή. Στα όργανα αεροναυτιλίας συμπεριλαμβάνονται η μαγνητική πυξίδα, ο γυροσκοπικός δείκτης διεύθυνσης και διάφορα άλλα όργανα κατάπτωσης. Στα όργανα ραδιοεντοπισμού και τα ραδιογωνιόμετρα. Ο αυτόματος πιλότος λειτουργεί με ηλεκτρικό υπολογιστή κι είναι δυνατό να επιλύσει διάφορα προβλήματα που θα μπορούσαν να παρουσιάζουν στη διάρκεια της πτήσης. Μια άλλη σειρά οργάνων δείχνει τις θερμοκρασίες και τις πιέσεις, καθώς και την ποσότητα των καυσίμων, του αέρα, των λαδιών, των αερίων καύσης κτλ. Στον τεχνικό εξοπλισμό των αεροσκαφών υπάρχει το λεγόμενο μαύρο κουτί (black box) που καταγράφει κάθε στιγμή ό,τι συμβαίνει στο αεροσκάφος, τις ενδείξεις των μετρητών, τις συνομιλίες των χειριστών κτλ. Το μαύρο κουτί το μελετούν οι ειδικοί σε περίπτωση πτώσης, για να γίνουν γνωστές οι αιτίες της καταστροφής.



**Σχήμα 1.15:** Πιλοτήριο αεροπλάνου

Μέσα στο πιλοτήριο υπάρχουν εκτός από τα όργανα ελέγχου και τα συστήματα χειρισμού. Με αυτά γίνονται όλες οι κινήσεις, που είναι αναγκαίες για την απογείωση, την πορεία και την προσγείωση του αεροπλάνου. Στα πρώτα αεροπλάνα υπήρχαν χειριστήρια διεύθυνσεως, κλίσεως, ανόδου-καθόδου και τροχοπεδήσεως. Κατά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο κατασκευάστηκε ράβδος Τζόις, η οποία αντικατέστησε τα προηγμένα συστήματα. Με τέτοια ράβδο είναι συνδεδεμένα τα πηδάλια κλίσεως και τα πηδάλια ύψους-βάθους, έτσι που όταν η ράβδος κινείται δεξιά αριστερά λειτουργούν τα πηδάλια κλίσεως και όταν κινείται μπρος-πίσω λειτουργούν τα πηδάλια ύψους-βάθους. Τα πηδάλια κλίσης είναι τοποθετημένα στο χείλος εκφυγής των πτερυγίων κι έχουν τη δυνατότητα να κινούνται πάνω ή κάτω με τη βοήθεια των αρθρώσεων. Έτσι το αεροπλάνο μπορεί να κλίνει δεξιά ή αριστερά όταν πρέπει να πάρει τη στροφή. Το πηδάλιο ύψος βρίσκεται τοποθετημένο στο χείλος εκφυγής του οριζώντιου σταθερού του ουραίου πτερώματος. Έχει τη δυνατότητα να κινείται πάνω ή κάτω σχετικά με το οριζόντιο σταθερό κι έτσι το αεροπλάνο μπορεί να ανεβαίνει ή να κατεβαίνει. Το πηδάλιο διεύθυνσης που βρίσκεται στο κάθετο σταθερό του Ουραίου πτερώματος, στρέφεται δεξιά ή

αριστερά κι έτσι το αεροπλάνο παίρνει στροφή με ταυτόχρονη κλίση. Μοιάζει στη λειτουργία του με το πηδάλιο του πλοίου και δε χρησιμοποιείται συχνά, γιατί αν χρησιμοποιηθεί μόνο του, θα προκαλέσει απώλεια στήριξης (στάλ). Το πτερύγιο ασφάλειας βρίσκεται στο χείλος προσβολής της πτέρυγας και χρησιμοποιεί στη βελτίωση ροής του αέρα γύρω από την επιφάνεια της πτέρυγας. Τα πτερύγια καμπυλότητας ή φλαπς βρίσκονται και από τις πτέρυγες προς το χείλος εκφυγής και χρησιμοποιούνται για το σταμάτημα του αεροπλάνου όταν κινείται στο έδαφος. Επίσης χρησιμοποιούνται στις απότομες καθόδους, γιατί αυξάνουν την αντίσταση του αέρα. Όταν η ταχύτητα του αεροπλάνου μειώνεται υπερβολικά ή όταν κατά τη διάρκεια της ανόδου του κινδυνεύει να χάσει τη στήριξη του, τότε τα πτερύγια καμπυλότητας βγαίνουν από μόνα τους κι έτσι ο χειριστής καταλαβαίνει το κίνδυνο και μπορεί να κάνει τους απαραίτητους χειρισμούς. Τα αερόφρενα είναι δυνατό να είναι τοποθετημένα είτε στο χείλος εκφυγής της πτέρυγας είτε κατά μήκος της ατράκτου και αποτελούνται από δύο αναδιπλούμενες επιφάνειες, που φέρνουν σχισμές για να μη διαταράσσεται η ροή του αέρα προς το ουραίο πτέρωμα κι επίσης για να μη σκίζονται εύκολα. Χρησιμοποιούνται για το σταμάτημα του αεροπλάνου, αυξάνοντας την αντίδραση του αέρα. Τα τάμιος είναι απαραίτητα για τον έλεγχο της πτήσης όταν το φορτίο του αεροπλάνου είναι ακανόνιστο τοποθετημένο μέσα στο σκάφος.

- 6) **Πρωθητικό σύστημα:** Στα αεροπλάνα η κίνηση οφείλεται στο μηχανικό έργο που δίνει ο κινητήρας. Εξαιτίας της δράσης του κινητήρα, τα αέρια επιταχύνονται προς τα πίσω είτε εξαιτίας της περιστροφής του έλικα, είτε εξαιτίας της κίνησης που αποκτούν μέσα στον ίδιο τον κινητήρα. Ο έλικας κατά την περιστροφή του αναρροφά και ταυτόχρονα σπρώχνει προς τα πίσω τις μάζες του αέρα και ασκούν μια ίση δύναμη πάνω στον έλικα. Ακριβώς η δύναμη αυτή προκαλεί την προώθηση του αεροπλάνου. Στα αεριωθούμενα η προωστική δύναμη προκαλείται εξαιτίας της ανάκρουσης που δημιουργείται από την εκτόξευση των αερίων μαζών προς τα πίσω.



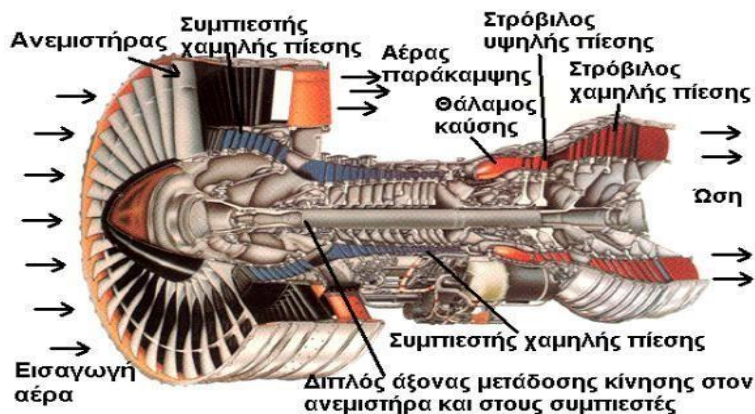
**Σχήμα 1.16:** Πρωθητικό σύστημα αεροπλάνου



## 1.4) ΤΥΠΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

### Αεριοστρόβιλος

Ο αεριοστρόβιλος είναι μια θερμική μηχανή, η λειτουργία του οποίου βασίζεται στον κύκλο Brayton. Σε αντίθεση με τους εμβολοφόρους κινητήρες, η ισχύς εδώ παράγεται με συνεχή ρυθμό. Η μετατροπή της χημικής ενέργειας του καύσιμου σε μηχανική, πραγματοποιείται σε πρώτη φάση με τη βοήθεια του θαλάμου καύσης (όπου η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική) και στη συνέχεια με τη βοήθεια του στρόβιλου, ο οποίος περιστρέφεται όταν προσπίπτουν πάνω στα πτερύγια του τα θερμά καυσαέρια που παράγονται στο θάλαμο καύσης. Μέρος της μηχανικής αυτής ενέργειας είναι απαραίτητη, σε όλους τους τύπους των αεριοστρόβιλων για την παραγωγή έργου, για την κίνηση του συμπιεστή και των παρελκόμενων του κινητήρα. Για τους αεριοστρόβιλους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση κίνησης σε έλικα (turbo-prop, turboshaft), το υπόλοιπο ποσοστό της μηχανικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την περιστροφή του έλικα.



**Σχήμα 1.17** :Χαρακτηριστικός τύπος αεριοστρόβιλου κινητήρα (στροβιλοανεμιστήρας-turbofan)που χρησιμοποιείται σε μεγάλα πολιτικά αεροσκάφη.

Οι βασικές κατηγορίες των αεριοστρόβιλων:

- Στροβιλοαντιδραστήρας (**turbojet**)
- ελικοφόρος Στροβιλοαντιδραστήρας ή ελικοστρόβιλος (**turboprop**)
- αεριοστρόβιλος μηχανικής ισχύος ή αξονοστρόβιλος (**turboshaft**)
- στροβιλοανεμιστήρας (**turbofan**)

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει παραπάνω η κατηγορία των θερμικών μηχανών που είναι γνωστή ως αεριοστρόβιλοι ή αεριοκινητήρες (**gas turbines**, **GTs**), παρουσιάζουν μεγάλο τεχνολογικό ενδιαφέρον. Τεράστια είναι η εξάπλωση τους σε εφαρμογές όπου καθοριστικές παράμετροι στην επιλογή της μονάδας ισχύος είναι η ικανότητα παραγωγής μεγάλης ισχύος σε συνδυασμό με μικρό βάρος, υψηλή αξιοπιστία/διαθεσιμότητα και ικανοποιητική θερμική απόδοση. Τέτοιες εφαρμογές είναι η πρόωση ή αλλιώς προώθηση (propulsion)αεροπλάνων (Σχήμα 1.18), ελικοπτέρων, πλοίων, η παραγωγή ισχύος σε αντλίες αγωγών πετρελαίου/φυσικού αερίου και φυσικά η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.



**Σχήμα 1.18:** Boeing 777, το μεγαλύτερο δίκινητήριο αεροπλάνο, θέσεις επιβατών έως 365, αυτονομία έως 17,446 km

Τα κύρια **πλεονεκτήματα** του αεριοστρόβιλου είναι τα παρακάτω:

- Πρόκειται για μηχανή εσωτερικής καύσης ΜΕΚ (internal combustion engine) συνεχόμενης ροής που συνεπάγεται μεγάλη παραγωγή ισχύος σε σχέση με το μέγεθος ή το βάρος της. Ειδικά, οι αεροπορικοί αεριοστρόβιλοι έχουν λόγο παραγόμενης ώσης ανά μονάδα βάρους που είναι από πέντε (ελικοστρόβιλος) έως και εννέα (Στροβιλοαντιδραστήρας) φορές μεγαλύτερος συγκριτικά με εμβολοφόρο κινητήρα εσωτερικής καύσης (Piston Engine, PE) αντίστοιχου βάρους. Η λειτουργία τους βασίζεται στο θερμοδυναμικό κύκλο Brayton.
- Ο ΜΕΚ συνεχόμενης ροής χαρακτηρίζεται επίσης από την απουσία παλινδρομικών κινήσεων, δηλαδή απουσία αλλαγής της φοράς κίνησης των κινούμενων τμημάτων (μειωμένη έμφαση δυνάμεων αδράνειας) και ελαχιστοποίηση τριβόμενων τμημάτων, (μειωμένη κατανάλωση λιπαντικού).
- Ο βαθμός θερμικής απόδοσης (thermal efficiency,  $\eta_{th}$ ) του απλού θερμοδυναμικού κύκλου είναι της τάξης του 32-45%. Ανάλογα τη διαμόρφωση όμως, μπορεί να φθάσει σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές ειδικά εάν χρησιμοποιηθούν σε συνδυαστικά συστήματα.
- Τα καύσιμα μπορεί να είναι είτε υγρά όπως είναι τα προϊόντα διύλισης του πετρελαίου και τέτοια είναι τα αεροπορικά καύσιμα (kerozines), το biodiesel είτε αέρια όπως το φυσικό αέριο (Natural Gas, NG), ο αεριοποιημένος άνθρακας (syngas) το βιοαέριο (biogas) κ.α.
- Τέλος, όσον αναφορά τα καυσαέρια, αυτά παρουσιάζονται σχετικά μειωμένα, ειδικά με την εφαρμογή στο θάλαμο καύσης σύγχρονων τεχνολογιών περιορισμού τους.

Στον αντίποδα, στα **μειονεκτήματα** του συγκαταλέγονται:

- Χαμηλή απόδοση σε συνθήκες λειτουργίας μερικού φορτίου/ισχύος.
- Λειτουργία που επηρεάζεται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, πίεση, υγρασία, ταχύτητα αέρα εισόδου), ενώ η επιρροή αυτή γίνεται πιο σημαντική όταν χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη.
- Σχετικά μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση καύσιμου στη βασική του έκδοση σε σχέση με τεχνολογικά προηγμένες εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης.
- Μεγάλο κόστος και χρόνος ανάπτυξης/κατασκευής.
- Κίνδυνος πρόκλησης σοβαρής ζημιάς-στους αεροπορικούς κυρίως-λόγω αναρρόφησης ξένων σωμάτων(Foreign object Damage, FOD) από την εισαγωγή του κινητήρα.

### 1.5) ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΣΤΗΝ ΠΡΩΩΣΗ ΤΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

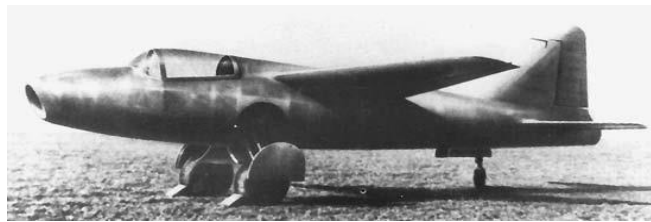
Ένας από τους κυριότερους λόγους εισαγωγής των αεριοστρόβιλων στην πρόωση αεροσκαφών είναι η απαίτηση για μεγιστοποίηση της ώσης ανά μονάδα μεγέθους (όγκου ή βάρους) του κινητήρα. Ο πιο σημαντικός λόγος όμως ήταν η ανάγκη αποδοτικής πρόωσης σε υψηλές ταχύτητες. Η πτήση με υπερηχητική ταχύτητα έγινε δυνατή μόνο με τη χρήση αεριοστρόβιλου σαν μέσο πρόωσης. Σε χαμηλές ταχύτητες ( $M < 0.6$ ) η έλικα αποδεικνύεται αποδοτική για πρόωση, όμως σε μεγαλύτερες ταχύτητες, η αποδοτικότητα της μειώνεται ραγδαία. Από την άλλη μεριά, οι αεριοστρόβιλοι παράγουν πολύ μεγαλύτερη ώση ανά μονάδα βάρους ή μετωπικής επιφάνειας κινητήρα απ'ότι οι αντίστοιχοι εμβολοφόροι κινητήρες. Έτσι, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η έλικα υπερτερεί ως προς την προωθητική απόδοση χρησιμοποιείται πλέον αεριοστρόβιλος για την παραγωγή της μηχανικής ισχύος που κινεί την έλικα και όχι εμβολοφόρος κινητήρας. Παρόλο που ο συνδυασμός έλικας-αεριοστρόβιλου είναι καλός έως σχετικά μέτριες ταχύτητες πτήσης, υπάρχουν συγκεκριμένα κατασκευαστικά και αεροδυναμικής φύσης μειονεκτήματα. Στα πρώτα, συγκαταλέγονται η ανάγκη να κρατηθεί η διάμετρος της έλικας μικρή για λόγους αντοχής, καθώς και η ανάγκη χρήσης μειωτήρα (κιβωτίου ταχυτήτων) για την προσαρμογή του ρυθμού περιστροφής του αεριοστρόβιλου με την έλικα. Το βασικό αεροδυναμικό μειονέκτημα είναι η ανάγκη μείωσης της ακτίνας της έλικας για την αποφυγή εμφάνισης υψηλών γραμμικών ταχυτήτων στα άκρα της, που συνεπάγεται υψηλές απώλειες πίεσης. Σήμερα, μόνο τα μικρά ιδιωτικά ή εκπαιδευτικά αεροσκάφη χρησιμοποιούν εμβολοφόρες μηχανές Otto για να οδηγήσουν έλικα, γιατί οι αντίστοιχοι αεριοστρόβιλοι είναι πολύ μικροί και έχουν σχετικά χαμηλή απόδοση, ενώ το κόστος κτήσης τους είναι υψηλό σε σχέση με το κόστος κατασκευής ενός μικρού αεροσκάφους. Οι αεριοστρόβιλοι άρχισαν να χρησιμοποιούνται για την πρόωση μετά το 1937, όταν ο Άγγλος μηχανικός **Frank Whittle** έθεσε σε λειτουργία τον πρώτο αεριοστρόβιλο **W1** που κινούσε το αεροσκάφος **Gloster E28/39**. Παράλληλα, ο Γερμανός μηχανικός **Hans Von Ohain** δοκίμασε με επιτυχία το δικό του αεριοστρόβιλο στο αεροσκάφος **Heinkel He-178** το 1939. Και οι δυο χρησιμοποίησαν μονοβάθμιο φυγοκεντρικό συμπιεστή και στρόβιλο.



**Σχήμα 1.19:** Ο πρώτος αεριοστρόβιλος Whittle W1 που σώζεται και είναι σε θέση να λειτουργεί έως σήμερα στο Grandfield University, U.K.



**Σχήμα 1.20:** Αεροσκάφος της βρετανικής αεροπορίας Gloster E28/39



**Σχήμα 1.21:** Αεροσκάφος της γερμανικής αεροπορίας Heinkel He-178



## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

### 2.1) ΔΟΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

#### Κύριο σώμα

Τα δομικά μέρη ενός αεροσκάφους σταθερών πτερύγων ονομάζεται κύριο σώμα. Τα τμήματα του μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του αεροσκάφους και τον σκοπό του. Οι πρώτοι τύποι αεροπλάνων κατασκευαζόταν συνήθως από ξύλο με υφασμάτινες επιφάνειες φτερών. Όταν άρχισαν να χρησιμοποιούνται κινητήρες στις μηχανοκίνητες πτήσεις, τον 20<sup>ο</sup> αιώνα, οι βάσεις τους κατασκευάστηκαν από μέταλλο. Καθώς οι ταχύτητες αυξανόταν ολοένα και περισσότερα τμήματα γινόταν μεταλλικά, και μέχρι το τέλος του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, τα περισσότερα αεροσκάφη ήταν μεταλλικά. Στη σύγχρονη εποχή, γίνεται αυξημένη χρήση σύνθετων υλικών.

#### Στα δομικά τμήματα περιλαμβάνονται:

- Μια ή περισσότερες οριζόντιες πτέρυγες (φερά), συχνά σε σχήμα αεροτομής. Η πτέρυγα εκτρέπει τον αέρα προς τα κάτω καθώς το αεροσκάφος κινείται μπροστά, παράγοντας δύναμη άνωσης για την υποστήριξη του στην πτήση. Η πτέρυγα παρέχει επίσης σταθερότητα ώστε να αποφευχθεί η αριστερή ή δεξιά κίνηση μια άτρακτος, ένα μακρύ, λεπτό σώμα, συνήθως με κωνικές ή στρογγυλεμένες άκρες ώστε να κάνουν το σχήμα του ομαλό αεροδυναμικά. Η άτρακτος συνδέεται με τα άλλα τμήματα του αεροπλαισίου και συνήθως περιέχει σημαντικά αντικείμενα όπως το πιλοτήριο, τον χώρο ωφέλιμου φορτίου και τα συστήματα πτήσης.
- Ένας κάθετος σταθεροποιητής ή πτερύγιο, που είναι μια κάθετη επιφάνεια που μοιάζει με φτερό τοποθετημένη στο οπίσθιο μέρος του αεροπλάνου και τυπικά προεξέχει πάνω από αυτό. Το πτερύγιο σταθεροποιεί την αριστερή ή δεξιά εκτροπή του αεροπλάνου και ελέγχεται από το πηδάλιο το οποίο ελέγχει την περιστροφή γύρω από αυτόν τον άξονα.
- Ένας οριζόντιος σταθεροποιητής ή ουραίο πτερύγιο, συνήθως τοποθετημένο στην ουρά πλησίον του κάθετου σταθεροποιητή. Ο οριζόντιος σταθεροποιητής χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση του ύψους του αεροπλάνου (κίνηση πάνω ή κάτω) και ελέγχεται από τους ελκυστήρες που ελέγχουν αυτή την κίνηση.
- Τροχοί προσγείωσης, ένα σύνολο τροχών, τροχοπεδών, ή φλοτέρ που στηρίζουν το αεροπλάνο όταν βρίσκεται στο έδαφος. Στα υδροπλάνα το κάτω μέρος της ατράκτου ή των φλοτέρ (πλωτές βάθρες) το υποστηρίζουν όταν βρίσκεται στο νερό. Σε μερικά αεροπλάνα οι τροχοί προσγείωσης ανακαλούνται κατά τη διάρκεια της πτήσης ώστε να μειωθεί η αντίσταση κατά τη διάρκεια της σταθερής πτήσης.

## Άτρακτος

Μια άτρακτος είναι ένα μακρύ, λεπτό σώμα, συνήθως με κωνικές ή στρογγυλεμένες άκρες ώστε να κάνουν το σχήμα του ομαλό αεροδυναμικά. Η άτρακτος ίσως περιλαμβάνει το πλήρωμα της πτήσης, επιβάτες, εμπορεύματα ή ωφέλιμο φορτίο, καύσιμα και κινητήρες. Οι κυβερνήτες των επανδρωμένων αεροσκαφών τα χειρίζονται από το πιλοτήριο το οποίο βρίσκεται στην κορυφή ή στο εμπρόσθιο τμήμα της ατράκτου και είναι εξοπλισμένο με πλήκτρα και συνήθως παράθυρα και όργανα. Ένα αεροπλάνο ίσως διαθέτει περισσότερες από μια ατράκτους, ή ίσως διαθέτει αλυσίδες που τοποθετούν την ουρά ψηλότερα ώστε να επιστρέψουν στο οπίσθιο τμήμα της ατράκτου να χρησιμοποιηθεί για άλλους λόγους. Η άτρακτος συνιστά το κεντρικό μέρος του αεροσκάφους και διαφοροποιείται από αεροσκάφος σε αεροσκάφος. Το σχήμα της ατράκτου είναι συνήθως κυλινδρικό, ενώ στα άκρα το σχήμα είναι κωνικό ή κυλινδροκωνικό ή αποστρογγυλεμένο. Στα αεροπλάνα μικρότερου μεγέθους, όπως είναι τα μαχητικά, η διατομή της ατράκτου δεν είναι σταθερή κατά μήκος του αεροσκάφους. Σύμφωνα με τη δομή των σύγχρονων αεροσκαφών, ο θαλαμίσκος του πληρώματος βρίσκεται στο πρόσθιο πάνω μέρος της ατράκτου, ενώ στο πίσω μέρος βρίσκεται το ουραίο πτέρωμα, που αποτελείται από τα δυο οριζόντια σταθερά και από ένα κατακόρυφο σταθερό (ή δυο), που συντελούν την ευστάθεια του αεροπλάνου και τα πηδάλια του πίσω χείλους τους που συντελούν την οδήγησή του. Στην περίπτωση των υποηχητικών αεροπλάνων η άτρακτος έχει μεγάλες διαστάσεις, γιατί συνήθως μεταφέρονται προϊόντα και επιβάτες, ενώ στην περίπτωση των υπερηχητικών στόχος είναι στο εμπρόσθιο τμήμα το σχήμα να είναι κώνος με μικρή γωνία, ενώ το πίσω μέρος της να καταλήγει σε κόψη, έτσι ώστε να περιορίζονται οι δίνες που προκαλούνται στην κίνηση της ατράκτου εξαιτίας του αέρα. Το υλικό κατασκευής της ατράκτου είναι συνήθως κράματα, τα οποία μπορούν να αντέξουν τόσο σε υψηλές θερμοκρασίες, όσο και στην μηχανική καταπόνηση. Τέτοια κράματα αποτελούνται κυρίως από τιτάνιο, αλουμίνιο, νικέλιο και άλλα στοιχεία σε μικρότερες αναλογίες. Το ποσοστό συμμετοχής του κάθε στοιχείου στο κράμα καθορίζεται από τις αεροναυπηγικές εταιρίες.

## Πτέρυγες

Οι πτέρυγες ενός αεροσκάφους σταθερών πτερύγων είναι στατικά επίπεδα τα οποία εκτείνονται και από τις δύο πλευρές του αεροσκάφους. Όταν το αεροσκάφος κινείται εμπρός, ο αέρας ρέει πάνω από τις πτέρυγες οι οποίες είναι σχεδιασμένες ώστε να παράγουν άνωση. Το σχήμα αυτό ονομάζεται αεροτομή και είναι παρόμοιο με το φτερό ενός πουλιού. Οι πτέρυγες εξασφαλίζουν την άνωση του αεροπλάνου κατά την κίνηση του με ορισμένη ταχύτητα, δηλαδή την κάθετη στο επίπεδο τους και με κατεύθυνση προς τα πάνω δύναμη, που αντισταθμίζει το βάρος του αεροπλάνου και συντελεί στην απογείωσή του και τη διατήρησή του κατόπιν στον αέρα. Το σχήμα τους ποικίλει και μπορεί να είναι τραπεζοειδές, βελοειδές ή τριγωνικό (“δέλτα”) και μόνο σε ορισμένα αργά και σχετικά ελαφρά αεροπλάνα, ορθογώνιο. Τα αεροσκάφη ανάλογα με την θέση των πτερύγων σε σχέση με την άτρακτο, διακρίνονται σε

χαμηλοπτέρυγα (π.χ. επιβατικά αεροπλάνα), όταν το επίπεδο των πτερύγων βρίσκεται στο κάτω μέρος της ατράκτου, μεσοπτέρυγα (κάποια μαχητικά αεροσκάφη), όταν τα φτερά είναι κοντά στον άξονα και υψηλοπτέρυγα (ειδικά μεταγωγικά της πολεμικής αεροπορίας) όταν τοποθετούνται στο ανώτερο τμήμα της. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι ένα μικρό ποσοστό αεροσκαφών περιλαμβάνει δύο επίπεδα φτερών. Πρόκειται για ελαφρές κατασκευές μικρών επιδόσεων, που χρησιμοποιούνται στον αεροαθλητισμό και ορισμένες ειδικές αποστολές, όπως ο αεροψεκασμός στη γεωργία. Συχνά, τα αεροσκάφη έχουν πτέρυγα σχήματος δέλτα, η οποία μπορεί να εμφανιστεί με πολλές παραλλαγές, όπως το διπλό δέλτα ή τη συνεχή μεταβολή της καμπύλης του χείλους προσβολής. Τα αεροσκάφη με πτέρυγα σχήματος δέλτα δεν έχουν οριζόντια σταθερή ουρά, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις είναι εφοδιασμένα με μικρές πτέρυγες στο πρόσθιο τμήμα της ατράκτου, που λέγονται “κανάρ” ή “κάναρντς”, οι οποίες βελτιώνουν την αεροδυναμική συμπεριφορά, τον έλεγχο του σκάφους και την ευελιξία.

### **Πηδάλια αεροσκάφους**

Στα αεροσκάφη το πηδάλιο αποτελεί μια επιφάνεια ελέγχου, η οποία είναι συνδεδεμένη με ένα πτερύγιο ή την ουρά του αεροσκάφους. Στα πτερύγια και στην ουρά, υπάρχουν πηδάλια ελέγχου, τα οποία εκτρέπουν τη ροή του αέρα, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό στο αεροπλάνο τη δυνατότητα να ανυψωθεί, να χαμηλώσει ή να αποκτήσει κλίση. Στην περίπτωση της απογείωσης, ο πιλότος προεκτείνει τα πηδάλια χείλους προσβολής και επεκτείνει τα πηδάλια χείλους εκφυγής. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται το εμβαδόν επιφάνειας των πτερύγων και έτσι παρέχεται μεγαλύτερη άνωση με χαμηλή ταχύτητα. Για να μπορέσει ο πιλότος να δώσει ύψος στο αεροσκάφος, τραβάει το πηδάλιο προς τα πίσω. Στην περίπτωση αυτή, τα πηδάλια εκτρέπουν προς τα πάνω τον αέρα και η ουρά ωθείται προς τα κάτω, ανυψώνοντας την μύτη της ατράκτου ενώ για να μπορέσει να χαμηλώσει, ο πιλότος σπρώχνει το πηδάλιο προς τα εμπρός, κατεβάζοντας τα πηδάλια ανόδου - καθόδου.

### **Πηδάλια κλίσης**

Ένα πηδάλιο κλίσης (αγγλικά: aileron) είναι μια αρθρωτή επιφάνεια ελέγχου πτήσης που συνήθως αποτελεί το εξωτερικό άκρο κάθε πτέρυγας σε ένα αεροσκάφος σταθερών πτερύγων. Τα πηδάλια κλίσης χρησιμοποιούνται ανά ζεύγη για να ελέγξουν την κίνηση του αεροσκάφους γύρω από τον διαμήκη άξονα, που οδηγεί σε αλλαγή της πορείας πλεύσης λόγω της κλίσης του διανύσματος άντωσης. Το πηδάλιο κλίσης κατοχυρώθηκε αρχικά από τον Βρετανό επιστήμονα και εφευρέτη Μάθιου Πίερς Βατ Μπούλτον το 1868, ο οποίος βασίστηκε στην επιστημονική εργασία του Ον Αerial Locomotion που είχε συγγράψει το 1864. Παρόλο που υπήρχαν παρασκηνιακές δραστηριότητες κατά τον 19ο αιώνα για το πηδάλιο κλίσης και του λειτουργικό του ανάλογο, τις πτέρυγες σάρωσης, οι ΗΠΑ παρέδωσαν δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1906 στους αδελφούς Ράιτ για την εφεύρεση ενός αεροδυναμικού συστήματος που έλεγχε τις επιφάνειες του αεροπλάνου.

## Τμήματα του πηδαλίου κλίσης:

### **‘Κέρατα’ και αεροδυναμικά αντίβαρα**

Ιδιαίτερα στα μεγαλύτερα ή ταχύτερα αεροσκάφη, οι δυνάμεις ελέγχου μπορεί να είναι εξαιρετικά ισχυρές. Ο δανεισμός μιας ανακάλυψης από τα πλοία που επεκτείνει την περιοχή της επιφάνειας ελέγχου μπροστά από το σημείο τοποθέτησης των πηδαλίων και ελαφραίνει τις απαιτούμενες δυνάμεις, εμφανίστηκε για πρώτη φορά στα πηδάλια κλίσης κατά τη διάρκεια του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου, όταν τα πηδάλια έγιναν μεγαλύτερα και τοποθετήθηκαν πέρα από την πτέρυγα με την παράλληλη τοποθέτηση ενός κέρατος μπροστά από το σημείο τοποθέτησης. Γνωστά ως υπερκρεμάμενα πηδάλια κλίσης, τα γνωστότερα αεροσκάφη που τα διαθέτουν είναι τα Fokker Dr.I και Fokker D.VII. Σε μεταγενέστερα αεροσκάφη τοποθετήθηκαν αντίβαρα στις πτέρυγες για την βελτίωση του ελέγχου και τη μείωση της αντίστασης. Πλέον χρησιμοποιούνται λιγότερο μιας και τα πηδάλια κλίσης τύπου Frise αποδίδουν το ίδιο αποτέλεσμα.

### **Αντισταθμιστικό πτερυγίδιο**

Τα αντισταθμιστικά πτερυγίδια είναι μικρά κινούμενα τμήματα που μοιάζουν με κλιμακωτά πηδάλια κλίσης που βρίσκονται επί ή πλησίον της οπίσθιας άκρης του πηδαλίου κλίσης. Στα περισσότερα ελικοφόρα αεροσκάφη, η περιστροφή της έλικας προκαλεί μια εξισοροπητική κίνηση περιστροφής λόγω του τρίτου νόμου κίνησης του Νεύτωνα, καθώς κάθε δράση έχει μια ίση και αντίθετη αντίδραση. Για την απαλλαγή του πιλότου από τη συνεχή πίεση προς μια κατεύθυνση (κάτι που προκαλεί κόπωση), τα αντισταθμιστικά πτερυγίδια αποκόπτουν την πίεση που απαιτείται για οποιαδήποτε ανεπιθύμητη κίνηση. Το ίδιο το πτερυγίδιο εκτρέπεται σε σχέση με το πηδάλιο κλίσης, προκαλώντας την κίνηση του προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τα αντισταθμιστικά πτερυγίδια υπάρχουν σε δύο μορφές, ρυθμιζόμενα και σταθερά. Τα σταθερά αντισταθμιστικά πτερυγίδια περιστρέφονται χειροκίνητα έως την απαιτούμενη εκτροπή, ενώ τα ρυθμιζόμενα μπορούν να ελεγχθούν από το πιλοτήριο, ώστε να μπορούν να αντισταθμιστούν διαφορετικές ρυθμίσεις ισχύος ή υψόμετρα πτήσης. Ορισμένα μεγάλα αεροσκάφη από της δεκαετίας του 1950 (όπως το Canadair Argus) χρησιμοποίησαν ελεύθερες επιπλέουσες επιφάνειες ελέγχου, οι οποίες ελέγχονταν από τον πιλότο μόνο μέσω της εκτροπής των αντισταθμιστικών πτερυγιδίων, οπότε και προστέθηκαν πρόσθετα πτερυγίδια για την τελειοποίηση του χειριστηρίου ώστε να παρέχεται ευθεία και επίπεδη πτήση.

## Αξίνη

Οι αξίνες είναι επίπεδες μεταλλικές πλάκες, συνήθως προσαρτημένες στην κατώτερη επιφάνεια του πηδαλίου κλίσης, μπροστά από το σημείο τοποθέτησής του πηδαλίου κλίσης, με βραχίονα μοχλού. Μειώνουν τη δύναμη που απαιτείται από τον πιλότο για να εκτρέψει το πηδάλιο κλίσης και συνήθως υπάρχουν σε αεροβατικά αεροσκάφη. Καθώς το πηδάλιο κλίσης εκτρέπεται προς τα επάνω, η αξίνη παράγει μια καθοδική αεροδυναμική δύναμη, η οποία τείνει να περιστρέφει ολόκληρη τη συνδεσμολογία ώστε να εκτρέψει περαιτέρω το πηδάλιο κλίσης προς τα πάνω. Το μέγεθος της αξίνης (και του βραχίονα του μοχλού) καθορίζει πόση δύναμη χρειάζεται να εφαρμόσει ο πιλότος για να εκτρέψει το πηδάλιο κλίσης. Μια αξίνη λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο όπως ένα κέρασ, αλλά είναι πιο αποτελεσματική λόγω του μεγαλύτερου βραχίονα ροπής.

## Βαρίδια μαζικής ισορροπίας

Για να αποφευχθεί η κατάπτωση της επιφάνειας ελέγχου (αεροελαστική ταραχή), το κέντρο άντωσης της επιφάνειας ελέγχου πρέπει να βρίσκεται πίσω από το κέντρο βάρους αυτής της επιφάνειας. Για την επίτευξη αυτού, μπορούν να προστεθούν βάρη μόλυβδου στο μπροστινό μέρος του πηδαλίου κλίσης. Σε ορισμένα αεροσκάφη, η κατασκευή των πηδαλίων κλίσης μπορεί να είναι πολύ βαριά για να επιτρέψει σε αυτό το σύστημα να λειτουργήσει χωρίς μεγάλη αύξηση βάρους. Στην περίπτωση αυτή, το βάρος μπορεί να προστεθεί με έναν βραχίονα ώστε να μετακινείται στο μπροστινό μέρος του σώματος του πηδαλίου κλίσης. Αυτά τα βάρη ισορροπίας έχουν σχήμα δακρύων (ώστε να μειώνουν την οπισθέλκουσα αντίσταση), γεγονός που τα κάνει να φαίνονται αρκετά διαφορετικά από τις αξίνες, αν και τα δύο προβάλλουν προς εμπρός και κάτω από το πηδάλιο κλίσης. Εκτός από τη μείωση των αναταράξεων, τα βάρη ισορροπίας μειώνουν επίσης τις δυνάμεις πρόσκρουσης που απαιτούνται για την κίνηση της επιφάνειας ελέγχου κατά την πτήση.

## Είδη πηδαλίων κλίσης

Τα πηδάλια αυτά χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της «εποχής των πρωτοπόρων» της αεροπορίας και στα πρώτα χρόνια του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου, και ελέγχονταν από ένα μόνο σύρμα, το οποίο τραβούσε το πηδάλιο προς τα επάνω. Όταν το αεροσκάφος βρισκόταν σε κατάσταση ηρεμίας, τα πηδάλια κλίσης κρεμόταν κάθετα προς τα κάτω. Αυτός ο τύπος πηδαλίων κλίσης χρησιμοποιήθηκε στο διπλόνο Farman III του 1909 και το Short 166. Μια «αντίστροφη» μορφή αυτού, που χρησιμοποιούσε πτέρυγες σάρωσης, εμφανίστηκε στην μεταγενέστερη μορφή του Demoiselle του Αλμπέρτου Σάντους-Ντουμό, η οποία σάρωνε τις άκρες των πτερύγων προς τα κάτω. Ένα από τα μειονεκτήματα αυτής της διάταξης ήταν η αυξημένη τάση να εκτρέπεται σε σχέση με τα βασικά διασυνδεδεμένα πηδάλια κλίσης. Τη δεκαετία του 1930 αρκετά ελαφρά αεροσκάφη χρησιμοποιούσαν συστήματα ελέγχου απλής ενέργειας αλλά επίσης χρησιμοποιούσαν ελατήρια για να επαναφέρουν τα πηδάλια κλίσης στις ουδέτερες θέσεις τους όταν απελευθερωνόταν το χειριστήριο

## Ακροπτέρυγα πηδάλια κλίσης

Αυτό το είδος χρησιμοποιήθηκε στο πρώτο αεροσκάφος που χρησιμοποίησε τον συνδυασμό «χειριστηρίου/λοβών πηδαλίων εκτροπής», προπομπούς των σύγχρονων συστημάτων ελέγχου πτήσης, το Blériot VIII του 1908. Μερικά πρώιμα μοντέλα αεροσκαφών χρησιμοποίησαν «ακροπτέρυγα» πηδάλια κλίσης, στα οποία ολόκληρο το ακροπτέρυγο περιστρεφόταν ώστε να επιτευχθεί πλευρικός έλεγχος σε μια ξεχωριστή, περιστροφική επιφάνεια—το AEA June Bug χρησιμοποιούσε μια μορφή αυτών, ενώ τόσο το πειραματικό γερμανικό Fokker V.1 του 1916 και οι πρώτες εκδόσεις του μονοπλάνου Junkers J 7 ήταν ανάμεσα σε αυτά που το χρησιμοποίησαν—το J 7 ήταν ο προπομπός του πλήρως μεταλλικού γερμανικού πολεμικού αεροσκάφους Junkers D.I του 1918, το οποίο διέθετε συμβατικά πηδάλια κλίσης. Το κύριο πρόβλημα με αυτόν τον τύπο πηδαλίων κλίσης είναι η απενεργοποίηση του κινητήρα αν χρησιμοποιηθεί επιθετικά, ειδικά εάν το αεροσκάφος κινδυνεύει ήδη να βρεθεί σε αυτή την κατάσταση, εξ ου και η χρήση κυρίως σε πρωτότυπα και η αντικατάστασή τους στα αεροσκάφη παραγωγής με συμβατικά πηδάλια κλίσης.

## Πηδάλια κλίσης Frise

Ο μηχανικός Λέσλι Τζορτζ Φράις (1897–1979) της Bristol Aeroplane Company ανέπτυξε ένα σχέδιο πηδαλίων κλίσης που περιστρεφόταν στο 25 με 30% της χορδής και πλησίον της κάτω επιφάνειας, ώστε να μειθούν οι δυνάμεις του χειριστηρίου καθώς τα αεροσκάφη έγιναν γρηγορότερα την δεκαετία του 1930. Όταν το πηδάλιο εκτραπεί προς τα κάτω (για να ωθήσει την πτέρυγα του να κινηθεί προς κάτω), το εμπρόσθιο άκρο του πηδαλίου κλίσης αρχίζει να προεξέχει κάτω από την κάτω επιφάνεια του πτερυγίου, στη ροή αέρα κάτω από την πτέρυγα. Η ροπή του εμπρόσθιου άκρου στη ροή του αέρα το βοηθά να κινηθεί προς την άκρη, κάτι που μειώνει την δύναμη του χειριστηρίου. Το καθοδικά κινούμενο πηδάλιο κλίσης προσθέτει επίσης ενέργεια στο οριακό στρώμα. Η άκρη του πηδαλίου κλίσης κατευθύνει τη ροή αέρα από την κάτω πλευρά του πτερυγίου στην ανώτερη επιφάνεια του, δημιουργώντας έτσι μια ανυψωτική δύναμη, η οποία προστίθεται στην άντωση της πτέρυγας. Αυτό μειώνει την απαιτούμενη γωνία εκτροπής του πηδαλίου κλίσης. Τόσο το καναδικό διπλό Fleet Model 2 του 1930, και το μεταγενέστερο αμερικανικό μονοπλάνο Piper J-3 Cub του 1938 διέθεταν πηδάλια κλίσης Frise στην αρχική τους μορφή, βοηθώντας στην ευρεία εισαγωγή και παρουσία τους. Ένα πλεονέκτημα του πηδαλίου κλίσης Frise είναι η δυνατότητα του να εξουδετερώνει την αντίξοχη εκτροπή. Για να γίνει αυτό, η αιχμή του πηδαλίου κλίσης πρέπει να είναι αιχμηρή ή στρογγυλεμένη, γεγονός που προσθέτει σημαντική οπισθέλκουσα αντίσταση στο ανοδικά κινούμενο πηδάλιο κλίσης και βοηθά το αεροσκάφος να στρέφεται προς την επιθυμητή κατεύθυνση, προσθέτοντας όμως ανεπιθύμητη, μη γραμμική παρενέργεια και δυνητικά επικίνδυνους αεροδυναμικούς κραδασμούς. Η ροπή της αντίξοχης εκτροπής αντισταθμίζεται βασικά από τη σταθερότητα της περιστροφής του αεροσκάφους, αλλά και από τη χρήση της διαφορικής κίνησης των πηδαλίων κλίσης.



## Διαφορικά πηδάλια κλίσης

Μέσω ενός προσεκτικού σχεδιασμού των μηχανικών διασυνδέσεων, το ανοδικά κινούμενο πηδάλιο κλίσης μπορεί να εκτρέπεται περισσότερο από το κάτω. Αυτό συμβάλει στην αποτροπή της πιθανότητας κατάρρευσης ενός ακροπτερυγίου σε μεγάλες γωνίες προσβολής. Σύμφωνα με την ιδέα η απώλεια άντωσης που σχετίζεται με το ανοδικά κινούμενο πηδάλιο δεν επιφέρει κάποιο αρνητικό αποτέλεσμα ενώ η αύξηση της άντωσης που σχετίζεται με το καθοδικά κινούμενο πηδάλιο κλίσης ελαχιστοποιείται. Το ζεύγος περιστροφής του αεροσκάφους ισούται πάντοτε με την διαφορά άντωσης μεταξύ των δύο πτερύγων. Ένας σχεδιαστής της εταιρείας de Havilland εφηύρε μια απλή και πρακτική διασύνδεση για το διπλό de Havilland Tiger Moth το οποίο έγινε ένα από τα πλέον γνωστά και ένα από τα πρώτα που χρησιμοποίησε διαφορικά πηδάλια κλίσης.

### Συνδυασμοί με άλλες επιφάνειες ελέγχου

- Μια επιφάνεια ελέγχου που συνδυάζει πηδάλιο κλίσης με πτερύγιο ονομάζεται πτερύγιο κλίσης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με τις δύο λειτουργίες: όταν χρησιμοποιείται ως πηδάλιο κλίσης, τα πτερύγια κλίσης αριστερά και δεξιά λειτουργούν διαφορετικά. Όταν η επιφάνεια χρησιμοποιείται ως πτερύγιο, και τα δύο πτερύγια κλίσης βρίσκονται προς τα κάτω. Όταν ένα πτερύγιο κλίσης βρίσκεται προς τα κάτω υπάρχει αρκετός χώρος κινήσεων για το πηδάλιο κλίσης.
- Μερικά αεροσκάφη έχουν διαφορικά ελεγχόμενους φθορείς άντωσης για την πραγματοποίηση περιστροφής αντί να χρησιμοποιούνται πηδάλια κλίσης. Το πλεονέκτημα είναι ότι ολόκληρη η πίσω πλευρά της πτέρυγας μπορεί να χρησιμοποιείται ως πτερύγιο, παρέχοντας ένα καλύτερο έλεγχο σε χαμηλές ταχύτητες. Το Northrop P-61 Black Widow χρησιμοποιούσε φθορείς άντωσης κατ' αυτό το τρόπο, σε συνδυασμό με πλήρους εύρους πτερύγια ενώ μερικά σύγχρονα αεροπλάνα χρησιμοποιούν φθορείς άντωσης συμπληρωματικά με τα πηδάλια κλίσης.
- Στα αεροσκάφη με πτέρυγες δέλτα, τα πηδάλια κλίσης συνδυάζονται με τα πηδάλια ανόδου-καθόδου σχηματίζοντας πηδάλια εκτροπής.
- Αρκετά σύγχρονα μαχητικά αεροσκάφη μπορεί να μην διαθέτουν πηδάλια κλίσης στις πτέρυγές τους αλλά να παρέχουν έλεγχο περιστροφής μέσω κινούμενων ουριαίων πτερύγων. Όταν οι οριζόντιοι σταθεροποιητές των ουριαίων πτερύγων κινούνται διαφορετικά ώστε να επιτευχθεί ο έλεγχος της περιστροφής των πηδαλίων κλίσης, όπως συμβαίνει σε μερικά σύγχρονα μαχητικά αεροσκάφη, ονομάζονται ουριαία πτερύγια κλίσης. Τα ουριαία πτερύγια κλίσης επιτρέπουν την χρήση μεγαλύτερων πτερυγίων στις πτέρυγες του αεροσκάφους.

- Οι στύλοι των πηδαλίων κλίσης συνδυάζονται με κινητές επιφάνειες και στύλους πτερύγων σε σχήμα αεροτομών. Ενεργώντας στον ανατροχασμό του έλικα οδήγησε στην αύξηση της αποτελεσματικότητάς τους, αν και το μηχανικό τους πλεονέκτημα μειώνεται λόγω της θέσης τους στο αεροσκάφος.

## Δομή των πτερύγων

Τα αεροπλάνα έχουν ευέλικτες επιφάνειες πτερύγων οι οποίες εκτείνονται σε ένα πλαίσιο και γίνονται άκαμπτες από τις δυνάμεις άνωσης που ασκούνται από την ροή του αέρα πάνω τους. Τα μεγαλύτερα αεροσκάφη έχουν άκαμπτες επιφάνειες πτερύγων οι οποίες παρέχουν επιπλέον δύναμη. Είτε ευέλικτες είτε άκαμπτες, οι περισσότερες πτέρυγες διαθέτουν ένα στιβαρό πλαίσιο από το οποίο παίρνουν το σχήμα τους και το οποίο μεταφέρει την άνωση από την επιφάνεια των πτερύγων προς το υπόλοιπο αεροσκάφος. Τα κύρια δομικά στοιχεία είναι ένας ή περισσότεροι δοκοί που εκτείνονται από τη μία στην άλλη άκρη, και πολλές ραβδώσεις που εκτείνονται από το κορυφαίο (μπροστινό) στο καταληκτικό (οπίσθιο) σημείο. Οι πρώτοι κινητήρες αεροπλάνων είχαν μικρή ισχύ, και η ελαφρότητα τους ήταν πολύ σημαντική. Επίσης, τα πρώτα τμήματα αεροτομών ήταν πολύ λεπτά, και δεν μπορούσαν να διαθέτουν ένα ισχυρό πλαίσιο στην επιφάνεια τους. Έτσι μέχρι τη δεκαετία του 1930 οι περισσότερες πτέρυγες ήταν πολύ ελαφρές και δεν διέθεταν αρκετή δύναμη. Έτσι προστέθηκαν εξωτερικοί δοκοί αντιστήριξης και καλώδια. Όταν αυξήθηκε η διαθέσιμη ισχύ των κινητήρων κατά τις δεκαετίες 1920 και 1930, οι πτέρυγες μπορούσαν να γίνουν βαρύτερες και αρκετά δυνατές, και η στήριξη δεν χρειαζόταν πλέον. Αυτός ο τύπος των αστήρικτων πτερύγων ονομάζεται διάταξη πτέρυγας υποστηρίγματος.



**Σχήμα 2.1:** Basic control surfaces of Fixed wing Aircraft (Βασικές επιφάνειες ελέγχου των αεροσκαφών σταθερής πτέρυγας)



## Διάταξη των πτερυγίων

Ο αριθμός και το σχήμα των πτερυγίων διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον τύπο. Ένα συγκεκριμένο επίπεδο πτέρυγας μπορεί να είναι πλήρους ανοίγματος ή διαχωρισμένο από μια κεντρική άτρακτο σε αριστερή και δεξιά πτέρυγα. Σε μερικές περιπτώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί και περισσότερες πτέρυγες, όπως το τριπλό με τις τρεις πτέρυγες που χρησιμοποιήθηκε αρκετά στον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Το τετραπτέρυγο τετραπλό και άλλα σχέδια πολυπλάνων είχαν μικρή επιτυχία. Το μονοπλάνο διαθέτει μια απλή επιφάνεια πτέρυγας, ένα διπλό έχει δύο στοιβαγμένες μια πάνω στην άλλη, ένα αεροπλάνο παράλληλης πτέρυγας έχει δύο τοποθετημένα το ένα πίσω από το άλλο. Όταν η διαθέσιμη ισχύς κινητήρα αυξήθηκε κατά τη δεκαετία του 1920 μέχρι 1930 και δεν χρειαζόταν πλέον στήριξη, το αστήρικτο μονοπλάνο έγινε ο πιο κοινός τύπος μηχανοκίνητου αεροπλάνου. Η κάτοψη της πτέρυγας είναι το σχήμα της όπως φαίνεται από πάνω. Για να είναι αεροδυναμικά αποτελεσματική, μια πτέρυγα πρέπει να είναι ευθεία με μακρά έκταση από τη μία άκρη στην άλλη αλλά να έχει μικρή χορδή (υψηλή αναλογία). Αλλά για να είναι δομικά αποτελεσματική και ως εκ τούτου ελαφριά σε βάρος, μια πτέρυγα πρέπει να διαθέτει μικρή έκταση η οποία θα πρέπει να είναι αρκετή για να παρέχει άνωση (χαμηλή αναλογία). Στις διηχητικές ταχύτητες (κοντά στην ταχύτητα του ήχου), η σάρωση της πτέρυγας μπροστά ή πίσω βοηθά ώστε να μειώνεται η αντίσταση από τα υπερηχητικά ωστικά κύματα καθώς αυτά αρχίζουν να δομούνται. Η πτέρυγα σάρωσης είναι μια ευθεία πτέρυγα η οποία κινείται μπροστά ή πίσω. Η πτέρυγα δέλτα είναι ένα τριγωνικό σχήμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλούς λόγους. Ως μια ευέλικτη πτέρυγα Rogallo καταλογίζεται ως ένα σταθερό σχήμα στις αεροδυναμικές δυνάμεις, και συχνά χρησιμοποιείται σε υπερελαφριά αεροσκάφη και ακόμη και χαρταετούς. Ως υπερηχητική πτέρυγα συνδυάζει την υψηλή δύναμη με την χαμηλή αντίσταση και έτσι συχνά χρησιμοποιείται σε γρήγορα αεριωθούμενα. Μια μεταβλητή γεωμετρική πτέρυγα μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια της πτήσης σε άλλο σχήμα. Οι μεταβλητές πτέρυγες σάρωσης μεταβάλλονται μεταξύ μιας αποτελεσματικής ευθείας διάταξης κατά την διάρκεια της απογείωσης και της προσγείωσης, σε μια διάταξη σάρωσης χαμηλής αντίστασης κατά τη διάρκεια πτήσεων υψηλής ταχύτητας.



**Σχήμα 2.2:** Μονοπλάνο – Αεροσκάφος με δύο επίπεδα φτερών – Αεροσκάφος με φτερά τύπου δέλτα

## Σύστημα Προσγείωσης

Το σύστημα προσγείωσης στηρίζει όλο το βάρος του αεροσκάφους κατά τη διάρκεια της προσγείωσης καθώς και στις λειτουργίες του εδάφους. Ο τύπος των οργάνων που συμπεριλαμβάνονται στο σύστημα προσγείωσης εξαρτάται από το σχεδιασμό του αεροσκάφους και την προοριζόμενη χρήση του. Τα συστήματα αυτά διαθέτουν ρόδες για να διευκολύνεται η λειτουργία προσγείωσης. Τα αεροσκάφη όμως που επιχειρούν προς και από παγωμένες λίμνες και χιονισμένες περιοχές μπορεί να είναι εξοπλισμένα με σύστημα προσγείωσης που έχει σκι. Τα αεροσκάφη που μπορούν να απογειώνονται και να προσγειώνονται στο νερό έχουν επίσης σύστημα προσγείωσης με σκι. Ανεξάρτητα από το είδος του συστήματος προσγείωσης που χρησιμοποιείται, θα πρέπει σε ένα τέτοιο σύστημα να υπάρχει εξοπλισμός για την απορρόφηση κραδασμών, φρένα, συστήματα προειδοποίησης και δομικά στοιχεία απαραίτητα για τη σύνδεση της ταχύτητας του αεροσκάφους, με τα μέρη του συστήματος προσγείωσης. Στη διάρκεια της προσγείωσης χρησιμοποιείται το σύστημα τροχών και η κατασκευή του περιλαμβάνει δύο κύρια μέρη. Το πρώτο βρίσκεται στο μεσαίο τμήμα του αεροπλάνου και το δεύτερο στο πρόσθιο ή ριναίο (οπίσθιο στα παλιότερα αεροσκάφη). Στα αεροπλάνα σήμερα, το σύστημα προσγείωσης – απογείωσης δεν είναι σταθερό αλλά κατά την πτήση ανασύρεται στην άτρακτο (το πρόσθιο και πολλές φορές το κύριο) ή στις πτέρυγες. Σε μερικά υψηλότερα κυρίως αεροπλάνα το κύριο σύστημα προσγείωσης βρίσκεται σε ειδικά πλευρικά ατρακτίδια του μεσαίου τμήματος της ατράκτου.

## Σύστημα Προώθησης

Για να μπορέσει ένα αεροσκάφος να προσεγγίσει μια ταχύτητα και να τη διατηρήσει απαιτείται μια συνεχής δύναμη, αναγκαία για τη στήριξή του και την οριζόντια και ανοδική κίνησή του, με την εξισορρόπηση όλων των αντιστάσεων. Η ώθηση προκαλείται από έναν κινητήρα, του οποίου ο ρόλος είναι να επιταχύνει τον αέρα που βρίσκεται μπροστά από το αεροπλάνο και να τον εκτοξεύει προς τα πίσω. Η εκτόξευση αυτή του αέρα προς την ουρά έχει ως αποτέλεσμα το αεροπλάνο να κινείται προς τα εμπρός χάρη στην αντίδραση. Το κλασικότερο σύστημα προώθησης, είναι ο έλικας, αφού τα πτερύγια του μπορούν να θεωρηθούν ως σύνολο περιστρεφόμενων πτερυγίων που καθώς κινούνται μέσα στον αέρα προκαλούν αεροδυναμικές αντιδράσεις, οι οποίες μεταβάλλονται σε επιταχύνσεις του αέρα προς κατεύθυνση αντίθετη με την κίνηση του αεροσκάφους. Όμως, ο έλικας του αεροσκάφους εξαιτίας αεροδυναμικών φαινομένων, παρουσιάζει σοβαρό μειονέκτημα, καθώς η ώθηση που παρέχει ελαττώνεται με την αύξηση της ταχύτητας πτήσης του αεροπλάνου και περιστροφής των πτερυγίων της. Για την αποφυγή αυτού του μειονεκτήματος, μπορεί να γίνει προσθήκη αεροσυμπιεστών ρυθμιζόμενων και αυτόματων, καθώς και χρησιμοποίηση στροβιλοσυμπιεστών, οι οποίοι λειτουργούν με τα καυσάερια της εξαγωγής και εξασφαλίζουν έτσι μεγάλα πλεονεκτήματα στη διατήρηση της ισχύος και σε μεγάλα ύψη, παρά την αραιώση του αέρα. Έγιναν ακόμα προσπάθειες, με καλά αποτελέσματα, να επανακτηθεί με τα καυσάερια μέρος της ισχύος που χάνεται, με την κίνηση ενός στροβίλου

συνδεδεμένου στον ίδιο κινητήριο άξονα, ώστε να μεγαλώνει με αυτόν τον τρόπο η ροπή στρέψης. Επιπλέον, με τη βελτίωση του έλικα και του κινητήρα, δημιουργήθηκαν προωθητικά συστήματα ισχύος περίπου 3000 ίππων. Διαπιστώθηκε όμως ότι πέρα από αυτή την ισχύ, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης με έλικα δεν είναι αρκετά αποδοτικός.

## Στροβιλοκινητήρας

Οι στροβιλοκινητήρες δημιουργούν ώθηση, σπρώχνοντας τον αέρα προς τα πίσω. Σαν αποτέλεσμα στην πάνω πλευρά των φτερών δημιουργείται υπό πίεση και στην κάτω υπερπίεση, με αποτέλεσμα να δημιουργείται άνωση, εξαιτίας της οποίας σηκώνεται το αεροσκάφος. Οι στροβιλοκινητήρες των αεροπλάνων διακρίνονται σε 3 είδη: **τους στροβιλοκινητήρες απλής ροής, τους στροβιλοκινητήρες διπλής ροής και τους ελικοστροβιλοκινητήρες.** Οι στροβιλοκινητήρες απλής ροής έχουν την πιο απλή δομή και κατασκευή. Περιλαμβάνουν τον συμπιεστή, έναν ή περισσότερους θαλάμους καύσης, το στρόβιλο, τον αυλό εξαγωγής (κάποιες φορές σε συνδυασμό με τον μετακαυστήρα) και το ακροφύσιο εξαγωγής. Ο στροβιλοκινητήρας διπλής ροής ή στροβιλοκινητήρας παροχέτευσης ρεύματος αέρα, μπορεί να λειτουργεί με την έλικα τοποθετημένη μπροστά ή πίσω. Στην πρώτη περίπτωση, ένα μέρος του εισερχόμενου ψυχρού αέρα δεν μπαίνει στο θάλαμο καύσης, αλλά διαχωρίζεται και συμπιέζεται από μια έλικα χαμηλής πίεσης, που βρίσκεται πριν από το συμπιεστή, διοχετεύεται γύρω από το θάλαμο καύσης και στη συνέχεια περιβάλλει τα θερμά καυσαέρια. Έτσι θερμαίνεται απότομα και αυξάνεται ο όγκος του, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συνολική ροή μάζας των αερίων και επομένως η ώθηση, χωρίς την επιπλέον κατανάλωση καυσίμου. Στη δεύτερη περίπτωση, η αναρρόφηση και η συμπίεση του δευτερεύοντος ρεύματος ψυχρού αέρα γίνεται γύρω από το χώρο εκτόνωσης των καυσαερίων, με τη βοήθεια μιας έλικας που βρίσκεται μετά το θάλαμο καύσης. Το ψυχρό αυτό ρεύμα αέρα αναμιγνύεται με το θερμό ρεύμα των καυσαερίων και δημιουργεί ένα μικτό ρεύμα. Ο ελικοστροβιλοκινητήρας, στον οποίο τα θερμά αέρια βγαίνοντας από το θάλαμο καύσης κινούν έναν ή περισσότερους στρόβιλους, οι οποίοι με τη σειρά τους κινούν μία έλικα που βρίσκεται μπροστά από το στόμιο εισαγωγής του στροβιλοκινητήρα. Η έλικα παρουσιάζει υψηλή απόδοση σε ένα ορισμένο εύρος ταχυτήτων, γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή του ελικοστροβιλοκινητήρα σε αεροσκάφη μεσαίων ταχυτήτων και στα ελικόπτερα.

## Δομή και Μηχανισμοί Οργάνων

Από λειτουργική άποψη, τα αεροσκάφη περιλαμβάνουν τέσσερις ενότητες εξαρτημάτων:

- Τα εξαρτήματα ανίχνευσης, που ανιχνεύουν τις μεταβολές στα απαραίτητα μεγέθη

- Τα εξαρτήματα μέτρησης, τα οποία μετρούν το μέγεθος των μεταβολών διαφόρων φυσικών μεγεθών σε συνάρτηση γραμμικών ή γωνιακών μετατοπίσεων
- Τα εξαρτήματα σύζευξης με τη βοήθεια των οποίων η προαναφερθείσα μεταβολή μετατρέπεται για το χειριστή σε ωφέλιμη τιμή
- Τα εξαρτήματα ένδειξης παρουσιάζουν την ωφέλιμη αυτή τιμή με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αναγνωρίσιμη και κατανοητή από το πλήρωμα του θαλάμου

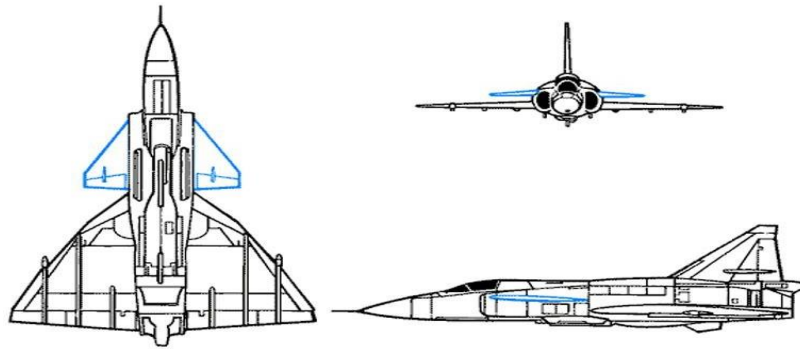
Τα δυο βασικά μεγέθη που πρέπει να μετρούνται από τα όργανα αεροσκάφους είναι η πίεση και η θερμοκρασία. Ειδικότερα τα όργανα μέτρησης πίεσης κατατάσσονται σε:

- Αυτά που μετρούν και δείχνουν την πίεση επί τόπου. Σε αυτή την περίπτωση, το εξάρτημα μέτρησης βρίσκεται εντός του οργάνου.
- Τα όργανα που αφού μετρήσουν την πίεση σε κάποιο σημείο του αεροσκάφους, τη μεταφέρουν στο όργανο που βρίσκεται στο θάλαμο διακυβέρνησης μέσω κάποιου υγρού ή ενός ηλεκτρικού ρεύματος. Σε αυτή την περίπτωση, το εξάρτημα μέτρησης βρίσκεται εκτός του οργάνου και συνδέεται με το όργανο μέσω κάποιου σωλήνα ή ηλεκτρικού καλωδίου.

Ο συνήθης τρόπος μέτρησης της πίεσης στα αεροσκάφη είναι η μέτρηση της τάσης που ασκείται πάνω σε κάποιο ελαστικό υλικό. Αυτό σημαίνει ότι το ελαστικό υλικό θα πάθει παραμόρφωση ανάλογη με την πίεση και εμείς θα μετρήσουμε είτε ηλεκτρονικά, είτε μηχανικά το μέγεθος της παραμόρφωσης και θα το αντιστοιχήσουμε στην ασκηθείσα πίεση.

### **Ουραίο πτερύγιο και πρόσθια πτερύγια**

Η κλασική πτέρυγα τύπου αεροτομής είναι ασταθής κατά τη διάρκεια της πτήσης, και ο έλεγχος της είναι δύσκολος. Οι τύποι ευέλικτων πτερύγων στηρίζονται συχνά σε μια γραμμή αγκύρωσης ή στο βάρος ενός πιλότου που κρέμεται από κάτω για να διατηρεί τη σωστή στάση. Μερικοί τύποι ελεύθερης πτήσης χρησιμοποιούν μια προσαρτημένη αεροτομή η οποία είναι σταθερή, ή άλλους ευφυείς μηχανισμούς στους οποίους συμπεριλαμβάνεται και, ο πιο πρόσφατος, η ηλεκτρονική τεχνητή σταθερότητα. Αλλά για να επιτευχθεί το τελείωμα, η σταθερότητα και ο έλεγχος, τα περισσότερα αεροσκάφη σταθερών πτερύγων διαθέτουν ένα ουραίο πτερύγιο στο οποίο περιλαμβάνονται ένα πτερύγιο και ένα πηδάλιο τα οποία λειτουργούν οριζοντίως και ένα ουραίο πτερύγιο με έναν ελκυστήρα που λειτουργούν καθέτως. Αυτή η διάταξη είναι τόσο κοινή που θεωρείται πλέον η συμβατική διάταξη. Μερικές φορές υπάρχουν δύο ή περισσότερα πτερύγια, καταμεμημένα κατά μήκος του ουραίου πτερυγίου. Ορισμένοι τύποι αεροπλάνων διαθέτουν «ψευδή» εμπρόσθια πτερύγια μπροστά από την κύρια πτέρυγα, αντί για πίσω της. Αυτό το εμπρόσθιο πτερύγιο συνεισφέρει στην άνωση, το τελείωμα ή τον έλεγχο του αεροσκάφους.



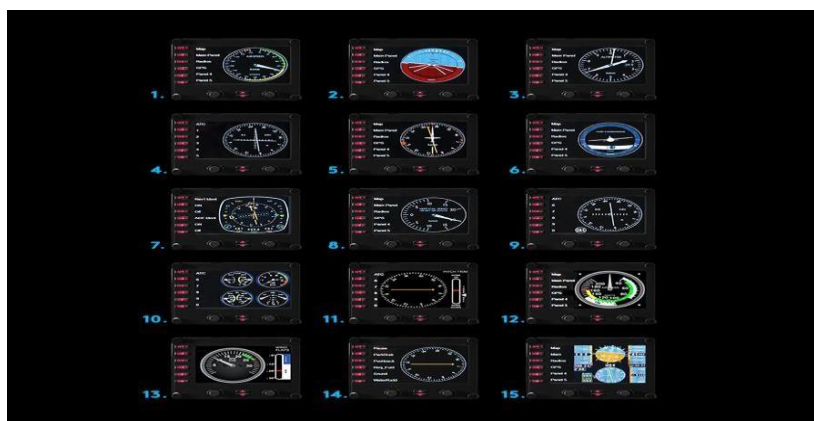
**Σχήμα 2.3:** Εμπρόσθια πτερύγια στο Saab Viggen

### Διακόπτες και όργανα

Τα αεροπλάνα διαθέτουν περίπλοκα συστήματα ελέγχου πτήσης. Οι κύριοι διακόπτες επιτρέπουν στον κυβερνήτη να διευθύνει το αεροσκάφος στον αέρα με τον έλεγχο της θέσης του αεροσκάφους και της ώθησης του κινητήρα. Στα επανδρωμένα αεροσκάφη, τα όργανα του πιλοτηρίου παρέχουν πληροφορίες στους κυβερνήτες, συμπεριλαμβανομένων δεδομένων της πτήσης, ισχύος του κινητήρα, πλοήγησης, επικοινωνίας, ενώ ενδέχεται να προστεθούν και άλλα συστήματα.



**Σχήμα 2.4 Α:** Πιλοτήριο αεροσκάφους



**Σχήμα 2.4 Β:** Πίνακας ενδείξεων πιλοτηρίου

Περιηγηθείτε σε 15 διαφορετικές οθόνες ή δημιουργήστε μια μεγαλύτερη διάταξη που θα προβάλλει ταυτόχρονα πολλούς πίνακες σε ένα πίνακα ενδείξεων πιλοτηρίου ενός αεροσκάφους. Οι παραπάνω οθόνες αποτελούν τη βασική οθόνη πτήσης (PFD) και περιλαμβάνουν:

1. Ένδειξη ταχύτητας αέρα	6. Ένδειξη κατεύθυνσης	11. Δείκτες κινητήρων
2. Ένδειξη υψομέτρου	7. Ένδειξη στροφής/ολίσθησης	12. ADF με ένδειξη αντιστάθμισης
3. Υψόμετρο	8. Ένδειξη οριζόντιας κατάστασης (HSI)	13. Δείκτης Ταχύτητας Cessna
4. VHF	9. Ένδειξη κατακόρυφης ταχύτητας	14. RPM με ένδειξη πτερυγίων
5. Πανκατευθυντικός ραδιοφάρος (VOR) 1	10. VHF πανκατευθυντικός ραδιοφάρος (VOR) 2	15. Εναέριο Γωνιόμετρο (ADF)

## 2.2) ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΩΣ ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

### Πόσο ασφαλές μέσο είναι το αεροπλάνο

Στις μέρες μας το αεροπλάνο θεωρείται ως το πιο ασφαλές μέσο μεταφοράς για τον άνθρωπο. Οι ασφαλιστικές εταιρίες και οι βιομηχανίες του παγκόσμιου αεροπορικού κλάδου βασίζουν τους στατιστικούς υπολογισμούς τους στον αριθμό θανάτων ανά χιλιόμετρο στα δελτία τύπου όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 2.5)

Θάνατοι ανά δισεκατομμύρια χλμ.	
Αεροπλάνο: 0.05	Αυτοκίνητο: 3.1
Λεωφορείο: 0.4	Ποδήλατο: 44.6
Τραίνο: 0.6	Πεζοί: 54.2
Πλοίο: 2.6	Μοτοσικλέτα: 108.9

**Πίνακας 2.5:** Αριθμός θανάτων ανά δισεκατομμύρια χλμ. σε διάφορα μέσα μεταφοράς.

Συμβαίνουν πολλά αεροπορικά ατυχήματα, τα περισσότερα από αυτά είναι ανθρώπινα λάθη. Βέβαια η πιθανότητα να γίνει αεροπορικό ατύχημα με το αεροπλάνο που ταξιδεύουμε είναι εξαιρετικά μικρή. Τα περισσότερα αεροπορικά ατυχήματα συνήθως συμβαίνουν κατά την προσγείωση ή την απογείωση.



Σε αυτές τις περιπτώσεις αεροπορικών ατυχημάτων είτε οι πιλότοι δεν έχουν βάλει σε σωστή θέση τα πτερύγια flaps ή έχουν πατημένα τα φρένα ή συγκρούονται αεροπλάνα μεταξύ τους, τα οποία είναι ανθρώπινα λάθη λόγω αμέλειας. Υπάρχουν και δύσκολες καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης **may day** και στον αέρα, όπως το να σβήσουν οι κινητήρες λόγω κακοκαιρίας ή λόγω κάποιας διαρροής καυσίμων, λόγω κακής συντήρησης ή ακόμα μπορεί και να τελειώσουν τα καύσιμα αφού δεν έγινε ανεφοδιασμός όταν έπρεπε. Στην περίπτωση που χαλάσουν οι κινητήρες ή τελειώσουν τα καύσιμα, συνήθως οι πιλότοι καταφέρνουν να προσγειώσουν το αεροπλάνο με ασφάλεια. Παράλληλα την ίδια στιγμή με υπερσύγχρονα συστήματα ραντάρ θωρακίζονται τέσσερα μεγάλα αεροδρόμια της χώρας εν όψει του χειμώνα και των δυσμενών καιρικών συνθηκών που επικρατούν κυρίως στις βόρειες περιοχές της. Εκτός αυτού σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία των διεθνών οργανισμών, περίπου το 20% των αεροπορικών ατυχημάτων έχουν ως κύρια αιτία τις κακές καιρικές συνθήκες κατά την προσγείωση ή την απογείωση των αεροσκαφών από τα αεροδρόμια. Οι βασικές αιτίες είναι η κακή ορατότητα λόγω ομίχλης, οι ξαφνικές καταιγίδες, οι δυνατοί άνεμοι, η χιονόπτωση, οι κεραυνοί, η παρατεταμένη βροχόπτωση, οι αναταράξεις και τα καθοδικά ρεύματα. Ενδεικτικά να αναφέρουμε ότι όλες οι κινήσεις των αεροσκαφών απεικονίζονται σε μια οθόνη με τον χάρτη της Ελλάδας και των γειτονικών χωρών και στην παραμικρή αλλαγή της προγραμματισμένης πορείας σημαίνει συναγερμός στην οθόνη των ελεγκτών και σημειώνεται με κόκκινο το στίγμα του αεροσκάφους ώστε να ειδοποιηθεί αμέσως ο πιλότος του. Επιπλέον έχει ήδη τοποθετηθεί και λειτουργεί το πρόγραμμα παροχής εικόνας ραντάρ από το Pallas (το σύστημα που καλύπτει όλη τη χώρα) στα 32 μεσαία και μεγάλα ελληνικά αεροδρόμια, ώστε να έχουν τη δυνατότητα οι ελεγκτές να παρακολουθούν σε μία οθόνη την απεικόνιση της πορείας των αεροσκαφών που πετούν στην περιοχή τους. Στην Ελλάδα, ευτυχώς, η εμφάνιση έντονων καιρικών φαινομένων, όπως τυφώνες, θύελλες και ισχυρές καταιγίδες, είναι σχετικά σπάνια. Τα τελευταία χρόνια όλα τα αεροσκάφη είναι εφοδιασμένα με ραντάρ και οι πιλότοι μπορούν να εντοπίσουν μια καταιγίδα και να την αποφύγουν. Μάλιστα το πρώτο πράγμα που μαθαίνουν οι νέοι πιλότοι είναι όταν εντοπίσουν ένα έντονο καιρικό φαινόμενο να κάνουν τα τρία A του αγγλικού αλφαβήτου, που σημαίνουν **Avoid, Avoid, Avoid** ( απόφυγε, απόφυγε, απόφυγε). Ωστόσο οι ιδιομορφίες του εδάφους στη χώρα μας και τα πολλά βουνά προκαλούν πολύ συχνά το φαινόμενο των καθοδικών ρευμάτων, ενώ συχνές είναι και οι εμφανίσεις αναταράξεων. Επίσης επικίνδυνες θεωρούνται οι ισχυρές βροχοπτώσεις λόγω της ολισθηρότητας που προκαλούν στους διαδρόμους προσγείωσης των αεροδρομίων και του ανεπαρκούς ελέγχου του δείκτη αντίστασης πέδησης. Παρ' ότι υπάρχουν ειδικά μηχανήματα MU METER, που μετρούν την πέδηση των τροχών του αεροσκάφους, αυτά δεν χρησιμοποιούνται από την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας. Αντίθετα, δεν υπάρχει σοβαρός κίνδυνος από τους κεραυνούς, αφού όλα τα αεροσκάφη είναι εξοπλισμένα με αλεξικέραυνα και το φαινόμενο στη χώρα μας δεν είναι τόσο συχνό όσο σε άλλες περιοχές του πλανήτη.

## Ρεύματα και αναταράξεις κατά την πτήση

Είναι κινήσεις αέριων μαζών στην ατμόσφαιρα που σε συγκεκριμένη στιγμή έχουν διαφορετική θερμοκρασία από τον αέρα που υπάρχει στο σημείο όπου κινούνται. Παρατηρούνται σε μεγάλα ύψη, πάνω από 10.000 μέτρα, αλλά υπάρχουν και αναφορές για εμφανίσεις του φαινομένου και σε μικρό ύψος από την επιφάνεια της γης. Όταν μιλάμε για τις αναταράξεις μπορούμε να τις φανταστούμε σαν «ποτάμια» από αέρα που κινούνται στην ατμόσφαιρα και κατά την πτήση ενός αεροσκάφους προκαλούν τα γνωστά «κουνήματα». Έντονες αναταράξεις παρατηρούνται συνήθως κατά τη διάρκεια κακοκαιρίας ή όταν το αεροπλάνο μπαίνει μέσα σε μαύρα σύννεφα. Ωστόσο τα «ποτάμια» αυτά εμφανίζονται και όταν ο καιρός είναι καλός. Υπάρχουν επίσης τα καθοδικά ρεύματα (Windshear), που μπορούμε να τα φανταστούμε σαν «καταρράκτες» από αέρα με διαφορετική θερμοκρασία, τα οποία συναντώνται κυρίως σε περιοχές όπου υπάρχουν βουνά. Οι περιπτώσεις πάντως όπου τα φυσικά αυτά φαινόμενα προκάλεσαν τη συντριβή ενός αεροσκάφους είναι ελάχιστες, μπορούν όμως να προκαλέσουν ανθρώπινα θύματα όπως φαίνεται από τα στοιχεία των αεροπορικών ατυχημάτων. Προς το παρόν οι ειδικοί ερευνητές συνιστούν στους επιβάτες να φορούν συνεχώς τη ζώνη τους κατά τη διάρκεια της πτήσης και να προσέχουν ιδιαίτερα τα παιδιά. Οι διάδρομοι με κόκκινο αστέρι

## Οι καλοκαιρινοί μήνες ως επικίνδυνος καιρός για πτήσεις στη χώρα μας

Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όμως τα πράγματα αλλάζουν, αφού οι ισχυροί νότιοι ή ανατολικοί άνεμοι δημιουργούν σε τουλάχιστον πέντε ελληνικά αεροδρόμια συνθήκες που θεωρούνται επικίνδυνες, αφού εμφανίζεται το φαινόμενο wind shear (ισχυρά καθοδικά ρεύματα αέρα). Στα αεροπορικά εγχειρίδια υπάρχει προειδοποιητικό κόκκινο αστέρι για το αεροδρόμιο του Ελληνικού και οι πιλότοι καλούνται να προσέχουν ειδικά στην περίπτωση που φυσούν ισχυροί ανατολικοί άνεμοι, πάνω από 20 κόμβους. Οι άνεμοι αυτοί προκαλούν ρεύματα αέρα που κατεβαίνουν από τις πλαγιές του Υμηττού και χτυπούν από το πλάι τα αεροσκάφη την ώρα που οι πιλότοι βρίσκονται στη φάση της προσγείωσης ή της απογείωσης. Στο αεροδρόμιο του Ελληνικού όμως η επίδραση του φαινομένου στις πτήσεις αυξάνεται και λόγω της ύπαρξης του γηπέδου του Ποσειδώνα στην αρχή του διαδρόμου, του οποίου οι κερκίδες λειτουργούν σαν μια χοάνη και δημιουργούν στο σημείο αυτό ισχυρούς στροβιλισμούς του αέρα. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται ακόμη πιο έντονα σε τέσσερα ελληνικά αεροδρόμια: του Ηρακλείου, της Ρόδου, της Σάμου και της Μυτιλήνης. Είναι χαρακτηριστικό ότι στο Ηράκλειο, όταν πνέουν νότιοι άνεμοι πάνω από 20 κόμβους, η Ολυμπιακή, που εφαρμόζει αυστηρά τους κανονισμούς ασφαλείας, προτιμά να ματαιώσει τις πτήσεις παρά να επιτρέψει την προσγείωση αεροσκαφών της παρ' ότι οι πιθανότητες να συμβεί κάτι είναι ελάχιστες. Το πρόβλημα των ισχυρών καθοδικών και ανοδικών ρευμάτων με αιφνίδιες μεταβολές στην ταχύτητα και στη διεύθυνση του αέρα θεωρείται ακόμη πιο επικίνδυνο όταν βρίσκει τα αεροπλάνα από το πλάι και, στη χειρότερη περίπτωση.



## Τι πρέπει να προσέχουν οι επιβάτες

Σύμφωνα με τους ειδικούς, όσοι σκοπεύουν να ταξιδέψουν αεροπορικώς θα πρέπει, κατά την επιλογή της αεροπορικής εταιρείας αλλά και του χρόνου του ταξιδιού, να λαμβάνουν υπόψη τους ορισμένους αποφασιστικούς παράγοντες:

- Να αποφεύγουν να ταξιδεύουν με πολύ παλιά αεροσκάφη ιδιαίτερα αν ο δείκτης ασφαλείας της αεροπορικής εταιρείας στην οποία ανήκουν βρίσκεται στη χαμηλότερη σειρά του σχετικού πίνακα που συντάσσουν οι διεθνείς οργανισμοί ασφαλείας πτήσεων.
- Να αποφεύγουν αεροσκάφη για τα οποία υπάρχουν υποψίες ότι κάτω από ορισμένες συνθήκες παρουσιάζουν προβλήματα.
- Να αποφεύγουν τις αεροπορικές εταιρείες για τις οποίες υπάρχουν αρνητικές εκθέσεις από την Αμερικανική Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (FAA).
- Να αποφεύγουν τις νέες αεροπορικές εταιρείες ώσπου να συμπληρώσουν ένα στοιχειώδη μητρώο ασφαλείας πτήσεων και να αποδείξουν ότι εφαρμόζουν πιστά τους κανονισμούς.
- Να αναφέρουν οτιδήποτε παράξενο νομίσουν ότι συμβαίνει κατά τη διάρκεια μιας πτήσης.
- Να μη διστάσουν να το πουν στο πλήρωμα ακόμη και αν κάποια αεροσυνοδός τους αγνοήσει ή τους επιπλήξει. Σε μερικές από τις μεγαλύτερες αεροπορικές τραγωδίες, επιβάτες είχαν παρατηρήσει κάποιο πρόβλημα και δίστασαν να το αναφέρουν στο πλήρωμα.
- Να αποφεύγουν να ταξιδεύουν όταν εμφανίζεται τυφώνας, ισχυρή καταιγίδα ή χιονοθύελλα. Πολλές φορές οι πιλότοι υπερεκτιμούν τις ικανότητές τους και τις αντοχές του αεροσκάφους.
- Να προτιμούν τις απευθείας πτήσεις διότι έτσι περιορίζουν σημαντικά τις πιθανότητες να συμβεί κάποιο περιστατικό, αφού οι αλλαγές αεροσκαφών και οι πολλές προσγειώσεις και απογειώσεις αυξάνουν την πιθανότητα ατυχήματος.

## Τι πρέπει να κάνετε σε περίπτωση ατυχήματος

Σύμφωνα πάλι με τους ειδικούς, αν συμβεί αεροπορικό ατύχημα ο τρόπος συμπεριφοράς του επιβάτη πριν ή μετά από αυτό παίζει σημαντικό ρόλο για να γλιτώσει, αν βεβαίως αυτό είναι εφικτό. Έτσι για να έχετε περισσότερες πιθανότητες επιβίωσης θα πρέπει:

- Όταν εντοπίσετε τη θέση σας στο αεροσκάφος μετρήστε τις θέσεις που σας χωρίζουν από την πλησιέστερη έξοδο κινδύνου. (Σε αρκετές περιπτώσεις από τον καπνό και τον πανικό οι επιβάτες δεν είναι σε θέση να εντοπίσουν τις εξόδους κινδύνου και χάνεται πολύτιμος χρόνος.)
- Ενημερωθείτε για τον τρόπο που ανοίγουν οι θύρες κινδύνου στο αεροπλάνο. (Σε αρκετές περιπτώσεις τα μέλη του πληρώματος καμπίνας είχαν τραυματιστεί ή σκοτωθεί και οι επιβάτες άνοιξαν μόνοι τους τις πόρτες).

- Όταν ύστερα από κάποιο ατύχημα χρειαστεί να τρέξετε στον διάδρομο του αεροσκάφους, φροντίστε τα χέρια σας να βρίσκονται σταυρωμένα πάνω στο στήθος σας και να ανασηκώνεται τα πόδια σας για να μην σκοντάψετε σε εξογκώματα του διαδρόμου.
- Όταν ταξιδεύετε να φοράτε ρούχα που να καλύπτουν το σώμα σας, να αποφεύγετε τα συνθετικά ρούχα και οι γυναίκες τα καλσόν. (Και αυτό διότι σε περίπτωση πυρκαγιάς έχετε περισσότερες πιθανότητες να γλιτώσετε με λιγότερα εγκαύματα).
- Τα μικρά παιδιά που δεν έχουν θέση, αν υπάρξει ανάγκη για αναγκαστική προσγείωση είναι καλύτερο να βρίσκονται στο πάτωμα ανάμεσα στα πόδια των συνοδών τους παρά να τα κρατούν στην αγκαλιά τους.
- Σε περίπτωση αναγκαστικής προσγείωσης η καλύτερη στάση του σώματος είναι να σκύψετε και να πιάσετε με τα χέρια τα πόδια σας. Ανάμεσα στα πόδια και στο στήθος σας θα πρέπει να τοποθετήσετε ένα μαξιλάρι.

### 2.3) ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

#### Ο ρόλος των αισθητήρων στη λειτουργία των αεροσκαφών:

Για την πραγματοποίηση μιας πτήσης είναι απαραίτητα τα λεγόμενα δεδομένα του «αέρα». Δύο κύρια φυσικά χαρακτηριστικά που πρέπει να προσδιορίζονται είναι η θερμοκρασία και η πίεση. Χρησιμοποιώντας αυτές τις βασικές μετρήσεις και επί μέρους και σε συνδυασμό γίνεται ο υπολογισμός πολλών άλλων παραμέτρων της πτήσης. Τα δεδομένα αυτά μετριοούνται χρησιμοποιώντας μια ποικιλία από αισθητήρες. Η έξοδος αυτών των συσκευών παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για να μπορούν τα αεροσκάφη να πετούν με ασφάλεια. Με χρήση των πληροφοριών των μετρήσεων του «αέρα» μπορούν να βρεθούν: η ταχύτητα, το υψόμετρο, τα ποσοστά ανόδου ή καθόδου και η γωνία εκτροπής. Οι δύο ευρείες κατηγορίες των δεδομένων «αέρος» όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω είναι η θερμοκρασία και η πίεση, οι οποίες όμως περιέχουν διάφορους τύπους μετρήσεων. Οι μετρήσεις πίεσης περιλαμβάνουν τη στατική και τη συνολική πίεση. Αφαιρώντας τη στατική πίεση από την ολική πίεση προκύπτει μια Τρίτη μέτρηση, η επίδραση της κίνησης στην πίεση, QC. Η στατική πίεση είναι το βάρος της ατμόσφαιρας πάνω από μια συγκεκριμένη περιοχή σε μια δεδομένη τοποθεσία. Όσο μεγαλύτερο είναι το υψόμετρο, τόσο λιγότερη ατμόσφαιρα βρίσκεται πάνω από αυτό και συνεπώς τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή της πίεσης. Στο επίπεδο της θάλασσας, η στατική πίεση του αέρα είναι επαρκής για την διατήρηση σε ένα βαρόμετρο μιας στήλης υδράργυρου ύψους 760mm (που αντιστοιχεί σε 1013 mbars). Αλλά σε 18.000 πόδια πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, η πίεση επαρκεί μόνο για την διατήρηση σε ένα βαρόμετρο μιας στήλης υδραργύρου ύψους 380mm. Με αυτό τον τρόπο, οι μετρήσεις στατικής πίεσης μπορεί να δώσουν μια ένδειξη του υψόμετρου. Η μέτρηση της στατικής πίεσης όμως σε σταθερή θέση σχετικά με το έδαφος είναι εντελώς διαφορετικό πράγμα από τη μέτρηση της σε ένα αεροσκάφος που είναι εν πτήση. Αυτό συμβαίνει γιατί τα αεροσκάφη διαταράσσουν την ατμόσφαιρα μέσω της οποίας πετούν.

Η αλλαγμένη ατμόσφαιρα με τη σειρά της επηρεάζει την ικανότητα του αισθητήρα να παρέχει μια ακριβή μέτρηση της στατικής πίεσης. Μια κοινή τεχνική για να μετρηθεί η στατική πίεση είναι η τοποθέτηση των εισόδων για την μέτρηση της πίεσης στην άτρακτο των αεροσκαφών, αλλά αυτή η λύση απαιτεί εύρεση θέσης στην άτρακτο αεροσκάφους που θα έχει καθαρό αέρα. Επιπλέον, η περιοχή γύρω από αυτές τις εισόδους πρέπει να είναι λεία και ομοιόμορφη για να εξασφαλιστεί η ακριβής μέτρηση. Αυτό σημαίνει ότι η ακριβής μέτρηση στατικής πίεσης πρέπει να λάβει υπόψη μια σειρά από παράγοντες, όπως είναι οι ταχύτητες των ανέμων, ο αριθμός Mach (M), η γωνία πρόσβασης (AOA), η γωνία εκτροπής (AOS) και ο σχεδιασμός των αεροσκαφών (τοποθεσία των πτερυγίων, της προσγείωσης κλπ.) Ένας άλλος τρόπος για τη μέτρηση της πίεσης είναι η τοποθέτηση μιας στατικής εισόδου στο σώμα ενός αισθητήρα pitot. Αυτή η προσέγγιση δίνει καλύτερες μετρήσεις επειδή βρίσκεται μακριά από την άτρακτο των αεροσκαφών και μακριά από τις επιρροές του περιβλήματος του αεροσκάφους. Η είσοδος του αισθητήρα δεν είναι μέρος της ατράκτου και μπορεί να κατασκευαστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια για την παροχή μιας ομαλότερης επιφάνειας για πρόσβαση του αέρα. Τοποθετώντας τη στατική είσοδο σε αισθητήρα pitot, βελτιώνεται σημαντικά η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα των μετρήσεων της στατικής πίεσης.

## Επίδραση της πίεσης

Όταν τα αεροσκάφη λειτουργούν, αντιμετωπίζουν επίσης, επίδραση της πίεσης. Η δύναμη του κινούμενου αέρα στο πίσω μέρος του κλειστού σωλήνα ενός αισθητήρα pitot αντιμετωπίζεται σαν πίεση. Οι διαταραχές ροής του αέρα που προκαλείται από την κίνηση των αεροσκαφών πρέπει να εξεταστεί κατά το σχεδιασμό και την τοποθέτηση των αισθητήρων pitot.

## Σύστημα Pitot

Το σύστημα Pitot αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα αεροσκάφους, με το οποίο μετράται η ολική πίεση που δημιουργείται με την πρόσθια κίνηση του αεροσκάφους αλλά και η στατική πίεση της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας. Βάσει αυτών των δεδομένων, υπολογίζονται η ταχύτητα αέρος, το ύψος και ο ρυθμός ανόδου-καθόδου. Στην πιο βασική του μορφή, ένα σύστημα Pitot αποτελείται από την κεφαλή μέτρησης, τις σωληνώσεις με τις απαραίτητες βαλβίδες αποστράγγισης και τα τρία πρωτεύοντα όργανα πτήσεως, το όργανο ταχύτητας αέρος, το υψόμετρο και το όργανο ρυθμού ανόδου-καθόδου.



Σχήμα 2.6: Βασική συνδεσμολογία συστήματος Pitot.

Η περιπλοκότητα του συστήματος εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και τον τύπο του αεροσκάφους, τον αριθμό των οργάνων τα οποία εμφανίζουν τα στοιχεία αέρος, καθώς και τα άλλα συστήματα που χρειάζονται στοιχεία αέρος για να λειτουργήσουν.

### **Αισθητήρες Ταχύτητας**

Τα όργανα ταχύτητας αέρος εμφανίζουν την ταχύτητα του αεροσκάφους και οι μετρούμενες ταχύτητες είναι ενδεικτικές για τις διάφορες φάσεις της πτήσης και την κατάσταση του αεροσκάφους. Ανάλογα με το αν πραγματοποιείται αποκόλληση ριναίου τροχού, απογείωση, προσέγγιση, απώλεια στήριξης, υπάρχουν οι αντίστοιχες ενδεικνυόμενες ταχύτητες αέρος. Τα παλιά όργανα μέτρησης έπασχαν από σφάλματα θέσης, όμως τα σύγχρονα όργανα και η βέλτιστη τοποθέτηση των ακροδεκτών των οργάνων έχουν μειώσει τα λάθη αυτά σε αμελητέο επίπεδο. Στο εσωτερικό του οργάνου μέτρησης της ταχύτητας (αισθητήρας Pitot) επικρατεί η στατική πίεση, που μετριέται από την κεντρική είσοδο στον αισθητήρα μέσω κάψουλας, όπως φαίνεται στο (σχήμα 2.6). Η κάψουλα διαστέλλεται εξαιτίας της διαφοράς της ολικής πίεσης από τη στατική, εξαιτίας δηλαδή της δυναμικής πίεσης που δημιουργείται. Η διαστολή που δημιουργείται, δηλαδή η δυναμική πίεση, είναι ανάλογη της ταχύτητας του αέρα. Όσο διαστέλλεται η κάψουλα, μετακινεί τον άξονα του οργάνου προς τα πίσω, με αποτέλεσμα να μετατοπίζεται με τον ίδιο τρόπο και ένας μοχλός. Ο τελευταίος με τη σειρά του μετατοπίζει το δείκτη δεξιόστροφα. Ένα ελατήριο ελέγχει τη διαστολή της κάψουλας ώστε να αντισταθμιστούν σφάλματα. Κάποια αεροπορικά ατυχήματα οφείλονται στο γεγονός ότι ο χειριστής ξέχασε να κατεβάσει το σκέλος προσγείωσης κατά την προσγείωση. Αυτό συνήθως συμβαίνει όταν οι χειριστές, που αρχικά πετούσαν με αεροπλάνα που είχαν εξωτερικά σκέλη (οπότε δεν υπήρχε θέμα επέκτασης κατά την προσγείωση), κι αργότερα πέρασαν σε αεροσκάφη με ανασυρόμενα σκέλη, ξεχνώντας λόγω συνήθειας, να ακολουθήσουν πιστά την Checklist πριν και κατά τη διάρκεια της προσγείωσης. Γι' αυτό το λόγο πολλά αεροσκάφη είναι εφοδιασμένα με ASI (AirSpeedIndicator), που όταν διαπιστώσει μικρή ταχύτητα, θεωρεί ότι πρόκειται να γίνει προσγείωση και φέρνει μπροστά τη σημαία προειδοποίησης σκελών. Αν τα σκέλη προσγείωσης δεν έχουν ενεργοποιηθεί από πριν, θα περάσει ρεύμα από τον ηλεκτρονόμο που θα φέρει προς τα εμπρός τη σημαία προειδοποίησης. Όταν όμως επεκταθούν και κλειδώσουν τα σκέλη, αυτά με το δικό τους διακόπτη θα κόψουν το ρεύμα από τον ηλεκτρονόμο και θα αποσυρθεί η σημαία. Συνήθως ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιεί ένα βομβητή ως ηχητική προειδοποίηση.

### **Αισθητήρες Γωνία Προσβολής**

Η γωνία προσβολής είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της χορδής της πτέρυγας και της κατεύθυνσης της σχετικής ροής ανέμου. Η γωνία προσβολής είναι η καθοριστική παράμετρος της αντήσεως που δημιουργεί μια πτέρυγα, με την άντωση να αυξάνει καθώς η γωνία προσβολής μεγαλώνει. Αυτό συμβαίνει μέχρι τη στιγμή που η γωνία προσβολής φτάνει μια οριακή τιμή, όπου η ροή του αέρα δεν μπορεί να

ακολουθήσει την καμπυλότητα της πτέρυγας με αποτέλεσμα η άντωση να καταρρεύσει. Σε αυτή την κρίσιμη γωνία προσβολής συμβαίνει το φαινόμενο απώλειας στήριξης που είναι εντελώς ανεξάρτητη από την ταχύτητα και η γωνία ονομάζεται «γωνία απώλειας στήριξης». Η απώλεια στήριξης, αν και εξαρτάται από τη γωνία προσβολής, δύναται να συσχετιστεί και με κάποιες ταχύτητες στις οποίες το αεροσκάφος μπορεί να εμπέσει σε αυτή την κατάσταση. Για να μπορέσει να αντισταθμιστεί μια πιθανή μείωση της άντωσης στις ταχύτητες αυτές, θα πρέπει να μεγαλώσει η γωνία προσβολής. Υπάρχει όμως μια οριακή ταχύτητα στην οποία για να διατηρήσει το αεροπλάνο το ύψος του, χρειάζεται να φτάσει σε οριακή γωνία προσβολής του. Δηλαδή, η επιπλέον μείωση της ταχύτητας δεν μπορεί να αντισταθμιστεί με περαιτέρω αύξηση της γωνίας προσβολής, διότι στο σημείο αυτό η άντωση θα καταρρεύσει. Από την άλλη, υπάρχει μια οριακή χαμηλή ταχύτητα που το αεροσκάφος δεν δύναται να κερδίσει ύψος αυξάνοντας τη γωνία προσβολής, διότι δεν υπάρχουν πλέον διαθέσιμα όρια περιθώρια αύξησης της αντώσεως. Αυτή η ταχύτητα ορίζεται με το σύμβολο  $V_{s1}$  στο όργανο ταχύτητας αέρος, στο κάτω όριο του πράσινου τόξου. Η ταχύτητα αυτή επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως είναι το βάρος του αεροσκάφους, ο ρυθμός στροφής<sup>2</sup>, η διαμόρφωση που έχει σε αντωτικές επιφάνειες κλπ. Γι' αυτό το λόγο στα αεροσκάφη υπάρχουν πολλές ταχύτητες απώλειας στήριξης, με κυριότερη την  $V_{s0}$ , η οποία αντιπροσωπεύει την απώλεια ταχύτητας στήριξης σε διαμόρφωση προσγείωσης. Αυτή η ταχύτητα αντιστοιχεί στο κάτω όριο του λευκού τόξου του οργάνου ταχύτητας αέρος.

## Αισθητήρες Ροής και Ποσότητας Καυσίμου

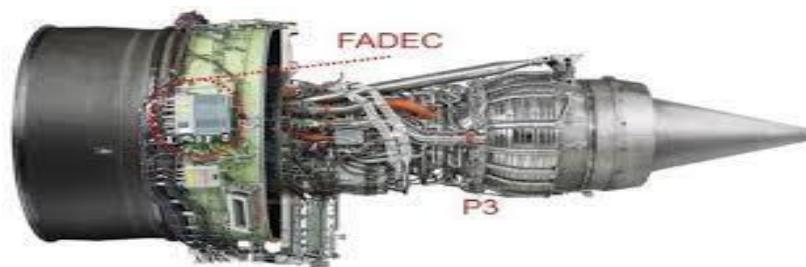
### Ροή Καυσίμου

Η ροή καυσίμου αποτελεί μια σημαντική ένδειξη για το αν λειτουργεί σωστά ο κινητήρας. Συγκεκριμένα αφορά την ποσότητα του καυσίμου σε βάρος ανά ώρα που καταναλώνει ο κινητήρας. Στην περίπτωση των μεγάλων και σύγχρονων αεροσκαφών, για τη μέτρηση της ροής του καυσίμου χρησιμοποιείται ένας ομοαξονικός μετρητής που τοποθετείται ενδιάμεσα στο σωλήνα τροφοδοσίας καυσίμου του κινητήρα. Το σύστημα μέτρησης ροής του καυσίμου συνίσταται από δύο τμήματα, τη φτερωτή που περιστρέφεται με τη βοήθεια ενός μοτέρ και τη τουρμπίνα. Η φτερωτή περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα από ένα μοτέρ. Όταν ρέει το καύσιμο, στο διάνυσμα της ταχύτητας ροής προστίθεται και το διάνυσμα ταχύτητας της φτερωτής, οπότε η ροή του καυσίμου γίνεται σπειροειδής. Με την κίνηση που προκαλείται, το καύσιμο εισέρχεται στο εσωτερικό της τουρμπίνας και προσπαθεί να την παρασύρει. Όμως ένα σπειροειδές ελατήριο αντιδρά και επιτρέπει την περιστροφή της τουρμπίνας σε ένα σημείο που η ασκούμενη από την ταχύτητα του καυσίμου μηχανική τάση, εξισορροπείται από την τάση του ελατηρίου. Όσο πιο γρήγορα ρέει ένα καύσιμο, τόσο πιο γρήγορα κινείται και τόσο μεγαλύτερη γίνεται και η στρέψη της τουρμπίνας, η οποία προκαλεί στρέψη του ρότορα ενός σερβομηχανισμού μετάδοσης τύπου *magnesyne*. Στην περίπτωση των μικρών αεροσκαφών της γενικής αεροπορίας χρησιμοποιείται ο αισθητήρας περιστρεφόμενου κλαπέτου. Το σύστημα που περιγράφεται από την εικόνα 45

αφορά ένα μικρό μηχανοκινητήριο αεροπλάνο με έλικα μεταβλητού βήματος. Ο αισθητήρας αποτελείται από δύο μικρούς θαλάμους, το θάλαμο εισαγωγής και το θάλαμο εξαγωγής. Οι δύο θάλαμοι διαχωρίζονται με ένα περιστρεφόμενο κλαπέτο που ο άξονας του στηρίζεται σε ένα σπειροειδές ελατήριο. Ο αισθητήρας λειτουργεί με τον εξής τρόπο: το καύσιμο εισέρχεται με μια δεδομένη ταχύτητα. Ανάλογη της ταχύτητας αυτής είναι και η πίεση που ασκείται στο κλαπέτο, το οποίο περιστρέφεται μέχρι η πίεση του καυσίμου να αντισταθμιστεί με την τάση του ελατηρίου που στηρίζει το κλαπέτο, το οποίο οδηγεί το ρότορα του σερβομηχανισμού μετάδοσης. Μια διαφορετική προσέγγιση θα ήταν το κλαπέτο να ρυθμίζει ένα ποτενσιόμετρο που με τη σειρά του θα τροφοδοτούσε ένα αμπερόμετρο, του οποίου η κλίμακα θα ήταν βαθμονομημένη σε γαλόνια ή σε λίβρες ανά ώρα. Καθώς, το ποτενσιόμετρο είναι ένας διαιρέτης τάσεως, η τάση της μεσαίας λήψης του θα είναι ανάλογη με τη ροή καυσίμου. Σε μετρητές όπως είναι αυτός, υπάρχει μια βαλβίδα παράκαμψης, η οποία ανοίγει μόνη της, όταν η διαφορά πιέσεως μεταξύ του θαλάμου εισαγωγής καυσίμου και του θαλάμου εξαγωγής καυσίμου υπερβεί τις 2,5 λίβρες/τετ. ίντσα. Όταν συμβεί αυτό σημαίνει ότι ο μετρητής παρουσιάζει βλάβη και είναι πιθανόν να φρακάρει το κλαπέτο ή να υπάρχει ξένο σώμα στο καύσιμο. Οπότε η βαλβίδα παράκαμψης παρέχει ασφάλεια για τη συνεχή τροφοδοσία του κινητήρα με καύσιμο. Σε πολλά αεροπλάνα, η κλίμακα του οργάνου ροής καυσίμου είναι προσημειωμένη με τις προβλεπόμενες ροές καυσίμου για τις ισχύεις σε ρελαντί, σε απογείωση και σε ευθεία οριζόντια πτήση. Ιδιαίτερα κατά της φάσης της απογείωσης και η ροή μαζί με τις στροφές N1 δηλώνει αν ο κινητήρας δουλεύει στην προβλεπόμενη ισχύ.

### Συστήματα ελέγχου και βοηθητικά συστήματα:

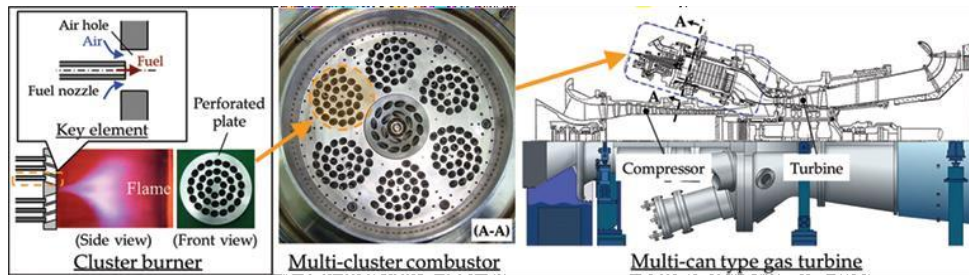
Η ισχύς εξόδου του αεριοστρόβιλου ελέγχεται κυρίως από την ποσότητα καυσίμου που καίγεται στο θάλαμο καύσης. Περίσσια ή ανεξέλεγκτη προσθήκη καυσίμου έχει σαν αποτέλεσμα την υπερθέρμανση και την υπέρβαση του ορίου ταχύτητας περιστροφής του στροβίλου (overspeeding) προκαλώντας σοβαρά προβλήματα στον κινητήρα. Είναι ευθύνη του συστήματα ελέγχου του κινητήρα, να διατηρεί ανά πάσα στιγμή, τη λειτουργία του κινητήρα εντός των προβλεπόμενων κατασκευαστικών ορίων, ενώ ταυτόχρονα να διατηρούνται στο βέλτιστο δυνατό επίπεδο οι επιδόσεις του. Ιδιαίτερα εξελιγμένα συστήματα ελέγχου όπως το **ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης και ελέγχου του κινητήρα** (Full Authority Digital Engine Control, FADEC), χρησιμοποιούνται ευρέως από τους περισσότερους μοντέρνους κινητήρες, (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: σύστημα FADEC



Επίσης, οι σύγχρονοι κινητήρες διαθέτουν πλέον **συστήματα ελέγχου των εκπομπών καυσαερίων**, (Dry Low Emissions gas turbine, DLE), Στους κινητήρες αυτούς, σήματα από επιπλέον αισθητήρες επεξεργάζονται και ρυθμίζεται ο λόγος αέρα καυσίμου έτσι ώστε οι εκπεμπόμενοι ρύποι  $\text{NO}_x$ , CO και UHC να διατηρούνται εντός των καθορισμένων ορίων, (Σχήμα 2.8).



**Σχήμα 2.8:** Σύστημα DLE

Πέρα από τα παραπάνω κύρια εξαρτήματα και συστήματα ελέγχου, ο αεριοστρόβιλος διαθέτει και βοηθητικά συστήματα όπως το σύστημα παροχής καυσίμου, λίπανσης, υδραυλικών συστημάτων καθοδήγησης, γεννήτριας, πυρόσβεσης, αποπαγοποίησης και κλιματισμού του αεροσκάφους. Η ισχύς για τη λειτουργία αυτών των συστημάτων προέρχεται από το στρόβιλο του συμπιεστή (μηχανική ισχύς) ή από το συμπιεσμένο αέρα που απομαστεύεται από τις τελευταίες βαθμίδες του συμπιεστή, (πνευματική ισχύς).

## 2.4) Τεχνικές προδιαγραφές αεροπλάνου

### Σκοπός προμήθειας του ειδικά εξοπλισμένου αεροσκάφους:

Η προμήθεια για την κάλυψη αναγκών ενός σύγχρονου και άρτια εξοπλισμένου Αεροσκάφους όπου η **ΥΠΑ** (Υπηρεσία πολιτικής αεροπορίας) θα διενεργήσει σύμφωνα με τον Κανονισμό των Πτητικών Μέσων (ΦΕΚ Β/708/9-6-2006, παρ. 4.2) των ΑΑΕ (Από Αέρα Ελέγχων):

**α)** Αεροναυτιλιακών Βοηθημάτων, **β)** Διαδικασιών Άφιξης - Προσέγγισης / Αναχώρησης συμβατικές και PBN. **γ)** Αεροδιαδρόμων, **δ)** Συμβατικών διαδικασιών RNAV, **ε)** Συστημάτων και εφαρμογών επιτήρησης, **στ)** Οπτικών Συστημάτων Προσέγγισης Αεροδρομίων, **ζ)** Τηλεπικοινωνιακών συστημάτων αεροναυτιλίας. Δηλαδή η πλοήγηση βάσει επιδόσεων ( PBN, performance-based navigation) σύμφωνα με το ICAO (International Civil Aviation Organization) καθορίζει ότι οι απαιτήσεις απόδοσης των συστημάτων του αεροσκάφους (RNP, required navigation performance) και της περιοχής πλοήγησης (RNAV, area navigation) καθορίζονται ως προς την ακρίβεια, την ακεραιότητα, τη διαθεσιμότητα, τη συνέχεια και τη λειτουργικότητα που απαιτούνται για τις προτεινόμενες λειτουργίες στο πλαίσιο ενός συγκεκριμένου εναέριου χώρου, όταν υποστηρίζεται από την κατάλληλη οργάνωση πλοήγησης.

## 1) ΓΕΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΑΠΑΙΤΗΣΗ	ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΗ	ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ
<p>Το αεροσκάφος θα είναι πιστοποιημένο σύμφωνα με την ισχύουσα Ελληνική και Ευρωπαϊκή (EASA) νομοθεσία και ο προηγούμενος/οι κάτοχοι θα πρέπει να το είχαν ενταγμένο σε εγκεκριμένο Οργανισμό Διαχείρισης Διαρκούς αξιοπλοΐας κατά EASA Part M και συντηρημένο σε οργανισμούς πιστοποιημένους κατά EASA Part-145. Θα υποβληθεί το Πιστοποιητικό Τύπου (TC) με την προσφορά.</p> <p>Θα είναι πιστοποιημένο για προσέγγιση ILS κατηγορίας I (CAT I) τουλάχιστον.</p> <p>Θα παραδοθεί στον αγοραστή το πλήρες πακέτο του Supplemental Type Certificate (STC).</p>	✓		
<p>Το αεροσκάφος θα έχει ολοκληρωμένα και πλήρη αρχεία για τα:</p> <p>A. Σκάφος</p> <p>B. Κινητήρες</p> <p>Γ. Προπέλες</p> <p>Δ. APU (εφόσον υπάρχει) Τα οποία να περιλαμβάνουν κατ ελάχιστον</p> <p>1. Κατάσταση εφαρμοσμένων και μη ADs&amp; SBs &amp; SL etc μαζί με τα αποδεικτικά εφαρμογής τους.</p> <p>2. Όλες τις εργασίες συντήρησης και επισκευές που έχουν εκτελεστεί μαζί με τα απαραίτητα πιστοποιητικά .</p> <p>3. Κατάσταση εξοπλισμού αεροσκάφους (Equipment List) με τις αντίστοιχες λίστες TSO/TSN .</p> <p>4. Ολοκληρωμένο Dents and Buckle chart.</p> <p>Επιπλέον η όποια μετατροπή έχει εφαρμοστεί επί του αεροσκάφους (STC) θα πρέπει να δικαιολογείται με τα απαραίτητα συνοδευτικά έγγραφα.</p>	✓		

Το Αεροσκάφος με το ΣΑΕ και τον εξοπλισμό του δεν θα υπερβαίνει το μέγιστο βάρος απογείωσης (MTOW) των 20.000 κιλών.	✓		
Θα έχει δυο (2) τουλάχιστον κινητήρες, με επιβραδυντικό σύστημα (reverse or equivalent) και υποδοχή για εξωτερικής πηγή ηλεκτρικής τροφοδότησης.	✓		
Θα διαθέτει ανασυρόμενο σύστημα προσγείωσης.	✓		
Το main Landing Gear να διαθέτει δύο (2) Τροχούς ανά σκέλος	✓		
Προειδοποιητικό σύστημα για την ανώτερη επιτρεπόμενη ισχύ των κινητήρων.	✓		
Το αεροσκάφος αλλά και οι κινητήρες θα έχουν συνολικά λιγότερες από 8.000 ώρες πτήσης/λειτουργίας από καινούρια (TSN) και η ημερομηνία κατασκευής του αεροσκάφους/κινητήρων θα είναι μεταγενέστερη της 01/01/2000.  Θα αξιολογηθεί επιπρόσθετα:  1. ο χρόνος για τα επόμενα engines HSI  2. ο χρόνος για τα επόμενα engines OVHL  3. Η ηλικία του αεροσκάφους  4. Οι ώρες πτήσεις του αεροσκάφους	✓		
Θα είναι ικανό (Airworthiness ready) για πτήσεις RVSM	✓		
Θα διαθέτει πιστοποιητικό θορύβου σύμφωνα με την ισχύουσα κατά το χρόνο υποβολής προσφορών Νομοθεσία.	✓		
Θα διαθέτει κατάλληλο εξοπλισμό για IFR πτήσεις, θα συμπεριλαμβάνει συστήματα αποπαγοποίησης, αντί- παγοποίησης (De-ice/ Anti-ice) και ικανότητα πτήσης σε γνωστές συνθήκες παγοποίησης (KNOWN ICING CONDITIONS).	✓		

Θα διαθέτει όλα τα προβλεπόμενα σωστικά, πυροσβεστικά, ιατρικά, κλπ. μέσα, σύμφωνα με την κλάση και κατηγορία πιστοποίησής του.	✓		
Το αεροσκάφος να είναι Συμπιεζόμενο και Κλιματιζόμενο.	✓		
Το σύστημα κλιματισμού να καλύπτει τις πρόσθετες απαιτήσεις αποβολής θερμότητας του εξοπλισμού ΣΑΕ. Θα διατηρούνται οι προβλεπόμενες θερμοκρασίες καμπίνας μετά την εγκατάσταση του ΣΑΕ.	✓		
Το αεροσκάφος θα διαθέτει ίδια μέσα επιβίβασης και αποβίβασης των επιβαινόντων.	✓		
Το αεροσκάφος θα είναι τύπου δοκιμασμένου στην εκμετάλλευση και θα δηλωθεί ο αριθμός των πωληθέντων αεροσκαφών του τύπου αυτού διεθνώς (Χώρες και Αγοραστές θα αναφέρονται).	✓		
<p>Η χωρητικότητα του αεροσκάφους θα είναι τέτοια ώστε να επαρκεί τουλάχιστον για τα ακόλουθα :</p> <p>1.Θάλαμος Διακυβέρνησης :</p> <p>Δύο (2) χειριστές αεροσκάφους.</p> <p>2.Κονσόλα (ΣΑΕ) :</p> <p>Τουλάχιστον μία (1) θέση χειριστή κονσόλας ΣΑΕ</p> <p>Μία (1) θέση εκπαιδευόμενου χειριστή ΣΑΕ Τουλάχιστον δύο (2) επιπλέον επιβαίνων. Όλες οι θέσεις, κατ' ελάχιστο έξι (6) συνολικά πρέπει να είναι εργονομικές και άνετες.</p> <p>3. Τουαλέτα</p> <p>4. Αποθηκευτικός χώρος (αποσκευές – εργαλεία)</p> <p>5. Χώρος αποθήκευσης βιβλιογραφίας.(Manual, charts, etc)</p>	✓		

## 2) ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

	ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΑΠΑΙΤΗΣΗ	ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΗ	ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ
	Το Αεροσκάφος πρέπει να έχει την δυνατότητα για διάρκεια πτήσεως τουλάχιστον δυο ωρών (2) και εφεδρικά καύσιμα 45 λεπτών υπό ISA, στα 10.000 πόδια με Cruise Speed και 6 επιβαίνοντες.	✓		
	Να δύναται να απογειωθεί και να προσγειωθεί από διάδρομο ίσο και μεγαλύτερο των 1100 μέτρων με ελάχιστο βάρος απογείωσης υπολογιζόμενο με καύσιμα για διάρκεια πτήσεως τουλάχιστον δυο ωρών (2) υπό ISA και 5 επιβαίνοντες.	✓		
	Δυνατότητα προσγείωσης - απογείωσης με πλάγιο άνεμο τουλάχιστον 20 κόμβων (demonstrated). Να δηλωθεί η μέγιστη ταχύτητα πλαγίου ανέμου και οι συνιστώσες της για ασφαλή απογείωση-προσγείωση Α/φους.	✓		
	Θα παρέχει Επιχειρησιακή οροφή πτήσης τουλάχιστον τα 25.000 πόδια .	✓		
	Θα διαθέτει έχει ελάχιστη επιχειρησιακή οροφή 10,000 πόδια με ένα κινητήρα εκτός ενεργείας, συνθήκες ISA .	✓		
	<p>Η ταχύτητα απώλειας στήριξης δεν θα υπερβαίνει τους 100 κόμβους στο M.T.O.W (Maximum Take Off Weight) με διαμόρφωση προσγειώσεως.</p> <p>Να δηλώνεται η ταχύτητα απώλειας στήριξης.</p>	✓		
	Θα έχει βαθμό ανόδου μεγαλύτερο των 500 ποδών ανά λεπτό, σε ύψος θαλάσσης και συνθήκες ISA. Θα δηλώνεται ο ελάχιστος βαθμός ανόδου απογείωσης ανά τμήμα (segment), ο βαθμός ανόδου με ένα κινητήρα εκτός λειτουργίας καθώς και ο βαθμός ανόδου προσέγγισης (approach climb, landing climb) και με ένα κινητήρα εκτός λειτουργίας.	✓		

<p>Το αεροσκάφος θα είναι εξοπλισμένο με FMS (να παραδοθεί με το τελευταίο update) το οποίο πρέπει να παρέχει ακριβή και αυτόματη δυνατότητα οριζόντιας και κάθετης πλοήγησης, έλεγχο πλοήγησης μέσω των VOR, ILS, GPS, κλπ, και των συστημάτων αεροσκάφους flight director, autopilot, κλπ.</p> <p>Εκτός του Βασικού (Standard) εξοπλισμού της κατηγορίας που έχει πιστοποιηθεί, θα πρέπει να διαθέτει τα ακόλουθα :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Αυτόματο πιλότο τριών αξόνων τελευταίας Τεχνολογίας ο οποίος θα συνεργάζεται με το FMS και θα παρέχει πληροφορίες για πορεία, ύψος, αεροναυιλία, GPS και προσέγγιση ILS κατηγορίας τουλάχιστον CAT I.</li> <li>2. Ικανότητα πραγματοποίησης διαδικασιών Performance Based Navigation – PBN (RNAV 5, RNAV 2, RNAV 1, RNP Approach).</li> <li>4. Έγχρωμο RADAR καιρού.</li> <li>5. Σύστημα αυτομάτου εντοπισμού θέσεως αεροσκάφους GPS (Global Positioning system).</li> <li>6. Διπλά όργανα ναυτιλίας (VOR - ILS – DME) στο πιλοτήριο.</li> <li>7. Ράδιο-υψόμετρο.</li> <li>8. Δυο (2) πομποδέκτες VHF με διαχωρισμό 8.33 KHz με συχνότητα αναμονής.</li> <li>9. ACAS- Airborne Collision and Avoidance System τελευταίας γενιάς και έκδοσης Λογισμικού (Version).</li> <li>10. EGPWS – Enhanced ground proximity warning system with map display τελευταίας γενιάς.</li> <li>11. ELT - Emergency locator transmitter crash activate (με συχνότητα 121,5 / 243 και 406 MHz).</li> <li>12. Standby instruments.</li> </ol>	✓		
<p>Ενδοεπικοινωνία (INTERCOM) η προτεραιότητα της οποίας θα καθορίζεται από τον θάλαμο διακυβέρνησης.</p>	✓		



0	Θα είναι εφοδιασμένο με τα κατάλληλα για την κατηγορία στην οποία πιστοποιήθηκε ψηφιακά FLIGHT DATA and VOICE recorders.	✓		
1	Σχεδιάγραμμα διαρρύθμισης των χώρων του προσφερόμενου αεροσκάφους σε τελική μορφή.	✓		
2	Η θέση του ΣΑΕ και της όλης καλωδίωσης καθώς και των υπόλοιπων παρελκόμενων να μην εμποδίζει την εκκένωση του αεροσκάφους σε περίπτωση κατάστασης ανάγκης.	✓		

## 2.5) ΠΟΛΙΤΙΚΟ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ

### Παράδειγμα Κατασκευής Boeing 787 Dreamliner:

Το 2009, το πρώτο πρωτότυπο 787 Dreamliner, άφησε το διάδρομο του αεροδρομίου Paine Field, στην περιοχή της Ουάσιγκτον, για να γράψει ιστορία ως το πρώτο «συνθετικό» αεροσκάφος που απογειώνεται (Σχήματα 2.9, 2.10).



Σχήμα 2.9: Boeing 787



Σχήμα 2.10: Πρώτη απογείωση του 787. Προσέξτε την καμπυλότητα που εμφανίζουν τα φτερά λόγω φόρτισης

Για το πρόγραμμα της πιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 8 αεροσκάφη, τα οποία συμπλήρωναν περισσότερες από 6,800 ώρες δοκιμών. Από αυτά, τα 6 χρησιμοποιήθηκαν για πτητικές δοκιμές, ενώ τα άλλα δύο παρέμειναν στο έδαφος, το ένα από αυτά για στατικές δοκιμές και το δεύτερο για δοκιμές κόπωσης. Η ολοκλήρωση του προγράμματος πιστοποίησης διήρκεσε σε 10-11 μήνες. Ο στόλος των 6 αεροσκαφών «έβαζε» κατά μέσο όρο 120 ώρες το μήνα, έναντι ενός συνήθους μέσου όρου 80 ωρών. Συνολικά, τα 6 αεροσκάφη συμπλήρωσαν περίπου 3,100 ώρες πτητικών δοκιμών και περίπου 3,700 στο έδαφος. Τα πρώτα τέσσερα ήταν εξοπλισμένα με κινητήρες Rolls-Royce Trent 1000 και ανέλαβαν το μεγαλύτερο βάρος των δοκιμών (περίπου 5,530 ώρες), ενώ τα άλλα δύο φορούν τους General Electric GE9X-IB. Το πρώτο πρωτότυπο χρησιμοποιήθηκε για την εξακρίβωση των πτητικών χαρακτηριστικών του αεροσκάφους και τη λειτουργία βασικών συστημάτων του, όπως είναι οι επιφάνειες ελέγχου, το σύστημα προσγείωσης και τα υδραυλικά συστήματα. Για περίπου δύο μήνες πετούσε συνεχώς υπό διαφορετικές συνθήκες ύψους, ταχύτητας, βάρους και φορτίου, για να ελεγχθεί η ομαλή και ελεύθερη δονήσεων πλεύση, ενώ στο διάστημα αυτό έγιναν δοκιμές και στους κινητήρες, με διακοπή λειτουργίας και επανεκκίνηση εν πτήση. Σε αυτό το πρώτο στάδιο, το πρώτο πρωτότυπο επέκτεινε ακόμα το φάκελο με δοκιμές απώλειας στήριξης με διάφορα βάρη, ενώ ελέγχθηκαν η σταθερότητα και ο έλεγχος του συστήματος στις χαμηλές ταχύτητες (Σχήμα 2.11)



**Σχήμα 2.11:** Κατά τη διάρκεια των πρώτων δοκιμαστικών πτήσεων το σύστημα προσγείωσης παρέμενε σε θέση έκτασης Προσέξτε ότι η πτήση του παρακολουθείται από ένα βοηθητικό αεροσκάφος T-33

Αφού καθορίστηκε η τελική διαμόρφωση, η Federal Aviation Administration (FAA) κλήθηκε για αυτό που ονομάζεται Type Inspection Authorization (TIA), την αρχική δηλαδή έγκριση του τύπου, με την ολοκλήρωση της οποίας συνεχίστηκε η εν πτήση πιστοποίηση του αεροσκάφους, με επιβάτες πλέον και το προσωπικό της FAA. Ακολούθησαν δοκιμές υψηλών ταχυτήτων και διερεύνησης της VMC (Velocity for Minimum Control), οι οποίες εξέτασαν τη συμπεριφορά του αεροσκάφους κατά την απογείωση με απώλεια κινητήρα. Αφού οι καταπονημένοι έως τότε κινητήρες αλλάχθηκαν από νέους, το πρώτο πρωτότυπο συνέχισε τις δοκιμές απογειώσεων και

προσγειώσεων από τη βάση Edwards, εκμεταλλεόμενο την τεράστια έκταση της τελευταίας, που «συγχωρεί» λάθη και απρόβλεπτες καταστάσεις. Στην τελευταία φάση δόθηκε επίσης έμφαση στη συγκέντρωση και την εισαγωγή δεδομένων στον προσομοιωτή, για την πιο πιστή απεικόνιση της πτητικής συμπεριφοράς του αεροσκάφους. Το δεύτερο πρωτότυπο ήταν εξοπλισμένο με κινητήρες Rolls-Royce Trent 1000, έφερε δε στο χώρο της καμπίνας επιβατών πλήθος υπολογιστών και καταγραφικών συστημάτων και πήρε και αυτό μέρος στο αρχικό πρόγραμμα δοκιμών (γενικός χειρισμός, ευστάθεια κ.λπ.) πριν από την αρχική έγκριση TIA από τη FAA. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την πιστοποίηση της λειτουργικότητας και της αξιοπιστίας (Functionality & Reliability F&R) των συστημάτων, τόσο σε τυπικές πτήσεις όσο και σε πτήσεις ETOPS (Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards). Η πιστοποίηση ETOPS (330min) απασχόλησε περίπου το 10% των συνολικών ωρών πτήσης. Οι σχετικές δοκιμές απαιτούσαν την πραγματοποίηση μεγάλων σκελών πτήσης (υπερατλαντικών). Στο δεύτερο πρωτότυπο εξετάζονταν και η λειτουργία του συστήματος τροφοδοσίας καυσίμων σύμφωνα με τις τελευταίες προδιαγραφές της FAA. Τέλος, κάποιο από τα πρώτα 787 χρειάστηκε επίσης να μεταφερθεί στη Νορβηγία ή την Ισλανδία, για πραγματοποίηση δοκιμών ισχυρού ψύχους, αφού το αεροσκάφος πρέπει να πιστοποιηθεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (μέχρι 55oF/-48oC), όπως απαιτεί η AirCanada. Το Dreamliner, παραμένει το πιο προηγμένο αεροδυναμικά αεροπλάνο, εισάγοντας σημαντικές καινοτομίες, τόσο με τη χρήση σύνθετων υλικών όσο και με τη νέα φιλοσοφία σχεδίασης του εσωτερικού. Η αφετηρία όλων των προσδοκιών της Boeίng αλλά και των υποσχέσεων για τις επιδόσεις σε οικονομία καυσίμου, εμβέλεια και μεταφορική ικανότητα ήταν η χρήση των συνθετικών υλικών. Το Dreamliner αποκαλείται «πλαστικό αεροπλάνο», αφού τα συνθετικά υλικά αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο μέρος του συνολικού όγκου της σχεδίασης και περίπου το 50% του συνολικού βάρους. Η διαφορά είναι μεγάλη σε σχέση με το περίπου 10% του προηγούμενου αεροσκάφους της εταιρίας, του εμπορικά πολύ επιτυχημένου B777. Η χρήση και η τεχνογνωσία των συνθετικών υλικών έχει σημειώσει άλματα και πρόκειται να βελτιωθούν περισσότερο στο μέλλον, όμως η εκτεταμένη χρήση τους προκάλεσε εύλογα ανησυχία, κυρίως σε θέματα ασφάλειας. Η χρήση των συνθετικών υλικών έχει πολλαπλές θετικές συνέπειες, οι οποίες όλες συνοψίζονται σε μία έννοια: οικονομία. Η αντικατάσταση των μερών από αλουμίνιο και άλλα μεταλλικά κράματα σημαίνει μείωση βάρους, συνεπώς μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, άρα μείωση του λειτουργικού κόστους. Επίσης, τα συνθετικά υλικά παρουσιάζουν πρακτικά μηδενική διάβρωση, το οποίο μεταφράζεται σε εξοικονόμηση του κόστους αντιδιαβρωτικής προστασίας, μείωση απαιτήσεων συντήρησης και περαιτέρω μείωση βάρους από τη μη ανάγκη δομικών ενισχύσεων. Η μείωση των απαιτήσεων συντήρησης, σημαίνει ότι ο χρόνος μεταξύ των προγραμματισμένων επιθεωρήσεων μπορεί να επιμηκυνθεί μέχρι και στο διπλάσιο, πράγμα που συνεπάγεται περαιτέρω μείωση κόστους.

Το ίδιο αποτέλεσμα φιλοδοξεί να έχει και με τη χρήση των κινητήρων νέας γενιάς. Η εταιρία εξέλεξε να προσφέρει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ του Rolls-Royce Trent 1000 και του GEnx-1B. Το Dreamliner μάλιστα, έχει κοινή υποδομή ανάρτησης και σύνδεσης των κινητήρων, οι οποίοι μπορούν να εναλλάσσονται. Αυτό το στοιχείο κάνει ιδιαίτερα ελκυστικό το αεροσκάφος και στις εταιρείες μίσθωσης αεροσκαφών, οι οποίες μπορούν να προσαρμόζουν την προσφορά τους στις απαιτήσεις του εκάστοτε χρήστη, χωρίς να διαθέτουν πολλαπλά αεροσκάφη διαφορετικών εκδόσεων. Εκτός αυτού, οι νέοι κινητήρες υπόσχονται μείωση θορύβου και κατανάλωσης, αν και το κόστος κτήσης είναι μάλλον αρκετά μεγαλύτερο από των παλαιότερων κινητήρων. Ένας άλλος παράγοντας που ευνοεί την οικονομικότερη απόδοση του αεροσκάφους είναι η εκτενής χρήση ηλεκτρικών συστημάτων (στα φρένα, στα αντιπαγωτικά συστήματα πτέρυγας, στη συμπίεση καμπίνας κ.λπ.) αντί των υδραυλικών ή των συστημάτων απαγωγής πεπιεσμένου αέρα. Και εδώ η αλυσίδα είναι αντίστοιχη:

### **Μείωση βάρους → Μείωση κατανάλωσης καυσίμου → Μείωση κόστους**

Κατά τις πτητικές δοκιμές όμως διαπιστώθηκαν σοβαρά δομικά προβλήματα. Το σημαντικότερο αφορούσε σε μερικά δομικά στοιχεία της ένωσης της ημιπτέρυγας-ατράκτου. Η εταιρία προέβη σε ενισχύσεις στα πλευρά του αεροσκάφους και μετά την επιδιόρθωση προχώρησε σε στατικές δοκιμές στο σημείο όπου η άτρακτος ενώνεται με τις ημιπτέρυγες (wing-box). Στις δοκιμές εδάφους το άκρο της πτέρυγας μετακινήθηκε κατά 5.5m, (Σχήμα 2.12). Τέτοια καταπόνηση δεν πρόκειται να προκύψει ποτέ σε πραγματικές συνθήκες αφού αντιστοιχεί σε βάρος αεροσκάφους 150% μεγαλύτερο του μέγιστου. Πέραν αυτού, ερωτηματικά εγείρονται για το αν η Boeing μπορεί να επιτύχει το στόχο της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου κατά 20% σε σχέση με το μέσο σημερινό αεροσκάφος, λόγω των αλλαγών και των δομικών ενισχύσεων που χρειάστηκαν για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, με επακόλουθο την αύξηση του βάρους. Σε συνάρτηση με το μειωμένο κόστος χρήσης, υπάρχει ακόμα ένας σημαντικός παράγοντας, χάρη στον οποίο το Dreamliner μπορεί να αλλάξει τα δεδομένα των αερομεταφορών. Είναι η εμβέλεια και η μεταφορική του ικανότητα. Η Boeing κατάφερε να δημιουργήσει το κατάλληλο αεροσκάφος για να «κλέψει» δουλειά τόσο από μεγαλύτερα όσο και από μικρότερα αεροσκάφη. Χάρη στο συνδυασμό επιδόσεων και κόστους, το 787 είναι ικανό από μόνο του να στηρίξει νέα αεροπορικά δρομολόγια, τα οποία έως τώρα δεν ήταν βιώσιμα για τις αεροπορικές εταιρείες, (Πίνακας 2.1). Όπως βλέπουμε και στον πίνακα 2.1 φαίνονται ενδεικτικά, οι δέκα μεγαλύτερες απευθείας πτήσεις που εκτελούνται σήμερα (απόσταση σε km) παγκοσμίως. Παρατηρούμε ότι την πρωτιά κατέχει η πτήση Σιγκαπούρη – Νέα Υόρκη η οποία διανύει 15,328 Km απόσταση. Για το λόγο είναι απαραίτητο να υπάρχει υποχρεωτικά μια στάση σε ένα προκαθορισμένο αεροπορικό σταθμό για τις απαραίτητες ενέργειες συντήρησης και την προμήθεια καυσίμου του αεροσκάφους.





**Σχήμα 2.12:** Στατική δοκιμή αντοχής της ημιπτέρυγας

Πρόκειται κυρίως για δρομολόγια μεγάλων αποστάσεων, αλλά σχετικά μικρής κίνησης (long, thin routes). Σε αυτά περιλαμβάνονται πολλά δρομολόγια από την Ασία προς την Ευρώπη και την Αμερική, τα οποία επιβαρύνονταν μέχρι τώρα από το υψηλό κόστος καυσίμου και τη χρήση μεγάλων αεροσκαφών, τα οποία όμως ταξίδευαν με πολλές αδιάθετες θέσεις. Επίσης, αναμένεται να επωφεληθούν και άλλες περιοχές, όπως για παράδειγμα πόλεις των ΗΠΑ μακρύτερα από τους καθιερωμένους προορισμούς στις δύο ακτές. Αυτές οι πόλεις θα έχουν πλέον τη δυνατότητα περισσότερων συνδέσεων με σημεία εκτός ΗΠΑ. Άλλωστε, αυτό το μοντέλο των απευθείας συνδέσεων (point-to-point) φαίνεται σε πολλές περιπτώσεις να κερδίζει έδαφος σε σχέση με το μοντέλο του κομβικού αεροδρομίου (hub), αφού το προτιμούν οι επιβάτες (λόγω άνεσης και χρόνου) και οι εταιρίες (λόγω κόστους). Εκτιμάται ότι η ένταξη του Dreamliner επιτρέπει τη δημιουργία τουλάχιστον 450 νέων συνδέσεων point-to-point, που δε θα ήταν βιώσιμες με τα υπάρχοντα αεροσκάφη. Μέχρι πρόσφατα, η διαδρομή των δικινητήριων αεροσκαφών μεγάλων αποστάσεων όπως το 787, έπρεπε -για λόγους ασφαλείας- να σχεδιάζεται έτσι ώστε να βρίσκονται σε απόσταση όχι μεγαλύτερη των 180min πτήσης με ένα κινητήρα από το πλησιέστερο αεροδρόμιο σε περίπτωση που ένας από τους δύο κινητήρες έπαυε να λειτουργεί. Με τους νέους κανονισμούς της FAA το περιθώριο πτήσης με ένα κινητήρα αυξήθηκε στα 330min, κάτι που σημαίνει ότι τα αεροσκάφη θα μπορούν να χαράσσουν πιο σύντομες διαδρομές για τον προορισμό τους, καθώς τώρα δεν θα υποχρεούνται να βρίσκονται σε απόσταση 180min από κάποιο εναλλακτικό αεροδρόμιο. Έτσι για παράδειγμα αεροσκάφη που θα απογειώνονται από τη Βρετανία θα μπορούν να «κόβουν» δρόμο πάνω από το Βόρειο Πόλο για να βρεθούν σε προορισμούς όπως η Χαβάη, η Αλάσκα ή η Γαλλική Πολυνησία. Οι ειδικοί ελπίζουν ότι με τους νέους κανονισμούς οι πτήσεις θα καταστούν φθηνότερες, καθώς θα απαιτείται λιγότερο καύσιμο αλλά και πιο οικολογικές αφού συνολικά θα εκλύονται λιγότερες εκπομπές των κινητήρων.

Σιγκαπούρη -Νέα Υόρκη (Newark)	15,328
Σιγκαπούρη -Λος Άντζελες	14,094
Ατλάντα-Γιοχάνεσμπουργκ	13,576
Ντουμπάι-Λος Άντζελες	13,394
Μπανγκόκ-Λος Άντζελες	13,274
Ντουμπάι-Χιούστον	13,118
Ντουμπάι-Σαν Φρανσίσκο	13,014
Χονγκ Κονγκ-Νέα Υόρκη (JFK)	12,964
Χονγκ Κονγκ-Νέα Υόρκη (Newark)	12,954
Ντόχα-Χιούστον	12,925

**Πίνακας 2.1:** Ενδεικτικά, οι δέκα μεγαλύτερες απευθείας πτήσεις που εκτελούνται σήμερα (απόσταση σε km)

Η αίσθηση ικανοποίησης του επιβάτη αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα στην επιλογή του ταξιδιού, έτσι η Boeing προχώρησε σε μια σειρά καινοτομίες, άλλες λειτουργικές και άλλες απλώς αισθητικές, (Σχήμα 15.25). Έτσι, το Dreamliner υιοθετεί μεγαλύτερα παράθυρα, καλύτερο φωτισμό, περισσότερο αποθηκευτικό χώρο στην οροφή και ανάμεσα στις σειρές των καθισμάτων. Επίσης, οι επιβάτες του 787 μπορούν να αναπνέουν σε καλύτερη ατμόσφαιρα (με ρυθμίσεις για μείωση υγρασίας, σωματιδίων, οσμών κ.λπ.), ενώ η συμπίεση της καμπίνας προσομοιάζει συνθήκες χαμηλότερου ύψους. Η Boeing λοιπόν υιοθέτησε τεχνολογικές καινοτομίες και στην καμπίνα επιβατών με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τη συμπίεση, η οποία προσομοιάζει συνθήκες ύψους 6,000ft αντί των 8,000ft που συνηθιζόταν έως σήμερα. Η διαμόρφωση του cockpit του B787 είναι ιδιαίτερα εργονομική και προηγμένη και περιλαμβάνει μεγάλες οθόνες και διπλά Head up Display, (Σχήμα 2.13).



**Σχήμα 2.13:** Αψίδες, ιδιαίτερα χρώματα, εναλλασσόμενοι φωτισμοί είναι μερικές μόνο από τις αισθητικές παρεμβάσεις που στόχο έχουν να κάνουν τον επιβάτη να αισθανθεί άνετα.





**Σχήμα 2.14:** Το υπερσύγχρονο cockpit του 787

Το Dreamliner είναι ένα «παγκόσμιο» αεροπλάνο με μικρά και μεγαλύτερα κομμάτια του να παράγονται σε κάθε γωνιά του κόσμου και την τελική συναρμολόγηση να γίνεται στο Έβερετ της Ουάσιγκτον, (Σχήμα 2.15) Αυτό δεν είναι φυσικά καθόλου ασυνήθιστο εδώ και πολλά χρόνια, όμως η διαφορά στην περίπτωση του Dreamliner είναι ότι τα βασικά τμήματα του αεροσκάφους φτάνουν στο Έβερετ με ενσωματωμένα ήδη όλα τα μικρότερα και μεγαλύτερα μέρη και απαρτία (από καλωδιώσεις μέχρι σκέλη προσγείωσης, (Σχήμα 2.16), όπως προβλέπεται να είναι στην τελική μορφή με το αεροπλάνο έτοιμο προς παράδοση.



**Σχήμα 2.15:** Γραμμή τελικής συναρμολόγησης του Boeing 787 στο Έβερετ



**Σχήμα 2.16:** Στατικές δοκιμές του δεξιού κύριος σκάλους προσγείωσης.

## 2.6) ΜΑΧΗΤΙΚΟ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ

### Παράδειγμα Κατασκευής F/A-18F Super Hornet:

Το F/A-18F Super Hornet (Σχήμα 2.17) κατασκευάζεται στο εργοστάσιο της Boeing με την κωδική ονομασία «building 67» (Σχήμα 2.18) που βρίσκεται στο Saint Luis των ΗΠΑ. Με βάση τις προβλέψεις που έχουν γίνει στο σχεδιασμό και τον εξοπλισμό της γραμμής παραγωγής, ο μέγιστος ετήσιος ρυθμός παραγωγής ανέρχεται σε 48 αεροσκάφη. Ο ρυθμός μπορεί εύκολα να αυξηθεί, ενώ στην περίπτωση πελατών με «πιεστικές» ανάγκες υπάρχει η δυνατότητα για περαιτέρω επιτάχυνση των παραδόσεων με τον αναπρογραμματισμό των παραδόσεων προς το Ναυτικό των ΗΠΑ. Γενικά πάντως, απαιτούνται, κατά μέσο όρο, 38 μήνες για την παραγωγή του πρώτου αεροσκάφους από την υπογραφή και ενεργοποίηση της σύμβασης, και 17 μήνες από την άφιξη όλων των συκροτημάτων από τους υποκατασκευαστές στο Saint Luis.

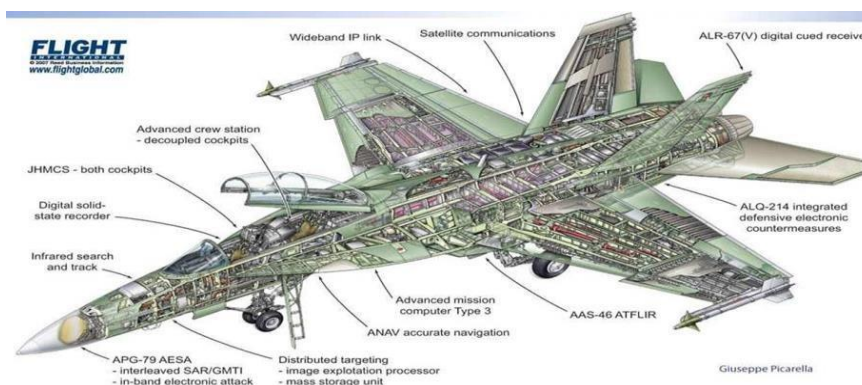


**PROPULSION:** Powerplant two General Electric F414-400 afterburning turbofans, **Thrust** 44,000lb (195.72kN) with afterburner

**PERFORMANCE:** **Max level Speed** at altitude: 1,190mph (1,915km/h) at 40,000ft (12,190m), Mach 1.8 at sea level: 835mph (1,350km/h), Mach 1.1 **Service Ceiling:** 50,000ft (15,240m) **Range typical:** 1,200nm (2,225km) **ferry:** 1,660nm (3,055km), **g-Limits:** +11.5/-3.5

**DIMENSIONS:** **Length** 60.01ft (18.31m) **Wingspan** 44.71ft (13.62m) **Height** 15.79ft (4.82m) **Wing Area** 500 ft<sup>2</sup> (46.45m<sup>2</sup>)

**WEIGHTS:** Empty 30,600lb (13,880kg), Max Takeoff 66,000lb (29,935kg), Fuel Capacity internal: (F-18E) 14,400 lb (6,530 kg) (F-18F) 13,550lb (6,145 kg) external: 9,780lb (4,435kg), Max Payload 17, 750lb (8,050 k)



Σχήμα 2.17: F/A-18F Super Hornet



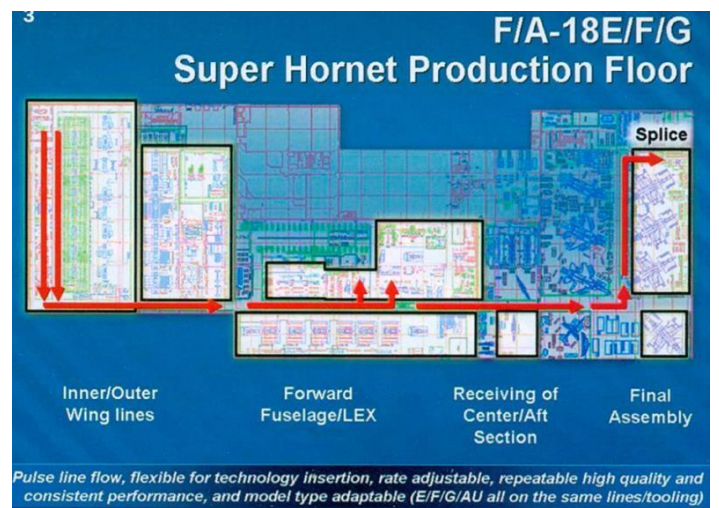


**Σχήμα 2.18:** Μία άποψη του χώρου παραγωγής στο building 67

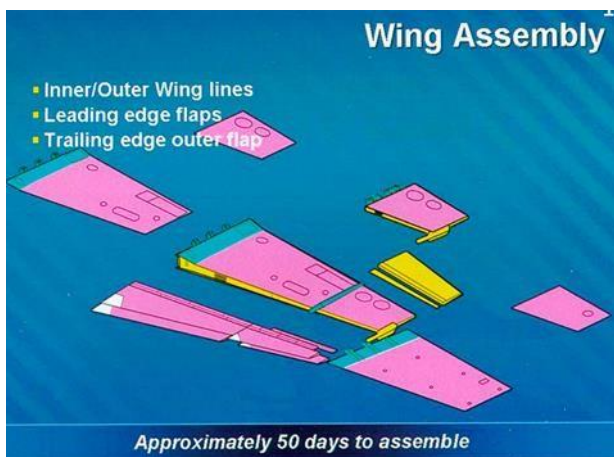
Ας δούμε όμως ορισμένες φάσεις της παραγωγής (Σχήματα 2.19, 2.20) του Super Hornet με τη βοήθεια φωτογραφικού υλικού που αποδέσμευσε η κατασκευάστρια εταιρία Boeing. Στο (Σχήμα 2.19) παρουσιάζονται τα κύρια στάδια της τελικής συναρμολόγησης του Super Hornet. Η συναρμολόγηση ακολουθεί την αρχή της «παλμικής ροής γραμμής» (pulse line flow), που σήμερα αποτελεί πλέον τον κανόνα για όλες τις μεγάλες αεροδιαστημικές εταιρείες, (λόγω φυσικά των μικρών γραμμών παραγωγής, ελλείψει μεγάλων παραγγελιών). Με απλά λόγια, «παλμική ροή γραμμής» σημαίνει ότι η γραμμή συναρμολόγησης δεν είναι κυλιόμενη, αλλά το αεροσκάφος παραμένει σε διάφορους σταθμούς όσο απαιτηθεί για να γίνουν οι προβλεπόμενες εργασίες. Στη συνέχεια, μετακινείται (στη συγκεκριμένη περίπτωση ολισθαίνοντας σε ένα στρώμα πεπιεσμένου αέρα, ας το παρομοιάσουμε ως αερόστρωμνο) στον επόμενο σταθμό. Πέρα από την αυτονόητη ευελιξία στην παραγωγή, και φυσικά την εύκολη ενσωμάτωση πιθανών αλλαγών ή τροποποιήσεων (γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, η συναρμολόγηση όλων των εκδόσεων του Super Hornet γίνεται στην ίδια γραμμή), ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι η παραγωγή και η ταχύτητά της ουσιαστικά «ελέγχεται» από το έμπειρο προσωπικό συναρμολόγησης που έχει άμεση αντίληψη των πραγμάτων και όχι από το «αποστασιοποιημένο» διοικητικό προσωπικό. Μάλιστα, για να μειωθεί ακόμη πιο πολύ ο χρόνος απόκρισης στην αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων ή στη σχεδίαση και ενσωμάτωση βελτιώσεων ή τροποποιήσεων, η Boeing έχει μεταφέρει το τμήμα μηχανολογικής σχεδίασης στον ίδιο χώρο με την παραγωγή. Έτσι, η επικοινωνία όχι μόνο είναι ταχεία, αλλά και άμεση με προφανή ευεργετικά αποτελέσματα. Στο (Σχήμα 2.20) φαίνεται διάγραμμα ροής του F/A-18F, όπου παριστάνεται η διαδικασία κατασκευής των πτερυγίων, η συναρμολόγηση του πρόσθιου τμήματος, της ατράκτου και των αεροδυναμικών προεκτάσεων στη ρίζα της πτέρυγας LE(R)X (Leading Edge Root). Η κατασκευή (σκελετός, επιφανειακές επικαλύψεις, κ.λπ.) και η συναρμολόγηση της πτέρυγας και των ουραίων οριζόντιων επιφανειών γίνεται εξ ολοκλήρου στο Saint Luis από την Boeing, (Σχήματα 2.23, 2.24 ). Η διαδικασία συναρμολόγησης απαιτεί περίπου 50 ημέρες.



Σχήμα 2.19: Κατασκευαστικά στάδια του F/A-18F

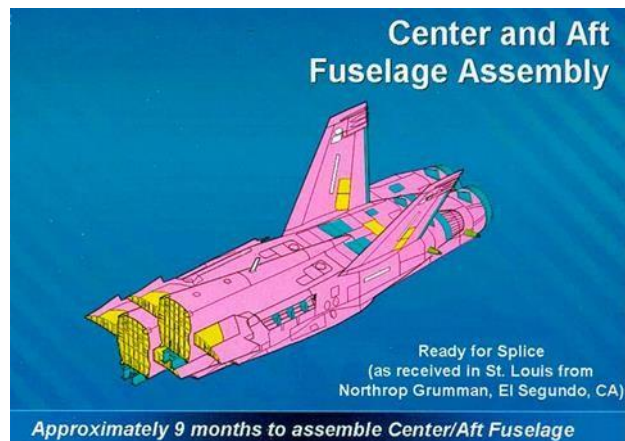


Σχήμα 2.20: Διάγραμμα ροής του F/A-18F



Σχήμα 2.21: Πτερύγια και επιφάνειες ελέγχου

**Σχήμα 2.22:** Κεντρικό και πίσω μέρος της ατράκτου



**Σχήμα 2.23:** Μπροστινό μέρος ατράκτου

**Σχήμα 2.24:** Τελική συναρμολόγηση





Όπως πλέον είναι ο κανόνας, η παραγωγή αεροσκαφών αποτελεί στην πράξη την τελική συναρμολόγηση τμημάτων τα οποία παράγουν διάφοροι υποκατασκευαστές. Για παράδειγμα το εικονιζόμενο στο (Σχήμα 2.22) κεντρικό και οπίσθιο τμήμα της ατράκτου (δηλαδή, η μισή πίσω άτρακτος) που περιλαμβάνει και τα δύο κάθετα σταθερά κατασκευάζεται από την Northrop Grumman στο El Segundo της Καλιφόρνια. Όπως φαίνεται και στο (Σχήμα 2.24) απαιτείται διάστημα εννέα μηνών για την κατασκευή και συναρμολόγηση του συγκεκριμένου τμήματος στην εικονιζόμενη μορφή, η οποία είναι έτοιμη για την ένωση της (splice) με το πρόσθιο μισό της ατράκτου (κατασκευάζεται από τη Boeing στο Saint Luis). Η ένωση γίνεται σε τέσσερα σημεία με δώδεκα βίδες το καθένα και διαρκεί περίπου τρεις ημέρες (κυρίως, γιατί είναι πολύ χρονοβόρα η διαδικασία επακριβούς ευθυγράμμισης των δύο τμημάτων). Η ένωση είναι εξαιρετικά ανθεκτική σε καταπονήσεις και μάλιστα πολύ περισσότερο από τις απαιτήσεις του Ναυτικού των ΗΠΑ. Έτσι, ενώ η απαίτηση του US Navy ήταν για φορτίσεις μέχρι 7.5g, επιτυγχάνεται αντοχή μέχρι 11.5g. Ανάλογα, ενώ η απαίτηση ήταν για μέγιστο βαθμό καθόδου σε προσγείωση 700-800ft/min (210240m/min), το αεροσκάφος εμφανίζει αντοχή μέχρι και 1,200ft/min (360m/min). Η συναρμολόγηση του πρόσθιου τμήματος της ατράκτου, δηλαδή από το πιλοτήριο και εμπρός μέχρι το ρύγχος, καθώς και των αεροδυναμικών προεκτάσεων LERX, συμπεριλαμβανομένης φυσικά της τοποθέτησης των καλωδιώσεων, γίνεται επίσης εξ ολοκλήρου στο Saint Luis από την Boeing και απαιτεί 55 ημέρες, (Σχήμα 2.23). Η τελική συναρμολόγηση διαρκεί 25 ημέρες, (Σχήμα 2.24). Μετά την τελική συναρμολόγηση ακολουθεί ο έλεγχος στεγανότητας. Σε ειδικό χώρο εντός του «building 67» (Σχήμα 2.25), γίνεται η προετοιμασία ενός αεροσκάφους για τη δοκιμασία με τη χρήση ενός συστήματος καταιονισμού που λειτουργεί εντατικά για πολλές ώρες και διαπιστώνεται αν το αεροσκάφος ανταποκρίνεται στις πολύ αυστηρές απαιτήσεις στεγανότητας του US Navy. Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι για ένα σημαντικό μέρος της επιχειρησιακής τους ζωής τα αεροσκάφη βρίσκονται εκτεθειμένα σε εξαιρετικά αντίξοες καιρικές συνθήκες στο κατάστρωμα των αεροπλανοφόρων. Η εμμονή του Ναυτικού με τη στεγανότητα έχει οδηγήσει στη σχεδίαση θυρίδων προσβασιμότητας που ασφαλίζουν υδατοστεγώς με μία μόνο κίνηση.



**Σχήμα 2.25:** Προετοιμασία αεροσκάφους για έλεγχο στεγανότητας



Μετά τον έλεγχο στεγανότητας, γίνεται ο έλεγχος όλων των λειτουργικών συστημάτων του αεροσκάφους (έλεγχος «ράμπας») και ακολουθεί η βαφή του. Η ολοκλήρωση και των δύο διαδικασιών απαιτεί συνολικά 16 ημέρες. Το επόμενο στάδιο είναι η πρώτη πτήση και οι πτητικές δοκιμές, που συνολικά διαρκούν 9 ημέρες. Λόγω όμως της πολύ υψηλής ποιότητας παραγωγής, οι πτητικές δοκιμές από 4 που ήταν αρχικά (δύο με δοκιμαστή πιλότο της εταιρίας, και δύο με πιλότο του Ναυτικού), έχουν περιοριστεί μόνο σε δύο. Με την ολοκλήρωση των πτητικών δοκιμών, το αεροσκάφος είναι έτοιμο για παράδοση στον πελάτη.

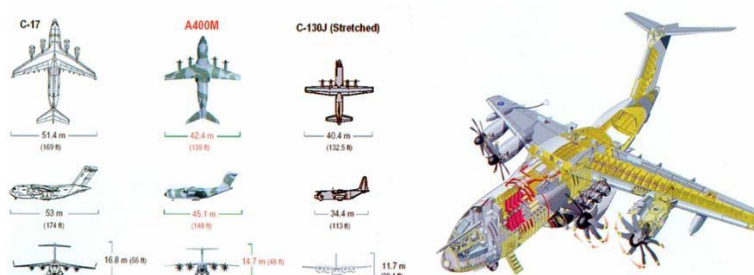
### Παράδειγμα Κατασκευής A400M Future Large Aircraft:

Η ανάγκη για τη μελλοντική αντικατάσταση των μεταφορικών αεροπλάνων της Ευρώπης και του NATO σε βάθος χρόνου, διαφάνηκε από τις αρχές της δεκαετίας του '80 και οδήγησε στη σχεδίαση και κατασκευή του A400M Future Large Aircraft, (Σχήμα 2.26). Αυτήν την περίοδο βρίσκονται σε υπηρεσία με στις περισσότερες Ευρωπαϊκές Αεροπορίες, μόνο τα C-130J. Η σχεδίαση του αεροπλάνου αυτού, όμως ανάγεται μισό αιώνα πίσω, γεγονός που το καθιστά πλέον, ακόμα και μετά το face lifting που έχει υποστεί, μη ικανοποιητικό μεταφορικό μέσον για ένα μεγάλο μέρος εφοδίων και υλικών μιας σύγχρονης πολεμικής αεροπορίας.



**Σχήμα 2.26:** A400M Future Large Aircraft

Οι μη επιθετικών προσανατολισμών εθνικοί αμυντικοί σχηματισμοί όπως αυτός της Ελλάδας, αρκούνται σε μικρότερης μεταφορικής ικανότητας αεροπλάνα, όπως το C-130 Hercules και το C-27 Spartan, (Σχήμα 2.27).



**Σχήμα 2.27:** Συγκριτικά σχέδια που φανερώνουν τη γενική ιδέα με βάση την οποία σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε το A400M. Σημαντικά μεγαλύτερο από το C-130 και μικρότερο από το στρατηγικού χαρακτήρα C-17A Globemaster III. Το A400M αξιοποιείται τόσο για τη διεξαγωγή αποστολών τακτικού όσο και στρατηγικού χαρακτήρα.

Το 1982 έξι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ): το Βέλγιο, η Γαλλία, η Γερμανία, η Ιταλία, η Ισπανία και το Ηνωμένο Βασίλειο, και λίγο αργότερα μία ακόμη εκτός ΕΕ άλλα μέλος του NATO η Τουρκία, έκριναν ότι χρειάζονται ένα νέο μεταφορικό αεροπλάνο που να καλύπτει τις ανάγκες τους. Οι απαιτήσεις αρχικά μιλούσαν για 297 αεροπλάνα, αρκετά δελεαστικό νούμερο για το ξεκίνημά. Βιομηχανικοί κολοσσοί όπως Airbus Industries, Aerospatiale, British Aerospace, MBB, CASA, η Alenia και η Daimler Benz Aerospace, σχημάτισαν μια κοινοπραξία, που ονομάστηκε FLAG (Future Large Aircraft Group). Αυτή η βιομηχανική και εμπορική συνεργασία οδήγησε τελικά στην από κοινού ανάπτυξη ενός μέσου τετρακινητήριου μεταφορικού αεροπλάνου, με την αρχική ιδέα να φέρει κινητήρες turbofan υψηλού λόγου παράκαμψης. Αυτό πρέπει να αντικαταστήσει τα C-130 και να αποτελέσει τη ραχοκοκαλιά της Ευρωπαϊκής Στρατιωτικής Δύναμης Αερομεταφορών για τον 21ο αιώνα.

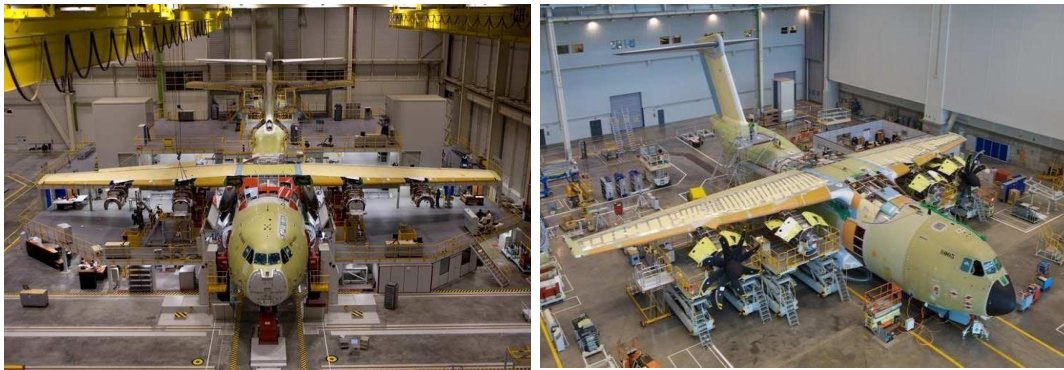
Η ονοματολογία που χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορίσει το αντικείμενο και το ρόλο του νέου ευρωπαϊκού μεταφορικού αεροπλάνου ήταν εξ αρχής ελαστική. Δεν αναφερόταν καθόλου σε αεροπλάνο αποκλειστικά στρατιωτικών μεταφορών και άφηνε ανοιχτή την «πύρτα» για την παραγωγή ενός εμπορικού αεροπλάνου. Βέβαια, προκειμένου το πρόγραμμα να πληροί τις απαιτήσεις ενός σύγχρονου στρατιωτικού αεροπλάνου, αλλά παράλληλα και ενός πολιτικού, πρέπει να ενσωματώνει τεχνολογία αιχμής και να καλύπτει τις κατάλληλες προδιαγραφές. Η χρήση λιγότερο καυσιμοβόρων κινητήρων ήταν πρωταρχικής σημασίας. Έτσι εγκαταλείφθηκε η αρχική ιδέα των κινητήρων turbofan με κόστος τη μείωση της ταχύτητας.

Αντίθετα, προηγμένης τεχνολογίας turboprop κινητήρες με τελευταίας σχεδίασης έλικες από σύνθετα υλικά μπορούν να πλησιάσουν σε ικανοποιητικό βαθμό την ταχύτητα που προσφέρουν οι κινητήρες turbofan, με το πλεονέκτημα έναντι αυτών της σημαντικά χαμηλότερης κατανάλωσης καυσίμων, (Σχήμα 2.28).



**Σχήμα 2.28:** Turboprop με προηγμένα αεροδυναμικά έλικα

Το σύστημα προσγειώσεως πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένο, ώστε το αεροπλάνο να έχει την ικανότητα να επιχειρεί από πρόχειρα διαμορφωμένους διαδρόμους. Το αεροπλάνο ακολουθεί την κλασική σχεδίαση των περισσότερων στρατιωτικών μεταφορικών αεροπλάνων, αλλά διαθέτει την τελευταία λέξη της τεχνολογίας διαχείρισης ηλεκτρονικών δεδομένων και ηλεκτρικό/ηλεκτρονικό σύστημα fly-by-wire για απόλυτα σταθεροποιημένο έλεγχο και προστασία σε όλες τις φάσεις της πτήσης. Οι πτέρυγες πρέπει να του προσδίδουν ικανότητα πτήσης με πολύ χαμηλές ταχύτητες στις φάσεις που αυτό απαιτείται και στην κατασκευή τους να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερα σύνθετα υλικά. Το ίδιο ισχύει φυσικά και για την άτρακτο του αεροσκάφους, (Σχήμα 2.29)



**Σχήμα 2.29:** Στάδια συναρμολόγησης και τοποθέτησης κινητήρων

Σημαντικές απαιτήσεις ήταν η ικανότητα εναέριου ανεφοδιασμού και φυσικά το υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας με χαμηλό κόστος συντήρησης. Το 2000 συγκροτήθηκε η Airbus Military Company, θυγατρική της Airbus Industries ως υπεύθυνη για την ανάπτυξη του προγράμματος A400M για την υλοποίηση των απαιτήσεων αυτής της ευρωπαϊκής ομάδας. Βασικός μέτοχος στον όμιλο είναι η Airbus με το 70% και ακολουθεί η EADS Casa με 20%. Στο πρόγραμμα συμμετέχουν συνολικά πάνω από 50 εταιρείες που απασχολούν περισσότερους από 23,000 εργαζόμενους. Η συναρμολόγηση της κεντρικής ατράκτου γίνεται από την Airbus Deutschland στη Βρέμη, με την Alenia να κατασκευάζει το οπίσθιο τμήμα της ατράκτου. Το ουραίο τμήμα κατασκευάζεται στο Αμβούργο και στην ισπανική Ταμπλάδα από την EADS Casa. Η EADS Military Air Systems (MAS) στο Augsburg κατασκευάζει τις πόρτες φόρτωσης. Το ριναίο τμήμα της ατράκτου κατασκευάζεται από την Airbus France στην Meaulte και τη St. Nazaire. Η Airbus UK στο Filton κατασκευάζει τις πτέρυγες και άλλες κατασκευάστριες, όπως η Flabel. τις επιφάνειες ελέγχου, η Safran Group's Messier-Bugatti και η Messier-Dowty τα συστήματα προσγειώσεως, τους τροχούς και τα φρένα, η TAI τμήματα της ατράκτου και των θυρών, η Saab Aerostructures διάφορες άλλες θύρες, η Thales ηλεκτρονικά και συστήματα αεροναυτιλίας και η Northrop Grumman το ραντάρ και αεροναυτιλίας AN/APN-241E. Η τελική γραμμή παραγωγής είναι στη Σεβίλλη της Ισπανίας όπου και μεταφέρονταν τα τεράστια τμήματα από το επί μέρους κατασκευαστικά κέντρα στο κέντρο της τελικής συναρμολόγησης, (Σχήμα 2.30).



**Σχήμα 2.30:** Μεταφορά τμημάτων από τα κατασκευαστικά κέντρα στο κέντρο της τελικής συναρμολόγησης.

Στον κατασκευαστικό τομέα, το αεροπλάνο αυτό ενσωματώνει μία πληθώρα από καινοτομίες, όχι μόνο καθαρά τεχνολογικές, αλλά και σχεδιαστικές. Σε αυτό βέβαια βοηθά και το γεγονός ότι ο αεροπορικός χώρος κυριολεκτικά βρίθκει από νέες τεχνολογίες και υλικά που εμφανίζονται σε καθημερινή βάση και βρίσκουν εφαρμογές σε όλα τα πεδία. Τα σύνθετα υλικά αποτελούν σήμερα αναπόσπαστο μέρος της δομής των σύγχρονων αεροσκαφών. Οι σπουδαίες ιδιότητες τους που συνδυάζουν τεράστια αντοχή με μικρότερο βάρος έναντι των μεταλλικών τα έχουν κάνει ιδιαίτερα ελκυστικά για χρήση σε κατασκευές στις οποίες ο περιορισμός του βάρους σε σχέση με την αντοχή διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο. Ιδιαίτερα ένα αεροπλάνο της κατηγορίας airlifter όπως το A400M, δε θα μπορούσε να μείνει έξω από το «χορό». Για παράδειγμα, περίπου το 30% της κατασκευής της ατράκτου του A400M αποτελείται από ανθρακονήματα (carbon fibres), αν και είναι συμβατικής σχεδίασης (monocoque) με επικάλυψη από αλουμίνιο. Στις πτέρυγες η χρήση των σύνθετων υλικών είναι ακόμα ευρύτερη. Το 50% της πρωτεύουσας δομής τους, συμπεριλαμβανομένων των κυρίων δοκών και του κεντρικού τμήματος, είναι κατασκευασμένες με την ευρεία χρήση σύνθετων υλικών, κατά βάση ανθρακονημάτων. Όλες οι κινητές επιφάνειες: πηδάλια κλίσεως, φθορείς ανώσεως, αερόφρενα, πτερύγια καμπυλότητας χείλους έκφυλης διπλής σχισμής, είναι κατασκευασμένα από πλαστικό υψηλής αντοχής και ανθρακονήματα. Αξίζει να σημειωθεί ιδιαίτερος ότι, και οι επικαλύψεις των πτερύγων, που είναι τμήματα μήκους είκοσι μέτρων, κατασκευάζονται επίσης από σύνθετα υλικά με ενσωματωμένες μεταλλικές ενισχύσεις. Οι συνδέσεις, όμως, κατά τη συναρμολόγηση όλων αυτών των τμημάτων απαιτούν μεγάλη προσοχή και λεπτές τεχνικές. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ειδικά σχεδιασμένα αυτόματα μηχανήματα διάτρησης και ήλωσης τους. Μέταλλα αυξημένης αντοχής όπως το τιτάνιο χρησιμοποιούνται σε περιοχές που δέχονται μεγαλύτερες καταπονήσεις είτε λόγω στατικών είτε λόγω δυναμικών φορτίων. Τέτοιες περιοχές είναι γύρω από τα παράθυρα του πιλοτηρίου - όπου χρησιμοποιούνται κράματα τιτανίου- τα σημεία ζεύξης των πτερύγων με την άτρακτο (Σχήμα 15.15) και τα σημεία προσαρμογής των σκελών του συστήματος προσγειώσεως. Σε δευτερεύουσες περιοχές, για παράδειγμα στα αεροδυναμικά καλύμματα χρησιμοποιούνται ελαφρά σύνθετα υλικά, όπως υαλονήματα ή ελαφρά μικρού πάχους ανθρακονήματα. Και στις περιοχές του ουραίου πτερώματος τα σύνθετα υλικά κυριαρχούν. Η σχεδίαση του σε διάταξη T (T-tail, Σχήμα 2.31), όπως στα περισσότερα στρατιωτικά μεταφορικά αεροπλάνα, αποσκοπεί στην όσο το δυνατόν λιγότερη έκθεση του στα δινορέυματα που σχηματίζονται πίσω από τις



πτέρυγες των υψηλοπτέρυγων αεροπλάνων, όπως και στην αποφυγή πρόσκρουσης ξένων αντικειμένων κατά την προσγείωση και απογείωση από πρόχειρους διαδρόμους. Επιπλέον, διευκολύνει τη φόρτωση από τη ράμπα στο πίσω μέρος του αεροσκάφους.



**Σχήμα 2.31:** Λεπτομέρεια από τη συναρμολόγηση του κάθετου σταθερού τύπου T-tail

Η άτρακτος έχει την ικανότητα να διατηρεί στο εσωτερικό του συνθήκες ύψους 8,000ft, σε ύψος πτήσεως του αεροπλάνου 37,000ft και για αποστολές μεγαλύτερου ύψους συνθήκες 9,000ft, όταν το αεροπλάνο πετά στα 40,000ft. Αυτό σημαίνει μια διαφορετική πίεση της τάξεως των 7.80psi καθόλου ευκαταφρόνητη για στρατιωτικό αεροπλάνο, αν αναλογιστούμε ότι στα πολιτικά αεριωθούμενα η τιμή είναι γύρω στα 8.5psi. Για ειδικές περιπτώσεις, όπως η μεταφορά τραυματιών, έχει την ικανότητα να διατηρεί την καμπίνα σε συνθήκες επιπέδου θαλάσσης, δηλαδή μηδενικού ύψους, πετώντας στα 19,400ft, δηλαδή διαφορετική πίεση μέχρι τα 7.82psi. Οι πτέρυγες υποβάλλονται σε δοκιμές καταπόνησης των πτερύγων με άσκηση των μέγιστα αναμενόμενων φορτίων σε κανονικές συνθήκες χρήσης πολλαπλασιασμένα με ένα συντελεστή ασφαλείας 1.5. Στην τελική φάση οι καταπονήσεις συνεχίζονται μέχρι τη θραύση της πτέρυγας και στο σημείο εκείνο καταγράφονται τα φορτία που δέχτηκε και αστόχησε, για αξιολόγηση, (Σχήμα 2.31).



**Σχήμα 2.31:** Δοκιμές αντοχής πτερυγίου



Σε εχθρικό περιβάλλον, όπου εν καιρώ πολέμου πάντα ένα στρατιωτικό αεροπλάνο είναι εκτεθειμένο, πολύ δε, περισσότερο όταν είναι άοπλο και χαμηλών επιδόσεων συγκρινόμενο με τα μαχητικά, είναι αναγκαίο να είναι εφοδιασμένο με τα κατάλληλα εφόδια που του επιτρέπουν να «επιβιώνει». Γι' αυτό το A400M διαθέτει διάφορα συστήματα αυτοπροστασίας και προειδοποίησης απειλών. Ο εντοπισμός επερχόμενων πυραυλικών απειλών βασίζεται αφενός μεν στις δυνατότητες του ραντάρ RWR (Radar Warning Receiver) ALR-400, που έχει αναπτύξει η Thales με την EADS Defense Electronics, όπως επίσης και στις ενδείξεις του συστήματος MIRAS (Multi-colour Infra Red Alerting Sensor). Για την αποφυγή του πλήγματος το πλήρωμα έχει στη διάθεσή του από τα παλαιότερα και κλασικά συστήματα παραπλάνησης του βλήματος, όπως ρυμουλκούμενου ψευδοστόχου και πακέτο με 24 διανομείς αερόφυλλων και θερμοβολίδων, μέχρι τα πλέον σύγχρονα συστήματα ηλεκτρονικών αντιμέτρων. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα τοποθέτησης και ενός συστήματος laser και αντιμέτρων υπέρυθρων DIRCM (Directed Infrared Countermeasure). Σε φορείς κάτω από τις πτέρυγες υπάρχει η πρόβλεψη ανάρτησης των ατρακτιδίων ηλεκτρονικού πολέμου. Ο συντονισμός όλων των αμυντικών ενεργειών γίνεται από έναν κεντρικό επεξεργαστή που ονομάζεται υπολογιστής αμυντικής υποστήριξης DAC (Defensive Aids Computer) της EADS Defence Electronics. Στα μέσα παθητικής προστασίας περιλαμβάνονται και τεχνικές μείωσης του υπέρυθρου ίχνους στις περιοχές εξόδου καυσαερίων των κινητήρων. Για την προστασία του πληρώματος η περιοχή του πιλοτηρίου έχει σχεδιαστεί σαν ένας θωρακισμένος κλωβός με την τοποθέτηση ενισχύσεων στην επικάλυψη, ικανών να ανθίστανται σε πρόσπτωση βολίδων διαμετρήματος 12.7mm. Ίδιας αντοχής είναι και τα αλεξίσφαιρα παράθυρα. Για να λειτουργήσουν όλα τα πιο πάνω χρειάζεται να τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια. Για το λόγο αυτό οι γεννήτριες του, έχει υπολογιστεί να παρέχουν μέχρι 400kVA. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα, δε χρησιμοποιούνται σταθεροποιητές στροφών (constant speed drives) ή γεννήτριες με ενσωματωμένο συγκρότημα ελέγχου των στροφών (integrated drive generators). Οι γεννήτριες του A400M, όπως και του A380, είναι μεταβλητής συχνότητας. Το A400M είναι σχεδόν διπλάσιο του μεγέθους του C-130J και το ήμισυ του C-17, όπως και η υπολογιζόμενη τιμή του φυσικά. Συγκρινόμενο με το C-130J, το ωφέλιμο φορτίο των 37ton που μπορεί να μεταφέρει το A400M είναι σχεδόν το διπλάσιο του C-130, όπως και ο όγκος των φορτίων. Η διαχείριση τόσο μεγάλων βαρών διαδραματίζει πάντα βασικό ρόλο στην επιχειρησιακή ικανότητα ενός μεταφορικού αεροπλάνου και δεν είναι πάντα εύκολη υπόθεση. Για να γίνονται τα πράγματα ευκολότερα ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης αποστολής (Military Mission Management System, M-MMS) που διαχειρίζεται το σχεδιασμό της φόρτωσης, το κέντρο βάρους και την κατανομή των φορτίων με τη βοήθεια βάσεων δεδομένων, που είναι φορτωμένες στους υπολογιστές και περιλαμβάνουν κάθε είδους φορτία. Μπορεί να υπολογίζει τις αποστολές και να εκτελεί την κατάλληλη φόρτωση. Η ασφάλιση των φορτίων στο δάπεδο γίνεται αυτόματα. Η θέση του υπεύθυνου φόρτωσης (loadmaster) ευρίσκεται στο αριστερό εμπρόσθιο τμήμα του χώρου φόρτωσης και του επιτρέπει να έχει άμεση οπτική επαφή με όλο το χώρο, τις πόρτες και τη ράμπα φόρτωσης/εκφόρτωσης.

Στην οροφή υπάρχει εγκατεστημένη γερανογέφυρα ανυψωτικής ικανότητας πέντε τόνων για ευκολότερη διακίνηση των φορτίων. Η οπίσθια πόρτα ανοίγει σε όλο το πλάτος του χώρου φόρτωσης, ενώ μπορούν να μεταφέρονται μέχρι 116 στρατιώτες με πλήρη εξοπλισμό σε τέσσερις διαμήκεις σειρές καθισμάτων. Οι δύο μεσαίες σειρές μπορούν να αφαιρούνται τελείως, ενώ αυτές που ευρίσκονται στα πλάγια μπορούν να αναδιπλώνονται πλήρως και να αφήνουν το χώρο ελεύθερο για τοποθέτηση φορτίων. Για κανονικά φορτία χωράει εννέα τυποποιημένες στρατιωτικές παλέτες (2.23x2.74m) συμπεριλαμβανομένων δύο στην κεκλιμένη ράμπα ή εμπορευματοκιβώτια (containers) ή μη συμμετρικά φορτία αποτελούμενα για παράδειγμα από στρατιωτικά ελικόπτερα και οχήματα μέχρι βαρύ εξοπλισμό. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να μεταφέρει μέχρι έξι ελαφρά οχήματα με trailer ή δύο επιθετικά ελικόπτερα, ή ένα μεταφορικό. Στο πάτωμα υπάρχουν ηλεκτρικά περιστρεφόμενοι τροχοί για καθοδήγηση του φορτίου κατά τη φόρτωση και εκφόρτωση, που μπορούν όμως να βυθίζονται κάτω από το επίπεδο του πατώματος ώστε να μην αποτελούν εμπόδιο όταν χρειάζεται να φορτωθούν οχήματα. Στην περίπτωση που θα χρειαστεί η αεροδιακομιδή τραυματιών ή ασθενών, μπορούν να τοποθετηθούν μέχρι 66 φορεία τυπικών προδιαγραφών NATO μαζί με 25 άτομα νοσηλευτικό προσωπικό. Επιπλέον, μπορεί να διαμορφώνεται ένας ιδιαίτερος χώρος εντατικής παρακολούθησης. Για τις πιθανές ανάγκες των ασθενών σε οξυγόνο χρησιμοποιείται το σύστημα παροχής οξυγόνου του αεροπλάνου ή το γνωστό oxygen generator system με χημικό τρόπο. Το μέγιστο βάρος απογείωσης και προσγείωσης είναι 141,000kg και 122,000kg, αντίστοιχα ενώ το ωφέλιμο φορτίο 37,000kg και το εσωτερικά μεταφερόμενο καύσιμο είναι 55,000kg. Το βεληνεκές του A400 ανάλογα το φορτίο του παρουσιάζεται στο (Σχήμα 2.32) .



**Σχήμα 2.32:** Βεληνεκές του A400 με βάση τις Βρυξέλες

Αν το είδος της αποστολής το απαιτεί, το A400M έχει τη δυνατότητα να μετατρέπεται σε χρόνο λιγότερο από δύο ώρες σε tanker ανεφοδιασμού με την ανάρτηση δύο ατρακτιδίων HDU (Hose Drum Units) σε φορείς στις πτέρυγες. Επιπλέον, μπορεί να δέχεται και μία παλέτα με δύο δεξαμενές των 5.7ton περίπου η κάθε μία, που πολύ εύκολα συνδέονται στο κύριο σύστημα καυσίμου του αεροπλάνου και αποτελούν πλέον μέρος του συστήματος διαχείρισης καυσίμου. Κάθε δεξαμενή διαθέτει έναν σωλήνα παροχής καυσίμου τύπου hose and drogue που ξετυλίγεται και εκτείνεται έξω από την ανοιχτή ράμπα φόρτωσης. Το A400M

μπορεί να τροφοδοτεί ένα αεροπλάνο με παροχή 1,800kg/min. Οι άλλοι δύο σωλήνες, που ξετυλίγονται από τα ατρακτίδια στις πτέρυγες, παρέχουν μια ροή καυσίμων μέχρι 1,200kg/min το καθένα. Τα καύσιμα αυτά προέρχονται από τις δεξαμενές του αεροπλάνου, που δέχονται συνολικά μέχρι 50.5ton. Και πάλι το M-MMS αναλαμβάνει τη διαχείριση των καυσίμων πρόσθετων και κανονικά φερόμενων. Το A400M σαν tanker έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονου ανεφοδιασμού μέχρι δύο αεροπλάνων, που πετούν με ταχύτητα 420knots στα 24,000ft, ή ελικόπτερα που πετούν με 110knots στα 4,000ft. Σε μία τυπική αποστολή το A400 μπορεί να μείνει στον αέρα για δύο ώρες σε απόσταση 400miles από τη βάση του και να παραδώσει πάνω από 40ton καυσίμου. Αν χρειαστεί να παραμείνει περισσότερο στον αέρα, έχει τη δυνατότητα να ανεφοδιάζεται εν πτήση. Οι δεξαμενές καυσίμων δέχονται πλήρωση του κενού χώρου με αδρανές αέριο για την εξάλειψη της πιθανότητας εκρήξεων και καταστολής της φωτιάς. σε περίπτωση που το αεροπλάνο βληθεί εν πτήση. Το πιλοτήριο είναι σχεδιασμένο με μεγάλη εργονομία για μείωση του φόρτου εργασίας του πληρώματος, αποτελούμενο από δύο χειριστές (Σχήμα 2.33). Η πείρα έχει δείξει, ότι ένα τρίτο μέλος πληρώματος αποτελεί αρκετά χρήσιμη παρουσία, ιδιαίτερα υπό συνθήκες μεγάλου φόρτου εργασίας, όπως κατά την εφαρμογή ηλεκτρονικών αντιμέτρων σε δύσκολες καιρικές συνθήκες, ρίψεις εφοδίων από πολύ μικρά ύψη κ.λπ. Για το λόγο αυτό υπάρχει πρόβλεψη για μία ακόμη θέση στο μέσον, πίσω από τους χειριστές, ενός τρίτου μέλους πληρώματος που έχει πρόσβαση και δυνατότητα χειρισμού όλων των συστημάτων εκτός του ελέγχου της πτήσης. Ο άνθρωπος αυτός δεν είναι κατ' ανάγκη μηχανικός ή ναύτιλος, μπορεί να είναι και ο διαχειριστής της φόρτωσης (loadmaster).



**Σχήμα 2.33:** Πιλοτήριο του A400M

Στους εμπρόσθιους πίνακες δεσπόζουν έξι κύριες οθόνες πολλαπλών ενδείξεων, διαστάσεων 15x20cm, σε διάταξη και λειτουργία παρόμοια με αυτήν του A380. Δύο ακόμη οθόνες MCDU (Multipurpose Control And Display Unit) ιδίων διαστάσεων υπάρχουν στην κεντρική κονσόλα (pedestal), οι οποίες απεικονίζουν περιφερειακά συστήματα διαχείρισης της πτήσης, της αποστολής και του διαγνωστικού συστήματος. Η γενικότερη διαρρύθμιση του πιλοτηρίου του A400M

είναι βασισμένη στο σχεδιασμό του πιλοτηρίου του A380 της Airbus. Επειδή, όμως, οι αντίστοιχοι χώροι του A400M είναι πολύ μικρότεροι από αυτούς του A380, αλλά και ως στρατιωτικό αεροπλάνο πρέπει να διαθέτει κάποια επιπλέον συστήματα όπως αυτοπροστασίας, ζεύξης δεδομένων, ειδικών επικοινωνιών και αεροναυτιλίας, απαιτήθηκε πιο επίπονη μελέτη διάταξης των πινάκων ελέγχου με κεντρικό άξονα τη διατήρηση του χαμηλού συντελεστή φόρτου εργασίας του πληρώματος. Κάθε χειριστής έχει μπροστά του μία πρωτεύουσα οθόνη ενδείξεων (Primary Flight Display, PFD) και μία οθόνη τακτικής αεροναυτιλίας (Navigation Tactical Display, NTD). Είναι οι ίδιες οθόνες που στα πολιτικά αεροπλάνα ονομάζονται η πρώτη ακριβώς το ίδιο (PFD) και η δεύτερη απλά ND (Navigation Display). Στην οθόνη PFD περιλαμβάνονται οι ίδιες ενδείξεις που εμφανίζονται στο HUD (Head-Up Display), συν τις λειτουργίες του αυτομάτου πιλότου και κάποιες άλλες δευτερεύουσες. Στο κέντρο όπως είπαμε υπάρχουν δύο ακόμη οθόνες για χρήση και από τους δύο χειριστές, η μία για τις ενδείξεις των κινητήρων και η άλλη και για την απεικόνιση των συστημάτων και μηνυμάτων/προειδοποιήσεων. Η επικοινωνία των χειριστών με τις οθόνες και τα συστήματα, των οποίων τις λειτουργίες απεικονίζουν, γίνεται με τη χρήση πληκτρολογίου πολλαπλών λειτουργιών και με τη χρήση ειδικού «πτοντικιού» (trackball). Το HUD είναι ένας ψηφιακός αποτυπωτής πολλαπλών ενδείξεων που κερδίζει ταχύτητα έδαφος και στην πολιτική αεροπορία. Η Airbus Military σχεδιάζει να το πιστοποιήσει ως κύρια μονάδα οργάνων πτήσεως και να ενσωματώσει μια μονάδα για κάθε χειριστή. Είναι ευρείας οπτικής απεικόνισης και ο υπολογιστής (γεννήτρια των ειδώλων) έχει την ικανότητα απόκρυψης των μη αναγκαίων στοιχείων σε σχέση με την φάση της πτήσης. Οι κύριες παράμετροι του είναι: αναφορά ορίζοντα, προσανατολισμός, πραγματική και προτιθέμενη αναφορά πορείας πτήσης, διαδρομή, επιλεγμένη και πραγματική, ταχύτητα και ύψος, ραδιούψομετρο, γωνία απόκλισης πορείας, ενδείξεις βοηθημάτων προσγείωσης και προειδοποιητικές ενδείξεις υψηλής προτεραιότητας, όπως απειλές εδαφικών ή τεχνητών εμποδίων ή πτήσεις πολύ κοντά στο έδαφος κ.λπ. Με λίγα λόγια ο χειριστής έχει ότι πληροφορίες χρειάζεται για να πετάξει το αεροπλάνο με «κεφάλι έξω» σε όλες τις φάσεις της πτήσης. Παράλληλα, ενσωματώνει και τεχνολογία ενίσχυσης της ορατότητας EVS (Enhanced Vision System) για μεγαλύτερη ασφάλεια σε δύσκολες συνθήκες πτήσης, υπό βροχή, νέφωση ή νύχτα, με τη χρήση υπερύθρων FLIR (Forward-Looking InfraRed) και απεικόνιση. Ο φωτισμός επίσης σε ολόκληρο το εσωτερικό του αεροπλάνου, συμπεριλαμβανομένου του χώρου φόρτωσης, είναι συμβατός με τις απαιτήσεις νυχτερινών επιχειρήσεων. Στις οθόνες τακτικής αεροναυτιλίας (NTD) εμφανίζονται οι πορείες σύμφωνα με το σχέδιο πτήσεως, οι σαρώσεις του ραντάρ και της χαρτογράφησης (mapping). Επιπλέον, μπορεί -για όσο χρόνο το αεροπλάνο εκτελεί πολύ χαμηλή πτήση για ρίψη εφοδίων- να εμφανίζεται η κάθετη θέση του σε σχέση με το έδαφος, σε συνεργασία με το σύστημα T-CGAS (Tactical Ground Collision Avoidance System), που είναι παρόμοιο με το EGPWS (Enhanced Ground Proximity Warning System), αλλά προσαρμοσμένο στις συνθήκες πολύ χαμηλών πτήσεων και συνεργάζεται με το σύστημα TERPROM (TERrain Profile Matching). Το σύστημα αυτό παρέχει αναφορά εδάφους σε συνδυασμό με προειδοποίηση εγγύτητας εδάφους, προειδοποίηση ύπαρξης εμποδίων, ακολουθία των εδαφικών

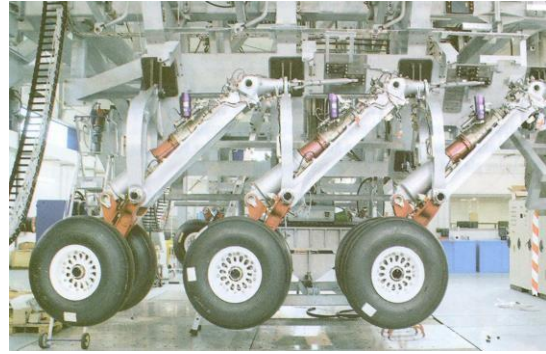
ανωμαλιών και παθητική αποστασιομέτρηση των εικονιζόμενων στόχων. Με τη συνεργασία όλων αυτών των βοηθημάτων, το A400M πιστοποιείται για ασφαλείς πτήσεις σε ένα ελάχιστο ύψος 492ft (150m) από το έδαφος, ακόμη και σε συνθήκες ενόργανης πτήσης. Τα A400M που προορίζονται για τη Γερμανική Αεροπορία διαθέτουν και σύστημα απόκρυψης/αποφυγής ραντάρ με τη χρήση του ανάγλυφου του εδάφους. Ο έλεγχος της πτήσης του αεροπλάνου ξεκινά από τα πλευρικά ηλεκτρικά χειριστήρια (side sticks controtlers), που αποτελούν μέρος του συστήματος ελέγχου της πτήσης fly-by-wire, το οποίο είναι βασισμένο στην τεχνολογία που ενσωματώνει η τελευταία γενιά των πολιτικών αεροσκαφών της Airbus. Στην πραγματικότητα το A400M είναι εφοδιασμένο με σύστημα ελέγχου πτήσης fly-by-wire, παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται στα αεροσκάφη A380, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο ARINC 661 για λόγους τυποποίησης και ως εκ τούτου μείωσης του κόστους. Το σύστημα αεροναυτιλίας και βοηθημάτων, πέραν των κλασικών όπως τα: ATC transponders, TACAN κ.λπ., συμπεριλαμβάνει τρία αδρανειακά συστήματα αναφοράς θέσης IRS (Inertial Reference System) με ενσωμάτωση διπλού παγκόσμιου συστήματος αναφοράς θέσης GPS (Dual - Global Positioning System). Το σύστημα ραντάρ και πλοήγησης ενσωματώνει ανιχνευτή διατμητικών ρευμάτων (windshear detector) και φυσικά χαρτογράφησης εδάφους (ground mapping). Το A400M έχει τη δυνατότητα αεροναυτιλίας FANS (Future Air Navigation System). Με το σύστημα αυτό μπορεί να ελέγχεται το σχέδιο πτήσης του αεροπλάνου και η πορεία του από τον έλεγχο εναερίου κυκλοφορίας στο έδαφος, μέσω ζεύξης δεδομένων, και οι χειριστές απλά παρακολουθούν τη λειτουργία των υπολοίπων συστημάτων του αεροπλάνου. Εννοείται, βεβαία, ότι οποιαδήποτε στιγμή θελήσουν να πάρουν τον έλεγχο του αεροπλάνου στα χέρια τους θα είναι θέμα δευτερολέπτων η αποσύνδεση του από τον έλεγχο εδάφους. Δε θα μπορούσαν, βέβαια, να λείπουν οι διπλοί υπολογιστές διαχείρισης της πτήσης FMC (Flight Management Computers). Ο ρόλος τους, όμως, στη στρατιωτική έκδοση του A400M περιορίζεται αισθητά σε σχέση με τα πολιτικά αεροπλάνα ή την πολιτική έκδοση του A400, στο αυστηρό πλαίσιο υπολογισμού των βαρών και της διαχείρισης του σχεδίου πτήσεως. Από εκεί και πέρα, κυρίαρχο ρόλο έχουν οι δύο υπολογιστές διαχείρισης αποστολής που ανήκουν στο M-MMS. Τα δύο συστήματα, αν και έχουν διαφορετικές αποστολές και λειτουργίες, εντούτοις ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους με ειδικά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Το M-MMS είναι σχεδιασμένο από την EADS Defence Electronics και έχει ένα ευρύτατο φάσμα λειτουργιών, όπως της αυτόματης διαχείρισης του φερόμενου καυσίμου για κατανάλωση, της επιλογής των συχνοτήτων των επικοινωνιών, της φόρτωσης και ζυγοστάθμισης, της ανάλυσης των δεδομένων του συστήματος αυτοπροστασίας, της αποφυγής σύγκρουσης εναέριας κυκλοφορίας (TCAS mode S), το σύστημα αναγνώρισης φίλιου ή εχθρικού αεροπλάνου (IFF), το σύστημα T-CGA5, το TERPROM, και φυσικά το σύστημα προστασίας του φακέλου πτήσεως, και καταλήγει στο σύνολο σχεδόν των τακτικών λειτουργιών. Για να βρεθεί το αεροπλάνο στον αέρα με τα φορτία που προορίζεται να μεταφέρει απαιτείται να είναι εφοδιασμένο με τους κατάλληλους κινητήρες. Η κοινοπραξία Europrop International (EPI) συντονίζει την ανάπτυξη και παραγωγή του turboprop TP400-D6, (Σχήμα 2.34). Στην πορεία της ανάπτυξης και των δοκιμών αποδείχθηκε ότι η



αχίλλειος πτέρνα του αεροπλάνου αυτού ήταν οι κινητήρες. Το τεράστιο μέγεθος των ελίκων του A400M με διάμετρο 5.33m είχε σαν αποτέλεσμα δύο αρνητικά δεδομένα. Πρώτον, τεράστια στρεπτικά φορτία που μεταφερόμενα μέσω των ατρακτιδίων καταπονούν υπερβολικά τη δομή της πτέρυγας και δεύτερον, τα διανορεύματα θα μπορούσαν να προκαλέσουν από ενός σημείου και μετά αποσταθεροποίηση της ροής στην πτέρυγα. Οι σχεδιαστές απορρίπτοντας τη λύση της διπλής αντίστροφα περιστρεφόμενης έλικας, όπως σε κάποια ρωσικά αεροπλάνα, υιοθέτησαν δύο λύσεις με μία κίνηση. Προηγμένης σχεδίασης έλικες από σύνθετα υλικά (ανθρακονήματα) με οκτώ λογχοειδή φύλλα και αντίστροφη περιστροφή των ελίκων της κάθε πτέρυγας. Δηλαδή, οι έλικες των κινητήρων 1 και 3 στρέφουν δεξιόστροφα, ενώ των 2 και 4 αριστερόστροφα. Η πρακτική αυτή, ενώ σχεδιαστικά δημιουργεί σχεδόν μηδενικές δυσκολίες, παράλληλα αποσβένει τα προβλήματα που αναφέρονται πιο πριν. Επιπλέον, οι ροπές μειώνονται δραματικά, οδηγώντας σε μια μείωση του μεγέθους της ουράς της τάξεως του 15-20% και μια πιο ομαλή ροή αέρος στην πτέρυγα και στο τμήμα της ατράκτου από τις πτέρυγες και πίσω. Ο TP400-D6 είναι ο μεγαλύτερος turboprop που κατασκευάστηκε ποτέ στο δυτικό κόσμο. Πρόκειται για κινητήρα δυο αξόνων και ελεύθερο στρόβιλο ισχύος που οδηγεί μέσω μειωτήρα στροφών (κιβώτιο) την έλικα. Ο συμπιεστής χαμηλής πίεσεως (LPC, RLPC=3.5), αποτελείται από πέντε βαθμίδες που κινούνται από το στρόβιλο χαμηλής πίεσεως (LPT) μονής βαθμίδας. Ακολουθεί ο συμπιεστής υψηλής πίεσεως (HPC, RHPC=7.2), που είναι αντιστρόφου περιστροφής από αυτόν της χαμηλής και αποτελείται από έξι βαθμίδες που κινούνται από το στρόβιλο υψηλής πίεσεως (HPT), επίσης μονής βαθμίδας. Ο στρόβιλος ισχύος (PT) μεταφέρει την κίνηση μέσω ενός τρίτου τηλεσκοπικού άξονα σε ένα κιβώτιο υποπολλαπλασιασμού, το οποίο μειώνει τις στροφές στο επιθυμητό επίπεδο για την περιστροφή της έλικας (διαμέτρου 5.3m). Πρόκειται για κινητήρα μέγιστης απόδοσης 11,000shp στο επίπεδο της θάλασσας, με ολικό λόγο πίεσης  $RC_{ovareall}=25$ . Η μοντέρνα σχεδίαση των ελίκων επιτρέπει στο A400M να πετάξει με μέγιστη ταχύτητα πλεύσης 0.72M (ή 560km/h) στα 37,000ft, ταχύτητα καθόλου ευκαταφρόνητη για ελικοφόρο αεροπλάνο. Ο κινητήρας αυτός πληροί τις προδιαγραφές θορύβου και εκπομπής καυσαερίων. Αξιοσημείωτο είναι ότι το αεροπλάνο μπορεί να κινηθεί προς τα πίσω, πάνω σε κανονικούς διαδρόμους με κλίση μέχρι 2% και σε πρόχειρους με κλίση 1%, με αναστροφή του βήματος των ελίκων. Ο έλεγχος του κινητήρα σε όλο του το φάσμα είναι τεχνολογίας FADEC 3. Το σύστημα FADEC είναι η ψυχή του κινητήρα και συγκροτείται από τις περιφερειακές μονάδες ελέγχου της λειτουργίας του κινητήρα και της έλικας. Παρέχει τη δυνατότητα εκτεταμένων διαγνωστικών ελέγχων και καταγραφής κάθε τμήματος του κινητήρα, καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του. Αν απαιτηθεί αντικατάσταση του κινητήρα, αυτή μπορεί να γίνει μόλις σε 4 ώρες. Τέλος, το σύστημα προσγειώσεως αποτελείται από δύο ρινιαίους τροχούς και τρία ανεξάρτητα συγκροτήματα δίδυμων τροχών σε κάθε πλευρά, δηλαδή έξι συνολικά τροχοί σε κάθε κύριο σκέλος προσγειώσεως και ανάλογα συγκροτήματα πέδησης, (Σχήμα 2.35).



**Σχήμα 2.34:** Turboprop TP400-D6



**Σχήμα 2.35:** Το ένα από τα δύο κύρια σκέλη προσγείωσης του A400M

Το σύστημα προσγειώσεως διαθέτει ειδικές ικανότητες κρούσης κατά την προσγείωση με υψηλούς βαθμούς καθόδου και ικανότητα προσγείωσης σε προχειούς διαδρόμους. Χρησιμοποιώντας ελαστικά χαμηλής πίεσεως και καλύτερης κατανομής του βάρους σε περισσότερους τροχούς, το high-floatation landing gear επιτρέπει στο A400M να επιχειρεί από πρόχειρα προετοιμασμένους διαδρόμους. Περισσότεροι τροχοί σημαίνει λιγότερη καταπόνηση της επιφάνειας του διαδρόμου άρα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του έτσι το A400M μπορεί να επιτρέψει σε ένα διάδρομο ακόμη και με λασπώδη επιφάνεια να εξακολουθεί να είναι εύχρηστος και έπειτα από 1,000 προσγειώσεις. Εν πτήσει ολόκληρο το συγκρότημα είναι περικλειστο μέσα σε αεροδυναμικά διαμορφωμένες φωλιές εξωτερικά της ατράκτου. Οι αποσβεστήρες κραδασμών των κύριων σκελών διατηρούν μια ελάχιστη απόσταση από το έδαφος με οποιοδήποτε φορτίο και αν χρειάζεται για να διευκολύνεται η φόρτωση κι η εκφόρτωση, το ύψος των κυρίων σκελών μπορεί να μεταβάλλεται με τη χρήση αεροθαλάμων στους αποσβεστήρες κραδασμών, ώστε να αλλάζει στάση και να χαμηλώνει το πίσω μέρος του αεροπλάνου. Η στρέψη του ριναίου και η αντοχή των κυρίων σκελών επιτρέπει στο αεροπλάνο να έχει ακτίνα περιστροφής 30m, πράγμα που του προσδίδει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ευελιξίας σε στενούς διαδρόμους και περιοχές ελιγμών.

## 2.7) ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΕΙΔΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

### Ιπτάμενη πτέρυγα

Η ιπτάμενη πτέρυγα είναι ένα αεροσκάφος χωρίς ουρά το οποίο δεν έχει καθορισμένη άτρακτο. Το μεγαλύτερο μέρος του πληρώματος, του ωφέλιμου φορτίου και του εξοπλισμού βρίσκονται εντός της κύριας δομής της πτέρυγας. Η διάταξη της ιπτάμενης πτέρυγας μελετήθηκε διεξοδικά τις δεκαετίες του 1930 και του 1940, κυρίως από τον Τζακ Νόρθροπ και τον Τσέστον Έσελμαν στις Ηνωμένες Πολιτείες, και τον Αλεξάντερ Λίπς και τους αδελφούς Χόρτεν στην Γερμανία. Μετά τον πόλεμο, πολλά πειραματικά σχέδια βασίστηκαν στην έννοια της ιπτάμενης πτέρυγας, αλλά οι γνωστές δυσκολίες παρέμειναν. Μερικό γενικό ενδιαφέρον συνέχισε να υπάρχει μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1950 αλλά τα σχέδια δεν παρείχαν κάποιο

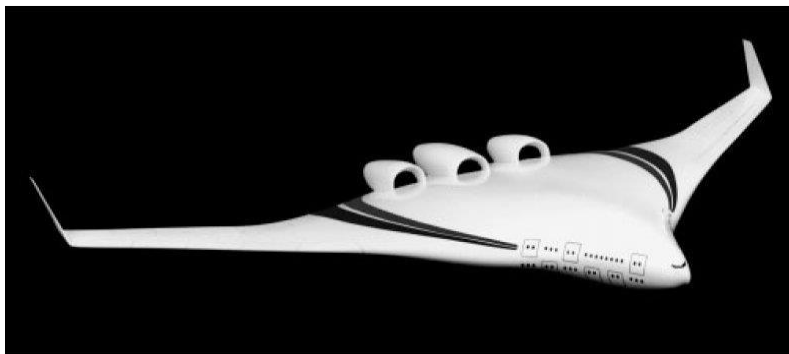
σημαντικό πλεονέκτημα και παρουσίαζαν πληθώρα τεχνικών προβλημάτων, που οδήγησαν στην υιοθέτηση «παραδοσιακών» λύσεων όπως το Convair B-36 και το B-52 Stratofortress. Εξαιτίας της πρακτικής ανάγκης για μια βαθιά πτέρυγα, το σχέδιο για την ιπτάμενη πτέρυγα ήταν πιο πρακτικό για σχέδια αργού προς μεσαίου εύρους ταχύτητας και υπήρχε συνεχές ενδιαφέρον για τη χρήση της ως στρατιωτικές αερογέφυρες. Το ενδιαφέρον στις ιπτάμενες πτέρυγες ανανεώθηκε την δεκαετία του 1980 εξαιτίας του χαμηλού επιπέδου εντοπισμού από τα ραντάρ. Η τεχνολογία Stealth στηρίζεται σε σχήματα τα οποία αντανakλούν κύματα ραντάρ σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις, και έτσι κάνουν το αεροσκάφος δύσκολα εντοπίσιμο, εκτός αν το ραντάρ βρίσκεται σε συγκεκριμένη θέση συγκριτικά με το αεροσκάφος - μια θέση η οποία μεταβάλλεται συνεχώς καθώς το αεροσκάφος κινείται. Αυτή η προσέγγιση οδήγησε τελικά στο βομβαρδιστικό τεχνολογίας Stealth B-2 Spirit. Σε αυτή τη περίπτωση τα αεροδυναμικά πλεονεκτήματα των ιπτάμενων πτερύγων δεν είναι η πρωταρχική ανάγκη. Όμως, τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου πτήσης βοήθησαν στην εξάλειψη πολλών αεροδυναμικών προβλημάτων των ιπτάμενων πτερύγων, κάνοντας τις αποτελεσματικά και σταθερά βομβαρδιστικά μεγάλης εμβέλειας.



**Σχήμα 2.9:** Το Αμερικανικό B-2 Spirit είναι στρατηγικό βομβαρδιστικό. Διαθέτει διάταξη ιπτάμενης πτέρυγας και μπορεί να ανταπεξέλθει σε διηπειρωτικές αποστολές.

### Μικτό σώμα πτέρυγας

Τα αεροσκάφη μεικτού σώματος πτέρυγας διαθέτουν επίπεδο σώμα σχήματος αεροτομής, το οποίο παράγει την περισσότερη άνωση για να τα διατηρήσει ψηλά, και διακριτές και ξεχωριστές δομές πτερύγων, αν και οι πτέρυγες συνδέονται ομαλά με το σώμα. Έτσι τα αεροσκάφη με μικτό σώμα πτέρυγας ενσωματώνουν στοιχεία σχεδιασμού στην φουτουριστική άτρακτο και το σχέδιο των ιπτάμενων πτερύγων. Τα υποτιθέμενα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι οι υπερυψωμένες πτέρυγες και ένα φαρδύ σώμα σχήματος αεροτομής. Αυτό δίνει τη δυνατότητα σε ολόκληρο το σκάφος να συνεισφέρει στην ανύψωση με αποτέλεσμα την αυξημένη οικονομία καυσίμου.



**Σχήμα 2.10:** Μοντέλο του Boeing X-48 σχεδιασμένο σε υπολογιστή.

### Μη Επανδρωμένα Αεροχήματα

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Στα μη επανδρωμένα αεροχήματα (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs) που μπήκαν σε λειτουργία αρχικά και σαν βασικό ρόλο είχαν αποστολές αναγνώρισης και επιτήρησης περιοχών αναμεταδίδοντας εικόνα μέρα και νύχτα σε πραγματικό χρόνο. Διαθέτουν κυρίως αισθητήρες παρακολούθησης, ελάχιστο οπλικό φορτίο, ενώ δεν διαθέτουν χαρακτηριστικά stealth.
2. Στα μη επανδρωμένα αεροχήματα μάχης (Unmanned Combat Air Vehicles,UCAVs ή Unmanned Combat Air Systems, UCASs). Χρησιμοποιούνται κυρίως σε αποστολές κρούσης μεταφέρουν ικανοποιητικό οπλικό φορτίο και διαθέτουν stealth χαρακτηριστικά. Η ικανότητα ενός stealth UCAS να εισέλθει στον εναέριο χώρο του αντιπάλου πετώντας σε χαμηλό ύψος εκμεταλλευόμενο το εδαφικό ανάγλυφο και να προσβάλει στόχους στρατηγικής σημασίας με χαμηλό επίπεδο απωλειών είναι σαφώς ελκυστική. Εκτιμάται ότι η επιχειρησιακή αξιοποίηση των UCAS κατά πρώτο θα υποκαταστήσει μερικώς τα βλήματα cruise μεγάλης εμβέλειας και κατά δεύτερον τα μαχητικά κρούσης.

Η καθοδήγηση των μη επανδρωμένων αεροχημάτων γίνεται μέσω σταθμών ελέγχου στο έδαφος (Ground Control Station, GCS) ή/και με τη χρήση ενός εναέριου σταθμού ελέγχου (Airborne Control Station, ACS) που επιλύει τα ζητήματα της επικοινωνίας ειδικά με τα UCAS που επιχειρούν σε μεγάλο βάθος. Μελλοντικά, με την εξέλιξη της τεχνολογίας της τεχνητής νοημοσύνης, δεν αποκλείεται τα UCAS να λειτουργούν με ελάχιστη εξάρτηση από το έδαφος. Τα δεδομένα τηλεμετρίας παρέχουν πληροφόρηση για την ταχύτητα, τη θέση και το ύψος των UAVs/UCASs. Η περιγραφή για τις αποστολές για τις οποίες προορίζονται τα UCASs συνοψίζεται στα 4D: Dull Dirty, Dangerous, Deep (δηλαδή Μονότονα, Βρώμικα, Επικίνδυνα, Βαθιά). Εκτελούν λοιπόν αποστολές κρούσης με στόχο την καταστροφή ποικιλίας στόχων (βαθιά κρούση για επιχείρηση σε μεγάλο βάθος στο εχθρικό έδαφος ή απλές αποστολές κρούσης), καταστολή αεράμυνας (Suppression Enemy Air Defence, SEAD) ή καταστροφή αεράμυνας (Destruction of Enemy Air Defenses, DEAD), προσβολή σκαφών επιφανείας, προσβολή αεροπορικών βάσεων κ.ά. Όλες οι ανωτέρω αποστολές είναι αποστολές <<υψηλής έντασης>> που επικεντρώνονται σε

στόχους για τους οποίους έχει υπάρξει προεργασία και περιλαμβάνουν τόσο σταθερούς όσο και κινούμενους. Οι αποστολές αυτές είναι αποστολές περιορισμένης διάρκειας και χαμηλής συχνότητας κυρίως σε βάθος στο εχθρικό έδαφος και τα αεροχήματα θα δράσουν σε περιβάλλον υψηλών απειλών. Γενικά, η χρήση των UCASs σε αποστολές κρούσης είναι περισσότερο αποδοτική στην προσβολή σταθερών στόχων (Fixed hard, Fixed soft) σε <<γνωστή θέση>>. Στις αποστολές αυτές η επιβίωση είναι το κύριο προσόν του αεροχήματος και γι' αυτό πρέπει να συνδυάζει χαρακτηριστικά stealth και επιδόσεις μεγάλης εμβέλειας. Συμπληρωματικά θα κληθούν να χρησιμοποιηθούν και στις αποστολές αντιμετώπισης <<ασύμμετρων απειλών>> όπως οι αντί-τρομοκρατικές αποστολές μέτριας έντασης απειλής. Επίσης, τα UCAS/UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την Εγγύς Υποστήριξη των φίλιων δυνάμεων στο πεδίο της μάχης (close Air Support, CAS) και αποστολές απαγόρευσης (interdiction) με στόχο την καταστροφή της λογιστικής υποστήριξης του αντιπάλου και των ενισχύσεων σε απόσταση μερικών δεκάδων χιλιομέτρων από το πεδίο της μάχης. Στην τελευταία αποστολή που ονομάζεται και <<Εναέρια Κατάληψη>> (Air Occupation) δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση των UAV, καθώς τα τελευταία οπλισμένα και χάρη στη μεγάλη διάρκεια πτήσης τους θα περιπολούν στα μετόπισθεν του εχθρού και θα καταστρέφουν τους στόχους που θα εντοπίζουν με τους αισθητήρες τους ή θα υποδεικνύονται από το Σταθμό Ελέγχου. Για το λόγο αυτό, τα UAV είναι ιδανικά στην εκτέλεση <<ειρηνευτικών αποστολών>>. Τα UAV αυτής της κατηγορίας παρέχουν μεγάλη αυτονομία, χρήση ποικιλίας αισθητήρων (ραντάρ SAR, EO/IR συστήματα κ.α.), δυνατότητα μεταφοράς ικανής ποσότητας οπλισμού σε εξωτερικούς φορείς ανάρτησης και τα χαρακτηριστικά stealth είναι δεύτερης προτεραιότητας.

### Fixed-wing UAV

Τα UAV παρουσιάζουν τεράστιο δυναμικό όσον αφορά την ακρίβεια και την αποδοτικότητα, επιτρέποντας όχι μόνο να μειώσουν το λειτουργικό κόστος σε σχέση με τα παραδοσιακά αεροσκάφη ή τα ελικόπτερα αλλά και να παρέμβει σε περιβάλλον όπου δεν θα ήταν δυνατή η λειτουργία του από αεροσκάφος με πιλότο επί του σκάφους. Επίσης, μεταξύ των αεροσκαφών υπάρχουν διαφορές που τους καθιστούν περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλα για μια δεδομένη δραστηριότητα. Ο τρόπος πτήσης των UAV σταθερής πτέρυγας βελτιστοποιείται ιδιαίτερα για την επαγγελματική χρήση των δεδομένων και για την τοπογραφική τους αποκατάσταση με υψηλή ποιότητα και ακρίβεια στις τρεις διαστάσεις. Εν συντομία, τα κύρια πλεονεκτήματα για τα UAV σταθερής πτέρυγας μπορούν να συνοψιστούν σε:

- Μεγαλύτερα αυτονομία πτήσης: τα UAV σταθερής πτέρυγας είναι ικανά να πετάξουν για περίπου 45-120 λεπτά. Η αυτονομία τους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αεροσκάφους.

- Υψηλότερο έλεγχο της ποιότητας εικόνας: τα UAV σταθερής πτέρυγας επιτρέπουν την αυτόματη και πραγματική παρακολούθηση της ποιότητας της εικόνας, επιτρέποντας, εάν είναι απαραίτητο, τη διακοπή της πτήσης και κατόπιν την επανεκκίνηση από το ακριβές σημείο λήψης της εικόνας που δεν έχει την απαιτούμενη ποιότητα.



- Καλύτερος έλεγχος των παραμέτρων της πτήσης: τα UAV σταθερής πτέρυγας επιτρέπουν να διατηρούνται σταθερά τα χαρακτηριστικά πτήσης και να ελέγχονται οι κύριες παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν την πτήση. 14

- Καλύτερες αεροδυναμικές επιδόσεις: τα UAV σταθερής πτέρυγας μπορούν να πετάξουν με ταχύτητα ανέμου έως 45 Km/h. Σε αυτές τις συνθήκες, εξασφαλίζεται με οποιονδήποτε τρόπο η σταθερότητα της πτήσης και η διατήρηση της σωστής της ισορροπίας, η οποία είναι απαραίτητη για τη λήψη σωστών ορθοφωτογραφιών.

### Τεχνικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές

Το συμβατικό αεροσκάφος που χρησιμοποιήθηκε ως βάση για το σχεδιασμό και την ανταγωνιστική σύγκριση, με το μη συμβατικό της εργασίας αυτής ήταν το πολεμικό αεροσκάφος YB-49. Έτσι, σχεδιάστηκε ένα UAV με επιθυμητή αυτονομία > 90 min, με ταχύτητα πτήσης 50 Km/h και ύψος πτήσης 492 πόδια. Όλες οι προδιαγραφές που αναφέρθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Προδιαγραφές αποστολής	
Ολικό βάρος	< 6kg
Βάρος ωφέλιμου φορτίου	1.15 kg
Ταχύτητα πτήσης	50 Kph
Ταχύτητα απώλειας στήριξης	20 mph
Υψόμετρο πτήσης	492 ft

Πίνακας 1: Επιθυμητές προδιαγραφές του υπό σχεδιασμού UAV

Το αεροσκάφος ακολουθεί ένα μη συμβατικό προφίλ πτήσης. Από την εκκίνηση των κινητήρων, το UAV απογειώνεται κάθετα έως τα 500 πόδια, στην συνέχεια ανέρχεται το Cruise. Με το πέρας της διάρκειας πτήσης, ανέρχεται τελικά η κάθετη προσγείωση.



Σχήμα 2.11: Μη επανδρωμένο Fixed-wing UAV

Σε σχέση με τα επανδρωμένα αεροσκάφη, τα UCASs/UAVs παρέχουν πληθώρα πλεονεκτημάτων:

- Παρέχουν χαμηλότερο κόστος κτήσης που εκτιμάται περίπου στο 1/3 του κόστους ενός μαχητικού, άλλα αντίστοιχα μεταφέρουν μικρότερο οπλικό φορτίο και έχουν μικρότερη διάρκεια πτητικής ζωής και αποθήκευσης. Ο στόχος είναι η κατασκευή UAV με διάρκεια ζωής 30-40 έτη.
- Παρέχουν χαμηλότερο κόστος ανά ώρα πτήσης και κόστος συντήρησης. Έχει υπολογισθεί ότι διαχρονικά το κόστος υποστήριξης προσεγγίζει τελικά το κόστος κτήσης.
- Παρέχουν ευελιξία στη χρήση και στη μετακίνηση, μεγαλύτερη διάρκεια πτήσης/αυτονομία. Η διασπορά δεν δημιουργεί προβλήματα λογιστικής υποστήριξης, καθώς αυτά δεν απαιτούν συντήρηση και δημιουργούν προβληματισμούς στον αντίπαλο.
- Η μη ύπαρξη χειριστή συνεπάγεται (πέραν της πιθανής πολύτιμης απώλειας της ανθρώπινης ζωής ή της πτώσης ηθικού σε περίπτωση αιχμαλωσίας) και σημαντική εξοικονόμηση πόρων που απαιτούνται για την εκπαίδευση και <<πτητική συντήρηση>> του χειριστή ή παρεπόμενες αναγκαίες αποστολές όπως η διάσωση μάχης (CSAR).
- Δεν υπάρχει πρακτικός περιορισμός στην εκτέλεση ελιγμών υψηλής φόρτισης εφόσον δεν υφίσταται ζήτημα καταιόνησης του ανθρωπίνου οργανισμού.
- Μπορούν να επιχειρήσουν συμπληρωματικά με μαχητικά σε <<μικτούς σχηματισμούς>> με κατανομή ρόλων στο πλαίσιο κοινών επιχειρήσεων COMAO (Combined Air Operations) για να πληγούν στόχοι υψηλής αξίας όπου, για παράδειγμα, τα μαχητικά να ασχολούνται με την κατάδειξη στόχων.

Από την άλλη πλευρά όμως παρουσιάζουν και μειονεκτήματα:

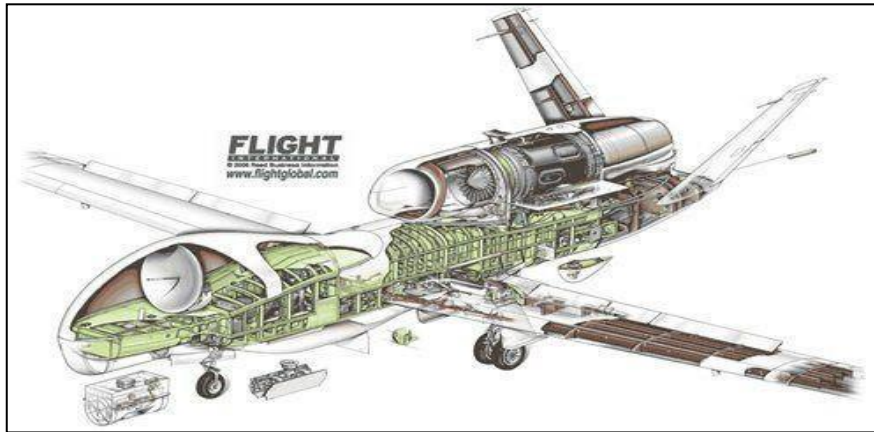
- Τα UAVs θεωρούνται σχετικά ευπαθή στις δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Ο πιο σημαντικός περιορισμός για τα UCASs είναι η εμβέλεια της ζεύξης δεδομένων που λειτουργεί στα VHS/UHF που το διασυνδέει με το σταθμό ελέγχου στο έδαφος. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιούνται έτερα UAVs ως τηλεπικοινωνιακοί αναμεταδότες ή σύγχρονα συστήματα ναυτιλίας (GPS ή συστήματα αναφοράς εδάφους) για πλοήγηση υψηλής ακρίβειας ή δορυφορικές ζεύξεις που λειτουργούν στα UHF ή στην Κ ζώνη συχνοτήτων, που επιτρέπουν στα UCASs να πετούν πέραν του οπτικού ορίζοντα. Αυτό φυσικά επιβαρύνει το UCAS με επιπλέον φορτίο και επιπλέον κόστος.
- Η διασύνδεση με το σταθμό GCS είναι καίριας σημασίας καθώς ασκείται ο έλεγχος, η ιχνηλάτηση και η λειτουργία των οχημάτων UAVs/UCASs. Στο σταθμό GCS γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων τηλεμετρίας, η σχεδίαση της αποστολής και ο έλεγχος των επικοινωνιών.
- Τα ανωτέρω συνδέονται και με την επιθυμητή αυτονομία που προαναφέρθηκε. Γενικά, οι επικοινωνίες αποτελούν πρόκληση για τα UCASs, όπως το nEUROn, που θα δράσουν σε βάθος στην εχθρική επικράτεια. Η πλέον αξιόπιστη μέθοδος επικοινωνίας θα παραμείνει στο εγγύς μέλλον η χρήση των ζεύξεων δεδομένων (Data Links).
- Τα UCASs προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εναέρια μάχη. Έτσι, αποκλείονται οι αποστολές OCA (Offensive Counter Air Attack) και DCA (Defensive Counter Air Attack). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα UCASs δεν μπορούν να εκτελέσουν αποστολές συνοδείας (Sweep και Escort).

Ειδικά για τα UCASs είναι εξαιρετικά σημαντική η διαχείριση της αποστολής και το επίπεδο αυτονομίας του αεροχήματος. Το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ περιγράφει τα επίπεδα αυτονομίας εκ των οποίων το επίπεδο 10 είναι η πλήρης αυτονομία. Το MQ-1 επιτυγχάνει επίπεδο αυτονομίας 2, όπου η καθοδήγηση γίνεται από το έδαφος με στοιχεία πραγματικού χρόνου από το UAV, ενώ το πλέον προηγμένο επίπεδο αυτονομίας που είναι σήμερα διαθέσιμο είναι το επίπεδο αυτονομίας 3 που επιτυγχάνεται από το RQ-4 Global Hawk, (Σχήμα 2.11). Για την επίτευξη υψηλού επιπέδου αυτονομίας απαιτούνται προηγμένοι αλγόριθμοι αναγνώρισης στόχου και αξιολόγησης απειλών. Έτσι, τα ζητήματα που χρήζουν προσοχής είναι η απαιτούμενη προετοιμασία της αποστολής, η δυνατότητα εναέριου ανεφοδιασμού, η δυνατότητα επαναπρογραμματισμού αποστολής στον αέρα η αλλαγή της διαδρομής προς το στόχο, η χρήση επικοινωνιών σε πτήση πάνω από εχθρική περιοχή κ.ά.

### RQ-4 Global Hawk

Το RQ-4 Global Hawk (Σχήμα 2.11) της εταιρίας Northrop Grumman είναι ένα με επανδρωμένο αερόχημα των USAir Force και Navy με βασικό ρόλο την **επιτήρηση**, (surveillance). Σε ρόλο και επιχειρησιακό σχεδιασμό είναι παρόμοιο με το κατασκοπευτικό U-2 της Lockheed, παρέχει δηλαδή στη διοίκηση ευρεία και ολοκληρωμένη εικόνα της τακτικής κατάστασης του πεδίου. Για το σκοπό αυτό είναι εφοδιασμένο με υψηλής ευκρίνειας high resolution Synthetic Aperture Radar, SAR που μπορεί να διαπεράσει σύννεφα υγρασίας και άμμου. Επίσης, διαθέτει ηλεκτροπτικούς και υπέρυθρους αισθητήρες (Electro-Optical/Infrared, EO/IR) για να παρατηρεί σε μεγάλη απόσταση, ενώ μπορεί να περιπολεί για μεγάλους χρόνους πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος. Σε μία περιπολία μπορεί να σαρώσει περιοχή 100,000 km<sup>2</sup> σε μία μέρα, παρέχοντας ιδιαίτερα ακριβείς πληροφορίες. Το κόστος ενός Global Hawk είναι \$35 εκ. Έκαστο, αλλά εάν συμπεριληφθεί και το κόστος έρευνας (Research & Development, R&D) και ανάπτυξης του όλου προγράμματος, τότε εκτοξεύεται στα \$123.2 έκαστο, (2010). Η άτρακτος (fuselage) είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο, ενώ τα φτερά είναι φτιαγμένα από ελαφρά αλλά ανθεκτικά συνθετικά υλικά. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Ο Global Hawk έκανε την πρώτη του πτήση στις 28 Φεβρουαρίου 1998. Τα πρώτα επτά αεροσκάφη κατασκευάστηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος Advanced Concept Technology Demonstration (ACTD), που χρηματοδοτήθηκε από την DARPA, προκειμένου να αξιολογήσει το σχεδιασμό και να δείξει τις δυνατότητές του. Η ζήτηση για τις ικανότητες του RQ-4 ήταν υψηλή στη Μέση Ανατολή. Έτσι, τα πρωτότυπα αεροσκάφη λειτουργούσαν ενεργά από την USAF στον πόλεμο στο Αφγανιστάν. Σε μια ασυνήθιστη κίνηση, το αεροσκάφος εισήλθε στην αρχική παραγωγή χαμηλού συντελεστή ενώ ήταν ακόμη σε μηχανική και κατασκευαστική ανάπτυξη. Παρασκευάστηκαν εννέα αεροσκάφη Block 10 παραγωγής, που μερικές φορές αναφέρονται ως RQ-4A. από αυτά, δύο πωλήθηκαν στο Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ και άλλα δύο αναπτύχθηκαν στο Ιράκ για να υποστηρίξουν επιχειρήσεις εκεί. Το τελικό αεροσκάφος Block 10 παραδόθηκε στις 26 Ιουνίου 2006.



**Σχήμα 2.11:** RQ-4 Global Hawk

**Πίνακας 2:** Τεχνικά χαρακτηριστικά του RQ-4 Global Hawk

Πλήρωμα	Μήκος	Εκπέτασμα	Ύψος	Βάρος(άδειο)	Μικτό βάρος
0	44ft 5in (13.54m)	116ft 2in (35.41m)	15ft 2in (4.62m)	8,490lb (3,851kg)	22,900lb (10,387kg)
Μέγιστη ταχύτητα	Ταχύτητα πλεύσης	Εμβέλεια	Χρόνος αποστολής	Επιχειρησ. Οροφή	Ωφέλιμο φορτίο
497.1 mph (800 km/h, 432kn)	404 mph (351 knts 650 km/h)	15,525 mi (13,491 nmil 24,985km)	36h	65,000ft (19,812m)	2,000lb (900kg)

Το Global Hawk εφοδιάζεται με ένα κινητήρα turbofan AE3007H της Allison Rolls-Royce (Πίνακας 2) με μέγιστη ώση 6,495-9,440 lbf (28.9-42.0kN). Ο λόγος ώση προς το βάρος (Thrust-to-weight ratio) που επιτυγχάνει ο κινητήρας είναι 4.1-5.6.

**Πίνακας 3:** Τεχνικά χαρακτηριστικά του turbofan AE3007H της Allison Rolls-Royce

Length	Diameter	Dry weight	Compressor	Turbine	Overall Rc	TET
106.5in (2,705mm)	38.5in (978mm)	585 lb (719kg)	14 stage HP <u>axial compressor</u> and single-stage fan	2-stage HP and 3-stage LP	18-20:1	994 C

### nEUROn

Η ανάπτυξη του nEUROn (Σχήμα 2.12) ανακοινώθηκε το 2003 και το πρώτο πρόπλασμα παρουσιάστηκε το 2005. Είναι προϊόν βιομηχανικής συνεργασίας με μία σειρά από χώρες: Γαλλία, Σουηδία, Ισπανία, Ελλάδα, Ιταλία και Ελβετία. Η Dassault αναλαμβάνει περίπου το 50% του προγράμματος, που μεταξύ άλλων περιλαμβάνει τη σχεδίαση, τον έλεγχο πτήσης και την τελική συναρμολόγηση. Η Saab αναλαμβάνει την άτρακτο, τα ηλεκτρονικά και το σύστημα καυσίμου, ενώ η EADS CASA τις πτέρυγες, τον GCS και την ολοκλήρωση της ζεύξης δεδομένων. Η EAB αναλαμβάνει την εξαγωγή του κινητήρα και το πίσω τμήμα της ατράκτου, η Alenia το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος και το σύστημα αποθήκευσης των όπλων, και τις δοκιμές στην αεροδυναμική σήραγγα. Ανήκει στην κατηγορία αεροχημάτων UCAS. Η σχεδίαση του αεροσκάφους κάνει εμφανή την προσπάθεια για μείωση της διατομής ενός πτηνού! (-20 dB/m<sup>2</sup> ή ανακλαστική επιφάνεια 0.01 m<sup>2</sup>). Η επίτευξη χαμηλής παρατηρητικότητας που επιτυγχάνεται στο nEUROn είναι σημαντική, εάν αναλογιστεί κανείς το χαμηλό κόστος ανάπτυξης αλλά και την τεχνολογία που ενσωματώνει. Για την επίτευξη αυτής της επίδοσης, το nEUROn χρησιμοποιεί πτέρυγες σχήματος Δέλτα σε σχήμα W χωρίς ουραία πτερύγια αλλά και κάθετο σταθερό. Για την επίτευξη μείωσης του υπέρυθρου ίχνους, το nEUROn διαθέτει ένα χωνευτό ραχιαίο αεραγωγό πάνω από το ρύγχος. Η είσοδος του αεραγωγού είναι σχεδιασμένη ώστε να καλύπτει τα πτερύγια του κινητήρα με σκοπό την αραίωση των θερμών καυσαερίων του κινητήρα. Το αερόχημα είναι κατασκευασμένο από συνθετικά υλικά και αλουμίνιο.



**Σχήμα 2.12:** nEUROn



**Πίνακας 4:** Τεχνικά χαρακτηριστικά του nEUROn

Μήκος (m)	Άνοιγμα πτερύγων (m)	Μέγιστο βάρος απογείωσης (Max Take off Weight, MTOW) (tons)	Ωφέλιμο (tons)	Μέγιστο Ύψος πτήσης (fts)	Μέγιστη Ταχύτητα (M)	Αυτονομία (h)
12	16	7	2,3	35	0.8	12

Το nEUROn διαθέτει τον κινητήρα turbofan Adour Mk951 χωρίς μετάκαυση της Rolls-Royce. Που χρησιμοποιείται και στο BAE Hawk. Ο κινητήρας προέρχεται από τον Adour Mk106 και είναι 2-shaft με σύστημα FADEC.

**Πίνακας 5:** Τεχνικά χαρακτηριστικά του turbofan Adour Mk951 Rolls-Royce

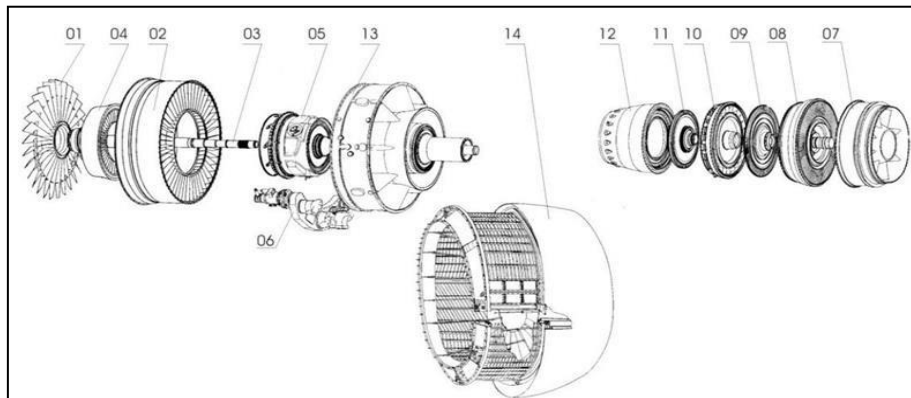
Length	Diameter	Dry weight	Compressor	Turbine	Overall Rc	B	Thrust
1,960 mm	580mm	620kg	2-stage LP, 5-stage Hp	1-stage LP, 1-stage HP	12.2:1	0.8	6,500lb

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΩΩΣΗΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

### 3.1) ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΠΡΩΩΘΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ:

#### Εξαρτήματα προωθητικού συστήματος:

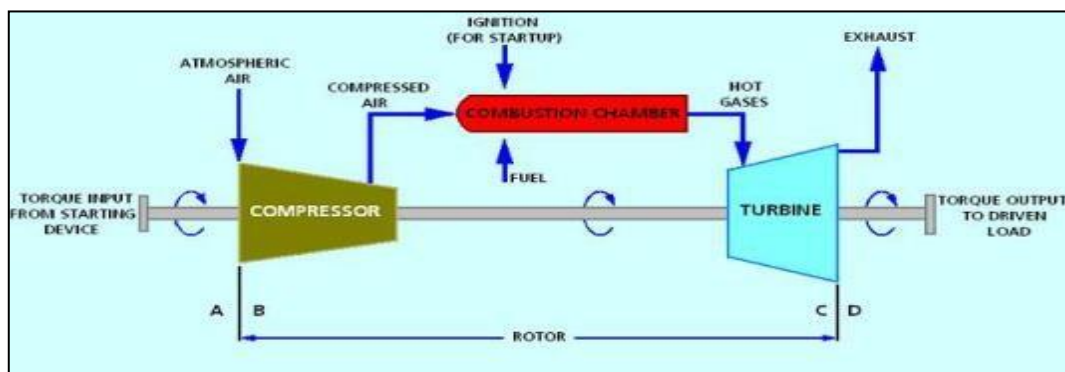
1. Ανεμιστήρας
2. Περίβλημα του εξαεριστήρα
3. Άξονας του ανεμιστήρα με την υποστήριξη ρουλεμάν
4. Στατική ενότητα προαγωγών
5. Συμπιεστής χαμηλής πίεσης
6. Κιβώτιο ταχυτήτων
7. Οπίσθιο στήριγμα εδράνου
8. Τουρμπίνα του ανεμιστήρα
9. LPT ρότορας
10. Τουρμπίνα υποστήριξης με ρουλεμάν
11. HPT ρότορας
12. Θάλαμος καύσης με πτερύγια ακροφυσίων
13. Κύρια μονάδα
14. Αναστροφέας ώσης με κινητή fairing.



Εξαρτήματα προωθητικού συστήματος – αεριοστρόβιλου

### 3.2) ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ (GAS TURBINE ENGINE)

Ο αεριοστρόβιλος θεωρείται ως ο πιο αποτελεσματικός κινητήρας αεριώθησης που βρίσκεται σε χρήση στην εποχή μας. Χρησιμοποιείται σε αεροσκάφη επιβατικά, εμπορικά και στρατιωτικά. Τα βασικά του μέρη είναι ο συμπιεστής, ο θάλαμος καύσης, ο στρόβιλος και το ακροφύσιο εξαγωγής, όπως φαίνεται στο (σχήμα 3.1). Η λειτουργία του αεριοστρόβιλου περιγράφεται συνοπτικά ως εξής: Ο αέρας εισέρχεται από την εισαγωγή (Intake) και συμπιέζεται στο συμπιεστή (Compressor) σε υψηλή πίεση. Στο θάλαμο καύσης (Combustion Chamber ή Burner), όπου οδηγείται ο συμπιεσμένος αέρας, προστίθεται καύσιμο, το οποίο αναφλέγεται και εκρήγνυται. Μέρος του έργου εκτόνωσης που ακολουθεί κινεί τον στρόβιλο (Compressor Turbine) που με τη σειρά του περιστρέφει το συμπιεστή μέσω ενός άξονα-ατράκτου (shaft) που υλοποιεί τη μηχανική σύνδεση. Το υπόλοιπο μέρος της εκτόνωσης αποτελεί το ωφέλιμο έργο εξόδου του κινητήρα. Το έργο αυτό, στους αεροπορικούς κινητήρες, παίρνει τη μορφή προωθητικής ενέργειας με τη βοήθεια προωθητικού ακροφυσίου εξαγωγής (Propelling Exhaust Nozzle), ενώ στους βιομηχανικής χρήσης αεριοστρόβιλους μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια (περιστροφική κίνηση) συνήθως με τη βοήθεια πρόσθετου στροβίλου ισχύος. (Power Turbine), (Σχήμα 3.1.α).



**Σχήμα 3.1.α :** Αρχή λειτουργίας αεροπορικού και βιομηχανικού αεριοστρόβιλου (Block diagram)

Εάν δεν υπήρχε περίσσειμα έργου εκτόνωσης μετά το στρόβιλο που κινεί το συμπιεστή, τότε το αποδιδόμενο έργο από το στρόβιλο θα ήταν ίσο προς το καταναλισκόμενο έργο προς το συμπιεστή. Σε αυτή την ακραία περίπτωση, δεν θα μπορούσε να παραχθεί ωφέλιμο έργο και το αποτέλεσμα θα ήταν απλώς η λειτουργία του συστήματος συμπιεστής/στρόβιλος. Επομένως, για να έχει νόημα η λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου, θα πρέπει η ενέργεια εκτόνωσης των καυσαερίων να υπερκαλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του συμπιεστή και να περισσεύει ένα ικανό ποσό ενέργειας που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση. Για να εκπληρωθεί η παραπάνω συνθήκη πρέπει να συμβούν τα παρακάτω: Το εισερχόμενο αέριο (συνήθως ατμοσφαιρικός αέρας) πρέπει να συμπιεστεί με τη βοήθεια του συμπιεστή και άρα να αυξηθεί η πυκνότητά του. Στο συμπιεσμένο (άρα <<πυκνό>> και σχετικά <<ζεστό>>) αέρα προστίθεται στο θάλαμο καύσης καύσιμο, που αναφλέγεται αυξάνοντας σημαντικά τη θερμοκρασία, άρα και τον όγκο των καυσαερίων. Τα διογκωμένα και υψηλής πλέον ενέργειας καυσαέρια που

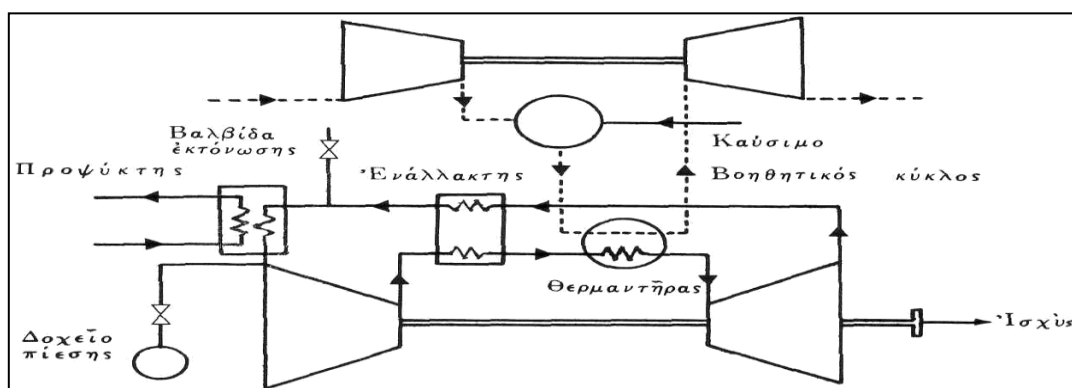
εγκαταλείπουν τον θάλαμο καύσης οδηγούνται στο στρόβιλο που ακολουθεί. Ο στρόβιλος περιλαμβάνει ενέργεια από για να κινήσει το συμπιεστή, ενώ η ενέργεια που απομένει μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο εκτόνωσης. Το ωφέλιμο έργο αυξάνεται με την προσθήκη επιπλέον καυσίμου αν και υπάρχει ένα όριο στο λόγο **καύσιμο/αέρα**, για δεδομένη παροχή αέρα, που περιορίζει το μέγεθος του ωφέλιμου έργου. Η μέγιστη τιμή του λόγου **καύσιμο/αέρα** (Fuel Air Ratio, FAR) καθορίζεται από τις συνθήκες καύσης και από τη **θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στον στρόβιλο** ( Turbine Entry Temperature, **TET** ή Turbine inlet Temperature, **TIT**), η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή. Μερικές φορές αντί τις TET χρησιμοποιεί τη **θερμοκρασία ακριβώς μετά την πρώτη σειρά σταθερών πτερυγίων του στροβίλου**, (Stator Outlet Temperature, **SOT**). Η θερμοκρασία SOT είναι πάντα μικρότερη από την TET, γιατί μεσολαβεί η παροχή αέρα ψύξης από τη πρώτη σειρά σταθερών πτερυγίων του στροβίλου. Η μέγιστη τιμή της TET καθορίζεται από τη αντοχή των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των πτερυγίων του στροβίλου, από την αποτελεσματικότητα του συστήματος ψύξης των πτερυγίων του και από την επιθυμητή διάρκεια ζωής του αεριοστρόβιλου. Η θερμοκρασία TET είναι η μέγιστη θερμοκρασία του θερμοδυναμικού κύκλου.

Συνοπτικά, **οι βασικοί παράγοντες** που επηρεάζουν τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων και **καθορίζουν τις επιδόσεις τους** όπως την ολική τους απόδοση  $\eta$  και το ωφέλιμο έργο UW είναι οι εξής:

- Η θερμοκρασία λειτουργίας TET, (εξαρτάται από την παροχή καυσίμου  $\dot{m}_f$  και τις συνθήκες καύσης).
- Ο λόγος πίεσης του συμπιεστή RC ( εξαρτάται από την παροχή καυσίμου) και επηρεάζει την παροχή αέρα (Mass flow,  $\dot{m}$ ).
- Η διάμετρος της εισαγωγής που επηρεάζει αέρα,  $\dot{m}$
- Η απόδοση ( $\eta$ ) κάθε τμήματος, (εισαγωγή, συμπίεσης, στρόβιλος, θάλαμος καύσης, εναλλάκτες, εξαγωγή κ.λπ.)
- Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, (θερμοκρασία  $T_{amb}$ , πίεση  $P_{amb}$  Υγρασία  $H$ ).

Αρχικά υπήρχαν δυσκολίες στην πραγματοποίηση υψηλού λόγου πίεσης. Σήμερα όμως ιδιαίτερα σε σύγχρονους κινητήρες, επιτυγχάνονται λόγοι πίεσης πάνω από **45:1**, με απόδοση συμπιεστή 90-95%, ενώ η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο TET μπορεί να φθάσει στους **1.800-2.100 K** (Kelvin). Στα πρώτα χρονιά της ανάπτυξης του αεριοστρόβιλου είχαν προταθεί δυο πιθανά συστήματα καύσης. Το ένα υπό σταθερό όγκο και το άλλο υπό σταθερή πίεση. Στην πρώτη περίπτωση όμως οι κατασκευαστικές δυσκολίες ήταν απαγορευτικές και έτσι εγκαταλείφθηκε. Για παράδειγμα, η προσθήκη θερμότητας σε σταθερό όγκο απαιτεί τη χρησιμοποίηση βαλβίδων για την απομόνωση του θαλάμου καύσης από το συμπιεστή και το στρόβιλο. Επομένως η διαδικασία καύσης θα ήταν διακοπτόμενη, γεγονός που εξουδετερώνει το βασικό πλεονέκτημα της συνεχούς λειτουργίας του κινητήρα. Στον αεριοστρόβιλο με σύστημα καύσης σταθερής πίεσης, η καύση είναι συνεχής διεργασία στην οποία δεν είναι αναγκαία η χρήση βαλβίδων. Σύντομα, λοιπόν έγινε αποδεκτό ότι ο κύκλος αεριοστρόβιλου με σταθερή πίεση είχε τις μεγαλύτερες

πιθανότητες για μελλοντική ανάπτυξη. Επιπλέον, ένα σημαντικό πλεονέκτημα του συστήματος σταθερής πίεσης καύσης είναι η ικανότητα του να λειτουργεί με πολύ μεγάλες παροχές μάζας, που σημαίνει κινητήρες με μεγάλη ισχύ. Πρέπει να τονιστεί ότι στον αεριοστρόβιλο η διεργασίες- μεταβολές συμπιεστή/ καύση/ εκτόνωση λαμβάνουν χώρα μέσα στον κινητήρα αλλά σε διαφορετικά διαδοχικά τμήματα του. Εκτός από τους διάφορους σύνθετους κύκλους, που προκύπτουν με την προσθήκη βοηθητικών συνιστωσών (ψύκτες, αναθερμαντήρες, εναλλάκτες), οι αεριοστρόβιλοι κατατάσσονται και ανάλογα με τη ικανότητα τους να ανακυκλώνουν ή όχι το **εργαζόμενο μέσο** (αέρας ή αέριο) κατά τη λειτουργία τους, σε δύο κατηγορίες: ανοικτού ή κλειστού κύκλου. Συγκεκριμένα, στους αεριοστρόβιλους **ανοικτού κύκλου** (open cycle) ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται από την εισαγωγή, οδηγείται στο συμπιεστή όπου συμπιέζεται ενώ ενέργεια προστίθεται με την καύση κάποιου καυσίμου και του αέρα στο θάλαμο καύσης. Στη συνέχεια τα καυσαέρια που δημιουργούνται εκτονώνονται στον ή στους στρόβιλους ή και στο προωθητικό ακροφύσιο και τελικά εξέρχονται στην ατμόσφαιρα. Η λειτουργία συνεχίζεται με την εισαγωγή νέας μάζας αέρα. Οι αεριοστρόβιλοι στην συντριπτική τους πλειοψηφία είναι αυτού του τύπου και με αυτούς θα ασχοληθούμε στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου. Αντίθετα, στους αεριοστρόβιλους **κλειστού κύκλου** (Closed Cycle) συγκεκριμένη ποσότητα ενός αερίου ανακυκλώνεται συνεχώς μέσα στον κινητήρα αυξομειώνοντας την θερμοκρασία, τον όγκο και την πίεσή του. Συνεπώς, το αέριο που βγαίνει από την εξαγωγή (και όχι τα καυσαέρια) οδηγείται και πάλι στην είσοδο του κινητήρα. Η απαιτούμενη θερμική ενέργεια παρέχεται από ένα θερμαντήρα (εναλλάκτη θερμότητας), ενώ η καύση λαμβάνει χώρα σε ένα χωριστό εξωτερικό καυστήρα. Εάν ο θάλαμος καύσης ήταν εσωτερικός και το εργαζόμενο μέσο ήταν ο αέρας τότε σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα θα καταναλωνόταν όλο το διαθέσιμο οξειδωτικό μέσο (οξυγόνο) του αέρα του κλειστού κυκλώματος και ο κινητήρας θα έσβηνε. Γίνεται, λοιπόν, φανερό ότι το αέριο (compressed gas) που επανακυκλοφορεί μέσα στον αεριοστρόβιλο δεν είναι αναγκαστικά πλέον αέρας, αλλά απαιτείται να είναι κάποιο αέριο με ανώτερες κατά προτίμηση θερμοδυναμικές ιδιότητες, όπως θα δούμε παρακάτω. Ο κλειστός κύκλος λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου μοιάζει με εκείνο του ατμοστρόβιλου. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στην περίπτωση χρησιμοποίησης πυρηνικού αντιδραστήρα για την παραγωγή θερμότητας, ο αεριοστρόβιλος κλειστού κύκλου είναι ο πιο κατάλληλος.



Σχήμα 3.1.β: Αρχή λειτουργίας αεριοστρόβιλου κλειστού κύκλου (Block diagram)



Ο αεριοστρόβιλος κλειστού τύπου παρουσιάζει ορισμένα αξιόλογα **πλεονεκτήματα**:

- Δυνατότητα χρήσης αερίου υπό πολύ υψηλή πίεση μέσα στο κλειστό κύκλωμα, με το μέγεθος του κινητήρα να είναι μειωμένο για δεδομένη ισχύ.
- Δυνατότητα αυξομείωσης της ισχύος εξόδου με την αλλαγή της πίεσης του αερίου και όχι μόνο με την ρύθμιση της παροχής καυσίμου, δηλαδή την μεταβολή της θερμοκρασίας TET. Έτσι για παράδειγμα, μπορεί να μειωθεί η ισχύς μειώνοντας την πίεση του κλειστού κυκλώματος, ενώ η θερμοκρασία TET διατηρείται σταθερή. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αποδοτική λειτουργία του κινητήρα ακόμα και σε μερικό φορτίο όπου αναγκαστικά η θερμοκρασία TET και ο λόγος πίεσης RC θα έπρεπε να μειωθούν, με αρνητικές συνέπειες στην απόδοση του κινητήρα.
- Αύξηση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη θερμότητας με την αύξηση της πίεσης του κλειστού κυκλώματος, λόγω της υψηλής πυκνότητας του αερίου.
- Η χρησιμοποίηση άλλων αερίων εκτός του αέρα για το κλειστό κύκλωμα, παρέχει την δυνατότητα χρήσης αερίων με καλύτερες θερμοδυναμικές ιδιότητες. Έτσι, η αντικατάσταση του αέρα (λόγος ειδικών θερμοτήτων  $\gamma \approx 1.4$ ) από ένα μονοατομικό αέριο (π.χ. ήλιο ή αργό), που έχει στην ίδια θερμοκρασία  $\gamma \approx 1.66$ , αυξάνει σημαντικά το ωφέλιμο έργο και θετική απόδοση του κύκλου. Επίσης, οι απώλειες πίεσης λόγω τριβής είναι πολύ μικρότερες με το ήλιο, ενώ οι βέλτιστοι λόγοι πίεσης του κύκλου είναι χαμηλότεροι και η μεταφορά θερμότητας καλύτεροι. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μέγεθος του εναλλάκτη να ελαττώνεται έως και 50% σε σχέση με εκείνο που θα είχε στην περίπτωση του αέρα.
- Αποφυγή προβλημάτων διαβρώσεως και φθοράς των πτερυγίων του στροβίλου που οφείλονται στα προϊόντα της καύσης στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες.
- Δεν χρειάζεται φιλτράρισμα του εισερχόμενου αέρα στο αεριοστρόβιλο, ανάγκη που εμφανίζεται σε αεριοστρόβιλους που λειτουργούν με ανοικτό κύκλο, ειδικά σε εφαρμογές όπου ο περιβάλλον αέρας μπορεί να περιέχει ξένα σώματα (π.χ. περιβάλλον ερήμου).

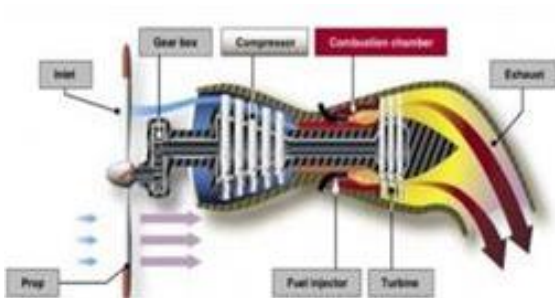
Υπάρχουν όμως και δύο σημαντικά **μειονεκτήματα**:

- Ανάγκη ύπαρξης ενός εξωτερικού συστήματος θέρμανσης. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει είτε έναν θάλαμο εξωτερικής καύσης είτε ένα δεύτερο βοηθητικό θερμικό κύκλο που προσφέρει την απαιτούμενη θερμική ενέργεια στο αέριο του κύριου κύκλου με την βοήθεια ενός εναλλάκτη θερμότητας αερίου – αερίου. Η ανώτατη επιτρεπτή θερμοκρασία λειτουργίας των επιφανειών του θερμαντήρα περιορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία του κύριου θερμοδυναμικού κύκλου αεριοστρόβιλου (TET).
- Προβλήματα με διαρροές στο κλειστό κύκλωμα υψηλής πίεσης.

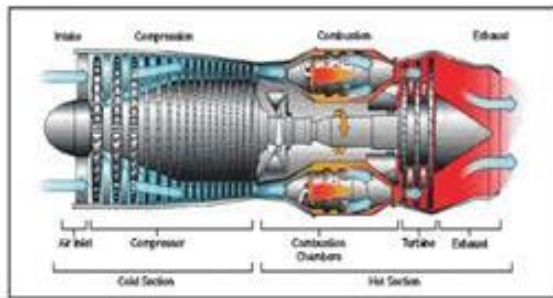
### 3.3) ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΓΙΑ ΕΠΙΒΑΤΙΓΟ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ

Γενικά, ο συμπιεστής αποτελεί το ψυχρό τμήμα του κινητήρα και ο θάλαμος καύσης με το στρόβιλο, το θερμό τμήμα. Μία μάζα αέρα οδηγείται στο θάλαμο καύσης. Αναμιγνύεται με εγχεόμενο καύσιμο και επιτυγχάνεται καύση. Τα παραγόμενα θερμά καυσαέρια εκτονώνονται και οδηγούνται προς την εξαγωγή. Στη διαδρομή αυτήν προκαλούν την περιστροφή του στροβίλου 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 αεροστροβίλων 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.

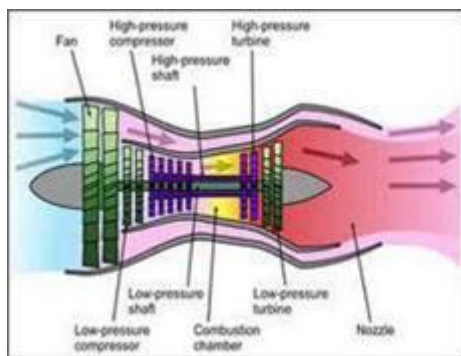
Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας ώσης. Όμως, παρουσιάζεται ο περιορισμός της αντοχής των υλικών κατασκευής του θαλάμου καύσης και του στροβίλου. Ο αεριοστρόβιλος κινητήρας διακρίνεται σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους. Όλοι αποτελούνται από τα βασικά μέρη που είδαμε παραπάνω. Οι διαφορές τους βρίσκονται στον τύπο και τη διάταξη των βασικών αυτών μερών. Στο ( σχήμα 3.2 ) διακρίνονται αεριοστρόβιλοι με διαφορετικές διατάξεις των βασικών τους μερών.



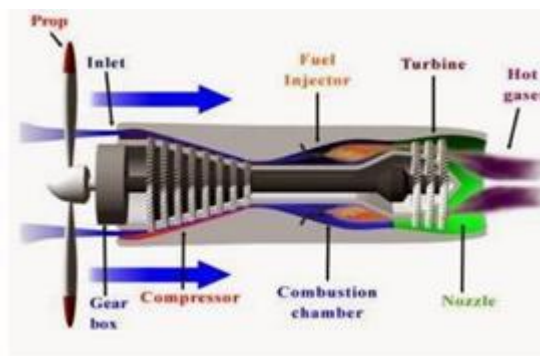
Ελικοστρόβιλος δύο αξόνων με φυγοκεντρικούς συμπίεστές



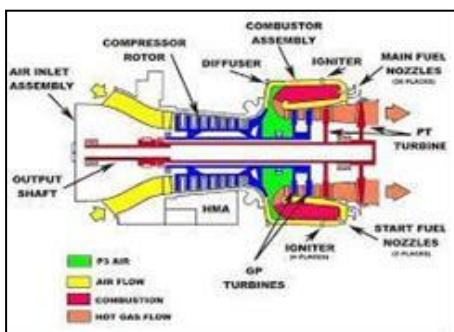
Στροβιλοανεμιστήρας τριών αξόνων



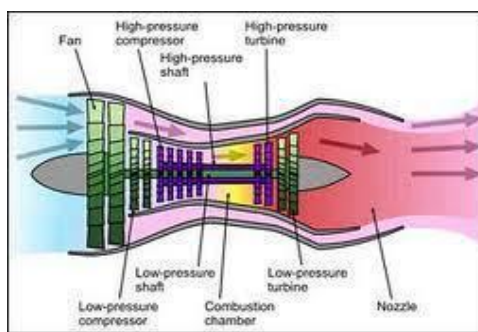
Στροβιλοανεμιστήρας δύο αξόνων



Ελικοστρόβιλος δύο αξόνων με αξονικούς συμπίεστές



Αξονοστρόβιλος τριών αξόνων με αξονικό φυγοκεντρικό συμπίεστή



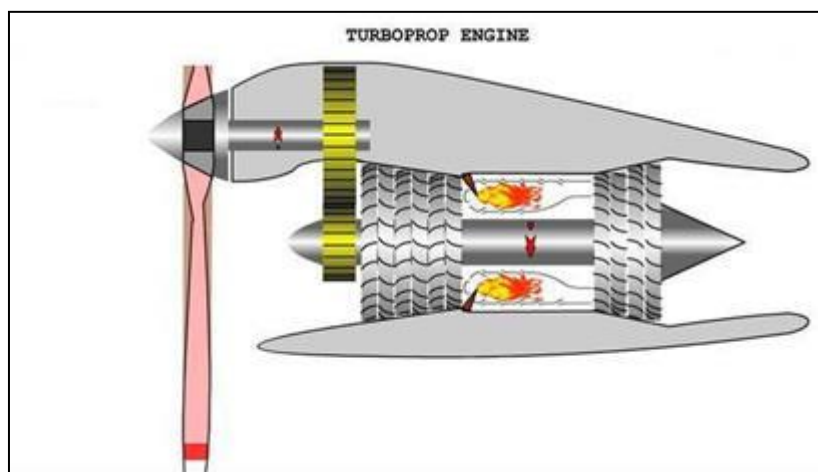
Στροβιλοαντιδραστήρας ενός άξονα και με αξονικό συμπίεστή

Σχήμα 3.2: Διάφοροι τύποι αεροστρόβιλων

### A) Ελικοστρόβιλος (turboprop engine)

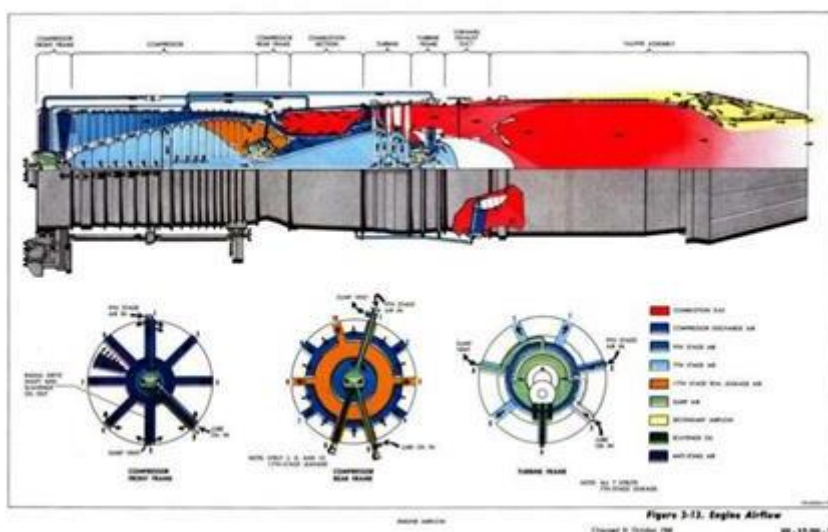
Ο κινητήρας αυτός (σχήμα 3.3) έχει ευρεία εφαρμογή. Ουσιαστικά, είναι όμοιος με το στροβιλοαντιδραστήρα με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται ένα σύστημα γρναζιών ως μειωτήρας στροφών για τη μετάδοση κίνησης σε έναν έλικα. Στον ελικοστρόβιλο, σχεδόν όλη η ενέργεια των καυσαερίων χρησιμοποιείται για την κίνηση του έλικα. Για το λόγο αυτό, η προσφερόμενη από τα καυσαέρια ώση είναι πολύ μικρή.

Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια των καυσαερίων ενός ελικοστρόβιλου κινητήρα αποδίδεται- σε ποσοστό έως 90%-ως ισχύς στον άξονα που κινεί τον έλικα. Μόνο το υπόλοιπο 10% της ενέργειας των καυσαερίων παρέχεται υπό μορφή ώσης.



Σχήμα 3.3: Ελικοστρόβιλος

### B) Στροβιλοαντιδραστήρας (turbojet engine)



Σχήμα 3.4: Στροβιλοαντιδραστήρας

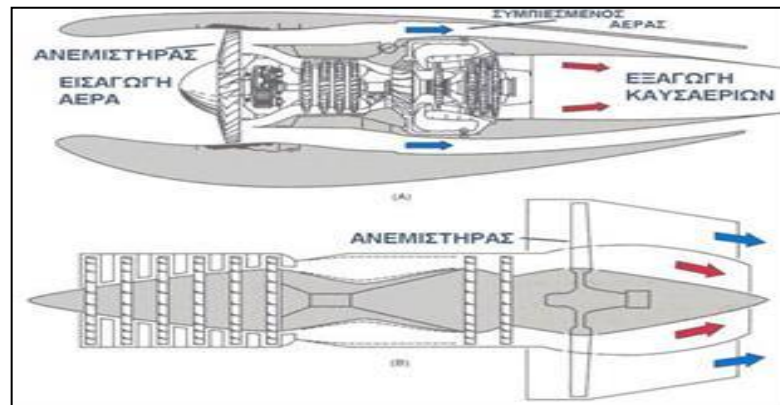
Ο Στροβιλοαντιδραστήρας (σχήμα 3.4) αποτελεί την απλούστερη μορφή αεριοστρόβιλου κινητήρα. Χρησιμοποιεί τη ροή των καυσαερίων που σχηματίζεται στο ακροφύσιο εξαγωγής ως το μοναδικό μέσο παραγωγής ώσης για την κίνηση του αεροσκάφους. Η παραγωγή ώσης επιτυγχάνεται με την επιτάχυνση μικρών, σχετικά, μαζών 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 750 km/h. Καθώς η απόδοση του έλικα που συνεργάζεται με τον ελικοφόρο κινητήρα μειώνεται σε ταχύτητες πτήσης άνω των 550 km/h, αναπτύχθηκαν νέοι τύποι αεριοστρόβιλων για την πιο αποτελεσματική λειτουργία σε αυτό το εύρος των ταχυτήτων πτήσης.

### **Γ) Στροβιλοανεμιστήρας (turbofan engine)**

Ο στροβιλοανεμιστήρας επιταχύνει μικρότερη μάζα 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 650 km/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 (fan)-μέσα στον κινητήρα.



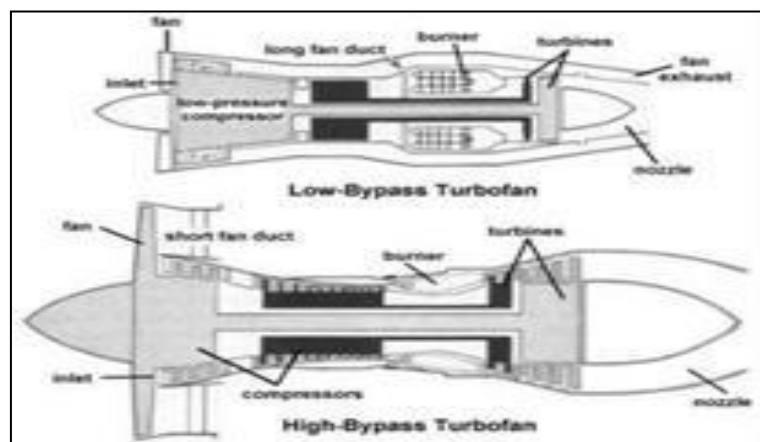
Ο ανεμιστήρας βρίσκεται στο μπροστινό ( σχήμα 3.5 Α) ή στο οπίσθιο τμήμα του κινητήρα ( σχήμα 3.5 Β).



**Σχήμα 3.5 Α, Β:** Θέσεις ανεμιστήρα σε κινητήρα

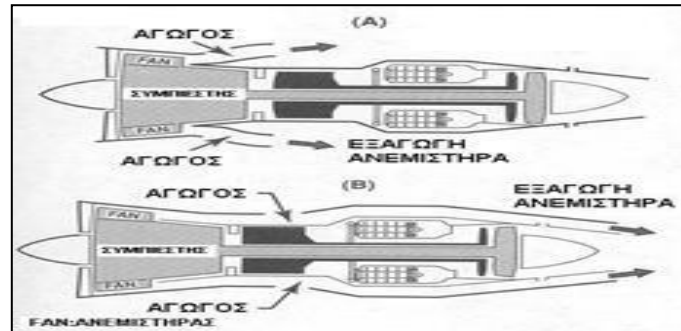
### Θέσεις του ανεμιστήρα στο στροβιλοανεμιστήρα

Η ροή του αέρα εισαγωγής διασπάται σε δύο ρεύματα: το θερμό και το ψυχρό. Το πρώτο ρεύμα διέρχεται μέσα από τον κινητήρα, 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 10:12. Ανάλογα με τις τιμές του λόγου, ένας στροβιλοανεμιστήρας χαρακτηρίζεται ως υψηλού ή χαμηλού λόγου παράκαμψης. Χαρακτηριστικά δείγματα φαίνονται στο (σχήμα 3.6) αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.6:** Στροβιλοανεμιστήρας υψηλού και χαμηλού λόγου παράκαμψης

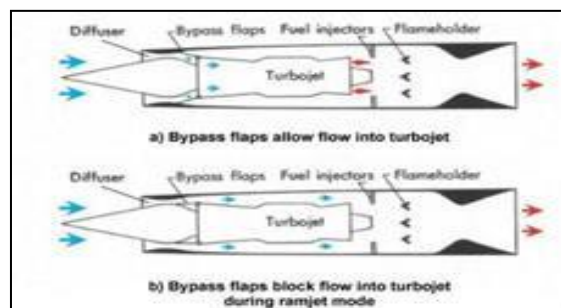
Η έξοδος του αέρα παράκαμψης πραγματοποιείται από ειδικό αγωγό (duct) που βρίσκεται περιφερειακά του κύριου σώματος του κινητήρα. Το μήκος του αγωγού είναι μικρό-συνήθως στην περίπτωση χρήσης ανεμιστήρα μεγάλης διαμέτρου ή μεγάλο- ο αγωγός εκτείνεται σε όλο το μήκος του κινητήρα- κατά περίπτωση (σχήμα 3.7). 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. Στις μέρες μας οι στροβιλοανεμιστήρες θεωρούνται ως οι πιο αξιόλογοι τύποι κινητήρων αεριώθησης για μεγάλα αεροσκάφη.



Σχήμα 3.7: Έξοδος αέρα παράκαμψης από αγωγό (Α) μικρού και (Β) μεγάλου μήκους

#### Δ) Στροβιλο-αθόδουλος (turboramjet)

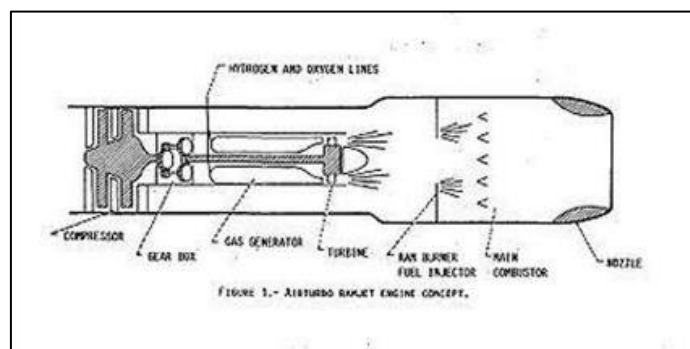
Αποτελεί συνδυασμό του στροβιλοαντιδραστήρα και του αθόδουλου. Ο κινητήρας διαθέτει αγωγό μεταβλητού ανοίγματος εισαγωγής, μετακαυστήρα και ακροφύσιο μεταβλητής διατομής, εκτός από τη διάταξη του στροβιλοαντιδραστήρα (σχήμα 3.7). Κατά την απογείωση και την προσγείωση ο κινητήρας λειτουργεί ως στροβιλοαντιδραστήρας 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 3.7: Στροβιλο-αθόδουλος

## Ε) 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 3.8). 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.

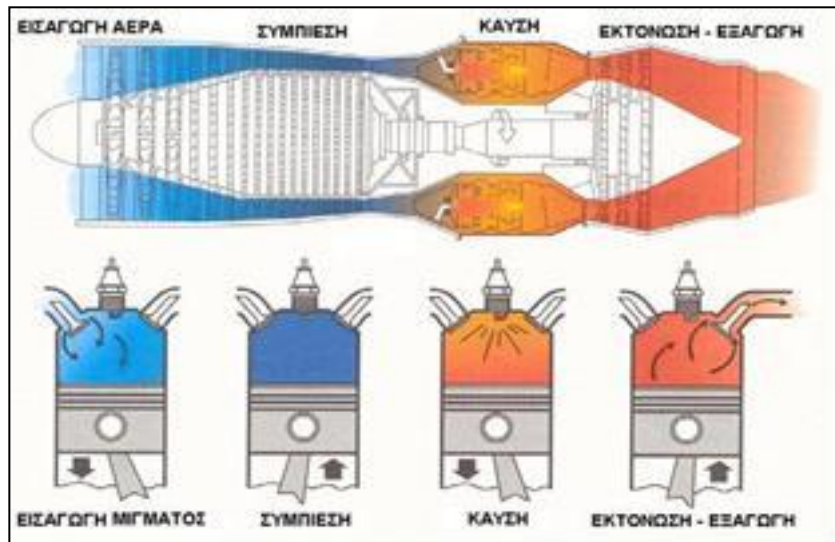


Σχήμα 3.8: Πυραυλοστρόβιλος

## 3.4) ΚΥΚΛΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

### Γενικά

Ο αεριοστρόβιλος 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 αεριοστρόβιλος 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 αεριοστρόβιλος κινητήρας παράγει την προωθητική δύναμη και τη χρησιμοποιεί κατευθείαν. Οι φάσεις λειτουργίας είναι οι ίδιες: εισαγωγή, συμπίεση, καύση, εκτόνωση-εξαγωγή, όπως φαίνεται στο (σχήμα 3.9).



**Σχήμα 3.9 :** Σύγκριση φάσεων λειτουργίας αεριοστρόβιλου και εμβολοφόρου κινητήρα

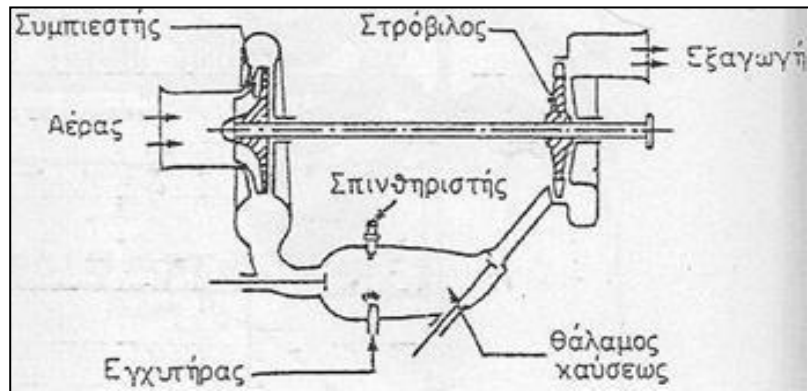
Η σημαντική διαφορά είναι ότι στον εμβολοφόρο κινητήρα οι φάσεις πραγματοποιούνται διαδοχικά, η μία μετά την άλλη, επειδή το έμβολο συμμετέχει σε όλες. Αντίθετα, στον αεριοστρόβιλο, οι ίδιες φάσεις λειτουργίας πραγματοποιούνται ταυτόχρονα και συνεχώς, από ένα εξάρτημα αποκλειστικά η κάθε μία. Με τον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

### Θεωρητικός κύκλος λειτουργίας

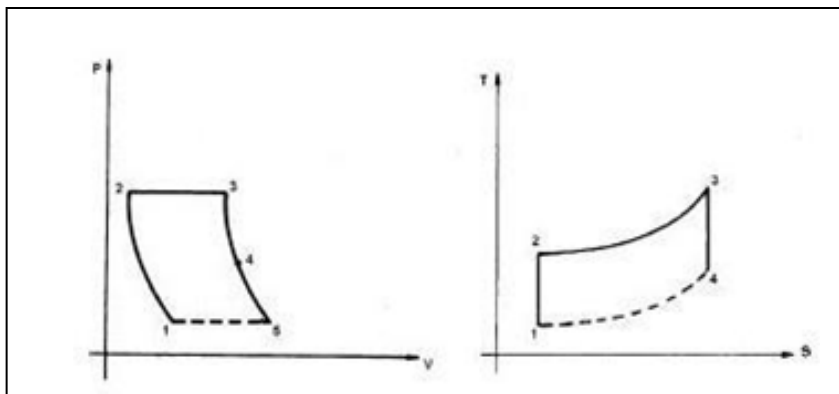
Ο κύκλος λειτουργίας του αεριοστρόβιλου κινητήρα στηρίζεται στο θερμοδυναμικό κύκλο του Μπράιτον (Brayton). Η ανάλυση των διεργασιών του κύκλου στηρίζεται στον 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> νόμο της θερμοδυναμικής. Οι υποθέσεις πάνω στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία του ιδανικού κύκλου είναι οι εξής:

- 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 3.10), ας εξετάσουμε με περισσότερη λεπτομέρεια τις φάσεις του θεωρητικού κύκλου λειτουργίας του (όπως φαίνεται στο (σχήμα 3.11)).



**Σχήμα 3.10:** Τα μέρη του αεριοστρόβιλου κινητήρα



**Σχήμα 3.11:** Το διάγραμμα του κύκλου Brayton σε συντεταγμένες T-S και P-V

- 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 στο 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 (1-2-3-4-1, σχήμα 3.11) 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 παράγεται ως αποτέλεσμα εκτόνωσης σε ακροφύσιο πρόωσης (σχήμα 3.11, γραμμή 3-4 διάγραμμα T-S).

Επίσης, στον υπολογισμό της απόδοσης του αεροπορικού αεριοστρόβιλου πρέπει να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της ταχύτητας του αεροσκάφους καθώς και το ύψος πτήσης.

### 3.4.1) Κριτήρια λειτουργικής απόδοσης αεριοστρόβιλων

Θεωρώντας ότι η ποσότητα του καυσίμου στη σύνθεση των καυσαερίων είναι αμελητέα και συμβολίζοντας ως:  $m$  τη παροχή της μάζας αέρα,  $V_a$  την ταχύτητα του αεροσκάφους  $V_j$  την ταχύτητα απόρριψης των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα και  $F$  την παραγόμενη (καθαρή) ώση τότε για την τελευταία ισχύει:

$$F = (\Delta m / \Delta t) (V_j - V_a) \quad (2-1)$$

Στην περίπτωση όπου η πίεση των καυσαερίων ( $P_j$ ) κατά την έξοδό του από το ακροφύσιο εξαγωγής είναι μεγαλύτερη από την πίεση του ρεύματος αέρα στην εισαγωγή ( $P_a$ ), τότε θα υπάρξει επιπρόσθετη ώση πίεσης στην επιφάνεια εξόδου των

καυσαερίων  $A_j$ . Η ολική ώση, λοιπόν, θα είναι ίση με το άθροισμα της ώσης ορμής και της ώσης πίεσης:

$$F = (\Delta m / \Delta t) (V_j - V_a) + A_j(P_j - P_a) \quad (2-2)$$

Συνέχεια, θα θεωρήσουμε ότι η εκτόνωση των καυσαερίων είναι τέλεια ( $P_j = P_a$ ), οπότε και θα ισχύει μόνο η εξίσωση (2-1). Από αυτή φαίνεται ότι η απαιτούμενη ώση παρέχεται από έναν κινητήρα ο οποίος θα λειτουργεί με υψηλή ταχύτητα απόρριψης καυσαερίων και χαμηλή παροχή αέρα ή το αντίθετο. Η απόδοση ώσης (ή πρόωσης) ηρ ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος ώσης προς το άθροισμα της ισχύος ώσης και της μη χρησιμοποιηθείσας κινητικής ενέργειας καυσαερίων:

$$\begin{aligned} n_p &= F V_a / 0.5(\Delta m / \Delta t)(V_j^2 - V_a^2) \\ &= 2V / (V_a + V_j) \end{aligned} \quad (2-3)$$

Η μέγιστη απόδοση ώσης εξασφαλίζεται στην περίπτωση όπου οι δύο ταχύτητες είναι ίσες, αν και τότε η παραγόμενη ώση θα είναι μηδενική. Για το λόγο αυτόν, οι δύο ταχύτητες δεν πρέπει να λαμβάνουν τιμές πολύ διαφορετικές, με την ταχύτητα των καυσαερίων πάντοτε μεγαλύτερη. Σημειώστε ότι η απόδοση ώσης εκφράζει το μέτρο της αποτελεσματικότητας του ακροφυσίου εξαγωγής (που χρησιμοποιείται για την πρόωση του αεροσκάφους) και δεν έχει σχέση με την απόδοση μετατροπής ενέργειας  $n_e$ . Αυτή ορίζεται ως ο λόγος της κινητικής ενέργειας από τη διαφορά των ταχυτήτων καυσαερίων και αέρα εισαγωγής προς το γινόμενο της παροχής καυσίμου επί την θερμογόνο δύναμη του καυσίμου. Η απόδοση μετατροπής ενέργειας είναι μέτρο του χρήσιμου έργου που παράγεται από τον κινητήρα για να υπερνικηθούν οι αντιστάσεις κατά την πτήση.

Η ολική απόδοση  $n_o$  ορίζεται ως ο λόγος του χρήσιμου έργου προς την ενέργεια που εκλύεται από το παροχετευμένο καύσιμο. Ισχύει:

$$N_v = n_p n_e \quad (2-4)$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνει κανείς ότι η ολική απόδοση είναι πολύ στενά συνδεδεμένη με την ταχύτητα του εισερχόμενου αέρα, δηλαδή την ταχύτητα πτήσης του αεροσκάφους. Η έννοια της ολικής απόδοσης μπορεί να συνδεθεί με τη γνωστή μας ειδική κατανάλωση καυσίμου s.f.c. (ανά μονάδα ώσης):

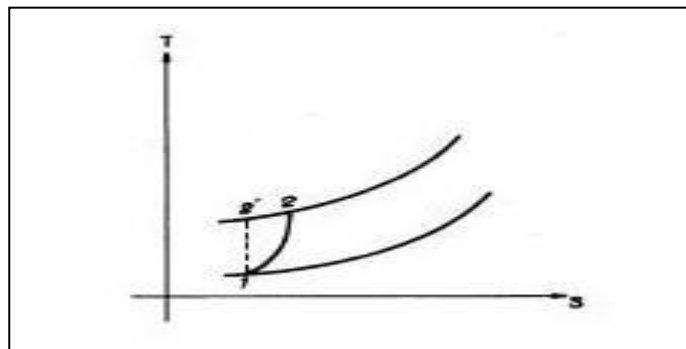
$$N_v = V_a / \text{s.f.c.} \quad (2-5)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για δεδομένο καύσιμο.

### 3.4.2) Πραγματικός κύκλος λειτουργίας

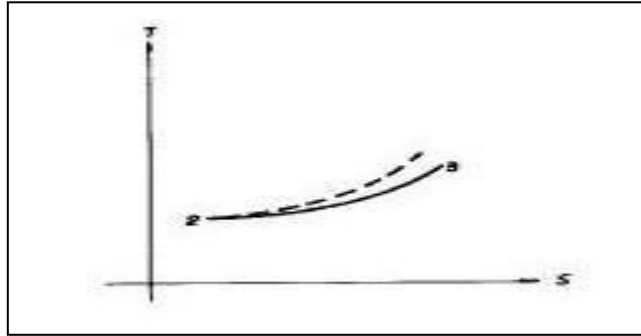
Οι προϋποθέσεις λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου ώσης (αλλά και ισχύος) σύμφωνα με το θεωρητικό κύκλο του Μπράιτον δεν μπορούν να εκπληρωθούν. Οι λόγοι είναι οι ακόλουθοι:

- Τα παρελκόμενα συστήματα του κινητήρα (αντλία ελαίου, αντλία καυσίμου, γεννήτρια ρεύματος κ.λπ.) 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 στο 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. Έτσι, η θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα-Σημείο 2, είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται θεωρητικά-Σημείο 2' (σχήμα 3.12). Η απώλεια αυτής 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 3.12: Απώλειες συμπιεστή στο διάγραμμα Brayton

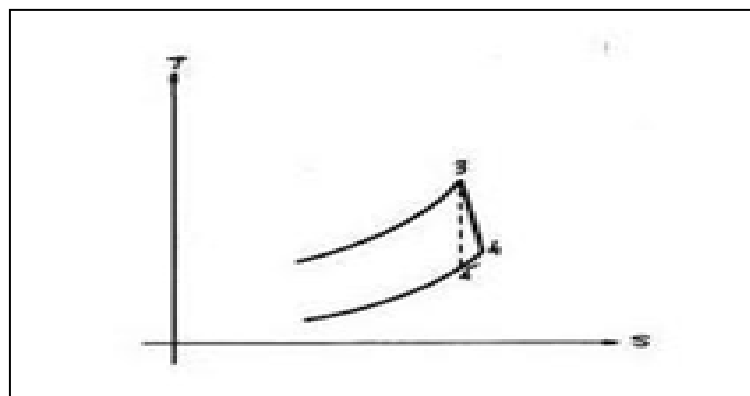
- Απώλειες στο θάλαμο καύσης: κατά μήκος του θαλάμου καύσης παρουσιάζεται πτώση της πίεσης των καυσαερίων της τάξης του 10% (σχήμα 3.13, γραμμή 2-3). Η πτώση αυτή οφείλεται στις διατάξεις που τοποθετούνται στο θάλαμο καύσης ώστε να επιτύχουν το βέλτιστο βαθμό ανάμιξης του εισερχόμενου αέρα με το καύσιμο.



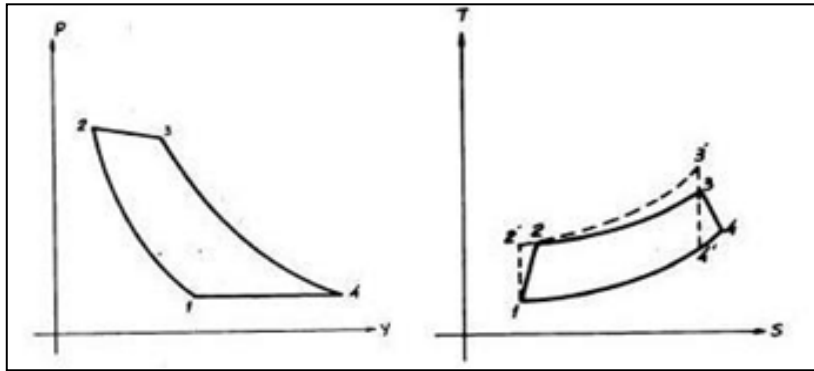
**Σχήμα 3.13:** Οι απώλειες στο θάλαμο καύσης όπως φαίνονται στο διάγραμμα Brayton

- 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 3.14). 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 3.15) (τα σημεία που τονίζονται αντιστοιχούν στη θεωρητική λειτουργία), αν συνυπολογίσουμε τις προαναφερόμενες απώλειες και τις αλλαγές που επιφέρουν στο θεωρητικό κύκλο λειτουργίας.



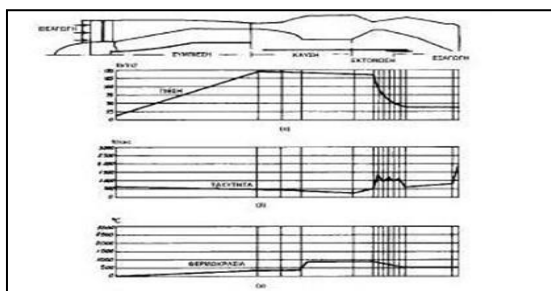
**Σχήμα 3.14:** Απώλειες κατά την εκτόνωση



**Σχήμα 3.15:** Το διάγραμμα πραγματικής λειτουργίας του Brayton σε συντεταγμένες  $p-v$  και  $T-s$

Θα κλείσουμε την παρουσίαση του κύκλου λειτουργίας του αεριοστρόβιλου 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, εκχύνεται 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  $1.800^{\circ}\text{C}$ . Στη συνέχεια, όμως, περίσσεια αέρα αναμιγνύεται με τα και η θερμοκρασία μειώνεται στους  $1.000^{\circ}\text{C}$  περίπου. Μετά την έξοδο 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 ελικοστρόβιλο κινητήρα). Στη συνέχεια, τα καυσαέρια εκτονώνονται και στο ακροφύσιο εξαγωγής, όπου λαμβάνουν ταχύτητες της τάξης των  $1.400\text{mph}$ .

Στο (σχήμα 3.16) παρουσιάζονται ενδεικτικές μεταβολές των πιέσεων, ταχυτήτων και θερμοκρασιών που λαμβάνουν το ρεύμα του αέρα και των καυσαερίων στις διάφορες φάσεις της λειτουργίας του αεριοστρόβιλου.



**Σχήμα 3.16:** Ενδεικτικές μεταβολές πίεσης, ταχύτητας και θερμοκρασίας στο εσωτερικό του αεριοστρόβιλου 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  $100\text{HP}$  περίπου. Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε κάθε τμήμα ενός αεριοστρόβιλου κινητήρα.

### 3.4.3 ) Σύστημα εισαγωγής αέρα

#### Γενικά

Η εισαγωγή του αέρα, που πραγματοποιείται από ειδικό αεραγωγό εισαγωγής (air inlet duct), ουσιαστικά αποτελεί τμήμα του αεροσκάφους και όχι του κινητήρα. Είναι από τα πιο σημαντικά τμήματα του κινητήρα. Η σημασία της είναι πολύ μεγαλύτερη σε αεροπλάνα μεγάλων ταχυτήτων. Η εισαγωγή αέρα θα πρέπει να έχει την δυνατόν μικρότερη οπισθέλκουσα στην ροή. Επίσης θα πρέπει να εξασφαλίζει ομοιόμορφη ροή αέρα, προς τον συμπιεστή και να αναλαμβάνει όλη την ενέργεια του αέρα χωρίς καμία απώλεια πίεσης. Απώλειες πίεσης μπορεί να δημιουργηθούν και λόγω τριβής στα τοιχώματα της εισαγωγής και λόγω κακής αεροδυναμικής σχεδίασης της εισαγωγής. Το σχήμα και η θέση της εισαγωγής έχουν σχέση με την σχεδίαση του αεροπλάνου, τον αριθμό των κινητήρων κ.λ.π. Καθώς, όμως, η παροχή του αέρα είναι πολύ σημαντική για τη λειτουργία του αεριοστρόβιλου, 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 πίεσης. 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.). Σε ορισμένες εισαγωγές τοποθετούνται οδηγία 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).

#### Είδη αεραγωγών εισαγωγής

Στην περίπτωση αεροσκαφών, συνήθως μεταφορικών, που φέρουν τους κινητήρες κάτω από τα πτερύγια ή στα πλευρά της ατράκτου, η εισαγωγή του αέρα είναι τμήμα του κινητήρα (σχήμα 3.17).



**Σχήμα 3.17:** Το τμήμα εισαγωγής αέρα θεωρείται μέρος του κινητήρα όταν αυτός τοποθετείται στα πτερύγια του αεροσκάφους



Στα μαχητικά αεροσκάφη, συνήθως ο κινητήρας τοποθετείται μέσα στην άτρακτο, με ανάλογη διαμόρφωση του αεραγωγού εισαγωγής (σχήμα 3.18). Γενικότερα, οι αεραγωγοί εισαγωγής για τους αεριοστρόβιλους κινητήρες διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Αεραγωγός ως τμήμα της ατράκτου του αεροσκάφους, στον ίδιο άξονα με το κινητήρα (σχήμα 3.18).



**Σχήμα 3.18:** Αεραγωγός εισαγωγής στην άτρακτο του αεροσκάφους

- Διαιρετή εισαγωγή. Αποτελείται από δύο εισαγωγές στα πλευρά της ατράκτου ή στις ρίζες των πτερυγίων που ενώνονται σε κοινή εισαγωγή στην περίπτωση μονοκινητήριου αεροσκάφους (σχήμα 3.19).



**Σχήμα 3.19:** Διαιρετή εισαγωγή

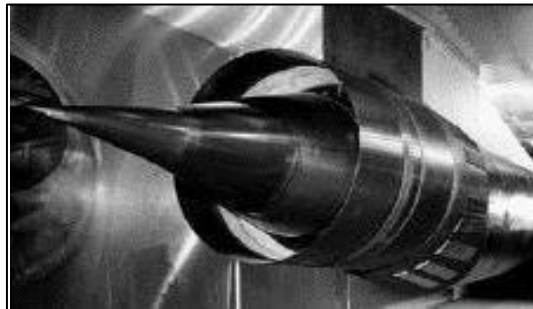
- Υποηχητική εισαγωγή. Χρησιμοποιείται σε κινητήρες που κινούν αεροσκάφη υψηλών υποηχητικών ταχυτήτων. Η διάμετρος του αεραγωγού αυξάνεται καθώς αυξάνεται το μήκος του, δίνοντάς του τη μορφή διαχύτη (σχήμα 3.20). Η μορφή αυτή βοηθά τον αεραγωγό να λειτουργεί ως σωλήνας Βεντούρι. Η ταχύτητα του αέρα μειώνεται με παράλληλη αύξηση της πίεσης. Γενικά, η ταχύτητα του αέρα ακριβώς πριν το συμπιεστή λαμβάνει τιμές 0,5 Mach περίπου.



**Σχήμα 3.20:** Υποηχητική εισαγωγή

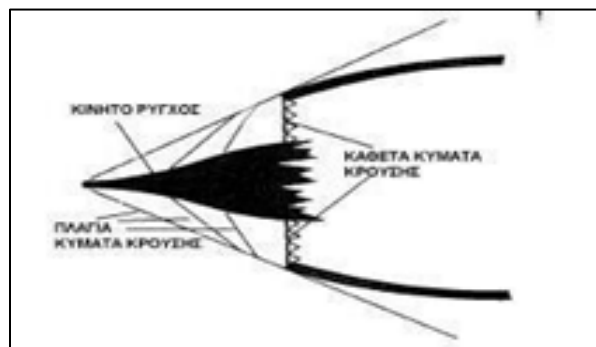
- Υπερηχητική εισαγωγή. Ο αεραγωγός σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να έχει τη μορφή συγκλίνοντος- αποκλίνοντος αγωγού (σχήμα 3.20). Στο συγκλίνον τμήμα, η υπερηχητική ροή του εισερχόμενου αέρα επιβραδύνεται σε διηχητική και στη συνέχεια και στη συνέχεια, το αποκλίνον τμήμα λειτουργεί όπως είδαμε στην 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 (σχήμα 3.21). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται εξωτερικά συμπίεση της ροής, λόγω της ανάπτυξης πλαγίων κυμάτων κρούσης.



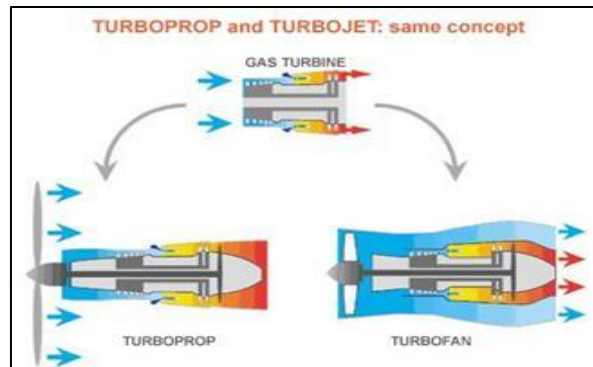
**Σχήμα 3.21:** Υπερηχητική εισαγωγής

- Εισαγωγές μεταβλητής διατομής. Χρησιμοποιούνται όπως είδαμε παραπάνω σε υπερηχητικά αεροσκάφη (σχήμα 3.22). Υπάρχουν και υποηχητικές εφαρμογές,



**Σχήμα 3.22:** Εισαγωγή εξωτερικής συμπίεσης και μεταβλητής διατομής

- Αεραγωγοί ελικοστρόβιλων κινητήρων. Αυτοί έχουν ειδικό σχήμα λόγω της ύπαρξης του έλικα του κινητήρα. Συνηθισμένοι τύποι είναι αυτοί που φαίνονται στο (σχήμα 3.23).



**Σχήμα 3.23:** Μορφές αεραγωγών ελικοστρόβιλων κινητήρων

### 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 ελικοπτερων. 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).

### 3.4.4) Συμπιεστές

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.

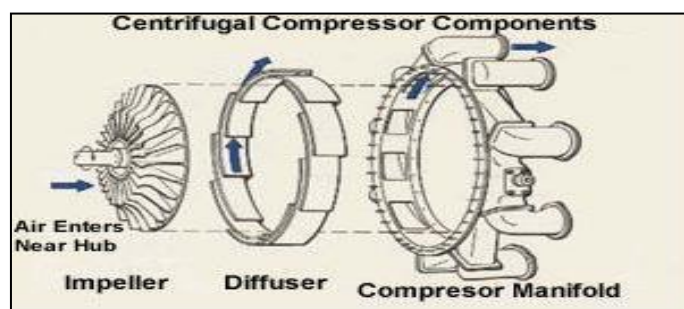
Η ποσότητα του αέρα που συμπιέζεται καθώς και η αύξηση της πίεσης εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Όσο αυτή αυξάνεται, επιτυγχάνεται και μεγαλύτερη συμπίεση. Βέβαια, η αύξηση της πίεσης εξαρτάται και από τη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής. Όταν αυτή λαμβάνει χαμηλές τιμές, τότε η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

### Φυγοκεντρικοί συμπιεστές

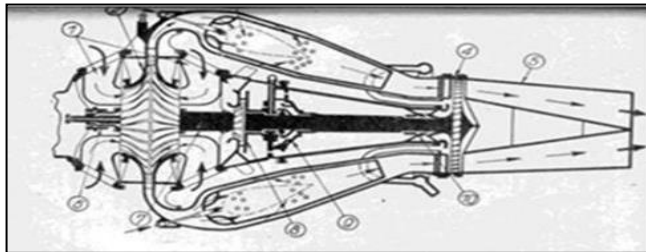
Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής (centrifugal compressor), ή συμπιεστής φυγοκεντρικής ροής, χρησιμοποιήθηκε στους πρώτους κινητήρες αεριώθησης. Αποτελείται από τρία μέρη: τον πτερυγιοφόρο δίσκο (στροφείο ή ρότορας, impeller), το διαχύτη (diffuser) και, σε ορισμένες περιπτώσεις, την πολλαπλή σωλήνωση (manifold) εξαγωγής του συμπιεσμένου αέρα στο επόμενο τμήμα του κινητήρα (σχήμα 3.24).



**Σχήμα 3.24:** Τα μέρη του φυγοκεντρικού συμπιεστή

Το στροφείο 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 στροφείου. Με αυτήν την κίνηση επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της ταχύτητας του αέρα και μικρή αύξηση στην (στατική) πίεση, λόγω της διόδου από τα πτερύγια του στροφείου. Καθώς αφήνει το στροφείο, 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 τριβές κύλισης (σφαιρικούς ή / και κυλινδρικούς). Σε αρκετές περιπτώσεις αποτελείται από δύο τμήματα που ενώνονται με ειδικό σύνδεσμο, κατάλληλο για εύκολη αποσυναρμολόγηση. Στο (σχήμα 3.25) φαίνεται η τομή αεριοστρόβιλου κινητήρα με φυγοκεντρικό συμπιεστή.



**Σχήμα 3.25:** 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.

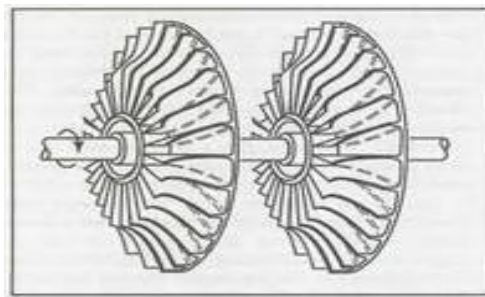
- **Το στροφείο:** Αποτελείται από σφυρήλατο δίσκο με ολόσωμα, ακτινικά πτερύγια στη μία (απλής εισόδου, single entry) ή και τις δύο πλευρές του (διπλής εισόδου, double entry). Ή και στις δύο πλευρές του (διπλής εισόδου, double entry). Στο (σχήμα 3.26) φαίνεται η τυπική κατασκευή των φυγοκεντρικών συμπιεστών απλής και διπλής εξόδου. Για να διευκολυνθεί η αλλαγή της ροής από την αξονική στην ακτινική διεύθυνση, τα πτερύγια στο κέντρο του στροφείου έχουν κλίση προς την κατεύθυνση της περιστροφής.



**Σχήμα 3.26:** Στροφέιο φυγοκεντρικού συμπιεστή (α) και (β) διπλής εισόδου

Ως υλικό κατασκευής χρησιμοποιείται κράμα αλουμινίου αλλά και τιτάνιο, σε σύγχρονες εφαρμογές. Το τμήμα εισαγωγής μπορεί να είναι και χαλύβδινο. Η χρήση φυγοκεντρικού συμπιεστή διπλής εισόδου εξασφαλίζει ταχύτητες στα ακροπτερύγια του στροφείου που δεν ξεπερνούν την ταχύτητα του ήχου. Παράλληλα, επιτρέπει τη δίοδο μεγαλύτερης ποσότητας αέρα από το στροφέιο απλής εισόδου και διαμορφώνει μικρότερη μετωπική επιφάνεια. Όμως, η ροή του αέρα στην οπίσθια πλευρά του κάποιες φορές είναι ασταθής ενώ παρατηρείται και αύξηση της θερμοκρασίας σε μεγαλύτερο ποσοστό από το στροφέιο απλής εισόδου. Σε κάποιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα στροφέια απλής εισόδου.

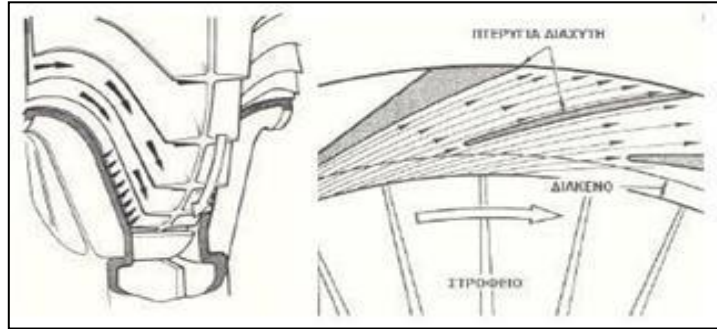
Έτσι, επιτυγχάνεται συμπίεση μεγαλύτερης μάζας αέρα. Το πλεονέκτημα, όμως, χάνεται από την απώλεια ενέργειας που παρατηρείται κατά τη μετάβαση του αέρα από το ένα στροφέιο στο άλλο, ενώ τίθεται και θέμα αυξημένου βάρους. Πρακτικά, σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται δύο στροφέια, όπως φαίνεται στο (σχήμα 3.27) (διβάθμιος φυγοκεντρικός συμπιεστής, ή δύο βαθμίδων).



**Σχήμα 3.27:** Φυγοκεντρικού συμπιεστής δύο βαθμίδων

- **Οι διαχύτες.** Αποτελούν ένα σώμα με το περίβλημα του στροφείου ή ξεχωριστό τμήμα. Και στις δύο περιπτώσεις οι διαχύτες διαμορφώνονται από αριθμό πτερυγίων τοποθετημένων εφαπτομενικά ως προς την περιφέρεια του δίσκου. Η διάταξή τους είναι τέτοια ώστε να σχηματίζουν αποκλίνοντες αγωγούς και έτσι να επιτυγχάνεται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε δυναμική (αύξηση της πίεσης). Η απόσταση μεταξύ του στροφείου και των διαχυτών, που ονομάζεται διάκενο, είναι πολύ σημαντική για την ομαλή λειτουργία του κινητήρα (σχήμα 3.28).





**Σχήμα 3.28:** Το διάκενο μεταξύ του στροφείου και του διαχύτη

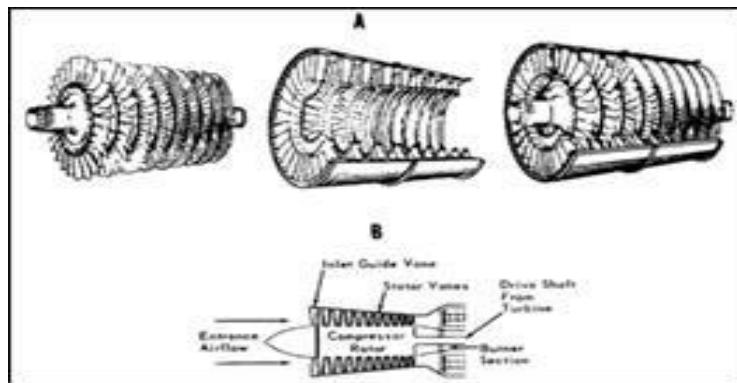
Αν η τιμή είναι μεγαλύτερη από αυτήν που προβλέπει ο κατασκευαστής, τότε θα υπάρξει υπερβολική διαρροή (απώλεια) αέρα από το στροφέιο. Αντίθετα, αν το διάκενο είναι μικρότερο από την φυσιολογική του τιμή, υπάρχει κίνδυνος να δημιουργηθεί ασταθής ροή και κραδασμοί. Και αυτό γιατί, καθώς αυξάνεται η πίεση στις ακμές των διαχυτών, τα διερχόμενα από τα σημεία αυτά πτερύγια του στροφείου δέχονται ωθήσεις.

Όταν το διάκενο είναι μικρό, οι ωθήσεις αυτές γίνονται αισθητές ως κραδασμοί. Μάλιστα, αν η συχνότητά τους γίνει ίση με την ιδιοσυχνότητα των πτερυγίων, δημιουργούνται φαινόμενα συντονισμού με επακόλουθη εμφάνιση ρωγμών στα πτερύγια.

### 3.4.5) Αξονικοί συμπιεστές

#### Γενικά

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 στροφέιο (spindle) πάνω στο οποίο είναι προσαρμοσμένα, με κατάλληλο τρόπο, τα κινητά πτερύγια (blades), όπως φαίνεται στο (σχήμα 3.29). Ο στάτορας είναι συνήθως διαιρεμένος σε δύο ημικυκλικά τμήματα στην εσωτερική περιφέρεια των οποίων προσαρμόζονται τα σταθερά πτερύγια (vanes). 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.

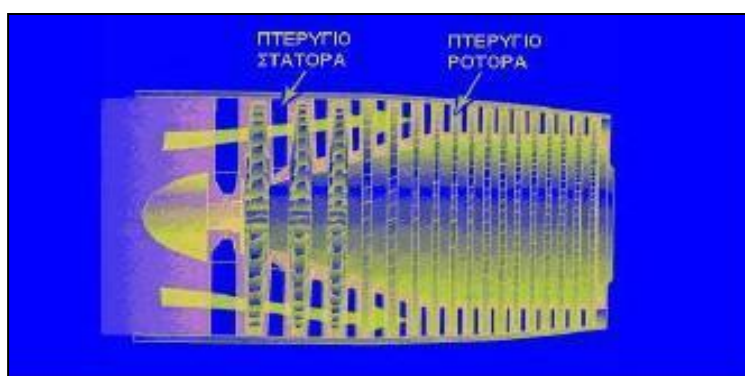


**Σχήμα 3.29:** Τα κινητά και τα σταθερά πτερύγια του αξονικού συμπιεστή

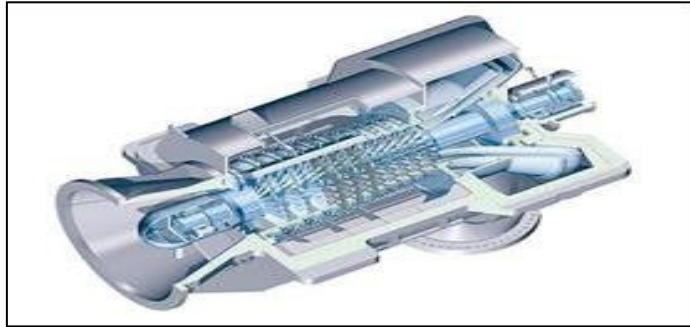
Τα κινητά και τα σταθερά πτερύγια έχουν την αεροδυναμική μορφή της πτέρυγας ή του έλικα ενός αεροσκάφους. Για το λόγο αυτόν, η λειτουργία και η απόδοση τους βασίζεται σε αεροδυναμικές αρχές που διέπουν τις πτέρυγες των αεροσκαφών, με ορισμένες πρόσθετες λειτουργικές συνθήκες, όπως η επίδραση της περιστροφής 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 τη χαμηλή προς την υψηλή πίεση) δημιουργείται μία σταδιακή μείωση της διατομής ανάμεσα στο στροφείο 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 3.30). Η μείωση της διατομής επιτυγχάνεται με την εφαρμογή κωνικότητας στο περίβλημα ή και στο στροφείο.



**Σχήμα 3.30:** Μείωση δακτυλίου ροής κατά μήκος του αξονικού συμπιεστή



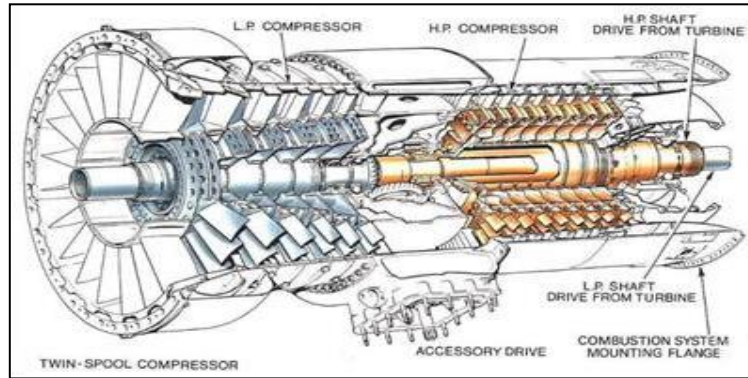
**Σχήμα 3.31:** Μονός αξονικός συμπιεστής (single spool)

Ο αξονικός συμπιεστής μονού 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 3.31).

Παρότι αυτός ο τύπος αξονικού συμπιεστή είναι σχετικά απλός στην κατασκευή του και όχι ιδιαίτερα υψηλού κόστους, παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα:

- 1) 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.
- 2) Εξαιτίας της μεγάλης αδρανειακής του μάζας, αντιδρά σχετικά αργά σε απότομες μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας (π.χ. εξαιτίας χειριστή).

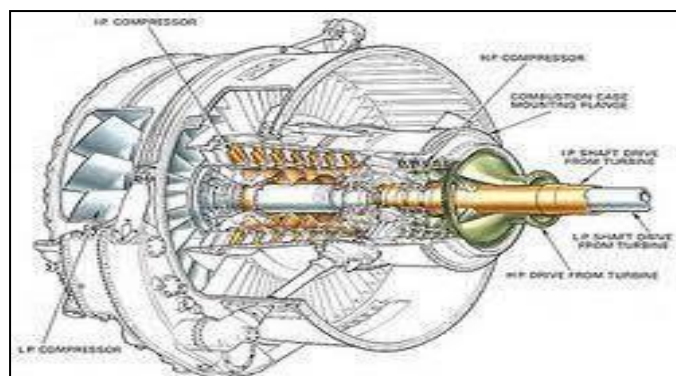
Ο τρόπος για να ξεπεραστούν τα προβλήματα αυτά ήταν η διαίρεση του συμπιεστή σε δύο ή τρία τμήματα. Σε ανάλογο αριθμό τμημάτων χωρίζεται και ο στρόβιλος. Τα τμήματα του συμπιεστή συνδέονται με τα αντίστοιχα του στροβίλου με άξονες στην ίδια ευθεία, που ο ένας βρίσκεται μέσα στον άλλον. Ο διαιρούμενος σε δύο τμήματα συμπιεστής ονομάζεται διπλού άξονα ή διπλού τυμπάνου (dual spool, twin spool compressor). Η διάταξη του φαίνεται στο (σχήμα 3.32). Το πρώτο τμήμα ονομάζεται συμπιεστής χαμηλής) ή συμπιεστής πίεσης (low pressure compressor  $N_1$ ). 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  $N_2$  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 3.32:** Διπλός αξονικός συμπιεστής (double spool compressor)

Σε αρκετούς στροβιλοανεμιστήρες κινητήρες ο συμπιεστής διαιρείται σε τρία τμήματα και ονομάζεται τριπλός (triple-spool compressor, (σχήμα 3.33). Στην περίπτωση αυτήν, 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.

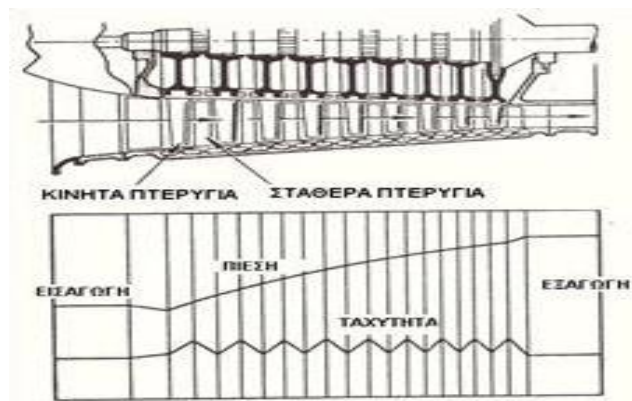
Οι δύο αυτοί συμπιεστές παίρνουν κίνηση από μονοβάθμιους στρόβιλους. Αυτός ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης έχει μεγάλες βαθμίδες και συμπιέζει το πού μεγαλύτερη μάζα αέρα από τους δύο άλλους. Το μεγάλο ποσοστό του αέρα (το ψυχρό ρεύμα) παρακάμπτει τους δύο άλλους συμπιεστές και εξέρχεται στην ατμόσφαιρα από ένα ιδιαίτερο δακτυλιοειδές ακροφύσιο. Η υπόλοιπη μάζα του αέρα (το θερμό ρεύμα) συμπιέζεται από τους άλλους συμπιεστές και οδηγείται στο θάλαμο καύσης.



**Σχήμα 3.33:** Ο τριπλός αξονικός συμπιεστής (triple-spool compressor)

## Αρχές λειτουργίας

Τα κινητά πτερύγια στρέφονται σε υψηλές ταχύτητες, από το στρόβιλο με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ο συμπιεστής, ώστε να εξασφαλίζεται μία συνεχής ροή αέρα. Ο αέρας επιταχύνεται από τα κινητά πτερύγια και οδηγείται στα σταθερά πτερύγια που ακολουθούν. Εκεί, μειώνεται η ταχύτητα και αυξάνεται η πίεση του λόγω διάχυσης μεταξύ των σταθερών και κινητών πτερυγίων. Οι αλλαγές στην πίεση και την ταχύτητα του αέρα κατά τη διαδρομή του μέσα από το συμπιεστή φαίνονται στο (σχήμα 3.34). Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, παρατηρείται μία σταδιακή αύξηση στη θερμοκρασία του αέρα.



**Σχήμα 3.34:** Οι μεταβολές των τιμών πίεσης και ταχύτητας κατά μήκος του συμπιεστή

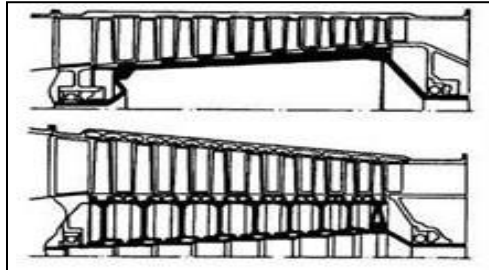
Τα πλεονεκτήματα που συγκεντρώνει ο αξονικός συμπιεστής (σε σύγκριση με το φυγοκεντρικό) είναι τα ακόλουθα:

- Ο λόγος συμπίεσης μπορεί να είναι μεγάλος αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν όσες βαθμίδες χρειάζονται για το στόχο αυτόν.
- Η εμπρόσθια επιφάνεια του κινητήρα είναι μικρότερη για δεδομένο όγκο εισερχόμενου αέρα, οπότε η αεροδυναμική αντίσταση είναι μικρότερη.
- Επιτυγχάνεται καλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου.

Βέβαια, από την άλλη μεριά, ο αξονικός συμπιεστής έχει ιδιαίτερα μεγάλο βάρος ενώ απαιτεί και μεγάλη κατανάλωση ισχύος κατά την εκκίνηση. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή συμπίεση που επιτυγχάνεται από κάθε μεμονωμένη βαθμίδα, οπότε απαιτείται η εγκατάσταση πολλών βαθμίδων για τη λειτουργία του. Ακόμη, ο αξονικός συμπιεστής παρουσιάζει ευπάθεια στην παγοποίηση και σε βλάβες από ξένα σώματα ενώ, γενικά είναι ευπαθής σε αστάθειες της ροής (όπως θα δούμε παρακάτω). Τέλος, παρουσιάζει ιδιαίτερα πολύπλοκες κατασκευαστές απαιτήσεις με αποτέλεσμα η τιμή του να είναι υψηλή.

## Στροφεία

Το στροφείο του αξονικού συμπιεστή είναι τύμπανο ή συναρμογή αριθμού δίσκων, όπως φαίνεται στο (σχήμα 3.35). Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και συνδυασμός των δύο τύπων.

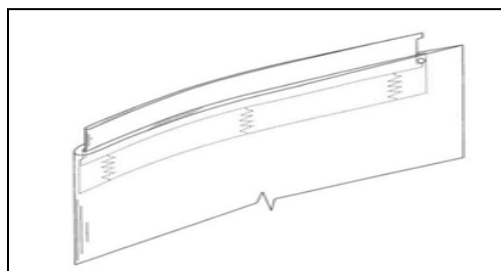


**Σχήμα 3.35:** Στροφείο αξονικού συμπιεστή (α) σε μορφή τυμπάνου, με κατάλληλη συναρμογή αριθμού δίσκων

Στην πρώτη περίπτωση, χρησιμοποιείται ένα σφυρήλατο τύμπανο πάνω στο οποίο ασφαρίζονται τα κινητά πτερύγια. Οι γειτονικές στη ρίζα του τυμπάνου περιοχές παραλαμβάνουν αξονικά και ακτινικά φορτία. Η συνολική ώση παραλαμβάνεται από το άκρο του τυμπάνου. Στη δεύτερη περίπτωση κάθε σειρά κινητών πτερυγίων ασφαρίζεται πάνω σε ένα δίσκο που προσαρμόζεται στον άξονα σύνδεσης, ε το στρόβιλο. Μεταξύ των δίσκων κάθε βαθμίδα τοποθετούνται δακτύλιοι απόστασης (spacers), οι οποίοι παραλαμβάνουν τα αξονικά φορτία. Τα ακτινικά φορτία παραλαμβάνουν από τους δίσκους, οι τελευταίοι από τους οποίους παραλαμβάνουν και τη συνολική ώση.

## Κινητά πτερύγια

Τα κινητά πτερύγια έχουν σχήμα αεροτομής (σχήμα 3.36) και μεταβλητή γωνία προσβολής (angle of incidence) ή συστροφή (twist) από τη ρίζα (root) προς το ακροπτερύγιο (tip). Η συστροφή επιτυγχάνει υψηλότερη πίεση στο ακροπτερύγιο ώστε να αντισταθμίζεται η διαφοροποίηση της ταχύτητας του πτερυγίου που προκαλείται από την ακτίνα καμπυλότητας του. Το μήκος των πτερυγίων μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση που έχουν κατά μήκος του συμπιεστή. Τα μπροστινά είναι μεγαλύτερα.



**Σχήμα 3.36:** Κινητό πτερύγιο συμπιεστή



Μεγάλη σημασία για την ικανοποιητική λειτουργία του συμπιεστή έχει το θέμα των ανοχών στα κινητά πτερύγια. Τα ακροπτερύγια τους πρέπει να έχουν το προβλεπόμενο από τον κατασκευαστή διάκενο με το περίβλημα του συμπιεστή. Επίσης, η ρίζα του κινητού πτερυγίου πρέπει να <<παίξει>> όταν τοποθετηθεί στο δίσκο ή το τύμπανο. Η ανοχή αυτή επιτρέπεται ώστε να είναι εύκολη η τοποθέτηση και η αφαίρεση τους καθώς και για την απορρόφηση των ταλαντώσεων που δημιουργούνται κατά την περιστροφή. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την ασφάλιση των κινητών πτερυγίων στο στροφέιο. Οι πιο συνηθισμένοι φαίνονται στο (σχήμα 3.37)

- Σταθερή ρίζα (solid root) με πείρο συγκράτησης και ασφαλιστικούς δακτυλίους,
- Ρίζα με σχήμα ελάτου (fir tree root) με ή χωρίς πλάκα ασφαλείας, και
- Ρίζα με σχήμα ουράς περιστεριού (dove tail root), όπου ένα από τα πτερύγια χρησιμοποιείται ως ασφαλιστικό.



**Σχήμα 3.37:** Τρόποι συναρμογής κινητών πτερυγίων συμπιεστή στο τύμπανο ή τους δίσκους

Σταθερά πτερύγια τοποθετούνται, όπως είδαμε, μεταξύ των κινητών πτερυγίων και λειτουργούν ως διαχύτες. Ακόμη, διορθώνουν τη διεύθυνση της ροής του αέρα κατά την έξοδό του από την προηγούμενη σειρά κινητών πτερυγίων, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή γωνία ροής για την επόμενη σειρά. Η πρώτη σειρά των σταθερών πτερυγίων έχει το ρόλο των οδηγών πτερυγίων που θα οδηγήσει το εισερχόμενο ρεύμα αέρα στην πρώτη βαθμίδα με τη βέλτιστη γωνία. Η τελευταία σειρά σταθερών πτερυγίων, συνήθως χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της ροής και την αποφυγή δημιουργίας στροβιλισμών κατά την έξοδο του αέρα από το συμπιεστή και την είσοδό του στο θάλαμο καύσης. Το σχήμα των σταθερών πτερυγίων είναι, όπως και στα κινητά, αυτό της αεροτομής. Στηρίζονται απευθείας στο περίβλημα του στροβίλου (shrouded blades) ή σε ένα δακτύλιο συγκράτησης (retaining ring), ο οποίος με τη σειρά του ασφαλίεται στο περίβλημα (σχήμα 3.38). Σε πολλές περιπτώσεις τα πτερύγια ασφαρίζονται και στο ακροπτερύγιο για την αποφυγή των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων.



**Σχήμα 3.38:** Σταθερά πτερύγια συμπίεστή

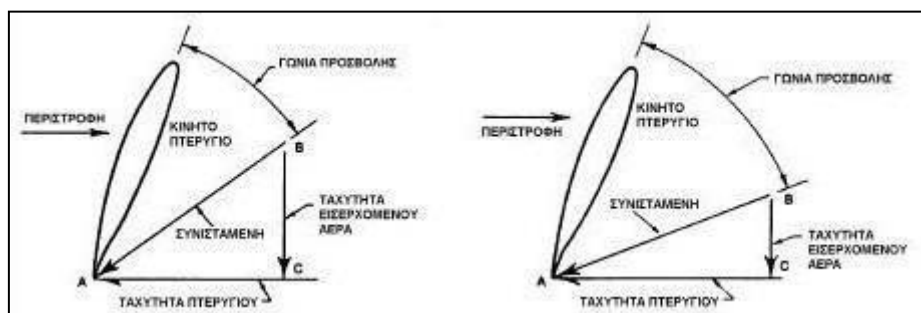
## Υλικά κατασκευής

Γενικά, τα υλικά κατασκευής των τμημάτων του συμπίεστή 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 συμπίεστή 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.

## Απώλεια στήριξης-πάλμωση

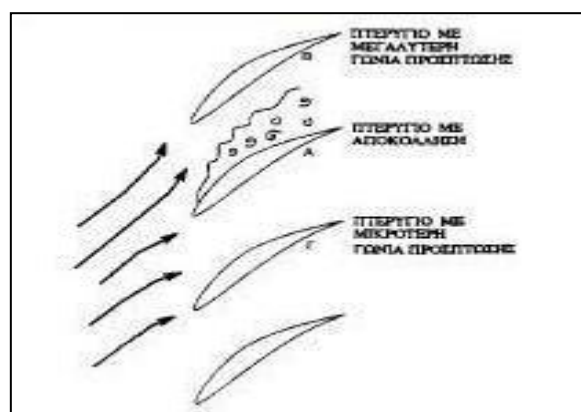
Οι βαθμίδες των συμπίεστών διακρίνονται μεταξύ τους από τα χαρακτηριστικά ροής τους. Ο αποτελεσματικός συνδυασμός των χαρακτηριστικών αυτών επιτυγχάνει την αποδοτική λειτουργία του συμπίεστή. Όμως, το ευμετάβλητο των συνθηκών λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου (ροή αέρα, λόγος συμπίεσης, αριθμός στροφών) δεν εξασφαλίζει πάντοτε τη λειτουργία σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά ροής που έχουν από το σχεδιασμό τους οι βαθμίδες. Στην περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί σε συνθήκες ασταθούς ροής του αέρα γύρω από τα πτερύγια του συμπίεστή, δημιουργούνται οι συνθήκες εμφάνισης των φαινομένων της πάλμωσης (compressor surge) και της απώλειας στήριξης (compressor stall). Στην ελληνική βιβλιογραφία, ο όρος <<πάλμωση>> μπορεί να συναντηθεί και ως <<αστάθεια λειτουργίας>> ή και <<απώλεια πίεσης>> του συμπίεστή ή ακόμη και ως αντίθλιψη. Γενικά, τα φαινόμενα της πάλμωσης και της απώλειας στήριξης είναι πολύ στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Ορισμένοι μάλιστα συγγραφείς θεωρούν τα δύο φαινόμενα ως ταυτόσημα. Με την ανάλυση που ακολουθεί, θα προσπαθήσουμε να αποσαφηνίσουμε τη σχέση που έχουν μεταξύ τους. Όπως αναφέραμε παραπάνω, η απώλεια στήριξης παρουσιάζεται στο συμπίεστή του αεριοστρόβιλου όταν η ροή γύρω από τα πτερύγιά του γίνει ασταθής. Συνήθως, η αστάθεια προκαλείται από την αιφνίδια αύξηση, (ή ελάττωση), της μάζας του ρεύματος αέρα χωρίς την αντίστοιχη

μεταβολή του λόγου συμπίεσης στο συμπιεστή. Αποτελεί, δηλαδή, την αδυναμία των πτερυγίων του συμπιεστή να προωθήσουν το εισερχόμενο ρεύμα του αέρα σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού τους. Στο σημείο αυτό, ας θυμηθούμε ότι τα πτερύγια του συμπιεστή (ιδιαίτερα του αξονικού) αποτελούν ουσιαστικά μικρές πτέρυγες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα πτερύγια να συμπεριφέρονται με τρόπο παρόμοιο με την πτέρυγα του αεροσκάφους. Κατά τη διάρκεια, λοιπόν, της λειτουργίας του συμπιεστή σε συνθήκες απώλειας στήριξης, ιδιαίτερο ρόλο παίζει η γωνία προσβολής του αέρα σε αυτά. Όταν αυτή υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή ( η οποία αποτελεί σχεδιαστική παράμετρο), επέρχεται μείωση της ταχύτητας εισαγωγής του αέρα στο συμπιεστή, όπως φαίνεται στο (σχήμα 3.39).



**Σχήμα 3.39:** Ρεύμα αέρα εισαγωγής με υψηλή και χαμηλή ταχύτητα

Τότε, παρατηρούνται περιοχές αποκόλλησης της ροής. Αυτές κινούνται περιφερειακά με ταχύτητα μικρότερη της ταχύτητας περιστροφής του άξονα του κινητήρα και με την ίδια φορά. Στο (σχήμα 3.40) παρουσιάζεται μία προσπάθεια ερμηνείας του φαινομένου.



**Σχήμα 3.40:** Περιοχή αποκόλλησης της ροής στα κινητά πτερύγια του συμπιεστή

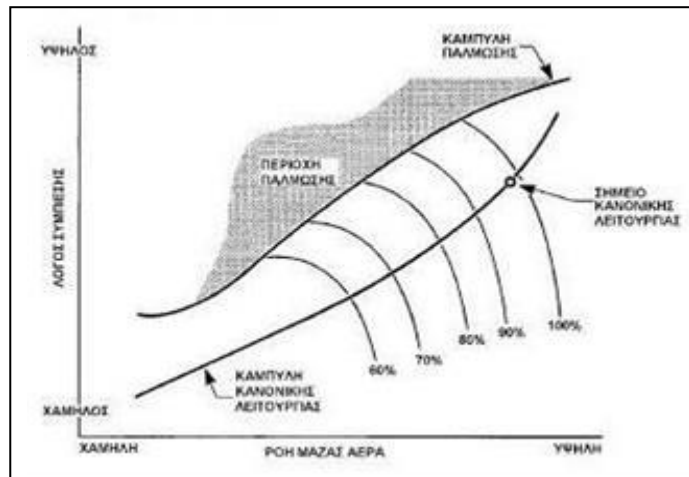
Η δημιουργία περιοχής αποκόλλησης της ροής μόνο στο πτερύγιο Α επηρεάζει προοδευτικά και τα γειτονικά πτερύγια. Το πτερύγιο Β βρίσκεται αμέσως μετά από το Α από την πλευρά υποπίεσης και θα δεχτεί τη ροή του αέρα με μεγαλύτερη γωνία προσβολής. Αντίθετα, το πτερύγιο Γ βρίσκεται αμέσως μετά το Α

από την πλευρά της υπερπίεσης. Θα δεχτεί, λοιπόν, τη ροή με μικρότερη γωνία προσβολής. Η αύξηση της γωνίας προσβολής στο πτερύγιο Β οδηγεί στην εμφάνιση περιοχής αποκόλλησης της ροής σε αυτό. Παράλληλα, μειώνεται η γωνία προσβολή στο πτερύγιο Α, οπότε η περιοχή αποκόλλησης της ροής σε αυτό μειώνεται και, τελικά, η ροή επανακολλάται. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι η περιοχή αποκόλλησης της ροής, ουσιαστικά, μεταφέρθηκε από το πτερύγιο Α στο πτερύγιο Β. Με όμοιο τρόπο αυτό, μία περιστρεφόμενη αποκόλληση (rotating stall), αφού τα πτερύγια του συμπιεστή βρίσκονται σε περιφερειακή διάταξη μέσα στον κινητήρα. Γενικά, η εμφάνιση του φαινομένου της περιστρεφόμενης αποκόλλησης προέρχεται από τη διαταραχή στη σχέση μεταξύ ροής αέρα, λόγου συμπίεσης και αριθμού στροφών. Οι αιτίες που μπορούν να δημιουργήσουν τέτοιες συνθήκες είναι:

- Μείωση της ροής του αέρα λόγω πτήσης σε μεγάλο ύψος, παγοποίησης.
- Απότομη αύξηση της ροής του καυσίμου.
- Απότομη αλλαγή της ροής του αέρα λόγω ελιγμού του αεροσκάφους.
- Υψηλή θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής.
- Βλάβη ενός ή περισσότερων πτερυγίων του συμπιεστή (π.χ. από αναρρόφηση ξένου σώματος), οπότε και αλλοιώνονται τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας του.
- Μείωση της διατομής εισαγωγής αέρα καθώς και των διόδων των βαθμίδων (π.χ. από επικαθίσεις).

Αν η αιτία του φαινομένου συνεχίσει να υπάρχει, τότε η αστάθεια της ροής του αέρα προσβάλλει το σύνολο των βαθμίδων του συμπιεστή. Στο σημείο αυτό είναι που κάποιοι από τους ειδικούς διαχωρίζουν τις έννοιες απώλεια στήριξης και πάλμωση. Ενώ η πρώτη αφορά την αστάθεια της ροής σε περιορισμένο αριθμό βαθμίδων, η πάλμωση θεωρείται ότι αποτελεί τη μετάβαση του φαινομένου σε όλες τις βαθμίδες του συμπιεστή. Παρατηρούνται, λοιπόν, συνολικές <<ταλαντώσεις>> της ροής σε όλο το μήκος του δακτυλίου ροής του συμπιεστή. Η ροή κατευθύνεται από την είσοδο προς τη έξοδο του συμπιεστή αλλά και το αντίθετο αμέσως μετά. Η απώλεια στήριξης μικρής έντασης συνοδεύεται από ελαφρύ κραδασμό. Καθυστέρηση μεταβολής των στροφών σε επιτάχυνση ή επιβράδυνση του κινητήρα. Συνήθως, σε αυτή την ένταση δεν επηρεάζει τη λειτουργία του κινητήρα και αποκαθίσταται αμέσως χωρίς την ανάγκη κάποιας διορθωτικής κίνησης από το χειριστή του αεροσκάφους. Απώλεια στήριξης με μεγαλύτερη ένταση συνοδεύεται από αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργία του στροβίλου του κινητήρα, κραδασμούς και εμφάνιση θορύβου (σαν βήξιμο) από το συμπιεστή. Κατά την πλήρη απώλεια στήριξης πάλμωση, δημιουργούνται ισχυροί κρότοι στο συμπιεστή και αύξηση στις θερμοκρασίες λειτουργίας του στροβίλου. Για την αποφυγή της λειτουργίας σε συνθήκες απώλειας στήριξης και πάλμωσης, οι κατασκευαστές αεριοστροβίλων έχουν δημιουργήσει το λεγόμενο <<πεδίο χαρακτηριστικών>> ή χάρτη του συμπιεστή. Σε αυτό, για κάθε διαφορετικό κινητήρα, απεικονίζονται όλες οι καταστάσεις λειτουργίας και προκύπτουν οι περιοχές ευσταθούς και ασταθούς λειτουργίας για το συμπιεστή. Όπως φαίνεται στο (σχήμα 3.41), κατά μήκος της καμπύλης κανονικής λειτουργίας, ο

συμπιεστής θα λειτουργεί χωρίς την εμφάνιση πάλμωσης για διάφορες τιμές του λόγου συμπίεσης, της ροής μάζας αέρα και του αριθμού στροφών. Το σημείο κανονικής λειτουργίας βρίσκεται σε αυτήν την καμπύλη και δηλώνει τις συνθήκες κάτω από τις οποίες ο συμπιεστής θα λειτουργεί τις περισσότερες φορές. Οι τιμές του λόγου συμπίεσης που εξασφαλίζουν ικανοποιητική λειτουργία του κινητήρα είναι αυτές που βρίσκονται μεταξύ της καμπύλης κανονικής λειτουργίας και της καμπύλης πάλμωσης. Επίσης, για κάθε δεδομένη τιμή ροής μάζας αέρα, υπάρχει μία μικρή περιοχή τιμών του λόγου συμπίεσης όπου ο κινητήρας θα λειτουργεί χωρίς την εμφάνιση πάλμωσης.



**σχήμα 3.41:** Διάγραμμα λειτουργίας αξονικού συμπιεστή

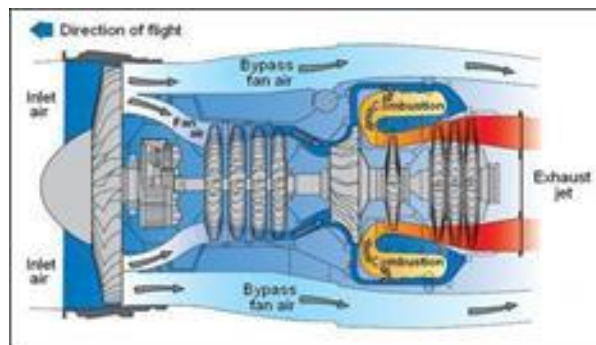
Η απώλεια στήριξης και η πάλμωση είναι, βέβαια, ανεπιθύμητες λειτουργίες. Η εμφάνισή τους επιφέρει κραδασμούς και σημαντική μείωση του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή. Αυτή, σε συμπιεστές υψηλής ταχύτητας, συνοδεύεται από μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας, οι οποίες σε συνδυασμό με τους κραδασμούς μπορεί να επιφέρουν την ολική καταστροφή του συμπιεστή. Επίσης, η αναστροφή τη ροής που παρατηρείται κατά την εμφάνιση της πάλμωσης μπορεί να οδηγήσει σε αναρρόφηση φλόγας από το θάλαμο καύσης και καταστροφή του συμπιεστή. Γενικά, τα φαινόμενα της απώλειας στήριξης και της πάλμωσης αντιμετωπίζονται με τους ακόλουθους τρόπους:

- 1) Αποτελεσματική λειτουργία του εξαρτήματος του αυτόνομου ρυθμιστή καυσίμου. Αυτός λαμβάνει υπόψη τις παραμέτρους της κατάστασης λειτουργίας (λόγος συμπίεσης, αριθμός στροφών λειτουργίας του συμπιεστή και ροή εισερχόμενου αέρα) και αντισταθμίζει τις μεταβολές τους, ιδιαίτερα κατά τις απότομες μετακινήσεις της μανέτας.
- 2) Μείωση της γωνίας προσβολής των μπροστινών βαθμίδων του συμπιεστή ώστε να μην υπερβεί την κρίσιμη τιμή της.
- 3) Χρήση συστήματος αυτόνομου ελέγχου ροής ώστε να επιτευχθεί λειτουργία χωρίς απώλεια στήριξης. Το σύστημα αυτό παροχετεύει ποσότητα αέρα από το μέσο ή το οπίσθιο μέρος του συμπιεστή προς την ατμόσφαιρα ή προς κάποια δευτερεύουσα ροή (π.χ. προς την καμπίνα

επιβατών). Η ποσότητα του αέρα ρυθμίζεται μέσω βαλβίδας (handling bleed valve). Αυτή είναι ανοιχτή κατά τη λειτουργία του κινητήρα σε χαμηλούς λόγους συμπίεσης και κλείνει στους υψηλότερους. Όταν η βαλβίδα είναι ανοικτή, η ροή αέρα αυξάνεται στις μπροστινές βαθμίδες ενώ μειώνεται στις οπίσθιες. Έτσι, επέρχεται ισορροπία στη ροή του αέρα κατά μήκος του συμπιεστή.

- 4) Χρήση οδηγών πτερυγίων στην είσοδο του συμπιεστή και σταθερών πτερυγίων με μεταβλητή γωνία στις αρχικές βαθμίδες. Ο μηχανισμός ρύθμισης της γωνίας λαμβάνει υπόψη τον αριθμό των στροφών λειτουργίας και τη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής.
- 5) Χρήση διβάθμιου συμπιεστή (δύο στροφείων). Με τον τρόπο αυτόν, επιτυγχάνεται ρύθμιση των στροφών του συμπιεστή χαμηλής πίεσης στις καλύτερες δυνατές συνθήκες λειτουργίας και μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης απώλειας στήριξης.

Αρκετοί κατασκευαστές κινητήρων χρησιμοποιούν συνδυασμό φυγοκεντρικού και αξονικού συμπιεστή για να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα και των δύο τύπων. Ο σχεδιασμός αυτός χρησιμοποιείται σε μικρούς κινητήρες που κινούν μικρά επιβατικά αεροσκάφη και ελικόπτερα. Ενδεικτικό παράδειγμα ο κινητήρας Garrett TFE731 που φαίνεται στο (σχήμα 3.42). Ένας πολυβάθμιος αξονικός συμπιεστής χρησιμοποιείται ως συμπιεστής χαμηλής πίεσης και ένας μονοβάθμιος φυγοκεντρικός συμπιεστής ως συμπιεστής υψηλής πίεσης. Επίσης, χρησιμοποιείται εμπρόσθιος ανεμιστήρας, ο οποίος παίρνει κίνηση, μέσω μειωτήρα στροφών, από τον άξονα που δίνει κίνηση στο συμπιεστή χαμηλής πίεσης.



**Σχήμα 3.42:** Συνδυασμός αξονικού και φυγοκεντρικού συμπιεστή

## Διαχύτες

Σκοπός του διαχύτη είναι να κατευθύνει τη μάζα του αέρα, που εξέρχεται από το συμπιεστή, προς το θάλαμο καύσης. Συγχρόνως, μετατρέπει την κινητική ενέργεια του αέρα σε στατική πίεση. Στο διαχύτη η τιμή της πίεσης λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή της μέσα στον κινητήρα. Όπως είδαμε, στο φυγοκεντρικό συμπιεστή ο αέρας εισέρχεται, συμπιεσμένος, σε περιφερειακά διατεταγμένους διαχύτες και στη συνέχεια στο θάλαμο καύσης. Στον αξονικό συμπιεστή, ο συμπιεσμένος αέρας διέρχεται από



σταθερά οδηγία πτερύγια- την τελευταία σταθερή βαθμίδα του συμπιεστή- για να εισέλθει στο διαχύτη. Μέσα σε αυτόν, η συνεχώς αυξανόμενη διατομή προκαλεί μείωση της ταχύτητας του αέρα και αύξηση της στατικής πίεσης, σύμφωνα με το νόμο του Μπερνούλλι (Bernoulli).

Μετά από το διαχύτη, ο αέρας εισέρχεται στο θάλαμο καύσης με υψηλή πίεση και χαμηλή ταχύτητα, συνθήκες κατάλληλες, δηλαδή, για την ικανοποιητική ανάμειξή τους με το καύσιμο που εγχέεται. Ο διαχύτης αποτελεί συνέχεια του περιβλήματος του συμπιεστή ή μπορεί να είναι και διαφορετικό κομμάτι (σχήμα 3.43). Και στις δύο περιπτώσεις φέρει θυρίδες για την παροχέτευση πεπιεσμένου αέρα για την εκτέλεση διάφορων βοηθητικών λειτουργικών του αεροσκάφους. Όπως είδαμε και παραπάνω, θυρίδες παροχέτευσης πεπιεσμένου αέρα υπάρχουν και στο τμήμα του συμπιεστή.

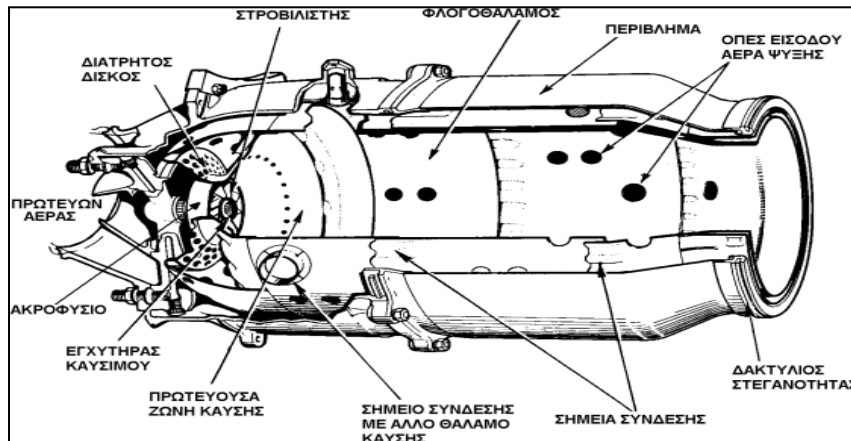


**Σχήμα 3.43:** Γενική μορφή διαχύτη

### 3.4.6) Θάλαμος Καύσης

#### Γενικές Αρχές Λειτουργίες Θαλάμου Καύσης Στροβιλοκινητήρων

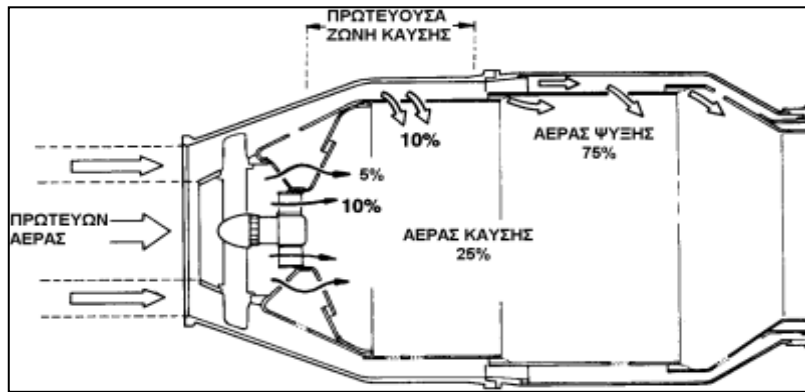
Ο θάλαμος καύσης είναι το μέρος στο οποίο γίνεται καύση του καυσίμου μαζί με τον αέρα που εξέρχεται από το συμπιεστή. Πιο αναλυτικά ο θάλαμος καύσης έχει σαν προορισμό την καύση μεγάλων ποσοτήτων καυσίμου, που παρέχονται μέσω ειδικών εγχυτήρων, με μεγάλες επίσης ποσότητες αέρα, που παρέχονται από τον συμπιεστή. Η καύση πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε ο αέρας να εκτονώνεται και να επιταχύνεται, για να δώσει ένα ομαλό ρεύμα ομοιόμορφου θερμού αέρα, σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του αεροστροβίλου. Αυτή η εργασία πρέπει να εκτελεστεί με την ελάχιστη δυνατή απώλεια πίεσης και με την μέγιστη δυνατή παροχή θερμότητας για τον περιορισμένο χώρο που διατίθεται.



**Σχήμα 3.44:** Τυπικός θάλαμος καύσης.

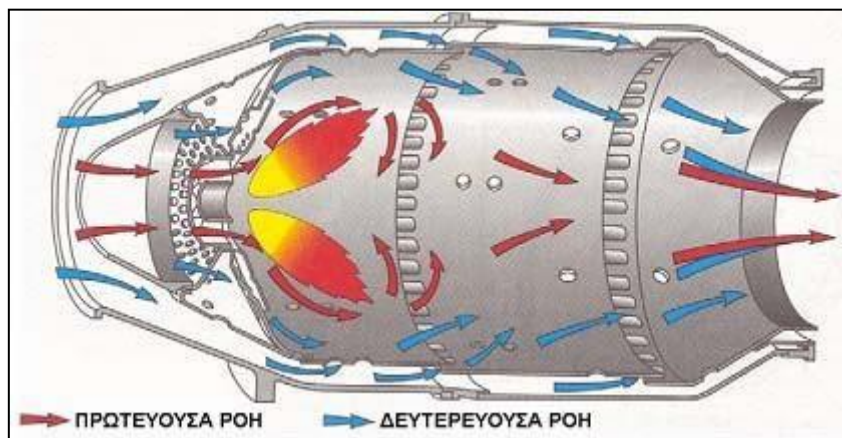
### Διαδικασία της καύσης

Ο αέρας που εξέρχεται συμπιεσμένος από το συμπιεστή με ταχύτητα μέχρι 150m/s. Επειδή αυτή η ταχύτητα είναι μεγάλη για αποτελεσματική καύση, το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει είναι η επιβράδυνση του ρεύματος του αέρα και επομένως η αύξηση της στατικής του πίεσης. Αυτό γίνεται στον διαχύτη που βρίσκεται μεταξύ συμπιεστή και θαλάμου καύσης. Μετά τη διόδο από το διαχύτη η ταχύτητα του ρεύματος αέρα είναι της τάξης των 25 m/sec, τιμή επίσης μεγάλη για την κανονική καύση. Η περαιτέρω μείωσή της σε τιμές της τάξης των 5 m/sec επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός διάτρητου δίσκου (perforated disk), ο οποίος αποτελεί εξάρτημα του θαλάμου καύσης και βρίσκεται περιφερειακά από τον εγχυτήρα καυσίμου (fuel nozzle). Επομένως θα πρέπει να δημιουργηθεί μια περιοχή χαμηλής αξονικής ταχύτητας στον θάλαμο καύσης, ώστε η φλόγα να παραμένει αναμμένη σ' όλες τις συνθήκες λειτουργίας του αεροστρόβιλου. Στην κανονική λειτουργία η αναλογία αέρα – καυσίμου είναι μεταξύ 45:1 και 130:1. Η κηροζίνη όμως καίγεται αποδοτικά σε αναλογία περίπου 15:1 και έτσι θα πρέπει να καεί μόνο με μέρος του αέρα, που εισέρχεται στον θάλαμο. Αυτή η περιοχή του θαλάμου ονομάζεται **πρωτεύουσα ζώνη καύσης** (primary combustion zone). Αυτό εξασφαλίζεται με την πρόβλεψη ενός φλογοσωλήνα, που έχει διάφορες διατάξεις για την διανομή του αέρα κατά μήκος του θαλάμου. Περίπου 25% της μάζας του αέρα εισάγονται στο τμήμα εισαγωγής (σχήμα 3.45). Αμέσως μετά από αυτό υπάρχουν πτερύγια στροβιλισμού και ένα διάτρητο έλασμα, μέσω του οποίου ο αέρας περνάει στην πρωτεύουσα ζώνη καύσης. Ο στροβιλισμένος αέρας δημιουργεί μια ροή αντίθετη προς την διεύθυνση της κανονικής και έτσι προκαλεί την επιθυμητή επανακυκλοφορία. Το υπόλοιπο 75% της μάζας του αέρα ρέει στον δακτυλιοειδή χώρο ανάμεσα στον φλογοσωλήνα και το περίβλημα.



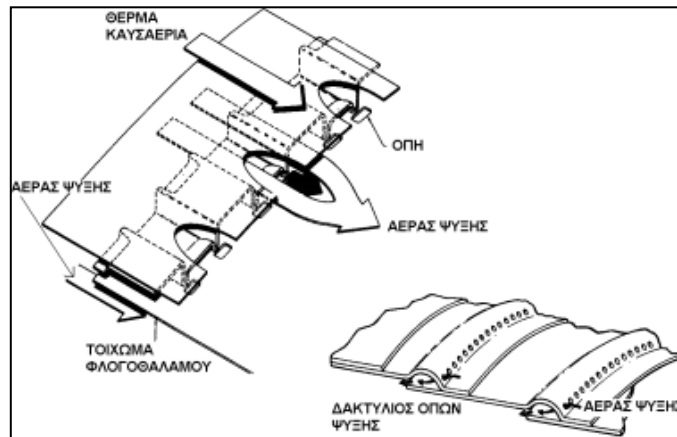
**Σχήμα 3.45:** Κατανομή αέρα στον θάλαμο καύσης

Στο τοίχωμα του φλογοσωλήνα και κοντά προς την ζώνη καύσης υπάρχει ένας αριθμός οπών, από τις οποίες περνά μια πρόσθετη ποσότητα αέρα (10 – 15% της κύριας ροής) προς την πρωτεύουσα ζώνη. Ο αέρας από τα πτερύγια στροβιλισμού και από τις οπές αυτές σχηματίζει μια περιοχή επανακυκλοφορίας αέρα με χαμηλή ταχύτητα. Το ρεύμα παίρνει την μορφή στροβιλισμού τύπου δακτυλίου καπνού και έτσι η φλόγα σταθεροποιείται και ακινητοποιείται. Τα αέρια που επανακυκλοφορούν επιταχύνουν την καύση των σταγόνων καυσίμου που εγχέονται με το να επιταχύνουν γρήγορη ανύψωση θερμοκρασίας μέχρι την θερμοκρασία της ανάφλεξης.



**Σχήμα 3.46:** Ροή αέρα στον θάλαμο καύσης.

Ο κωνικός πίδακας καυσίμου των εγχυτήρων κόβει τον στρόβιλο επανακυκλοφορίας, που δημιουργείται στο κέντρο του. Αυτό σε συνδυασμό με το γενικό στροβιλισμό στην πρωτεύουσα ζώνη συντελεί στο να διασκορπιστεί το καυσίμο και να αναμιχθεί με τον αέρα.



**Σχήμα 3.47:** Διαμόρφωση εξωτερικού ελάσματος θαλάμου καύσης.

Η θερμοκρασία των καυσαερίων από την ζώνη καύσης φθάνει τους 1800 - 2000°C, και πρέπει οπωσδήποτε να μειωθεί πριν φθάσουν τα καυσάερια στον στρόβιλο. Για να επιτευχθεί αυτό, ο αέρας, που δεν έχει χρησιμοποιηθεί για την καύση (60 – 75% του αρχικού), εισάγεται σταδιακά στον φλογοσωλήνα. Περίπου η μισή ποσότητα χρησιμοποιείται για τη μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων και η υπόλοιπη για την ψύξη των τοιχωμάτων του φλογοσωλήνα. Η καύση πρέπει να έχει τελειώσει πριν εισέλθει στον φλογοσωλήνα το ψυχρότερο ρεύμα αέρα, οπότε δεν θα είναι αποδοτική η καύση λόγω των μειωμένων θερμοκρασιών. Ένας σπινθήρας από ειδικό σπινθηριστή προκαλεί την έναρξη της καύσης, που συνεχίζεται μετά μόνη της λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, που δημιουργούνται. Η σχεδίαση των θαλάμων καύσης μπορεί να παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από κινητήρα σε κινητήρα, όπως και ο τρόπος έγχυσης του καυσίμου. Η διανομή όμως της ροής καυσίμου που περιεγράφηκε είναι παρόμοια σε όλους τους αεροστρόβιλους.

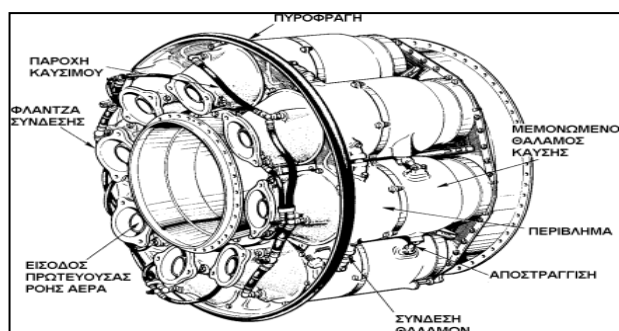
### Τύποι θαλάμων καύσης

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι θαλάμων καύσης, που χρησιμοποιούνται στους σημερινούς αεροστρόβιλους. Αυτοί είναι:

- (α) ο πολλαπλός θάλαμος καύσης,
- (β) ο σωληνοδακτυλιοειδής θάλαμος και
- (γ) ο δακτυλιοειδής θάλαμος.

## Πολλαπλός θάλαμος καύσης

Ο τύπος θαλάμου καύσης αυτός χρησιμοποιήθηκε στους αρχικούς αεριωθούμενους κινητήρες. Ουσιαστικά, αποτελείται από ένα συγκεκριμένο αριθμό ξεχωριστών θαλάμων καύσης σωληνοειδούς τύπου (can type combustion chamber), όπως αυτός που φαίνεται στα σχήματα 5 και 6. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται στους αεροστροβίλους με φυγοκεντρικό συμπιεστή και τους παλαιότερους με αξονικό. Είναι κατ' ευθείαν εξέλιξη του αρχικού τύπου θαλάμου καύσης του Whittle. Η κύρια διαφορά είναι, ότι ο θάλαμος καύσης του Whittle είχε αντίστροφη ροή και αυτό δημιουργούσε σημαντική απώλεια πίεσης στην ροή. Οι κυλινδρικοί θάλαμοι διατάσσονται γύρω από τον κινητήρα και η παροχή συμπιεσμένου αέρα γίνεται μέσω αγωγών ιδιαίτερων για καθένα τους. Κάθε θάλαμος έχει ιδιαίτερο φλογοσωλήνα και περίβλημα. Οι ξεχωριστοί θάλαμοι συνδέονται μεταξύ τους. Έτσι λειτουργούν στην ίδια πίεση και κατά την εκκίνηση η φλόγα διαδίδεται σε όλους τους φλογοσωλήνες από τον ένα ή δύο θαλάμους, όπου συμβαίνει η αρχική ανάφλεξη.



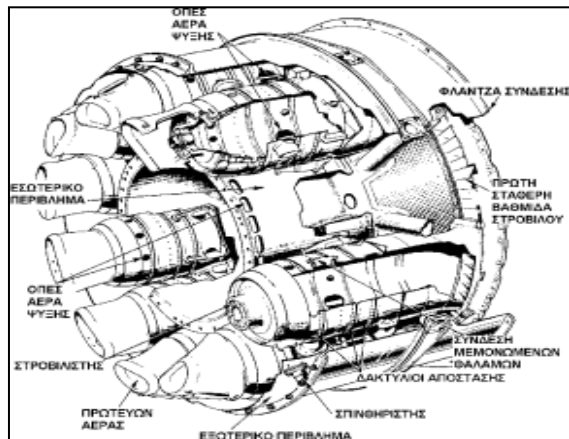
Σχήμα 3.48: Πολλαπλός θάλαμος καύσης



Σχήμα 3.49: Θάλαμος καύσης τύπου σωλήνα.

## Σωληνοδακτυλιοειδής θάλαμος καύσης

Αυτός είναι συνδυασμός του πολλαπλού και του δακτυλιοειδούς θαλάμου καύσης. Αποτελείται από ένα αριθμό φλογοσωλήνων τοποθετημένων σε ένα κοινό δακτυλιοειδές πλαίσιο. Αυτός ο τύπος συνδυάζει την ευκολία γενικής επισκευής και δοκιμής του πολλαπλού θαλάμου με τον μικρό όγκο του δακτυλιοειδούς.

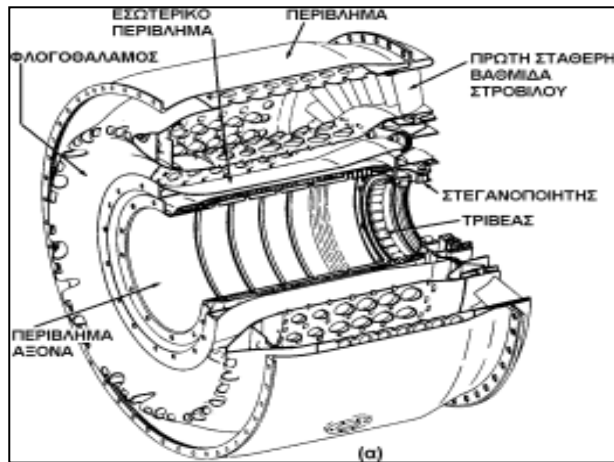


**Σχήμα 3.50:** Σωληνοδακτυλιοειδής θάλαμος καύσης.

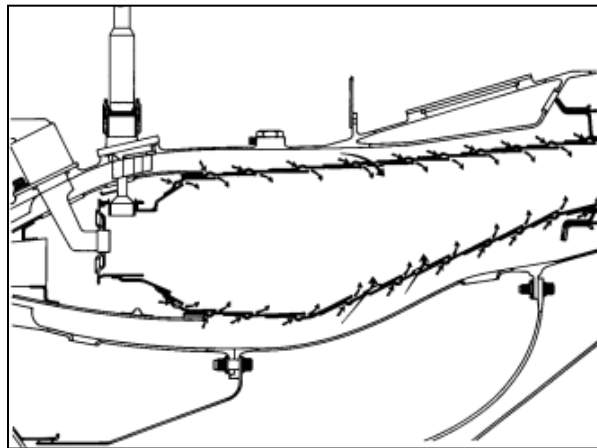
### Δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης

Αποτελείται από ένα δακτυλιοειδή φλογοσωλήνα, που περιέχεται μεταξύ ενός εξωτερικού και ενός εσωτερικού κυλινδρικού περιβλήματος. Ο θάλαμος είναι ανοικτός στο μπροστινό και πίσω μέρος προς τον συμπιεστή και τον στρόβιλο αντίστοιχα. Ο δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης αποτελείται από ένα δακτυλιοειδή φλογοθάλαμο που σχηματίζεται από ένα εξωτερικό (outer liner) και ένα εσωτερικό κυλινδρικό περίβλημα ή δακτύλιο (inner liner), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.51. Ο θάλαμος είναι ανοικτός στο μπροστινό και το οπίσθιο τμήμα του προς το διαχύτη και το στρόβιλο, αντίστοιχα. Το κύριο πλεονέκτημα του δακτυλιοειδούς θαλάμου είναι, ότι για αεροστρόβιλους της ίδιας ισχύος το μήκος του είναι μόνο το 75% ενός σωληνοδακτυλιοειδούς θαλάμου με φυσική μείωση βάρους και κόστους. Επίσης η διάδοση της φλόγας παρουσιάζεται βελτιωμένη επειδή δεν υπάρχουν συνδετήριες σωληνώσεις από θάλαμο σε θάλαμο. Ένα ακόμη πλεονέκτημα του δακτυλιοειδούς θαλάμου καύσης είναι ότι εκμεταλλεύεται πολύ αποδοτικά το χώρο στον οποίο τοποθετείται και επιτυγχάνει την καλή ανάμιξη του καύσιμου μμείγματος. Το μήκος και η διάμετρος του δακτυλιοειδούς θαλάμου είναι αρκετά μικρότερα από αυτά των άλλων τύπων θαλάμων καύσης για την ίδια παραγόμενη ισχύ. Η απουσία αγωγών διάδοσης της φλόγας εξασφαλίζει καλή απόδοση καύσης. Επίσης, επιτυγχάνεται ένας βέλτιστος λόγος εσωτερικής επιφάνειας φλογοθαλάμου προς τον συνολικό όγκο οπότε εξασφαλίζεται μέγιστη ψύξη κατά τη διάρκεια της καύσης. Ένα ακόμη πλεονέκτημα θεωρείται η απλή κατασκευή του.





**Σχήμα 3.51:** Δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης.



**Σχήμα 3.52:** Ροή μέσα σε δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης.

### Υλικά κατασκευής θαλάμων καύσης

Τα τοιχώματα και τα εσωτερικά τμήματα των θαλάμων καύσης πρέπει να αντέχουν στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες, που δημιουργούνται. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρησιμοποίηση των καλύτερων διαθέσιμων υλικών από πλευράς θερμικής αντοχής και με την ψύξη του εσωτερικού των τοιχωμάτων του φλογοσωλήνα για απομόνωση από την φλόγα. Ο θάλαμος καύσης πρέπει επίσης να αντέχει στην διάβρωση, που τείνει να δημιουργηθεί από τα προϊόντα της καύσης, στην τάση δημιουργίας ρωγμών λόγω θερμοκρασιακής άνισης κατανομής και στην ξήρανση λόγω τάσεων από κραδασμούς λειτουργίας. Συνήθως οι φλογοσωλήνες κατασκευάζονται από νικελιοχρωμιοχάλυβες υψηλής αντοχής σε θερμοκρασίες, ενώ το περίβλημα κατασκευάζεται από ελαφρό χάλυβα.

## Απαιτήσεις επίδοσης και λειτουργίας που επηρεάζουν τη σχεδίαση των θαλάμων καύσης

Οι απαιτήσεις, από ένα θάλαμο καύσης, που σχετίζονται με την **επίδοση** όλου του αεριοστρόβιλου είναι:

- Υψηλή απόδοση καύσης που αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει τη κατανάλωση καυσίμου.
- Μικρή πτώση πίεσης (ανακοπής) κατά μήκος του θαλάμου. Η ύπαρξη μεγάλης πτώσης πίεσης αυξάνει την κατανάλωση του καυσίμου και μειώνει την ισχύ εξόδου, με άμεση επίδραση στο σχήμα και το βάρος της μηχανής.
- Ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή στην έξοδο του θαλάμου. Η επίτευξη ομοιομορφίας επηρεάζει την επιθυμητή στάθμη θερμοκρασιών στην είσοδο του στροβίλου, αφού η μέγιστη τοπική θερμοκρασία στην κατανομή περιορίζεται από τα όρια της θερμικής αντοχής των υλικών.

Έτσι, η ύπαρξη ανομοιόμορφης θερμοκρασιακής κατανομής έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της μέσης θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο, ώστε να αποφευχθεί μεγάλη τοπική θερμοκρασία, γεγονός που προκαλεί, μείωση της ισχύος εξόδου με άμεση επίδραση στο σχήμα και το βάρος της μηχανής. Οι απαιτήσεις, από ένα θάλαμο καύσης, που σχετίζονται με την **ικανοποιητική λειτουργία και μακροβιότητα** του είναι:

- Ευσταθής καύση εντός μιας μεγάλης περιοχής μεταβολής τιμών του λόγου καυσίμου-αέρα. Η απαίτηση αυτή προκύπτει από την ανάγκη να αποφευχθεί το σβήσιμο της φλόγας σε μεγάλες μεταβολές φορτίου και σε μεγάλες ταχύτητες αέρα (30-60m/sec) που προκύπτουν από τις μεγάλες παροχές αέρα, που απαιτούνται για τον μετριασμό της θερμοκρασίας των καυσαερίων.
- Θερμοκρασίες των μετάλλων κάτω από μια ορισμένη τιμή και μικρές κλίσεις των θερμοκρασιακών κατανομών στο τοίχωμα του φλογοσωλήνα (liner). Έτσι αποφεύγεται η θερμική κόπωση των μετάλλων και βελτιώνεται η μακροβιότητα της κατασκευής.
- Αποφυγή δημιουργίας σκληρών υπολειμμάτων άνθρακα. Τα υπολείμματα του άνθρακα διαβρώνουν και καταστρέφουν τα τοιχώματα του φλογοσωλήνα καθώς και τα πτερύγια του στροβίλου, διότι μεταφέρονται δια των καυσαερίων με μεγάλες ταχύτητες δημιουργώντας σημαντικές δυνάμεις κατά την κρούση τους με τις μεταλλικές επιφάνειες.
- Αποφυγή δημιουργίας καπνού. Ο καπνός είναι ανεπιθύμητος για όλα τα είδη αεριοστρόβιλων διότι δημιουργεί επικαθήσεις στους εναλλάκτες καυσαερίων (εφ' όσον υφίστανται) και ρυπαίνει την ατμόσφαιρα.

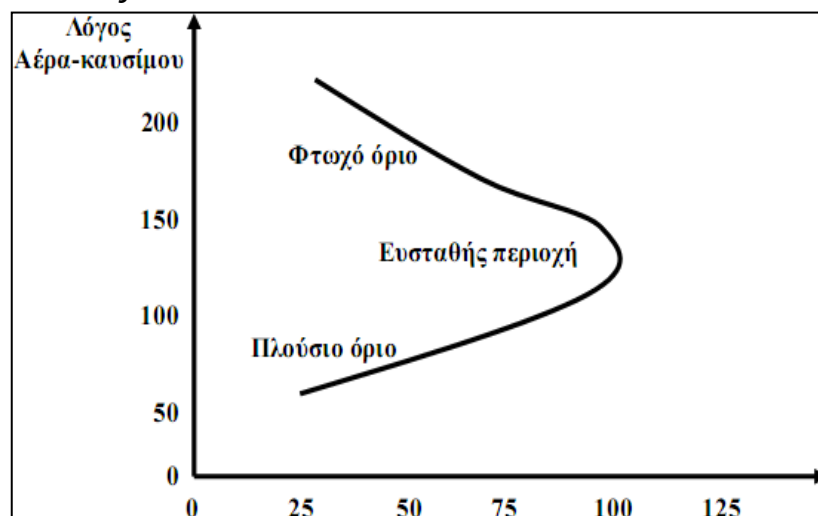
Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι η σχεδίαση ενός θαλάμου καύσης ανάγεται τελικά στον πλέον κατάλληλο συμβιβασμό ενός μεγάλου αριθμού απαιτήσεων και συνθηκών, αφ' ενός μεν διότι οι περισσότερες από τις εκτεθείσες απαιτήσεις είναι αντικρουόμενες, αφ' ετέρου δε διότι η βέλτιστη σχεδίαση για ένα συγκεκριμένο φορτίο μπορεί να μην είναι η κατάλληλη για κάποιο άλλο.

### Όρια Ευσταθούς Λειτουργίας Καύσης



Σχήμα 3.53: Θερμική απόδοση θαλάμου καύσης.

Για οποιοδήποτε θάλαμο καύσης υπάρχει ένα πλούσιο και ένα φτωχό όριο του λόγου αέρα-καυσίμου πέραν των οποίων η φλόγα είναι ασταθής. Συνήθως τα όρια αυτά λαμβάνονται όταν η φλόγα 'σβήνει', παρά το ότι η ασταθής λειτουργία λαμβάνει τη μορφή τραχείας λειτουργίας, που μπορεί να προκαλέσει αεροδυναμικές ταλαντώσεις οι οποίες μειώνουν το όριο ζωής του θαλάμου καύσης και προξενούν ταλαντώσεις των πτερυγίων. Η περιοχή των λόγων αέρα-καυσίμου μεταξύ των δύο ορίων περιορίζεται με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα και πέραν ενός ορίου είναι τελείως αδύνατη η έναρξη της καύσης. Το σχήμα 11 δείχνει ένα τυπικό διάγραμμα ευστάθειας



Σχήμα 3.54: Διάγραμμα ευστάθειας καύσης

Το διάγραμμα ευστάθειας είναι επίσης συνάρτηση της πίεσης που επικρατεί στον θάλαμο καύσης. Μία μείωση της πίεσης (στους αεροπορικούς αεριοστρόβιλους είναι σπουδαίο να ελεγχθεί ότι τα όρια ευστάθειας είναι αρκετά πλατειά, με μια πίεση του θαλάμου καύσης που επικρατεί στο μέγιστο υψόμετρο) ελαττώνει την ταχύτητα με την οποία προχωρεί η χημική αντίδραση και άρα στενεύει τα όρια της ευστάθειας. Έτσι οι αεριοστρόβιλοι με χαμηλή σχέση συμπίεσης παρουσιάζουν, από αυτή την άποψη, μεγαλύτερα προβλήματα απ' ό,τι οι με υψηλή σχέση συμπίεσης. Οι θάλαμοι καύσης των κυρίως των βιομηχανικών αεριοστρόβιλων δεν παρουσιάζουν, εν γένει, πολλά προβλήματα ευσταθούς λειτουργίας, λόγω της λειτουργίας τους μάλλον σε σταθερές συνθήκες. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, το 'πλούσιο' και 'φτωχό' όριο της ευσταθούς καύσης πρέπει να απέχουν σημαντικά από όλα τα σημεία μόνιμης λειτουργίας, ώστε να είναι δυνατή η επιτάχυνση και επιβράδυνση της μηχανής, οπότε παρατηρούνται (κατά το 'μεταβατικό' στάδιο) σημαντικές διακυμάνσεις στον λόγο αέρα-καυσίμου (η παροχή αέρα δεν αντιδρά 'αμέσως' στην αλλαγή της παροχής καυσίμου, που είναι και ο ρυθμιστής του φορτίου).

### 3.4.7) Αεροπορικά καύσιμα

**Τα καύσιμα αεροπορίας**, γνωστά και ως αεροπορικά καύσιμα ή καύσιμα αεριωθουμένων, είναι υγρά καύσιμα που προορίζονται για κινητήρες αεροπλάνων. Πρόκειται για μια πολύ ειδική κατηγορία καυσίμων που διέπονται από πολύ αυστηρές προδιαγραφές ποιότητας δεδομένων των συνθηκών χρήσης τους. Βασικό συστατικό τους αποτελεί η κηροζίνη, προϊόν απόσταξης πετρελαίου, στην οποία έχει γίνει επεξεργασία απομάκρυνσης των μερκαπτανών. Κηροζίνη ονομάζεται ένα εύφλεκτο καύσιμο, κύρια χρήση του οποίου είναι στην αεροπορία (στα αεροπορικά καύσιμα), αλλά και σε λάμπες κηροζίνης. Η κηροζίνη αποτελείται από υδρογονάνθρακες και προέρχεται από διύλιση φυσικών καυσίμων που περιέχουν υδρογονάνθρακες, συνηθέστερα σήμερα από διύλιση (ορθότερα κλασματική απόσταξη) πετρελαίου. Το όνομα «κηροζίνη» επινόησε ο Αβραάμ Γκέσνερ το 1854, όταν το κατέθεσε ως εμπορικό σήμα στον Καναδά για το καύσιμο που έφτιαξε με σκοπό τη χρήση του σε λάμπες. Έχει πολύ χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης (από 38°C έως 65°C περίπου[1]) και για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο.

#### Κατηγορίες

Οι γενικές κατηγορίες αεροπορικών καυσίμων είναι οι παρακάτω:

- Βενζίνη αεροπορίας (aviation gasoline)
- Καύσιμα για στροβιλοκινητήρες (turbine ή jet fuel)
- Καύσιμα για αεροπορικά βλήματα (missile fuel)

## Γενικές απαιτήσεις αεροπορικών καυσίμων

- Καύση αποδοτική και αποτελεσματική υπό όλες τις συνθήκες.
- Υψηλή θερμογόνος δύναμη, για μέγιστη εμβέλεια και μειωμένο βάρος φορτίου καυσίμου. Έτσι, ελαχιστοποιείται η ποσότητα καυσίμου που απαιτείται για συγκεκριμένη αποστολή. Η θερμογόνος δύναμη δεν αλλάζει πολύ από καύσιμο, δεδομένου ότι όλα προέρχονται από το αργό πετρέλαιο.
- Μείωση κινδύνων πυρκαγιάς ( που σημαίνει χαμηλή πίεση ατμών, χαμηλή πτητικότητα, υψηλό σημείο ανάφλεξης και υψηλή αγωγιμότητα για να ελαχιστοποιείται η ανάπτυξη στατικού ηλεκτρισμού κατά την τροφοδοσία).
- Χαμηλή πίεση ατμών , για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες, από ατμοποίηση σε χαμηλές πιέσεις (μεγάλα ύψη πτήσης).
- Ευκολία εκκίνησης του κινητήρα κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες στο έδαφος και ικανοποιητικά χαρακτηριστικά επανεκκίνησης του κινητήρα κατά την πτήση.
- Υψηλή ειδική θερμότητα, για την αποτελεσματική απορρόφηση θερμότητας που αναπτύσσεται στο κέλυφος αεροσκαφών που πετούν σε πολύ υψηλές ταχύτητες.

## Απαιτήσεις που προκύπτουν από το σύστημα διαχείρισης καυσίμου

- Χαμηλό ιξώδες, για να είναι εύκολη η άντληση και ο διασκορπισμός κάτω από όλες τις συνθήκες λειτουργίας.
- Υψηλή λιπαντική ικανότητα, για ελαχιστοποίηση φθορών της αντλίας καυσίμου.
- Οικονομικό και με υψηλή διαθεσιμότητα.

## Απαιτήσεις που προκύπτουν από τη λειτουργία του θαλάμου καύσης και του στροβίλου

- Καλός διασκορπισμός (εδώ παίζει ρόλο κυρίως η συνεκτικότητα).
- Υψηλός ρυθμός εξάτμισης. Τα ανώτατα ποσοστά εξάτμισης επιτυγχάνονται με καύσιμα χαμηλού ιξώδους και υψηλής πτητικότητας.
- Απουσία ουσιών που μπορεί να προκαλούν εμφράξεις σε σωλήνες ή ακροφύσια καυσίμου. Η δημιουργία επικαθήσεων και κατάλοιπων συνδέεται με την ύπαρξη διαφόρων συστατικών μέσα στο καύσιμο (αυτό είναι πρόβλημα

κυρίως για βιομηχανικούς αεριοστρόβιλους των οποίων τα καύσιμα περιέχουν περισσότερες προσμίξεις). Για παράδειγμα, το καύσιμο μπορεί να περιέχει διάφορα μέταλλα όπως π.χ. Νάτριο, κάλιο, βανάδιο, ασβέστιο και μόλυβδο με τη μορφή ενώσεων τους. Από την άλλη μεριά, κάποια χαρακτηριστικά του ίδιου του καυσίμου, όπως π.χ. Τα υπολείμματα άνθρακα κατά την καύση συνδέονται με την τάση του καυσίμου να δημιουργήσει επικαθήσεις στους εγχυτήρες, το φλογοσωλήνα και τα σταθερά πτερύγια του στροβίλου. Για αποφυγή τέτοιων προβλημάτων όπως και της παγοποίησης χρησιμοποιούνται πρόσθετα στο καύσιμο ή θέρμανση.

- Ελαχιστοποίηση σχηματισμού άκαυστου άνθρακα.
- Η διαβρωτικότητα του καυσίμου σχετίζεται με το σχηματισμό ενώσεων που προκαλούν χημική διάβρωση των υλικών του θαλάμου καύσης και των πτερυγίων του στροβίλου. Η διάβρωση συνδέεται με την περιεκτικότητα σε διάφορα μέταλλα και σε θείο. Η ύπαρξη τέτοιων συστατικών σε περιεκτικότητες πάνω από ορισμένα αποδεκτά όρια παίζει την επεξεργασία του καυσίμου για αφαίρεσή τους.

## Τύποι 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 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 αεροσκάφους (- 50 °C έως 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 καυσίμου 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 θερμογόνο δύναμη (FCV –fuel calorific value)
- Θα πρέπει να περιέχει λίπανση στα κινούμενα μέρη των εξαρτημάτων του συστήματος καυσίμου.

Μια από τις βασικές ιδιότητες ενός καυσίμου και πολύ περισσότερο ενός αεροπορικού καυσίμου, είναι η υψηλή θερμογόνο δύναμη 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 πόσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα δράσης του αεροσκάφους για δεδομένη χωρητικότητα των δεξαμενών του. Η περιεκτικότητα του σε θείο 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 οξειδωση 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 το οποίο 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 κοντά σε συνθήκες πήξης του, σχηματίζονται στερεά σωματίδια με συνέπεια την απόφραξη φίλτρων και τμημάτων του συστήματος καυσίμου. Το σημείο πήξης των καυσίμων αεριοστροβίλων 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 στροβίλου. 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.

## Τύποι Αεροπορικών Καυσίμων

Στην προσπάθεια παραγωγής καυσίμων με ικανοποιητική απόδοση και σε επαρκείς ποσότητες για τις εκάστοτες ανάγκες της αγοράς και των τύπων των αεριοστροβίλων κινητήρων έχουν παραχθεί αρκετοί τύποι καυσίμων. Ευρύτερα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα καύσιμα με κωδικό **JP**, που αναπτύχθηκαν για χρήση σε στρατιωτικούς κινητήρες της Αμερικάνικης Πολεμικής Αεροπορίας και τα καύσιμα με κωδικό **Jet** που αναπτύχθηκαν για χρήσεις με πολιτικούς κινητήρες. Τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα και διακινούμενα αεροπορικά καύσιμα στην Ελλάδα και διεθνώς είναι τα καύσιμα στροβιλοκινητήρων (Jet Fuel) που ακολουθούν:

### A) Καύσιμα κατηγορίας JP

- JP-1: Το πρώτο καύσιμο τύπου κηροζίνης με χαμηλό σημείο πήξης 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 σημεία και τη δημιουργία πάγου στο σύστημα καυσίμου.
- JP-2: Το καύσιμο αυτό ήταν μια απόπειρα βελτίωσης του JP-1 προσθέτοντας του ένα μικρό ποσό βενζίνης.
- JP-3: Το καύσιμο που αντικατέστησε το JP-1 ήταν ένα μείγμα του 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 μειονέκτημα του ήταν η υψηλή πτητικότητά του, η οποία δημιούργησε απώλειες 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 αεροστρόβιλων κινητήρων ο οποίος είναι σε περιορισμένη χρήση έως και σήμερα. (Σταδιακά αντικαταστάθηκε από το JP-8) Είναι ένα καύσιμο ευρείας απόσταξης, δηλαδή περιέχει και ποσοστά των καυσίμων που παράγονται κατά την 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 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 UP -7: Αναπτύχθηκαν για εφαρμογές σε υπερηχητικά αεροσκάφη, όπου υπήρχε 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 μικρότερη και πτητικότητα χαρακτηριστικά που το κάνουν πιο ασφαλές.



**Σχήμα 3.55:** Ανεφοδιασμός αεροσκάφους της British Airways στο αεροδρόμιο Σκίπχολ του Άμστερνταμ. Σε αυτήν την περίπτωση, το καύσιμο φτάνει ως τη θέση στάθμευσης του αεροσκάφους με υπόγειους αγωγούς και το όχημα ανεφοδιασμού μεταφέρει μόνο την αντλία και τις σωληνώσεις σύνδεσης.

### Διεθνείς Προδιαγραφές

Οι προδιαγραφές των προϊόντων είναι ο μηχανισμός προσδιορισμού και ελέγχου των, απαραίτητων για την ικανοποιητική και αξιόπιστη απόδοσή τους, ιδιοτήτων τους από τους παραγωγούς και τους χρήστες.

### **Καύσιμα (Jet Fuel) πολιτικής αεροπορίας**

Δύο οργανισμοί έχουν λάβει ηγετικό ρόλο στην θέσπιση και τήρηση προδιαγραφών για καύσιμα προοριζόμενα για χρήση σε πολιτικά αεροσκάφη. Πρόκειται για την ASTM (American Society for Testing and Materials), της οποίας η Επιτροπή D-2 "Προϊόντα Πετρελαίου και Λιπαντικά" είναι υπεύθυνη για τις προδιαγραφές αεροπορικών καυσίμων, και το MOD (United Kingdom Ministry of Defence). Οι προδιαγραφές που εκδίδουν οι δύο οργανισμοί είναι παρόμοιοι αλλά



## Καύσιμα κατηγορίας Jet (πολεμικής αεροπορίας)

**Jet A, Jet A-1 και Jet B:** Τα καύσιμα αυτά χρησιμοποιούνται στη 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 μίγμα 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.

Τα κύρια καύσιμα της αεροπορίας για χρήση σε πολεμικά αεροσκάφη ακολουθούν τις παρακάτω προδιαγραφές:

JP-5: NATO F-44, MIL-DTL-5624, DEF STAN 91-86

JP-8: NATO F-34, NATO F-35, MIL-DTL-83133, DEF STAN 91-87

## Αεροπορικές Βενζίνες (AvGas)

Οι Βενζίνες Αεροπορίας (Aviation Gasolines) διέπονται από τις προδιαγραφές ASTM D910 ή / και Def Stan 91-90 (DERD 2485). Οι συγκεκριμένες προδιαγραφές έχουν καθοριστεί ώστε να εξασφαλίζουν ικανοποιητική απόδοση σε κινητήρες αεροσκαφών τύπου ανάφλεξης με σπινθήρα, σε μεγάλο εύρος λειτουργικών συνθηκών.

## Χαρακτηριστικά και επιδόσεις

Εφόσον η βασική λειτουργία ενός αεροπορικού καυσίμου για στροβιλοκινητήρες είναι η παροχή ενέργειας σε αεροσκάφη, η περιεκτικότητα σε ενέργεια και η ποιότητα καύσης είναι τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά επίδοσης του καυσίμου. Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι η σταθερότητα, η λιπαντικότητα, η πτητικότητα, η μη διαβρωτικότητα και η καθαρότητα. Επιπλέον της παροχής ενέργειας, το καύσιμο λειτουργεί και ως υδραυλικό υγρό για τα συστήματα ελέγχου της μηχανής και ως ψυκτικό για συγκεκριμένα μέρη του συστήματος καυσίμου.

## Περιεχόμενη ενέργεια καυσίμου

Ο στροβιλοκινητήρας του αεροσκάφους παράγει ενέργεια μετατρέποντας την χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο καύσιμο σε έναν συνδυασμό μηχανικής ενέργειας και θερμότητας. Στα περισσότερα αεροσκάφη ο χώρος είναι πολύτιμος, συνεπώς η ποσότητα ενέργειας που περιέχεται σε μια ορισμένη ποσότητα καυσίμου είναι σημαντική. Η ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στο αεροπορικό καύσιμο είναι μετρήσιμη και μετράται μέσω της χαμηλής θερμογόνου δύναμης, αφού το νερό μένει στα καυσαέρια με μορφή ατμού. Η περιεχόμενη ενέργεια μπορεί να εκφραστεί ανά μονάδα μάζας (MJ/kg, Btu/lb) ή ανά μονάδα όγκου (MJ/l, Btu/gal). Εφόσον η περιεχόμενη ενέργεια κάθε διαφορετικού υδρογονάνθρακα διαφέρει, η σύσταση του

jet fuel έχει αντίκτυπο στην περιεχόμενη ενέργεια του καυσίμου. Συνήθως η πρόβλεψη γίνεται βάσει της πυκνότητας του καυσίμου, η οποία επίσης είναι συνάρτηση της σύστασής του. Σε γενικές γραμμές τα πυκνότερα καύσιμα έχουν υψηλότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου (και χαμηλότερη ανά μονάδα μάζας).

### **Μέθοδοι ελέγχου Κατώτερης Θερμογόνου Δύναμης**

Κατώτερη θερμογόνος δύναμη: ASTM D 3338 Estimation of Net Heat of Combustion of Aviation Fuels: Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη ενός δείγματος υπολογίζεται κατ' εκτίμηση βάσει του API gravity, των περιεχόμενων αρωματικών και του προφίλ απόσταξης. Η εκτίμηση βασίζεται σε εξίσωση συσχετισμού που έχει αναπτυχθεί για ένα μεγάλο εύρος καυσίμων. ASTM D 4809 Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter (μέθοδος διαιτησίας): Ένα ζυγισμένο δείγμα του καυσίμου τοποθετείται σε ένα θερμιδόμετρο βόμβας οξυγόνου υπό προδιαγεγραμμένες συνθήκες. Το καύσιμο αναφλέγεται και η αύξηση της θερμοκρασίας του θερμιδόμετρου χρησιμοποιείται για υπολογισμό της θερμογόνου δύναμης ASTM D4529/IP 381.

### **Χαρακτηριστικά καύσης**

Η βασική διαφορά μεταξύ των κινητήρων εμβόλου και των στροβιλοκινητήρων είναι ότι, στην πρώτη περίπτωση η καύση είναι διακοπτόμενη (συνεπώς ο χρονισμός ανάφλεξης είναι σημαντικός για την καλή απόδοση), ενώ στη δεύτερη είναι συνεχής (συνεπώς ο χρονισμός ανάφλεξης δεν είναι πολύ σημαντικός). Στους στροβιλοκινητήρες, νωρίς κατά τη διεργασία της καύσης, σχηματίζονται μικρά ανθρακικά σωματίδια τα οποία, στις έντονες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του θαλάμου καύσης είναι ανεπιθύμητα επειδή: μπορούν να προκαλέσουν ρωγμές στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης ή και βλάβες του κινητήρα (πυρακτώνονται και η ακτινοβολία που εκπέμπουν προστίθεται στην αναμενόμενη θερμική ακτινοβολία των αερίων καύσης που μεταφέρεται στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης), μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση στις τουρμπίνες και τους στάτορες, μπορούν να βουλώσουν τα σημεία εισόδου αέρα διάλυσης στον θάλαμο καύσης διαταράσσοντας την ομαλή ροή των προϊόντων καύσης, είναι εν μέρει υπεύθυνα για τον ορατό καπνό που αναδίδουν κάποιοι κινητήρες. Μεγαλύτερη τάση να δημιουργούν τέτοια ανθρακικά σωματίδια έχουν τα καύσιμα με μεγάλη περιεκτικότητα σε αρωματικά και κυρίως σε ναφθαλένια, συνεπώς και τα δύο αυτά είδη συστατικών των καυσίμων είναι υπό έλεγχο.

### **Σταθερότητα Καυσίμου**

Ένα καύσιμο θεωρείται σταθερό όταν οι ιδιότητές του δεν αλλάζουν. Αλλαγές στις ιδιότητες των καυσίμων μπορούν να επιφέρουν παράμετροι όπως ο χρόνος (σταθερότητα αποθήκευσης - storage stability) ή η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες στον κινητήρα (θερμική σταθερότητα - thermal stability). Ενδεχόμενη αστάθεια του καυσίμου προέρχεται από χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται σταδιακά, περιλαμβανομένων αντιδράσεων οξειδωσης. Τα αρχικά προϊόντα αυτών των αντιδράσεων είναι υπεροξειδία, τα οποία παρόλο που μένουν διαλυμένα στο καύσιμο μπορεί να δράσουν επιθετικά στα ελαστομερή του συστήματος καυσίμου. Στη συνέχεια μπορεί να δημιουργηθούν διαλυτά κομμωδία και αδιάλυτα σωματίδια, τα

οποία μπορεί να βουλώσουν φίλτρα καυσίμου και επικαθήσεις στις επιφάνειες των συστημάτων καυσίμου των αεροσκαφών, παρεμποδίζοντας τις διόδους μικρής διαμέτρου.

### **Σταθερότητα Αποθήκευσης**

Τα αεροπορικά καύσιμα που παράγονται, διακινούνται και αποθηκεύονται με το σωστό τρόπο είναι σταθερά για τουλάχιστον ένα έτος και στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν αφού επιβεβαιωθεί η σταθερότητα των ιδιοτήτων μέσω ελέγχων. Το αεροπορικό καύσιμο συνήθως καταναλώνεται σε μικρό χρονικό διάστημα από την παραγωγή του, οπότε η σταθερότητα αποθήκευσης ενδιαφέρει περισσότερο σε περιπτώσεις που τηρούνται αποθέματα ασφαλείας, όπως στην πολεμική αεροπορία, ή για παράδειγμα σε μικρά αεροδρόμια που δεν έχουν μεγάλη κίνηση και άρα η κατανάλωση καυσίμων είναι μικρή. Η σταθερότητα αποθήκευσης εξαρτάται από παραμέτρους όπως η σύσταση του καυσίμου, δεδομένου ότι την αστάθεια την προκαλούν τα περισσότερα δραστικά συστατικά και η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες που μπορεί να επιταχύνουν τις αντιδράσεις που προκαλούν αστάθεια. Η βελτίωση της σταθερότητας αποθήκευσης μπορεί να προκύψει με την προσθήκη αντιοξειδωτικών.

### **Θερμική σταθερότητα και μέθοδοι ελέγχου**

Πρόκειται για μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητες του καυσίμου, εφόσον αυτό λειτουργεί μεταξύ άλλων ως μέσο ανταλλαγής θερμότητας, αφαιρώντας θερμότητα από το λιπαντικό του κινητήρα, τα υδραυλικά υγρά και τον εξοπλισμό κλιματισμού. Η θέρμανση του καυσίμου μπορεί να επιταχύνει αντιδράσεις που παράγουν κομμιώδη και σωματίδια, τα οποία μπορούν να επικαθήσουν στα φίλτρα, στις νόζλες ψεκασμού, στα κεντρικά συστήματα ελέγχου του κινητήρα και στους εναλλάκτες, προκαλώντας έτσι λειτουργικά προβλήματα και αυξημένες ανάγκες συντήρησης. Σε αυτή την περίπτωση τα αντιοξειδωτικά δεν βοηθούν, όπως στην αποθήκευση, ενώ ενδεχόμενα προβλήματα που δημιουργούνται στις μηχανές λόγω θερμικής αστάθειας γίνονται αντιληπτά κατόπιν εκατοντάδων ωρών λειτουργίας και μετά από καύση μεγάλου όγκου καυσίμου - επομένως δεν υπάρχει πρακτικός τρόπος ελέγχου σε αντίστοιχες συνθήκες με αυτές της λειτουργίας των κινητήρων. Η λύση που έχει επιλεγεί για έλεγχο της θερμικής σταθερότητας στο εργαστήριο, είναι η έκθεση του καυσίμου σε πολύ πιο έντονες συνθήκες, ώστε να γίνει εφικτή η παρακολούθηση μετρήσιμου αποτελέσματος σε έναν λογικό χρόνο. Η συσκευή JFTOT - Jet Fuel Thermal Oxidation Tester - βάσει της επίσημης μεθόδου ASTM D3241, υποβάλλει το καύσιμο σε άντληση πάνω από μία θερμαινόμενη επιφάνεια αλουμινίου (που προσομοιώνει την επιφάνεια ενός εναλλάκτη θερμότητας καυσίμου-λιπαντικού) και στη συνέχεια άντληση δια μέσου φίλτρου που συγκρατεί όποια στερεά κατάλοιπα (που προσομοιώνει το ακροφύσιο ψεκασμού του καυσίμου).

### **Λιπαντικότητα**

Λιπαντικότητα είναι η δυνατότητα μείωσης της τριβής μεταξύ στερεών επιφανειών σε σχετική κίνηση, συνεπώς είναι το μέτρο της αποτελεσματικότητας ενός υλικού ως μέσο λίπανσης. Οι κινητήρες αεροσκαφών βασίζονται στο καύσιμο για τη λίπανση κάποιων κινητών μερών στις αντλίες καυσίμου και στις μονάδες ελέγχου



ροής. Πρόκειται για έναν συνδυασμό υδροδυναμικής και οριακής λίπανσης: ένα στρώμα υγρού αποτρέπει τις αντίθετα κινούμενες επιφάνειες να έρθουν σε επαφή (οπότε τα μεγαλύτερου ιξώδους υγρά παρέχουν μεγαλύτερη υδροδυναμική λίπανση) και παράλληλα οι περιεχόμενες ενώσεις δημιουργούν ένα προστατευτικό στρώμα κατά της φθοράς, προσκολούμενες στις μεταλλικές επιφάνειες. Τα straight run καύσιμα λειτουργούν καλά ως προς την παροχή οριακής λίπανσης και αυτό οφείλεται κυρίως στα ίχνη συγκεκριμένων οξυγονούχων, αζωτούχων και θειούχων ενώσεων (θεωρία στην οποία συνηγορεί το γεγονός αρκούν 10ppm προσθέτου βελτίωσης λιπαντικότητας για να κάνουν αποδεκτό ένα καύσιμο με κακή λιπαντικότητα). Η υδρογονοκατεργασία (διεργασία που μειώνει το θείο και τα αρωματικά) απομακρύνει αυτές τις ενώσεις που προκύπτουν φυσικά και παραμένουν μετά τη διύλιση, όμως η έλλειψη θείου και αρωματικών δεν σημαίνει οπωσδήποτε ότι το καύσιμο έχει κακή λιπαντικότητα, εφόσον καύσιμα με αντίστοιχες περιεκτικότητες θείου και αρωματικών διαφέρουν στην λιπαντικότητα.

### **Μέθοδος ελέγχου λιπαντικότητας**

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου ASTM D5001 "BOCLE wear scar diameter", μία ασφάλινη μπάλα μένει σταθερή, κόντρα σε ένα κυλινδρικό δαχτυλίδι που περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα ενώ βρίσκεται εν μέρει βυθισμένο στο καύσιμο. Στο τέλος του τεστ η μπάλα αφαιρείται και ελέγχεται για σημάδια φθοράς, των οποίων το μέγεθος είναι αντιστρόφως ανάλογο της λιπαντικότητας. Πάντως, η απαίτηση μέτρησης λιπαντικότητας περιορίζεται στις περιπτώσεις καυσίμων που η σύστασή τους περιλαμβάνει: α) τουλάχιστον 20% έντονα υδρογονοκατεργασμένα συστατικά και ταυτόχρονα λιγότερα από 5% μη υδρογονοκατεργασμένα συστατικά ή β) συνθετικά συστατικά καυσίμου.

### **Ρευστότητα Καυσίμου**

Προφανώς το αεροπορικό καύσιμο πρέπει να μπορεί να ρέει από τις δεξαμενές αποθήκευσης στα φτερά του αεροσκάφους ως τον κινητήρα, μέσω του συστήματος καυσίμων του αεροσκάφους. Η ρευστότητα ως γενικός όρος αναφέρεται στην ικανότητα μιας ουσίας να ρέει αλλά δεν αποτελεί φυσική ιδιότητα: οι σχετικές με την ποσοτικοποίηση της ρευστότητας φυσικές ιδιότητες είναι το ιξώδες και το σημείο πήξης. Τα αεροπορικά καύσιμα εκτίθενται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες τόσο στο ύψος πτήσης (ειδικά σε διαδρομές προς τους πόλους τον χειμώνα) όσο και στο έδαφος σε περιοχές όπου παρατηρούνται ακραίες θερμοκρασίες. Σε αυτές τις θερμοκρασίες είναι πολύ σημαντικό για το καύσιμο να τηρεί την ρευστότητά του, διαφορετικά η ροή του προς τον κινητήρα θα μπορούσε να μειωθεί ή και να σταματήσει.

### **Ιξώδες και μέθοδοι ελέγχου**

Το ιξώδες είναι ένα μέτρο της αντίστασης ενός ρευστού στη ροή υπό πίεση (βαρύτητας ή μηχανική), η οποία αυξάνεται όσο μειώνεται η θερμοκρασία. Στους κινητήρες αεροσκαφών το αεροπορικό καύσιμο ψεκάζεται υπό υψηλή πίεση σε έναν θάλαμο καύσης μέσα από ακροφύσια ώστε να παράγεται ένα λεπτό νέφος σταγονιδίων που εξατμίζεται γρήγορα καθώς ανακατεύονται με τον αέρα. Το μέγεθος των σταγονιδίων και το σχήμα του νέφους εξαρτώνται από το ιξώδες του καυσίμου.

Πολύ υψηλό ιξώδες θα καθιστούσε δύσκολη την πτήση, συνεπώς έχει τεθεί προδιαγραφή μέγιστης τιμής. Επιπλέον το ιξώδες του καυσίμου επηρεάζει την πτώση πίεσης στις γραμμές του συστήματος καυσίμου και τη μονάδα ελέγχου καυσίμου. Οι επίσημες μέθοδοι για τη μέτρηση του ιξώδους στα αεροπορικά καύσιμα είναι η ASTM D445 / IP71, "Κινηματικό ιξώδες Διαφανών και Αδιαφανών Υγρών": Ένα δείγμα τοποθετείται σε ένα διακριβωμένο γυάλινο ιξωδόμετρο και τοποθετείται σε λεπτομερώς ελεγχόμενη θερμοκρασία. Ο χρόνος που απαιτείται για έναν συγκεκριμένο όγκο δείγματος να κινηθεί από το τριχοειδές μόνο με την επίδραση της βαρύτητας μετρείται και είναι ανάλογος με το κινηματικό ιξώδες του δείγματος.

### **Σημείο πήξης και μέθοδοι ελέγχου καυσίμου**

Οι διάφοροι υδρογονάνθρακες που αποτελούν το καύσιμο δεν πήζουν στην ίδια θερμοκρασία. Επομένως όταν το καύσιμο ψύχεται, πρώτα παγώνουν οι υδρογονάνθρακες με ψηλό σημείο πήξης (freezing point) και σχηματίζουν κρυστάλλους. Συνεχίζοντας την ψύξη του καυσίμου, όλο και περισσότεροι υδρογονάνθρακες κρυσταλλώνονται και έτσι το καύσιμο σταδιακά μετατρέπεται από ομοιογενές υγρό, σε υγρό που περιλαμβάνει μερικούς κρυστάλλους, σε πολύ καύσιμο και κρυστάλλων υδρογονανθράκων και τέλος σε ημιστερεό τεμάχιο υδρογονανθράκων. Το σημείο πήξης είναι η θερμοκρασία στην οποία λιώνει και ο τελευταίος κρύσταλλος που έχει δημιουργηθεί με την προηγούμενη ψύξη τού δείγματος. Συνεπώς, το σημείο πήξης του καυσίμου είναι αρκετά υψηλότερο από τη θερμοκρασία στην οποία το καύσιμο στερεοποιείται εντελώς. Το σημαντικότερο κριτήριο για την εκτίμηση της επίδοσης του καυσίμου είναι η αντλησιμότητα, δηλαδή η ικανότητα της μετακίνησης του καυσίμου από τη δεξαμενή στον κινητήρα, η οποία επηρεάζεται από την ρευστότητα του καυσίμου και τον σχεδιασμό του κινητήρα. Το σημείο πήξης χρησιμοποιείται από την βιομηχανία ως ένδειξη της αντλησιμότητας του καυσίμου σε χαμηλές θερμοκρασίες, εφόσον το αεροπορικό καύσιμο συνήθως μένει αντλήσιμο 4-15°C κάτω από το σημείο πήξης του. Οι επίσημες μέθοδοι για τη μέτρηση του σημείου πήξης είναι οι ASTM D2386/IP16 (μέθοδος διαιτησίας), ASTM D5972/IP435, ASTM D7153/IP528, ASTM D7154/IP529.

### **Πτητικότητα Καυσίμου**

Πτητικότητα είναι η τάση ενός καυσίμου να εξατμίζεται και είναι σημαντική γιατί, από τη μία το καύσιμο πρέπει να εξατμιστεί πριν μπορέσει να καεί και άρα το καύσιμο χρειάζεται να είναι πτητικό, όμως αν είναι πολύ πτητικό μπορεί να οδηγήσει σε κλείδωμα ατμών vapor lock. Οι φυσικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την πτητικότητα είναι η τάση ατμών και το προφίλ απόσταξης.

### **Μη διαβρωτικότητα καυσίμου**

Το καύσιμο δεν πρέπει να διαβρώνει τα υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή κατά την διακίνηση και χρήση: αλουμίνιο για τις δεξαμενές, χάλυβα και άλλα μέταλλα στο σύστημα καυσίμου, ελαστομερή και επικαλύψεις κ.λπ. Διαβρωτικές ουσίες οι οποίες ενδεχόμενα βρίσκονται μέσα στο αεροπορικό καύσιμο περιλαμβάνουν οργανικά οξέα και μερκαπτάνες, οπότε οι προδιαγραφές καθορίζουν μέγιστη περιεκτικότητα για αυτού του είδους τις ενώσεις, παραπροϊόντα μικροβιακής ανάπτυξης και ίχνη νατρίου, καλίου και άλλων αλκαλίων.

## Καθαρότητα Καυσίμου

Το καύσιμο πρέπει να είναι καθαρό από σωματίδια, νερό και επιμολυντές. Τα σωματίδια (σκουριά, βρωμιές κ.λπ.) μπορούν να βουλώσουν τα φίλτρα και να αυξήσουν τις φθορές της αντλίας καυσίμου. Το νερό, αφενός δεν μπορεί να καεί στον κινητήρα, αφετέρου παγώνει στις χαμηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στο ύψος πτήσης των αεροσκαφών με τον πάγο να βουλώνει τα φίλτρα και να παρεμποδίζει την ροή του καυσίμου, ενώ παράλληλα διευκολύνει τη διάβρωση των μετάλλων και ευνοεί την μικροβιακή ανάπτυξη. Άλλες πηγές επιμόλυνσης είναι διαφορετικά προϊόντα πετρελαίου, απορρυπαντικά, μικρόβια και βαφές.

## Μικροβιακή ανάπτυξη

Κατά την παραγωγή του το αεροπορικό καύσιμο είναι στείρο μικροβίων λόγω των εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών των διεργασιών. Σύντομα όμως αρχίζει να επιμολύνεται από μικροοργανισμούς (βακτήρια και μύκητες) που πάντα υπάρχουν στον αέρα και το νερό. Αυτοί τρέφονται με καύσιμο, νερό (οπότε αναπτύσσονται συνήθως στην διεπιφάνεια καυσίμου / νερού, όταν υπάρχει υδατική φάση) και μεταλλικά συστατικά που περιέχονται στο καύσιμο, ενώ η ανάπτυξή τους διευκολύνεται από ενδεχόμενες υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

## Ιδιότητες σχετιζόμενες με την ασφάλεια

Τα αεροπορικά καύσιμα, αν δεν έχουν σωστή διαχείριση, μπορεί να αποδειχθούν επικίνδυνα. Το πιο σημαντικό είναι ότι είναι εύκολο να αναφλεγούν. Παράλληλα, η επαφή με το υγρό καύσιμο ή τους ατμούς του πρέπει να είναι περιορισμένη. Το ίδιο το καύσιμο στην υγρή του μορφή δεν καίγεται, καίγονται όμως οι ατμοί του, όταν το μίγμα τους με τον αέρα είναι εντός του εύρους ευφλεκτότητας. Υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορούν να θερμάνουν το καύσιμο τόσο ώστε οι ατμοί να φτάσουν στο εύρος ευφλεκτότητας, ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις το μίγμα ατμών υδρογονανθράκων και αέρα, που βρίσκεται στο χώρο πάνω από το καύσιμο σε κλειστό χώρο, είναι αρκετά κάτω από το ελάχιστο σημείο ευφλεκτότητας. Εντούτοις, απουσία συγκεκριμένων πληροφοριών που να συνηγορούν προς άλλη κατεύθυνση, σε κάθε περίπτωση η διαχείριση του καυσίμου πρέπει να θεωρείται δυνητικά επικίνδυνη και να λαμβάνονται πάντα τα ενδεδειγμένα μέτρα ασφαλείας.

## Σημείο Ανάφλεξης και μέθοδοι ελέγχου

Το σημείο ανάφλεξης είναι η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία οι ατμοί πάνω από ένα εύφλεκτο υγρό θα αναφλεγούν όταν έρθουν σε επαφή με πηγή ανάφλεξης. Πρόκειται για την ελάχιστη θερμοκρασία ευφλεκτότητας υπό τις συνθήκες εκτέλεσης του ελέγχου, δηλαδή, σε άλλες συνθήκες δεν είναι απαραίτητο ότι η ελάχιστη θερμοκρασία ευφλεκτότητας θα είναι η ίδια. Ειδικά για τα δείγματα αεροπορικών καυσίμων προδιαγράφονται τιμές σημείου ανάφλεξης με τις μεθόδους ASTM D56, ASTM D3828, IP303, IP523, IP170. Σύμφωνα με την ASTM, μία ποσότητα του καυσίμου τοποθετείται σε έναν πωματιζόμενο περιέκτη και θερμαίνεται με αργό, σταθερό ρυθμό. Σε κανονικά χρονικά διαστήματα, το πώμα ανοίγει και μία πηγή ανάφλεξης (πχ φλόγα) κατευθύνεται στο εσωτερικό του περιέκτη όπου βρίσκεται το δείγμα. Σημείο ανάφλεξης είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία, στην οποία η πηγή

προκαλεί ανάφλεξη του ατμού που έχει συγκεντρωθεί πάνω από το δείγμα. Σύμφωνα με την ASTM μία ποσότητα καυσίμου τοποθετείται σε πωματιζόμενο περιέκτη και αυτός θερμαίνεται μέχρι μία επιλεγμένη θερμοκρασία. Μετά από προδιαγεγραμμένο χρόνο, το πώμα ανοίγει, μια φλόγα εισάγεται και παρατηρείται αν υπάρχει ή όχι ανάφλεξη. Ο έλεγχος επαναλαμβάνεται σε άλλες επιλεγμένες θερμοκρασίες, μέχρι να προσδιοριστεί το σημείο ανάφλεξης εντός της απαιτούμενης ακρίβειας (ως 0,5°C)

## Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Καθώς το καύσιμο κινείται εντός αγωγών, σωληνώσεων, βαλβίδων ή φίλτρων, στην διεπιφάνεια μπορεί να αναπτυχθεί ηλεκτρικό φορτίο όπως σε κάθε περίπτωση που διαφορετικής φύσης υλικά κινούνται ερχόμενα σε επαφή. Ο ρυθμός απομάκρυνσης ηλεκτρικού φορτίου είναι ανάλογος της αγωγιμότητας του καυσίμου. Παρόλο που το καύσιμο αποτελείται από υδρογονάνθρακες, οι οποίοι είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, περιέχει επίσης ίχνη ενώσεων που μπορούν να ιονιστούν όπως π.χ. το νερό, οι φαινόλες και τα ναφθενικά οξέα. Όταν ένα υγρό χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, όπως το αεροπορικό καύσιμο, αντλείται με μεγάλη ταχύτητα ή διέρχεται από φίλτρο, η συγκέντρωση ηλεκτροστατικού φορτίου μπορεί να είναι ταχύτερη από την απομάκρυνσή του. Όταν το συγκεντρωμένο φορτίο ξεπερνάει την ενέργεια ιονισμού του αέρα που βρίσκεται πάνω από το υγρό, μπορεί να προκύψει αποφόρτιση της επιφάνειας του υγρού με τη μορφή σπινθήρα. Εάν το υγρό είναι εύφλεκτο και η σύνθεση του μίγματος ατμού / αέρα πάνω από αυτό βρίσκεται στο εύρος ευφλεκτότητας, η ενέργεια του σπινθήρα μπορεί να προκαλέσει έκρηξη. Προκειμένου να αποφευχθούν εκρήξεις από σπινθήρες λόγω στατικού ηλεκτρισμού, χρησιμοποιούνται καλά σχεδιασμένα συστήματα διακίνησης καυσίμων με γειώσεις, όρια ρυθμού άντλησης και χρόνο αποφόρτισης πριν εκτεθεί το καύσιμο στον αέρα. Παράλληλα χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα αντιστατικά πρόσθετα που ελαττώνουν τον κίνδυνο συγκέντρωσης ηλεκτρικού φορτίου: δεν μειώνουν τη δημιουργία ηλεκτροστατικού φορτίου, αλλά αυξάνουν τον ρυθμό απομάκρυνσής του, με την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του καυσίμου.

## Εκπομπές Ρυπαντών

Οι εκπομπές ρυπαντών από τα αεροσκάφη αποτελούν ένα μικρό μόνο ποσοστό των αντίστοιχων από τα οχήματα ξηράς και άλλες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο έδαφος. Η έρευνα για το κατά πόσο συμμετέχουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση, εφόσον το μεγαλύτερο μέρος τους αποβάλλεται σε μεγάλο ύψος, βρίσκεται σε εξέλιξη.[9] Όταν οι υδρογονάνθρακες καίγονται πλήρως, τα προϊόντα της καύσης θεωρητικά είναι μόνο διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Ωστόσο στην πραγματικότητα, όταν καίγεται το αεροπορικό καύσιμο και λόγω των ιχνών θείου και αζώτου που περιέχονται σε αυτό, αλλά και ανάλογα με το σχεδιασμό της μηχανής και τις συνθήκες λειτουργίας, εκπέμπονται επιπλέον οξειδία του θείου, οξειδία του αζώτου, υδρογονάνθρακες που δεν κάηκαν πλήρως και σωματίδια (τέφρα). Το εκπεμπόμενο διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί αέριο που συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και εμπλέκεται στην κλιματική αλλαγή, η ποσότητά του είναι ανάλογη της ποσότητας του καυσίμου που καίγεται και η ελάττωσή του επιτυγχάνεται με κατασκευαστικές βελτιώσεις των αεροσκαφών. Οι ατμοί νερού, ενώ δεν αποτελούν πρόβλημα στο επίπεδο του εδάφους, όταν εκπέμπονται στο μεγάλο ύψος πτήσης

των αεροσκαφών αποτελούν πρόβλημα, εφόσον οδηγούν στην δημιουργία λευκής "ουράς" ή νεφελωμάτων που ενδεχομένως συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα οξειδία του θείου, που προέρχονται από την καύση ενώσεων θείου που περιέχονται στα καύσιμα, θεωρείται ότι συνεισφέρουν στην δημιουργία αερολυμάτων (aerosols) και στην δημιουργία σωματιδίων, όμως η προσπάθεια ελάττωσής τους μέσω της μείωσης του περιεχόμενου θείου των καυσίμων μπορεί να μεταβάλλει άλλες ιδιότητες του καυσίμου και αυτό πρέπει να συνεκτιμηθεί. Τα οξειδία του αζώτου, τα οποία θεωρείται ότι συνεισφέρουν στην δημιουργία στρώματος όζοντος στην επιφάνεια του εδάφους, προέρχονται κυρίως από την οξειδωση του αζώτου της ατμόσφαιρας στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στον καυστήρα, συνεπώς μπορούν να μειωθούν με βελτιώσεις στον σχεδιασμό των αεροσκαφών και των συνθηκών λειτουργίας, ώστε οι θερμοκρασίες καύσης να διατηρούνται σε χαμηλότερα επίπεδα. Τα σωματίδια και οι υδρογονάνθρακες που δεν έχουν καεί, προέρχονται από την ατελή καύση, είναι ορατά με τη μορφή καπνού, η ποσότητά τους εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το σχεδιασμό της μηχανής και τις συνθήκες λειτουργίας και δευτερευόντως από διάφορες ιδιότητες του καυσίμου (π.χ. σημείο καπνού, αρωματικά, ναφθαλένια), ενώ συνεισφέρουν στην δημιουργία νέφους επικίνδυνου για την εισπνοή.



**Σχήμα 3.57:** "Ουρά" ατμών από την εξάτμιση αεροσκάφους Boeing 777 κατά την πτήση σε ύψος 7,620 ως 12,192 m.

### 3.4.8) Στρόβιλος (turbine)

Ο πρωταρχικός σκοπός του στροβίλου (turbine) είναι να παράγει την απαιτούμενη ισχύ για την περιστροφή του συμπιεστή. Ο στρόβιλος απορροφά ενέργεια από το ρεύμα των θερμών καυσαερίων κατά την έξοδό τους από τον θάλαμο καύσης και την μετατρέπει σε μηχανική ενέργεια για την παραγωγή ισχύος ή ροπής. Γενικά ο στρόβιλος αποτελείται από το περίβλημα, το στάτορα, τα δακτύλιο και το ρότορα. Το περίβλημα περιβάλλει το στάτορα και το ρότορα. Φέρει φλάντζες στα δυο άκρα του για την σύνδεση του τμήματος του στροβίλου με τα τμήματα του θαλάμου καύσης και του ακροφυσίου εξαγωγής. Ο στάτορας βρίσκεται προς την πλευρά του θαλάμου καύσης και δέχεται πρώτο τα καυσαέρια που εξέρχονται από αυτόν και είναι σταθερά πτερύγια που έχουν το σχήμα αεροτομής. Τα πτερύγια παρουσιάζουν στένωση, έτσι η ταχύτητα των καυσαερίων να αυξάνεται ώστε να έχουν αρκετά μεγάλη τιμή όταν φτάσουν στα κινητά πτερύγια. Τα πτερύγια ακόμα δίνουν στα καυσαέρια την κατάλληλη κατεύθυνση ώστε να αποδώσουν την μέγιστη ισχύ στον στρόβιλο. Ο δακτύλιος τοποθετείται στην εσωτερική και εξωτερική περιφέρεια των πτερυγίων του στάτορα. Ο ρότορας ή στροφείο λειτουργεί ως διαχύτης. Με τον τρόπο αυτό μετατρέπει το εισερχόμενο αέρα σε πίεση. Η διατομή δυο διαδοχικών κινητών πτερυγίων του στροβίλου, μειώνεται προς το χείλος εκφυγής τους. Έτσι η ροή των καυσαερίων επιταχύνεται. Έτσι έχουμε μείωση της πίεσης και



της θερμοκρασίας, δηλαδή συνθήκες κατάλληλες για την παραγωγή έργου. Με άλλα λόγια ο **στρόβιλος** ή **τουρμπίνα**, είναι ένας κινητήρας που εξάγει ενέργεια από τη ροή ενός ρευστού και τη μετατρέπει σε ωφέλιμο έργο. Αν το ρευστό είναι αέριο καλείται *αεριοστρόβιλος* ενώ αν είναι υγρό λέγεται *υδροστρόβιλος*. Ο στρόβιλος γενικά μπορεί να είναι τόσο ακτινικής όσο και αξονικής ροής. Η πιο απλή μορφή αεριοστρόβιλου είναι μια συνδεσμολογία στροφείου όπου σε έναν άξονα ή τύμπανο προσαρτώνται πτερύγια. Το ρευστό επιδρά στα πτερύγια και αυτά αντιδρώντας στη ροή περιστρέφουν το στροφείο. Παραδείγματα απλών τουρμπινών αποτελούν οι ανεμόμυλοι και οι νερόμυλοι. Δηλαδή ο στρόβιλος (Σχήμα 3.58 ) είναι το εξάρτημα το οποίο μετατρέπει την ενέργεια εκτόνωσης των καυσαερίων σε μηχανική ισχύ. Ανάλογα με το που διαθέτουν τη μηχανική ισχύ τους, διακρίνουμε δύο τύπους στροβίλων :

- Ο **αεριοστρόβιλος ακτινικής ροής** χαρακτηρίζεται από το συμπαγές και στιβαρό της κατασκευής του, ενώ πλεονεκτεί και ως προς τη μέθοδο κατασκευής αφού κατασκευάζεται με χύτευση. Έχει λοιπόν εφαρμογή σε μικρού μεγέθους στροβιλοσυμπιεστές και για κινητήρες που χρησιμοποιούν ελαφρά κλάσματα, αφού παρουσιάζονται δυσκολίες, στην απομάκρυνση κατά τη λειτουργία, σωματιδίων που επικάθονται σε αυτόν. Για μεγαλύτερες κατασκευές το βάρος αυξάνεται σημαντικά ενώ και η χύτευση μεγάλων κομματιών παρουσιάζει δυσκολίες. Οι απώλειες πίεσης που οφείλονται στη μείωση του μεγέθους για τους αξονικούς στροβίλους δεν επηρεάζουν την λειτουργία τους σε υψηλές πιέσεις. Στους αεριοστρόβιλους ακτινικής ροής τα καυσαέρια οδηγούνται στο στροφείο μέσω ενός σπειροειδούς κελύφους το οποίο δίνει τη συστροφή στη ροή. Πριν το στροφείο μπορεί να παρεμβάλλεται μια σταθερή πτερύγωση η οποία χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τη γωνία προσπτώσεως της ροής στα κινητά πτερύγια. Με κατάλληλη ρύθμιση της κλίσεως των σταθερών πτερύγιων είναι δυνατή η ρύθμιση της παροχής καυσαερίων, της ισχύος και των στροφών του στροβίλου. Με άλλα λόγια ο **αεριοστρόβιλος ακτινικής ροής** ή αλλιώς ο **στρόβιλος του συμπιεστή** (Compressor Turbine, CT), ο οποίος παρέχει ισχύ κυρίως για την κίνηση του συμπιεστή, αλλά και των διαφόρων παρελκόμενων συστημάτων του κινητήρα που χρειάζονται μηχανική ενέργεια.
- Οι **αεριοστρόβιλοι αξονικής ροής** μπορεί να είναι μίας ή (σπάνια) δυο βαθμίδων. Κάθε βαθμίδα αποτελείται από μια σειρά σταθερών πτερύγιων που ακολουθείται από μια σειρά κινητών πτερύγιων. Μέσα στον στάτορα η ροή αποκτά συστροφή την οποία αφαιρεί το στροφείο απορροφώντας ενέργεια από το ρευστό. Τα πτερύγια του στροβίλου επειδή διαβρέχονται από τα καυσαέρια, λειτουργούν σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες. Η μεγάλη ταχύτητα περιστροφής τους δημιουργεί ισχυρές φυγοκεντρικές δυνάμεις οι οποίες σε συνδυασμό με τη υψηλή θερμοκρασία καταπονούν ιδιαίτερα τα πτερύγια. Επιπλέον στην περίπτωση υπάρξεως συστήματος παλμών δημιουργούνται ισχυρές ταλαντώσεις στα πτερύγια. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας και της οριακής φορτίσεως θα πρέπει να ελέγχεται συνεχώς



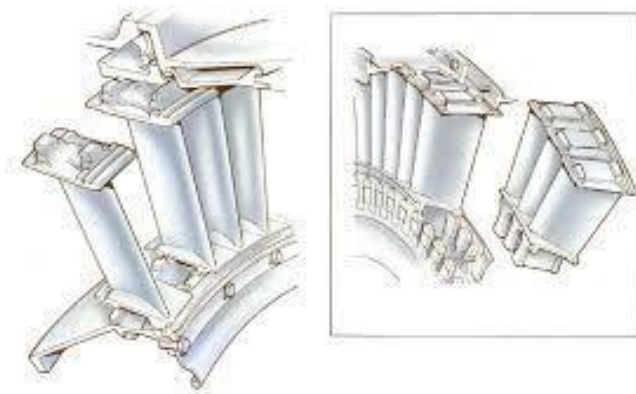
η μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων. Με άλλα λόγια ο **αεριοστρόβιλος αξονικής ροής ή στρόβιλος ισχύος** (Power Turbine, PT), που συναντάται κυρίως στους βιομηχανικούς αεριοστρόβιλους, ως δεύτερος μετά το στρόβιλο του συμπιεστή. Οι δύο στρόβιλοι είναι <<αεροδυναμικά>> συνδεδεμένοι και όχι <<μηχανικά>>. Ο στρόβιλος ισχύος παραλαμβάνει το υπόλοιπο μέρος της δύναμης εκτόνωσης των καυσαερίων, δίνοντας κίνηση στο ρότορα ενός καθοδηγούμενου μηχανήματος(π.χ. γεννήτριας, αντλίας, κ.λπ.) μέσω ενός δευτέρου άξονα.

Υπάρχει όμως περίπτωση ένας και μόνο στρόβιλος να οδηγεί και το συμπιεστή και το εξωτερικό φορτίο, δηλαδή να είναι ταυτόχρονα CT & PT.



**Σχήμα 3.58:** Στρόβιλος αξονικής και ακτινικής ροής.

Ένα και μόνο πτερύγιο του στρόβιλου μπορεί να παράγει ισχύ έως και 300 hp. Κάθε πτερύγιο έχει λίγο πιο πάνω από τη ρίζα (root) του και στην κορυφή (tip) του, από ένα μικρό τμήμα υλικού το οποίο συνδυαζόμενο με τα αντίστοιχα των υπολοίπων σχηματίζει τελικά δύο δακτύλιους σταθεροποίησης (shrouds), έναν κοντά στη ρίζα και έναν στην κορυφή, όπως φαίνεται στο (σχήμα 3.59).



**Σχήμα 3.59:** Πτερύγιο στρόβιλου

Ο στρόβιλος αποτελείται, όπως έχει ήδη ειπωθεί, από βαθμίδες σαν το συμπιεστή. Επίσης, η χωροταξική τους διάταξη διαφέρει. Έτσι, σε κάθε βαθμίδα στροβίλου προηγείται η σταθερή σειρά πτερυγίων (συνήθως αποκαλούνται Nozzle Guide Vanes, NGVs) και ακολουθεί η κινητή. Τέλος, τα πτερύγια του στροβίλου παρουσιάζουν μεγαλύτερη κυρτότητα και πάχος από αυτά του συμπιεστή, ενώ γενικά έχουν πολύ μικρότερο μήκος. Ο αριθμός των βαθμίδων του στροβίλου αλλά και ο αριθμός των στροβίλων (κατ' αντιστοιχία με το συμπιεστή) εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- τον ολικό λόγο πίεσης,
- τον αριθμό των αξόνων που θα χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση συμπιεστών και στροβίλων,
- το ποσό της ενέργειας που πρέπει να παραλάβει από τα καυσαέρια ο στρόβιλος (παραγόμενη ισχύ),
- τον αριθμό των στροφών λειτουργίας ( N σε rpm),
- τη μέγιστη διάμετρο την οποία μπορεί να έχει το στροφέιο του στροβίλου, και
- τις θερμοκρασίες και πιέσεις στην είσοδο και την έξοδο του στροβίλου.

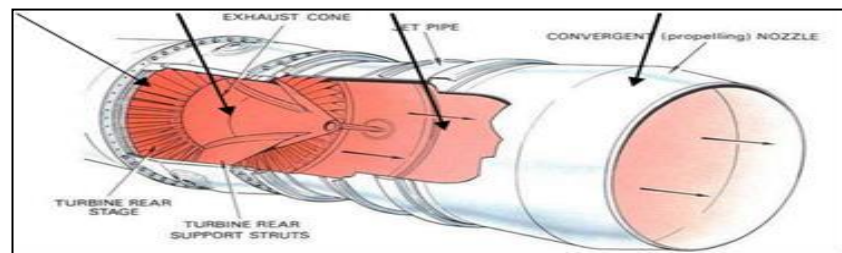
Η διάμετρος των στροβίλων αυξάνεται κατά την κατεύθυνση της ροής των καυσαερίων, καθώς αυξάνεται ο όγκος τους, ενώ μειώνεται η ταχύτητα και η πίεση των καυσαερίων. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου είναι της τάξης **0.87-0.97**, ενώ ο λόγος εκτόνωσης ανά βαθμίδα στροβίλου είναι **2.0-2.4** και είναι αισθητά μεγαλύτερος από το λόγο της αντίστοιχης βαθμίδας του συμπιεστή. Επειδή ο στρόβιλος συνήθως συνδέεται με το συμπιεστή με κοινό άξονα, επιβάλλεται να ρυθμιστούν κατάλληλα οι συνθήκες λειτουργίας του συμπιεστή και του στροβίλου, ώστε να λειτουργούν αποδοτικά στην ίδια περιστροφική ταχύτητα. Ο στρόβιλος λειτουργεί κάτω από ακραίες συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και μεγάλων στρεπτικών και φυγοκεντρικών δυνάμεων. Τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων του στροβίλου είναι σιδηρούχα ή ωστενιτικά κράματα με βάση το νικέλιο ή το τιτάνιο, ενώ ενίοτε εφαρμόζονται και πυρίμαχες επιστρώσεις από σύγχρονα κεραμικά υλικά όπως το ωιτρίδιο και το καρβίδιο του πυριτίου. Είναι χαρακτηριστικό ότι το κόστος κατασκευής ενός πτερυγίου του στροβίλου αντιστοιχεί στο βάρος του σε χρυσό!

### 3.4.9) Συστήματα εξαγωγής

#### Εισαγωγή

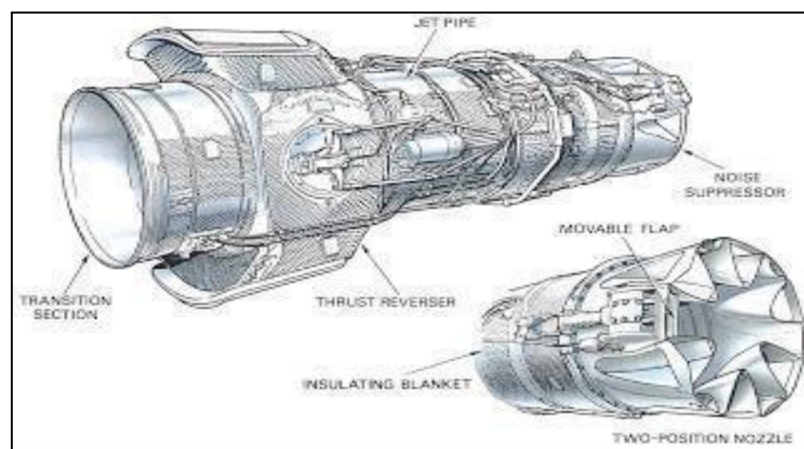
Οι αεριοστρόβιλοι έχουν ένα σύστημα εξαγωγής, που οδηγεί τα καυσαέρια από τον στρόβιλο προς την ατμόσφαιρα με ορισμένη ταχύτητα και διεύθυνση. Η ταχύτητα και πίεση των καυσαερίων δημιουργούν την ώση του αεριοστρόβιλου. Στον ελικοστρόβιλο μικρό μέρος της ώσης οφείλεται στα καυσαέρια, γιατί το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του έχει απορροφηθεί από τον στρόβιλο, που κινεί την έλικα. Η σχεδίαση λοιπόν της εξαγωγής έχει σημαντική επίδραση στις

επιδόσεις του κινητήρα. Οι επιφάνειες του σωλήνα και του ακροφυσίου εξαγωγής επηρεάζουν την θερμοκρασία καυσαερίων εισαγωγής στον στρόβιλο, την ροή αέρα και την ταχύτητα και πίεση των καυσαερίων εξαγωγής. Η θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο του τμήματος εξαγωγής είναι 550-850 °C ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα. Οι ελικοστρόβιλοι και οι αεριοστρόβιλοι διπλής ροής έχουν την ψυχρότερη ροή καυσαερίων. Όταν έχουμε μετάκαυση, η θερμοκρασία στον σωλήνα εξαγωγής φθάνει τους 1500 °C ή ακόμη περισσότερο. Παρά το γεγονός, ότι η ψηλή αυτή θερμοκρασία δεν επηρεάζει άμεσα τα τοιχώματα λόγω του τρόπου καύσης και του συστήματος ψύξης, είναι αναγκαία η χρήση κατάλληλων υλικών και ανάλογου τρόπου κατασκευής για να αποφύγουμε παραμόρφωση, ρωγμές και αγωγιμότητα θερμότητας προς την δομή του αεροπλάνου. Ο σωλήνας εξαγωγής αεριοστρόβιλου με μετάκαυση επίσης απαιτεί την πρόβλεψη ακροφυσίου εξαγωγής δύο θέσεων ή μεταβλητής διατομής για την επίτευξη αποδοτικής εξαγωγής και λειτουργίας στους διαφορετικούς όγκους καυσαερίων, που προκύπτουν, όταν το σύστημα μετάκαυσης είναι και όταν δεν είναι σε λειτουργία.

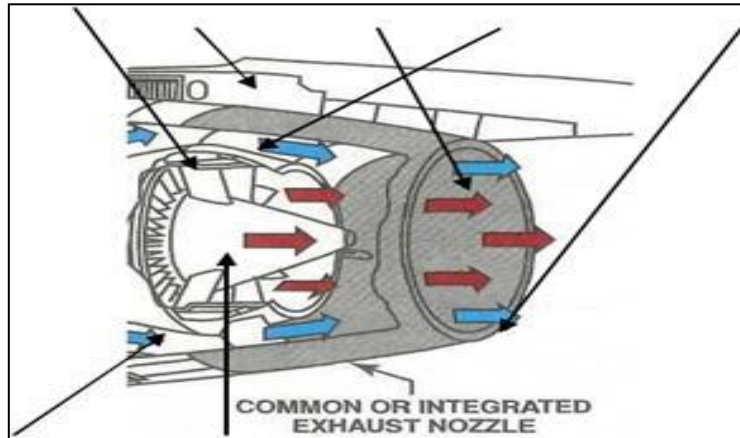


**Σχήμα 3.60 :** Βασικό σύστημα εξαγωγής

Ένα βασικό σύστημα εξαγωγής παριστάνεται στο (σχήμα 3.60). Η χρήση αναστροφέα ώσης, η μειωτή θορύβου ή ενός ακροφυσίου μεταβλητής διατομής, επιβάλλουν πιο πολύπλοκη κατασκευή, όπως φαίνεται στο (σχήμα 3.61). Ο αεριοστρόβιλος διπλής ροής επίσης μπορεί να διαθέτει συγκρότημα ανάμειξης, για να διευκολύνει την ανάμειξη θερμού και ψυχρού ρεύματος (σχήμα 3.62).



**Σχήμα 3.61:** Σύστημα εξαγωγής με αναστροφέα ώσης, μειωτήρα θορύβου και προωθητικό ακροφύσιο μεταβλητής διατομής



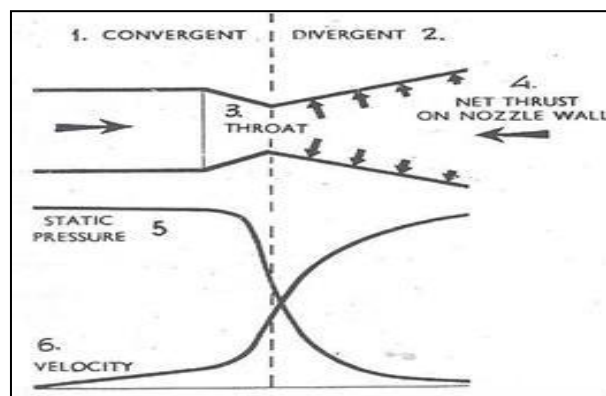
1. Ακτινικά στηρίγματα
2. Αγωγός παράκαμψης
3. Αέρας παράκαμψης αναμειγνύεται με καυσαέριο εξαγωγής
4. Ελάσματα αναμεικτήρα
5. Φλάντζα προσαρμογής σωλήνα εξαγωγής
6. Διάφραγμα διαχωρισμού
7. Εσωτερικός κώνος τμήματος εξαγωγής

**Σχήμα 3.62:** Συγκρότημα ανάμειξης του αέρα παράκαμψης

### Ροή Καυσαερίων

Τα καυσαέρια από τον στρόβιλο εισέρχονται στο τμήμα εξαγωγής με ταχύτητες 750-1200 ποδιών ανά δευτερόλεπτο. Επειδή όμως σε τέτοιες ταχύτητες ροής θα είχαμε μεγάλες απώλειες τριβών, η ταχύτητα της ροής επιβραδύνεται με διάχυση. Αυτή επιτυγχάνεται με την δημιουργία αυξανόμενης διατομής εξόδου ανάμεσα στο περίβλημα και τον κώνο εξαγωγής (σχήμα 3.63). Ο κώνος επίσης εμποδίζει τα καυσαέρια να έρχονται σε επαφή με την πίσω επιφάνεια του δίσκου. Συνήθως η ταχύτητα στο τμήμα εξαγωγής κρατιέται σε αριθμό MAX 0,5 περίπου, που αντιστοιχεί σ' αυτή την θερμοκρασία σε 950 πόδια ανά δευτερόλεπτο περίπου. Πρόσθετες απώλειες ενέργειας συμβαίνουν λόγω στροβιλισμού της ροής από την περιστροφή του στροβίλου. Για μείωση αυτών των απωλειών τα στηρίγματα του κώνου εξαγωγής ευθυγραμμίζουν την ροή, πριν τα αέρια εισέλθουν στον σωλήνα εξαγωγής. Τα καυσαέρια εξέρχονται στην ατμόσφαιρα μέσω του ακροφυσίου εξαγωγής, που σχηματίζει συγκλίνοντα αγωγό, για αύξηση της ταχύτητας εξαγωγής. Σε ένα αεριοστρόβιλο η ταχύτητα των καυσαερίων εξαγωγής είναι υποηχητική, μόνο σε συνθήκες χαμηλής ώσης. Κατά την διάρκεια των περισσότερων συνθηκών λειτουργίας, η ταχύτητα εξαγωγής φθάνει την ταχύτητα του ήχου σχετικά με την θερμοκρασία καυσαερίων και τότε το ακροφύσιο εξαγωγής λέγεται <<στραγγαλισμένο>> (choked). Αυτό σημαίνει, ότι δεν είναι δυνατή παραπάνω αύξηση ταχύτητας, εκτός αν αυξηθεί η θερμοκρασία των καυσαερίων. Καθώς αυξάνεται η ολική πίεση προς τα πίσω, πάνω από τη τιμή, που αντιστοιχεί στον

στραγγαλισμό του ακροφυσίου, στατική πίεση στην εξαγωγή αυξάνεται πάνω από την ατμοσφαιρική. Αυτή η διαφορά πίεσης στο ακροφύσιο εξαγωγής δίνει την ώση πίεσης όπως ονομάζεται και είναι αποτελεσματική στην επιφάνεια εξόδου του ακροφυσίου. Αυτή είναι επιπρόσθετη ώση και επιτυγχάνεται λόγω της αλλαγής στον ορμή των καυσαερίων. Με τον συγκλίνοντα τύπο ακροφυσίου έχουμε απώλεια ενέργειας, γιατί τα καυσαέρια που εξέρχονται δεν εκτονώνονται αρκετά γρήγορα, ώστε να αποκτήσουν αμέσως την ατμοσφαιρική πίεση. Ανάλογα προς το σχέδιο πτήσης του αεροπλάνου, μερικοί κινητήρες βαθμού συμπίεσης, μπορούν να χρησιμοποιήσουν αποδοτικά ένα ακροφύσιο συγκλίνον-αποκλίνον για να ανακτήσουν μέρος της απώλειας ενέργειας. Αυτό το ακροφύσιο χρησιμοποιεί την ενέργεια της πίεσης για παραπάνω αύξηση ταχύτητας και επομένως αύξηση στην ώση.



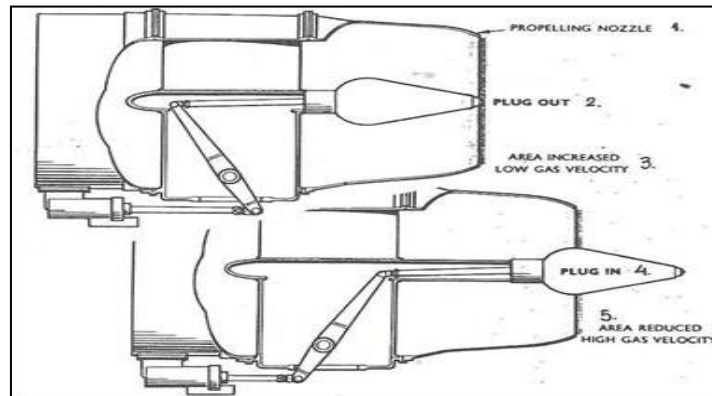
1. Συγκλίνον
2. Αποκλίνον
3. Στένωση
4. Καθαρή ώση στο τοίχωμα του ακροφυσίου
5. Στατική πίεση
6. Ταχύτητα

**Σχήμα 3.63:** Ροή μέσω συγκλίνοντος αποκλίνοντος ακροφυσίου

Από το (σχήμα 3.63) φαίνεται, ότι το συγκλίνον τμήμα τώρα γίνεται ο λαιμός της εξαγωγής, ενώ η τελική εξαγωγή μετακινείται στο τέλος του αποκλίνοντος τμήματος. Τα καυσαέρια καθώς εισέρχονται στο συγκλίνον τμήμα επιταχύνονται μέχρι να αποκτήσουν ηχητική ταχύτητα στον λαιμό. Στο αποκλίνον τμήμα επιταχύνονται σε υπερηχητικές ταχύτητες μέχρι την έξοδο. Η αντίδραση σ' αυτή την αύξηση ταχύτητας και ορμής δρα στα εσωτερικά τοιχώματα αυτού του τμήματος. Από τις δυνάμεις που δημιουργούνται, αυτή που είναι παράλληλη προς τον άξονα του ακροφυσίου, δημιουργεί μια παραπάνω αύξηση στην ώση. Το μέγεθος του ακροφυσίου εξαγωγής είναι πολύ σημαντικό και πρέπει να σχεδιάζεται για να εξασφαλίζει την σωστή ισορροπία μεταξύ πιέσεων, θερμοκρασιών και ώσης. Με μικρό ακροφύσιο αυτές οι τιμές αυξάνονται, αλλά δημιουργείται κίνδυνος αντίθλιψης



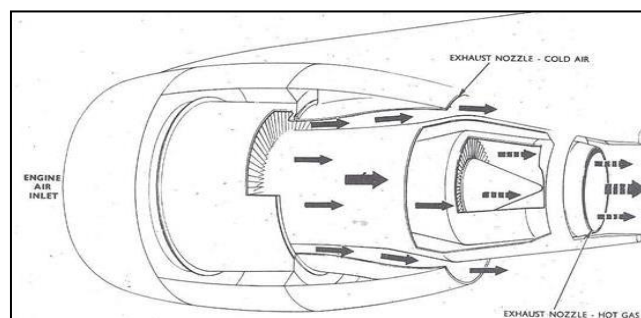
στον συμπιεστή. Με μεγάλο ακροφύσιο οι παραπάνω τιμές μειώνονται. Σε μερικούς κινητήρες χρησιμοποιείται ακροφύσιο εξαγωγής μεταβλητής διατομής. Η αυξομείωση μπορεί να επιτευχθεί με την χρησιμοποίηση ενός πτερυγίου, ή με την μετακίνηση προς τα μέσα ή έξω κώνου (σχήμα 3.64).



1. Προωθητικό ακροφύσιο
2. Βύσμα έξω
3. Αυξημένη διατομή – χαμηλή ταχύτητα αερίων
4. Βύσμα μέσα
5. Μειωμένη διατομή – ψηλή ταχύτητα αερίων
- 6.

**Σχήμα 3.64:** Ακροφύσιο εξαγωγής μεταβλητής διατομής με κώνο

Όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος, μια αύξηση στην διατομή επιτρέπει να έχουμε ευκολότερη εκκίνηση σε χαμηλές θερμοκρασίες και στροφές, λόγω της μείωσης της αντίστασης στην ροή από την πίεση στον στρόβιλο. Με μειωμένη διατομή αυξάνουμε την ώση. Η μεταβολή της διατομής επιτρέπει επίσης επίτευξη χαμηλής ειδικής κατανάλωσης κατά την λειτουργία του κινητήρα σε ορισμένες συνθήκες.



1. Εισαγωγή αέρα κινητήρα αεροπλάνου
2. Ακροφύσιο εξαγωγής – Κρύος αέρας
3. Ακροφύσιο εξαγωγής – Θερμά αέρια

**Σχήμα 3.65:** Σύστημα εξαγωγής θερμών και ψυχρών αερίων



Ο αεριοστρόβιλος διπλής ροής έχει δύο ρεύματα αέρα για εξαγωγή στην ατμόσφαιρα, το ψυχρό ρεύμα παράκαμψης και το θερμό ρεύμα καυσαερίων. Τα δύο ρεύματα συνδυάζονται σε ένα συγκρότημα ανάμειξης, που εξασφαλίζει στο ρεύμα παράκαμψης κατάλληλη είσοδο προς το ρεύμα των καυσαερίων, ώστε να έχουμε πολύ καλή ανάμειξη. Στους αεριοστρόβιλους μπροστινού ανεμιστήρα το θερμό και ψυχρό ρεύμα εξάγονται χωριστά (σχήμα 3.65). Τα δύο ρεύματα είναι ομοαξονικά και τα δύο ακροφύσια σχεδιάζονται για επίτευξη μέγιστης απόδοσης.

### Κατασκευή και υλικά

Το σύστημα εξαγωγής πρέπει να μπορεί να αντέξει τις ψηλές θερμοκρασίες καυσαερίων και επομένως πρέπει να κατασκευάζεται από ειδικό θερμό-ανθεκτικό χάλυβα. Πρέπει επίσης να εμποδίζει απαγωγή θερμότητας προς την γύρω δομή του αεροπλάνου. Αυτό επιτυγχάνεται με την ροή αέρα γύρω από τον σωλήνα εξαγωγής ή με την επένδυση των τμημάτων της εξαγωγής με ένα μονωτικό υλικό (σχήμα 3.66). Κάθε επένδυση διαθέτει ένα εσωτερικό στρώμα μόνωσης, που περιβάλλεται από ένα εξωτερικό στρώμα από ανοξείδωτο χάλυβα, σε φολιδωτό σχήμα για αύξηση αντοχής. Επίσης μερικές φορές χρησιμοποιούνται στην εξαγωγή ηχομονωτικά υλικά για την μείωση του θορύβου.



**Σχήμα 3.66:** Μονωτική επένδυση

Όταν η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι πολύ ψηλή (π.χ. όταν έχουμε μετάκαυση), τότε ο σωλήνας εξαγωγής μπορεί να είναι διπλός με δακτυλιοειδές διάκενο μεταξύ των δύο τοιχωμάτων. Τα θερμά αέρια, που εγκαταλείπουν το ακροφύσιο εξαγωγής, δημιουργούν μία ροή αέρα μέσω του δακτυλιοειδούς αυτού διακένου του φορέα του κινητήρα. Αυτή η ροή μειώνει την θερμοκρασία του εσωτερικού και χρησιμεύει σαν θερμομόνωση, γιατί μειώνει τη μεταφορά θερμότητας από το εσωτερικό προς το εξωτερικό τοίχωμα. Ο κώνος και τα αεροδυναμικά στηρίγματα στο τμήμα εξαγωγής υφίστανται την πίεση των καυσαερίων. Έτσι και για αποφυγή παραμορφώσεων υπάρχουν οπές απαέρωσης για απόκτηση μιας εξίσωσης πιέσεων. Το συγκρότημα ανάμειξης, που αναφέραμε, αποτελείται από ένα αριθμό εισόδων, μέσω των οποίων το ψυχρό ρεύμα περνά προς τη ροή των καυσαερίων. Λόγω των μεγάλων μεταβολών στη θερμοκρασία, που επικρατεί στο σύστημα εξαγωγής, πρέπει αυτό να στερεώνεται και να έχει τα τμήματα του ενωμένα με τέτοιους τρόπους, ώστε να υπάρχει περιθώριο διόγκωσης (αξονικής και ακτινικής) και δημιουργίας των σχετικών δυνάμεων χωρίς παραμόρφωση ή βλάβη.

### 3.4.10) Θερμικοί εναλλάκτες αεροσκαφών

**Θερμικοί εναλλάκτες (heat exchanger):** Οι θερμικοί εναλλάκτες έχουν διαφορετική μορφή ανάλογα με τη θέση τους στο θερμοδυναμικό κύκλο. Οι πιο γνωστοί τύποι είναι ο κλασσικός ο αναγεννητικός, ο ενδιάμεσος ψύκτης και ο αντικαταστάτης του θαλάμου καύσης στους αεριοστρόβιλους κλειστού κύκλου. Γενικά οι θερμικοί εναλλάκτες είναι του τύπου αέριο – αέριο ή αέριο – υγρό και διαφόρων τεχνολογιών, όπως σταυρωτοί, αντιρροής κ.λπ. Ανάλογα με τον τύπο και τη φάση των κυκλοφορούντων ρευστών ο βαθμός απόδοσής τους κυμαίνεται από **0.75 – 0.92**, ενώ η τεχνολογία των υλικών τους επιτρέπει μέγιστη τιμή θερμοκρασίας λειτουργίας μέχρι **950 K**.

#### Χρήση θερμικών εναλλακτών σε αεριοστρόβιλους:

- **Με αναγεννητική προθέρμανση:** Η πιο σημαντική τροποποίηση που μπορεί να εισαχθεί σε έναν απλό θερμοδυναμικό κύκλο για να αυξήσει τη θερμική απόδοση του είναι η διεργασία της προθέρμανσης. Στην ουσία πρόκειται για έναν εναλλάκτη τύπου αέρα-αέρα, όπου είναι τοποθετημένος ανάμεσα στον συμπιεστή και στο θάλαμο καύσης και χρησιμοποιείται για να προθερμαίνει το συμπιεσμένο αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης, εκμεταλλευόμενος την θερμότητα των καυσαερίων. Επίσης, διευκρινίζεται σε αυτό το σημείο ότι όταν η προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα γίνεται με καυσαέρια που δεν αναμιγνύονται με αυτόν, τότε ο εναλλάκτης θερμότητας ονομάζεται **racuperator**, ενώ όταν αναμιγνύονται λέγεται **regenerator**. Τέλος, στα μειονεκτήματα αυτής της διαμόρφωσης πρέπει φυσικά να τονιστεί η ύπαρξη του εναλλάκτη θερμότητας (προθερμαντήρας), που λειτουργεί με αέρα/αέρα και άρα καταλαμβάνει μεγάλο όγκο, ενώ ανεβάζει την πολυπλοκότητα, το κόστος της όλης εγκατάστασης και της συντήρησης.
- **Ενδιάμεσης ψύξης:** Ένας εναλλάκτης τύπου αέρα-νερό τοποθετημένος ανάμεσα σε δυο συμπιεστές ή ανάμεσα σε δυο τύμπανα του ίδιου συμπιεστή χρησιμοποιείται για να ψύξει το συμπιεσμένο αέρα προτού αυτός συμπιεστεί ξανά για να φτάσει στην τελική τιμή του λόγου πίεσης.
- **Με αναθέρμανση ή μετάκαυση:** Στους βιομηχανικούς μερικές φορές υπάρχει, πριν τον τελευταίο στρόβιλο, ένας επιπλέον θάλαμος καύσης που ανεβάζει και πάλι την θερμοκρασία των καυσαερίων στα επίπεδα της θερμοκρασίας εισόδου του στον στρόβιλο (TET). Στους αεροπορικούς από την άλλη, κάποιες φορές εκχύνουμε επιπλέον καύσιμο στον αγωγό εξαγωγής προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο και πάλι εξίσου μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων πριν αυτά εγκαταλείψουν το προωθητικό ακροφύσιο.
- **Με συνδυασμό των παραπάνω.**

### 3.5) ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΓΙΑ ΜΑΧΗΤΙΚΟ

#### Στροβιλοαντιδραστήρας (turbojet)

Χρησιμοποιήθηκε σε μαχητικά αεροσκάφη υπερηχητικών ταχυτήτων πρώτης και δεύτερης γενιάς. Αυτός ήταν ο πρώτος και πιο απλός τύπος αεροπορικού αεροστροβίλου που αναπτύχθηκε.

Διαφέρει από τον αεριοπαραγωγό ως προς την προσθήκη μετά από τον στρόβιλο, του συστήματος εξαγωγής. Χρησιμοποιεί τη ροή των καυσαερίων που σχηματίζονται στο ακροφύσιο εξαγωγής (συγκλίνον ή συγκλίνον-αποκλίνον) ως το μοναδικό μέσο παραγωγής ώσης για την κίνηση του αεροσκάφους.

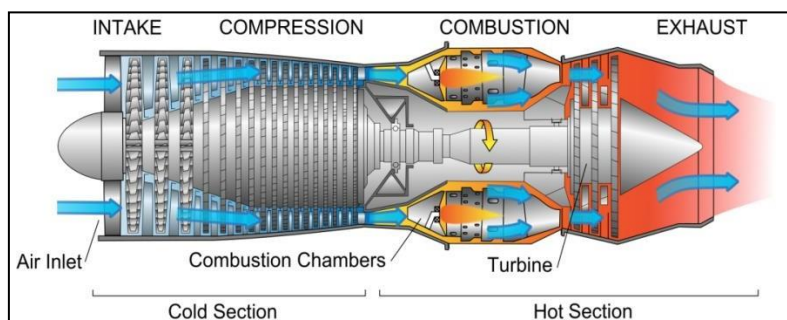
Οι κινητήρες αυτοί, επιτυγχάνουν μεγάλη επιτάχυνση μικρών σχετικά μαζών αέρα, ενώ η ταχύτητα των καυσαερίων μπορεί να αυξηθεί ύστερα και από μια πρόσθετη διεργασία καύσης, που αποκαλείται μετάκαυση.

Μειονέκτημα αυτού του κινητήρα είναι ότι στις χαμηλές ταχύτητες πτήσης η παραγόμενη ώση είναι αναλογικά μικρή. Ο λόγος είναι ότι απαιτείται ικανοποιητική πίεση εισαγωγής αέρα στο συμπιεστή για την αποδοτική λειτουργία του. Αυτός είναι και ένας λόγος όπου ένα αεροσκάφος που χρησιμοποιεί στροβιλοαντιδραστήρα χρειάζεται μεγάλο διάδρομο απογείωσης, ώστε να αυξηθεί ικανοποιητικά η πίεση εισαγωγής και συνεπώς η ώση κατά την απογείωση του αεροσκάφους.

Άλλα σοβαρά μειονεκτήματα του στροβιλοαντιδραστήρα είναι η αυξημένη κατανάλωση καυσίμου και τα αυξημένα επίπεδα θορύβου (Σχήμα 3.67) .



Σχήμα 3.67: Κινητήρας turbojet σε τομή



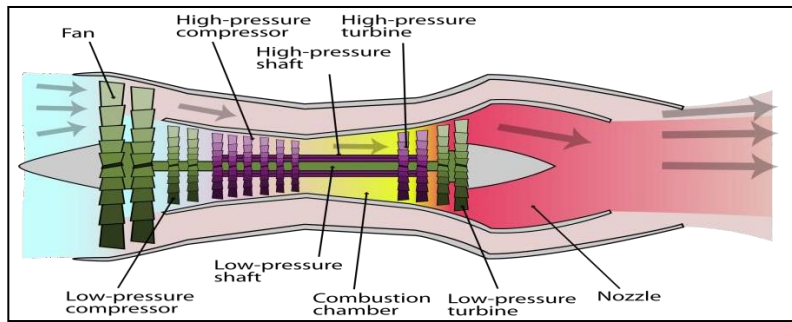
Σχήμα 3.68: turbojet

## Στροβιλοανεμιστήρας (turbofan)

Χρησιμοποιείται στα σύγχρονα αεροπλάνα υψηλών υποηχητικών, διηχητικών ή υπερηχητικών ταχυτήτων, μαχητικά αεροσκάφη τρίτης και άνω γενιάς και πολιτικά αεροσκάφη μέσω ή μεγάλων ταχυτήτων. Τα αεροσκάφη που τον φέρουν αναπτύσσουν μεγάλες ταχύτητες πτήσης και σε μεγάλα ύψη, ενώ παράλληλα δεν απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλος διάδρομος για την απογείωση. Χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι μετά από μια πρώτη συμπίεση το ρεύμα του ατμοσφαιρικού αέρα χωρίζεται σε δύο ρεύματα. Το ένα ρεύμα αυτό της παράκαμψης παρακάμπτει τον πυρήνα του κινητήρα και εκτονώνεται απ' ευθείας στην ατμόσφαιρα. Το άλλο ρεύμα εισέρχεται σε αυτόν και ακολουθεί την φυσιολογική πορεία πριν εκτονωθεί όπως και στους στροβιλοαντιδραστήρες. Ο λόγος της παροχής μάζας του αέρα που παρακάμπτει τον πυρήνα προς αυτήν που εισέρχεται, ονομάζεται λόγος παράκαμψης. Η επιλογή του κατάλληλου στροβιλοανεμιστήρα, για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, εξαρτάται από τον λόγο παράκαμψης. Όταν ο λόγος των δυο ροών είναι μικρός χρησιμοποιείται κοινό ακροφύσιο, με τα δύο ρεύματα να επανασυνδέονται στο πίσω μέρος του κινητήρα όπου υπάρχει συνήθως και σύστημα μετάκαυσης. Όταν ο λόγος παράκαμψης μεγαλώνει τότε η αρχική συμπίεση γίνεται ουσιαστικά από έναν ανεμιστήρα που παίζει το ρόλο του συμπιεστή χαμηλής πίεσης. Ο ανεμιστήρας είναι μια έλικα στην οποία έχει τοποθετηθεί περιφερειακά περίβλημα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αύξηση της απόδοσης της έλικας κυρίως στις υψηλές στροφές καθώς και μείωση του θορύβου που προέρχεται από αυτήν. Επομένως, εάν η ροή στο εξωτερικό ρεύμα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στο εσωτερικό χρησιμοποιούνται συνήθως δύο ξεχωριστά ακροφύσια ένα για κάθε ρεύμα. Σημαντικά πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου κινητήρα είναι η αυξημένη παραγωγή ισχύος ανά μονάδα βάρους, η καλή ειδική κατανάλωση καυσίμου και ο μειωμένος θόρυβος κατά την απογείωση (Σχήμα 3.69).



Σχήμα 3.69: Κινητήρας turbofan



**Σχήμα 3.70:** Κινητήρας Turbofan

### Μέρη κινητήρων (Turbojet-Turbofan)

Η εισαγωγή του αέρα πραγματοποιείται από ειδικό αεραγωγό εισαγωγής, ο οποίος, αν και αποτελεί στην πραγματικότητα μέρος του αεροσκάφους και όχι του κινητήρα, είναι σημαντικός επειδή η παροχή αέρα είναι απαραίτητη για την λειτουργία του κινητήρα. Ο αεραγωγός πρέπει κατευθύνει τον αέρα στον συμπιεστή όσον το δυνατόν πιο ομοιόμορφα και με τις λιγότερες τριβές και στροβιλισμούς. Η διατομή του αεραγωγού αυξάνεται κατά μήκος του ώστε να αυξηθεί η στατική πίεση. Το σχήμα και η θέση του αεραγωγού εισαγωγής εξαρτάται από τον τύπο του αεροσκάφους. Ο αεραγωγός μπορεί να διαθέτει οδηγεί πτερύγια για να διευκολύνει τη ροή του αέρα. Πίσω ακριβώς από τον αεραγωγό είναι ο αεροσυμπιεστής. Ο ρόλος του αεροσυμπιεστή είναι να συμπιέζει τον εισερχόμενο αέρα στον κινητήρα ώστε να γίνει πυκνότερος. Οι αεροσυμπιεστές μπορεί να είναι φυγοκεντρικής ή αξονικής ροής ή και συνδυασμός των δύο τύπων. Οι συμπιεστές αξονικής ροής αποτελούνται από σταθερά (στάτορες) και κινητά (ρότορες) πτερύγια. Ο συμπιεσμένος αέρας περνά μέσω το διαχύτη στο θάλαμο καύσης. Στο διαχύτη η πίεση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της μέσα στο κινητήρα. Ο θάλαμος καύσης είναι το μέρος στο οποίο γίνεται καύση του καυσίμου μαζί με τον αέρα που εξέρχεται από το συμπιεστή. Τα εξερχόμενα αέρια στη συνέχεια κινούν ένα στρόβιλο, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το συμπιεστή, έτσι ώστε η περιστροφή του στρόβιλου να περιστρέφει και τον συμπιεστή. Χρησιμοποιείται αποκλειστικά στρόβιλος αξονικού τύπου. Αν ο συμπιεστής σε υψηλούς λόγους συμπίεσης γίνεται χρήση πολλαπλών στρόβιλων. Οι στρόβιλοι προστατεύονται από τα θερμά αέρια με ένα σύστημα ψύξης. Τα καυτά αέρια μόλις περάσουν από τον τελευταίο στρόβιλο βγαίνουν στην ατμόσφαιρα μέσα από το σύστημα εξαγωγής. Η διαφοροποίηση του αεροστρόβιλου για μαχητικό αεροσκάφος από τα υπόλοιπα αεροσκάφη (όπως τα επιβατηγά) είναι ότι έχουν **διαφορετικό σύστημα εξαγωγής** και ενίοτε **μετακαυστήρα**. Το σύστημα εξαγωγής αποτελείται από το κώνο, τον αγωγό και το ακροφύσιο εξαγωγής. Έχει ως στόχο να αυξήσει την παραγόμενη ώθηση με την εξίσωση της πίεσης των αερίων με την ατμοσφαιρική. Σε κάποιους κινητήρες ανάμεσα στον στρόβιλο και το ακροφύσιο βρίσκεται ο μετακαυστήρας.



### 3.6) Η μετάκαυση στους αεροπορικούς κινητήρες

Μέσω της μετάκαυσης, του λεγόμενου δηλαδή **afterburning**, επιτυγχάνεται αύξηση της ταχύτητας του αεροσκάφους με άμεση συνέπεια την αύξηση της προωστικής δύναμης (ώσης), σε ποσοστό που κυμαίνεται από 40 έως 70% ανάλογα με τον κινητήρα, σε σχέση με την ξηρά ώση. Χρησιμοποιείται κυρίως στα μαχητικά - υπερηχητικά αεροσκάφη. Με μετακαυστήρες ήταν εφοδιασμένοι και οι κινητήρες των πολιτικών αεροσκαφών Concorde και Tu-144. Πλέον, οι περιορισμοί θορύβου κάνουν απαγορευτική τη χρήση μετάκαυσης σε πολιτικά και εμπορικά αεροσκάφη. Ήταν αναμενόμενη η υπεροχή του μετακαυστήρα έναντι της χρήσης μεγαλύτερου κινητήρα, αφού θα επιβάρυνε το αεροσκάφος με μεγαλύτερη μετωπική επιφάνεια, επιπρόσθετο βάρος και μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου.



**Σχήμα 3.71:** Μετακαυστήρας σε μαχητικό αεροσκάφος

**Χρησιμοποιείται** κυρίως κατά την φάση της απογείωσης για την επίτευξη μέγιστης ταχύτητας και για την ταχεία ανάκτηση κινητικής ενέργειας μετά από ενεργοβόρους ελιγμούς.

#### **Πώς λειτουργεί;**

Η επιπλέον ώθηση δημιουργείται από την έγχυση επιπλέον καυσίμου στην απόληξη του κινητήρα, με αποτέλεσμα την ανάφλεξή του και τη περαιτέρω θέρμανση των αερίων.

#### **Πού μειονεκτεί;**

Η χρήση μετάκαυσης αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου έως και τρεις φορές, κάτι που σημαίνει ότι η χρήση της περιορίζεται σε ελάχιστα λεπτά κατά την διάρκεια μίας αποστολής. Με δεδομένο ότι η τριπλάσια κατανάλωση οδηγεί σε αύξηση μόλις 40% έως 70% της τελικής ταχύτητας, γίνεται φανερό ότι η απόδοση της μετάκαυσης είναι εξαιρετικά μειωμένη!



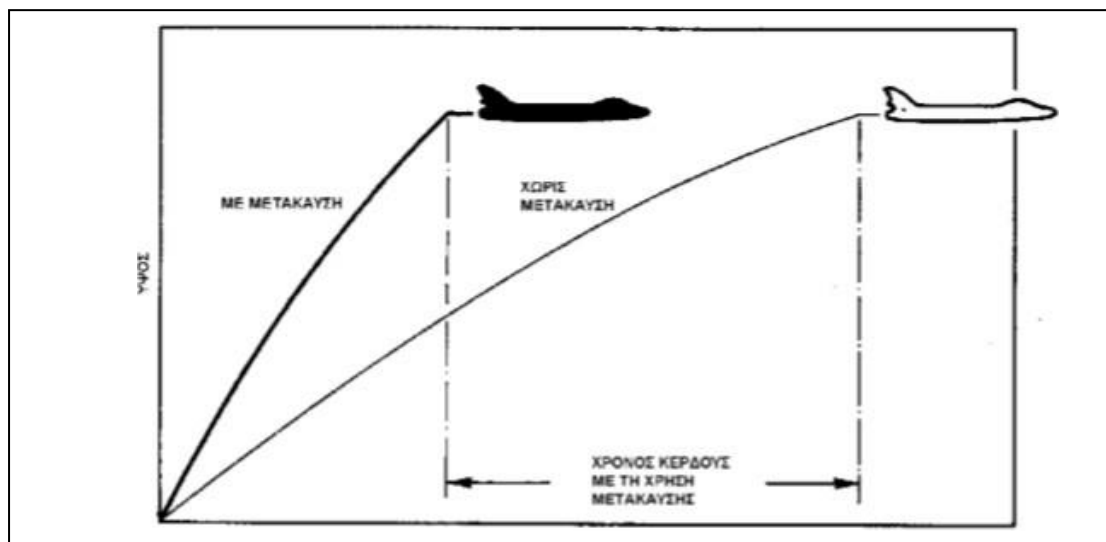
## Σε ποια αρχή στηρίζεται;

Η ώθηση των κινητήρων και κατ'επέκταση η χρήση της μετάκαυσης, στηρίζεται στη γενική αρχή του ρυθμού ροής μάζας. Η ώση εξαρτάται από δύο πράγματα: α) από τη ταχύτητα των καυσαερίων και β) από τη μάζα του εν λόγω αερίου. Έτσι, για να αυξήσουμε την ώση ενός αεροπορικού τζετ κινητήρα, είτε θα αυξήσουμε την επιτάχυνση του αερίου μέσω υψηλότερης ταχύτητας είτε θα αυξήσουμε τη μάζα των αερίων στην έξοδο του κινητήρα. Ένας turbofan κινητήρας, μπορεί να παρέχει εξαιρετικά υψηλή απόδοση καυσίμου με υψηλή παραγωγή ώσης για μεγάλο χρονικό διάστημα αλλά απαιτείται μεγάλο μέγεθος/όγκος του κινητήρα σε σχέση με την ισχύ που βγάζει στην έξοδο. Γενικά ο turbofan κινητήρας, παράγει μικρής ταχύτητας αέρια στην έξοδο αλλά μεγάλης μάζας/ποσότητας.

## Γενική λειτουργία

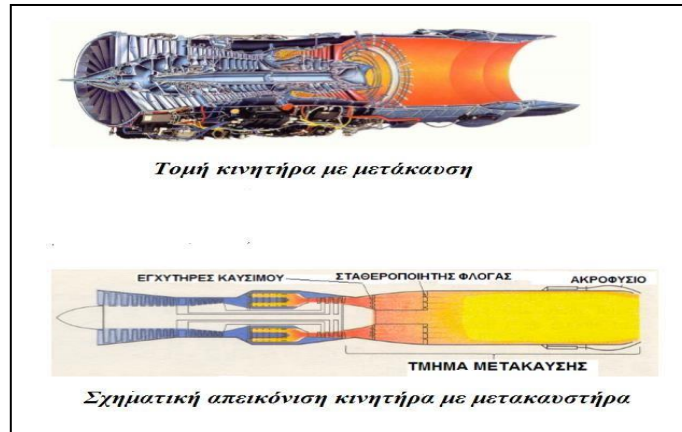
Η θερμοκρασία του αερίου στον κινητήρα είναι υψηλότερη λίγο πριν από το στρόβιλο και η ικανότητα της τουρμπίνας να αντέχει σε αυτές τις θερμοκρασίες είναι ένας από τους πρωτογενείς περιορισμούς επί της συνολικής ξηρής ώσης του κινητήρα. Αυτή η θερμοκρασία είναι γνωστή ως η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο (TET) και αποτελεί μία από τις κρίσιμες παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα. Επειδή ο ρυθμός καύσης είναι αρκετά υψηλός για να καταναλώσει όλη την εισερχόμενη ποσότητα οξυγόνου, είναι σε θέση να δημιουργήσει υψηλές θερμοκρασίες στην εισαγωγή του στροβίλου (ιδίως τις πρώτες σειρές των πτερυγίων) με αποτέλεσμα να τον υπερθερμάνει. Για να αποφύγουμε λοιπόν την υπερθέρμανση, η ροή του καυσίμου πρέπει να περιοριστεί σε τέτοιο βαθμό ώστε το καύσιμο, αντί του οξυγόνου, να γίνει ο περιοριστικός παράγοντας της αντίδρασης, αφήνοντας έτσι κάποια ποσότητα οξυγόνου να ρέει και μετά το πέρασμα του στροβίλου. Μετά το πέρασμα του στροβίλου, το αέριο διαστέλλεται υπό σταθερή (σχεδόν) εντροπία, χάνοντας έτσι θερμοκρασία. Έτσι, ο μετακαυστήρας εγχέει καύσιμο και αναθερμαίνει το αέριο. Σε συνδυασμό λοιπόν με την πρόσθετη θερμότητα, η πίεση ανεβαίνει και το αέριο εκτοξεύεται μέσα από το ακροφύσιο με υψηλότερη ταχύτητα. Η ροή μάζας επίσης αυξάνεται ελαφρώς εξαιτίας της προσθήκης καυσίμου. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της χρήσης μετάκαυσης, είναι η φλόγα στο πίσω μέρος/έξοδο του κινητήρα. Καθώς περισσότερο καύσιμο καίγεται στο μετακαυστήρα, τα καυσαέρια αποκτούν μεγαλύτερη ενέργεια και εκτομώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό, οπότε επιτυγχάνεται μεγαλύτερη παραγόμενη ώση. Το μέγεθος της ώσης αυτής εξαρτάται από την ποσότητα του καυσίμου που εγχέεται στο μετακαυστήρα και τις θερμοκρασίες καυσαερίων που επιτυγχάνονται. Βέβαια, αυτές δεν πρέπει να υπερβαίνουν τη θερμοκρασία αντοχής των υλικών κατασκευής της εξαγωγής του κινητήρα. Στον αντίποδα της αύξησης της παραγόμενης ώσης με τη χρήση μετάκαυσης, βρίσκεται η

αύξηση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα. Τονίζεται ότι η το καύσιμο καίγεται κατά τη διάρκεια της μετάκαυσης με μικρό βαθμό απόδοσης, λόγω των συνθηκών μεγάλης ταχύτητας και μικρής πίεσης του, στις οποίες πραγματοποιείται η καύση. Επίσης, η χρήση της μετάκαυσης συμβάλλει στη μείωση του χρόνου και της απόστασης απογείωσης και ανόδου του αεροσκάφους, όπως καταγράφεται παραστατικά στο (Σχήμα 3.72). Με αυτά τα δεδομένα, η αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου που παρατηρείται, και είναι περίπου τρεις έως τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την κανονική, δε θεωρείται απαγορευτική για τη χρήση της μετάκαυσης.



**Σχήμα 3.72:** Η χρήση της μετάκαυσης μειώνει το χρόνο και την απόσταση απογείωσης και ανόδου του αεροσκάφους

Με λίγα λόγια λοιπόν, 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. Τα επίπεδα του θορύβου ξεπερνούν κατά πολύ τις ήδη αυξημένες τιμές που λαμβάνουν κατά τη λειτουργία χωρίς μετάκαυση.



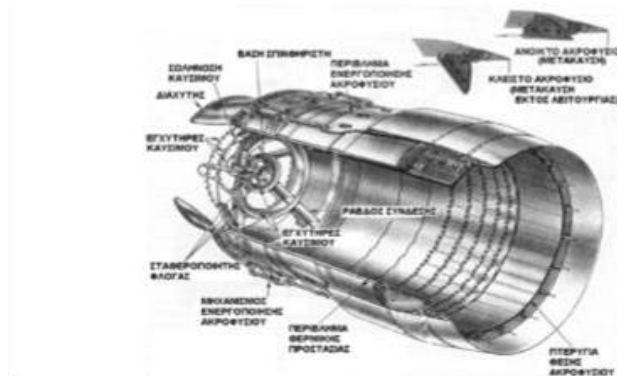
**Σχήμα 3.73:** Τομή κινητήρα με μετάκαυση

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:

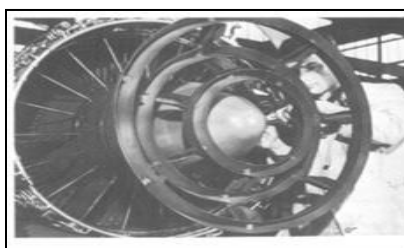
- α) ο αγωγός εξαγωγής (flame duct) ο οποίος περιέχει το φλογοθάλαμο (flame tube)
- β) το σύστημα έγχυσης του καυσίμου
- γ) ο σταθεροποιητής της φλόγας (flame holder) και
- δ) το μεταβλητής γεωμετρίας ακροφύσιο εξαγωγής

Στο Σχήμα 3.74 φαίνεται ένας τυπικός μετακαυστήρας που χρησιμοποιείται στους αεριοστρόβιλους κινητήρες της Rolls-Royce ενώ στο Σχήμα 3.75 φαίνεται η συνδεσμολογία των μερών που αποτελούν τον μετακαυστήρα του στροβιλοαντιδραστήρα J-79 της General Electric.



**Σχήμα 3.74:** Διάταξη μετακαυστήρα κινητήρων Rolls-Royce

Όταν ο μετακαυστήρας δε βρίσκεται σε λειτουργία, το ακροφύσιο εξαγωγής λειτουργεί με τη μικρότερη δυνατή γεωμετρία εξόδου και ο μετακαυστήρας λειτουργεί σαν αγωγός εξαγωγής. Η γεωμετρία εξόδου μεταβάλλεται με τη λειτουργία θυρίδων ελέγχου (interlocking flaps) και ειδικού συστήματος ελέγχου, το οποίο θα εξετάσουμε παρακάτω. Η σχεδίαση του μετακαυστήρα πρέπει να είναι τέτοια ώστε αυτός να μην διαταράσσει τις πιέσεις λειτουργίας του κινητήρα. Ο κινητήρας πρέπει να «αγνοεί» την ύπαρξη του μετακαυστήρα, ακόμη και όταν ο τελευταίος βρίσκεται σε λειτουργία. Βέβαια, παρόλες τις προσπάθειες βέλτιστου σχεδιασμού, αυτό δεν είναι εφικτό. Η ύπαρξη μετακαυστήρα επιβάλλει την αύξηση της διατομής του αγωγού εξαγωγής του κινητήρα, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας των καυσαερίων. Ακόμη, τα εμπόδια που παρεμβάλλονται στη ροή των καυσαερίων μέσα στο μετακαυστήρα προκαλούν μείωση στην παραγόμενη ώση του κινητήρα, όταν το σύστημα μετάκαυσης δε λειτουργεί. Τέλος, το βάρος του κινητήρα που φέρει σύστημα μετάκαυσης είναι αυξημένο λόγω του βαρύτερου αγωγού εξαγωγής και των εξαρτημάτων του μετακαυστήρα. Ο αγωγός εξαγωγής κατασκευάζεται από κράματα χάλυβα με μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες ενώ απαιτεί και καλύτερη ηχομόνωση από τους κοινούς αγωγούς εξαγωγής. Σε κάποιες περιπτώσεις, ο αγωγός αποτελείται από διπλό τοίχωμα και στο δακτύλιο που σχηματίζεται ανάμεσα στα δύο κελύφη κυκλοφορεί αέρας για την καλύτερη ψύξη του φλογοθαλάμου. Αυτός φέρει ειδικές οπές για την καλύτερη κυκλοφορία του αέρα ψύξης. Για την αποφυγή της οξειδωσής του από τα διαβρωτικά καυσαέρια, ο φλογοθάλαμος επικαλύπτεται με ειδικό κεραμικό επίστρωμα. Η εισαγωγή των καυσαερίων από την τελευταία βαθμίδα του στροβίλου στο μετακαυστήρα γίνεται με ταχύτητες της τάξης των 250 έως 400 m/sec. Η κλίμακα ταχυτήτων αυτή είναι απαγορευτική για την καύση. Για το λόγο αυτόν, το εμπρόσθιο τμήμα του μετακαυστήρα έχει τη διατομή διαχύτη. Έτσι, επιτυγχάνεται η μείωση της ταχύτητας των καυσαερίων και η αύξηση της πίεσής τους. Όμως, ακόμη και σε αυτές τις συνθήκες, η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας είναι μικρότερη από την ταχύτητα των καυσαερίων. Η διορθωτική κίνηση είναι η εγκατάσταση του σταθεροποιητή της φλόγας αμέσως μετά τους εγχυτήρες καυσίμου. Σκοπός του σταθεροποιητή είναι η δημιουργία στροβιλισμού της ροής με επακόλουθη μείωση της ταχύτητάς της και επίτευξη σταθερής φλόγας. Ο σταθεροποιητής της φλόγας έχει διατομή κυκλική, «V». Συνήθως, αποτελείται από τρεις ομόκεντρους δακτυλίους.



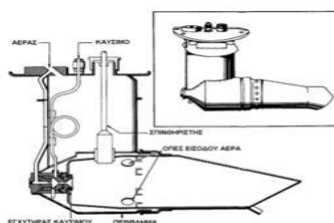
**Σχήμα 3.75:** Σταθεροποιητής φλόγας

Το σύστημα έγχυσης του καυσίμου είναι ξεχωριστό από αυτό του κινητήρα. Χρησιμοποιείται ξεχωριστή αντλία καυσίμου, η οποία παροχετεύει καύσιμο σε μία σειρά εγχυτήρων. Αυτοί τοποθετούνται ομοιόμορφα στην περιφέρεια του αγωγού εξαγωγής ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη έγχυση καυσίμου. Στους κινητήρες με λόγο παράκαμψης η έγχυση του καυσίμου γίνεται μετά τη μείξη των δύο ρευμάτων. Υπάρχει, όμως, και η περίπτωση της ξεχωριστής έγχυσης καυσίμου στις δύο ροές και η μείξη των δύο ρευμάτων πριν από το ακροφύσιο εξαγωγής. Στο *Σχήμα 3.76* φαίνεται το σύστημα έγχυσης καυσίμου μετακαυστήρα του κινητήρα J-79 της General Electric.



**Σχήμα 3.76:** Σύστημα έγχυσης καυσίμου μετάκαυσης κινητήρα GE J-79

Θα μπορούσε κάποιος να αναμένει ότι λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας με την οποία τα καυσέρια εισέρχονται στο μετακαυστήρα, η ανάφλεξη του μείγματος που σχηματίζουν με το καύσιμο επιτυγχάνεται μόνη της. Αυτή η κατάσταση εξαρτάται από το ύψος και την ταχύτητα της πτήσης. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ανεξάρτητη πηγή έναυσης η οποία μπορεί να προέρχεται από σύστημα έναυσης διαφόρων ειδών. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης, πριν το στρόβιλο. Επιτυγχάνεται μία θερμή φλόγα (hot spot ignition), η οποία διαπερνά το στρόβιλο και δημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες για την έναυση στο μετακαυστήρα. Το μειονέκτημα της μεθόδου ήταν η θερμοκρασιακή καταπόνηση των βαθμίδων του στρόβιλου. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε η μέθοδος της καταλυτικής ανάφλεξης. Τα καυσέρια και το καύσιμο αναμειγνύονται και οδηγούνται πάνω σε μεταλλικό στοιχείο (πλατίνα), όπου και πραγματοποιείται η έναυση. Τέλος, η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι αυτή της χρήσης ενός συστήματος παροχής σπινθήρων (torch igniter). Αυτό τοποθετείται δίπλα σε έναν εγχυτήρα καυσίμου και λειτουργεί, παρέχοντας σπινθήρα, καθόλη τη διάρκεια της λειτουργίας του μετακαυστήρα (*Σχήμα 3.77*). Έτσι, εξασφαλίζεται η έναυση του μετακαυστήρα, ανεξάρτητα από το ύψος και την ταχύτητα της πτήσης.



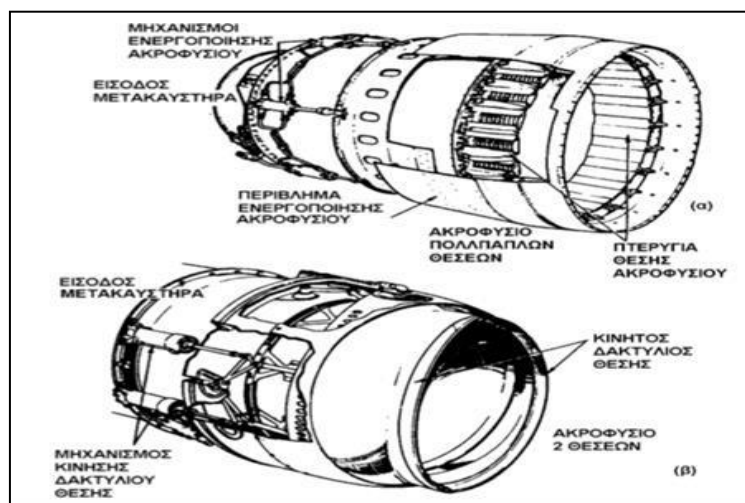
**Σχήμα 3.77:** Σύστημα παροχής σπινθήρα στο χώρο του μετακαυστήρα

Το ακροφύσιο εξαγωγής αποτελεί ξεχωριστό τμήμα που προσαρμόζεται στον αγωγό εξαγωγής. Καθώς αυξάνεται η ενέργεια των καυσαερίων κατά τη διάρκεια της μετάκαυσης, το ακροφύσιο εξαγωγής πρέπει να είναι σε θέση να αυξήσει την επιφάνεια στην έξοδό του. Τα καυσαέρια με τον τρόπο αυτόν θα εκτονωθούν κανονικά. Από την άλλη πλευρά, η επιφάνεια εξόδου του ακροφυσίου θα πρέπει να επανέλθει στη μικρότερη τιμή της όταν ο μετακαυστήρας σταματήσει να λειτουργεί. Η παραπάνω διαδικασία επιτυγχάνεται με τη χρήση:

- Ακροφυσίου δύο θέσεων (ανοικτό – κλειστό, eyelid-type), Σχήμα 3.78(α).

Το ακροφύσιο φέρει δύο ξεχωριστούς δακτυλίους θέσης, που εξασφαλίζουν την ανοικτή ή κλειστή θέση του ακροφυσίου.

- Ακροφυσίου με πτερύγια μεταβλητής θέσης (interlocking flaps), Σχήμα 2.117(β). Τα αρθρωτά πτερύγια αυτά κινούνται με λάδι λίπανσης, καύσιμο, αέρα ή ηλεκτρικό ρεύμα και δίνουν στο ακροφύσιο εξαγωγής διατομή ανάλογη με την επιλογή του χειριστή του αεροσκάφους.



**Σχήμα 3.78:** Είδη ακροφυσίων

Για την κανονική λειτουργία του συστήματος μετάκαυσης εγκαθίσταται σύστημα ελέγχου της διατομής του ακροφυσίου εξαγωγής.

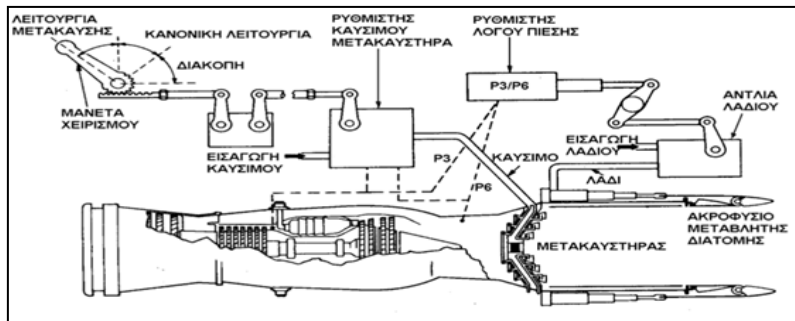
Αυτό περιλαμβάνει:

- τις θυρίδες,
- μία αντλία για την παροχή της πίεσης του μέσου που κινεί τις θυρίδες, και
- ένα ρυθμιστή του λόγου της πίεσης του αέρα μετά το συμπιεστή προς την πίεση των καυσαερίων μετά το στρόβιλο, P3/P6.

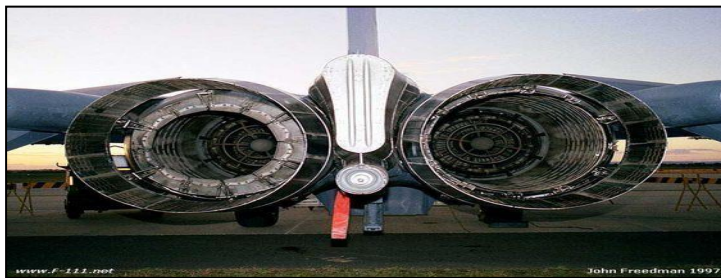
Μετά την επιλογή της λειτουργίας της μετάκαυσης από το χειριστή, ο ρυθμιστής καυσίμου μετάκαυσης αυξάνει την παροχή της αντίστοιχης αντλίας. Το σύστημα ελέγχου καυσίμου μετάκαυσης συνεργάζεται με το σύστημα ελέγχου της διατομής του ακροφυσίου. Η ανάφλεξη του μείγματος καυσίμου μετάκαυσης και καυσαερίων δημιουργεί αύξηση στην πίεση του αγωγού εξαγωγής P6 (Σχήμα 3.79). Τότε, ο λόγος των πιέσεων P3/P6 μεταβάλλεται.



Ο ρυθμιστής του λόγου πιέσεων αυξάνει την παροχή της αντλίας που ελέγχει την κίνηση των θυρίδων, αυτές ανοίγουν και τα καυσαέρια εκτονώνονται. Έτσι, μειώνεται η πίεση στον αγωγό εξαγωγής και αποκαθίσταται και η τιμή του λόγου P3/P6. Με τον τρόπο αυτόν, η λειτουργία του υπόλοιπου κινητήρα δεν επηρεάζεται από την μετάκαυση!



Σχήμα 3.79: Σύστημα ελέγχου διατομής ακροφυσίου εξαγωγής



Σχήμα 3.80:α) Πίσω όψη ακροφυσίου (μετακαυστήρα),β) μετάκαυση εν ώρα πτήσης, γ) μετάκαυση κατά την εκκίνηση μαχητικού αεροσκάφους.

### 3.7) ΣΧΕΔΙΑΣΗ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ, ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

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 την 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 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

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 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 μολυβδαίνιο 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 το 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.

### **3.8) ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΕΙΔΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΥΠΩΝ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΟΒΙΛΩΝ**

Οι τύποι των αεριοστροβίλων κινητήρων παρουσιάζουν πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα τα οποία συνοπτικά είναι:

- Ο **στροβιλοαντιδραστήρας**, είναι ο πιο απλός αεριοστροβίλος κινητήρας, διότι κατασκευάζεται, συντηρείται με ευκολία και κοστίζει λιγότερο. Όμως, παρουσιάζει και μειονεκτήματα τα οποία είναι:
  1. Οι χαμηλές ταχύτητες πτήσης,
  2. Η παραγόμενη ώση είναι αναλογικά μικρή,
  3. Χρειάζεται μεγάλο διάδρομο απογείωσης,
  4. Απαιτούν αυξημένη κατανάλωση καυσίμου.

Επίσης, συγκριτικά με έναν ελικοφόρο κινητήρα ο στροβιλοαντιδραστήρας επιτυγχάνει μικρότερη απόδοση σε ταχύτητες πτήσης, κάτω των 750 km/h

- Ο **ελικοστροβίλος** κινητήρας παρουσιάζει ένα μεγάλο πλεονέκτημα το οποίο είναι να επιτυγχάνει την καλύτερη ειδική κατανάλωση σε σύγκριση με οποιονδήποτε άλλο κινητήρα άλλου τύπου. Η παραγόμενη ώση λόγω της συμβολής της έλικας 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 650 km/h) και το ύψος της πτήσης (άνω των 7000 m).

Οι ελικοστρόβιλοι κινητήρες 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. Επίσης, ένα άλλο 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.

- Ο **αξονοστρόβιλος** κινητήρας έχει ελάχιστη παραγωγή ώσης, διότι παρέχει ισχύ σχεδόν αποκλειστικά στον άξονα του και παρουσιάζει σχεδόν τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με τον **ελικοστρόβιλο** κινητήρα λόγω της μεγάλης ομοιότητας των δύο κινητήρων
- Ο **στροβιλοανεμιστήρας** επιτυγχάνει μικρότερη μάζα αέρα από τον **ελικοστρόβιλο** αλλά μεγαλύτερη από το **στροβιλοαντιδραστήρα**. Επίσης, 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 από 550 – 650 km/h δεν ισχύει. Επιπλέον, σημαντικά πλεονεκτήματα θεωρούνται η αυξημένη παροχή ισχύος ανά μονάδα βάρους, η καλή ειδική κατανάλωση καυσίμου και ο μειωμένος θόρυβος κατά την απογείωση και την προσγείωση.
- Τέλος, το βασικό πλεονέκτημα του **πυραυλοστρόβιλου** είναι ο μικρός του όγκος και βάρος, ενώ το μειονέκτημα του είναι ότι παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή ειδική κατανάλωση καυσίμου.

### 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 2,6 Mach 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 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 αεροχημάτων έξω από την ατμόσφαιρα.

## **4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ**

### **4.1) ΓΕΝΙΚΑ**

Η λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου σε όλες τις φάσεις της ελέγχεται από τον χειριστή, όπου ακολουθεί τις οδηγίες του κατασκευαστή. Επίσης, ο έλεγχος εξασφαλίζεται μέσω του μοχλού ισχύος, του μοχλού εκκίνησης, ορισμένων διακοπών και βάση των ενδείξεων των οργάνων του κινητήρα.

### **4.2) ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**

Οι περιοχές λειτουργίας των αεριοστρόβιλων ορίζονται ανάλογα προς τις στροφές του κινητήρα. Ο ορισμός αυτών των περιοχών διαφέρει στους αεριοστρόβιλους πολιτών αεροπλάνων από τον αντίστοιχο των πολεμικών αεροπλάνων, λόγω των διαφορετικών απαιτήσεων των δύο μορφών χρήσης. Οι περιοχές αυτές, καθορίζονται βασικά από τις μέγιστες τιμές ώσης, που μπορεί χωρίς βλάβη, να αποδώσει ο κινητήρας, για διάφορα συγκεκριμένα στάδια λειτουργίας στο έδαφος ή κατά την πτήση.

#### **421) Περιοχές λειτουργίας πολιτικών αεριοστρόβιλων (Commercial Ratings)**

##### **1. Ώση απογείωσης – υγρή (take off thrust – wet)**

Αυτή είναι η μέγιστη επιτρεπτή ώση για απογείωση. Επιτυγχάνεται με την ενεργοποίηση του συστήματος έγχυσης νερού και μετακίνηση του μοχλού ισχύος σε κατάλληλη θέση, ώστε να έχουμε την προκαθορισμένη (από πίνακες ή διαγράμματα) ένδειξη πίεσης εξόδου του στρόβιλου ή τον ανάλογο λόγο πίεσης του κινητήρα, στις συνθήκες λειτουργίας του. Η ώση αυτή προορίζεται μόνο για την απογείωση, έχει υψομετρικό περιορισμό, περιορισμό διάρκειας και δεν υπάρχει φυσικά σε κινητήρες χωρίς σύστημα έγχυσης νερού.

## **2. Ώση απογείωσης – ξηρή (take off thrust – dry)**

Αυτή είναι η μέγιστη επιτρεπτή ώση απογείωσης χωρίς χρησιμοποίηση του συστήματος έγχυσης νερού. Ο καθορισμός της γίνεται με την μετακίνηση του μοχλού ισχύος, μέχρι μία ένδειξη με προκαθορισμένα λόγο πιέσεων ή συγκεκριμένη πίεση εξόδου στροβίλου, ανάλογα προς τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η λειτουργία του αεριοστρόβιλου με αυτή την ώση έχει περιορισμό διάρκειας και προορίζεται μόνο για την απογείωση.

### **3. Μέγιστη συνεχής ώση (maximum continuous thrust)**

Αυτή είναι η μέγιστη ώση, στην οποία μπορεί να λειτουργεί συνεχώς ο αεριοστρόβιλος. Χρησιμοποιείται μόνο για περιπτώσεις ανάγκης και κατά την βούληση του χειριστή. Εξασφαλίζεται με τον ίδιο τρόπο.

### **4. Κανονική ώση ανόδου (normal rated thrust)**

Είναι η μέγιστη εγκεκριμένη ώση για κανονική άνοδο. Επιτυγχάνεται με τον ίδιο τρόπο. Σε μερικούς αεριοστρόβιλους είναι η ίδια με την μέγιστη συνεχή ώση.

### **5. Μέγιστη ώση πλεύσης (maximum cruise thrust)**

Είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη ώση για πλεύση. Επιτυγχάνεται με τον ίδιο τρόπο.

### **6. βραδεία λειτουργία (idle)**

Αυτός δεν είναι καθορισμός ώσης, αλλά θέσης του μοχλού ισχύος για επίτευξη της ελάχιστης ώσης στο έδαφος ή την πτήση. Επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του μοχλού στην εγκοπή βραδείας λειτουργίας, που υπάρχει στο συγκρότημα μετακίνησης του μοχλού (quadrant). Οι περιοχές λειτουργίας των πολιτικών αεριοστρόβιλων καθορίζονται σε ειδικό δελτίο Αεροναυτικών προτύπων (Aeronautical standard) του αμερικανικού S.A.E (Society of Automotive Engineers).

## **422 Περιοχές λειτουργίας πολεμικών αεριοστρόβιλων (Military Ratings)**

### **1. Μέγιστη ώση (maximum thrust)**

Αυτή η οριακή ώση υπάρχει μόνο σε αεριοστρόβιλους με μετάκαυση. Λαμβάνεται με την μετακίνηση του μοχλού ισχύος στην εντελώς μπροστινή θέση και ενεργοποίηση του συστήματος μετάκαυσης. Η λειτουργία με αυτή την ώση είναι χρονικά περιορισμένη.



## **2. Ώση απογείωσης (take off thrust)**

Αυτή επιτυγχάνεται με την θέση του μοχλού ισχύος στην εντελώς μπροστινή θέση και ενεργοποίηση του συστήματος έγχυσης νερού. Σε μερικούς αεριοστροβίλους η θέση του μοχλού ισχύος κανονίζεται, ώστε να επιτευχθεί προκαθορισμένη ένδειξη πίεσης εξόδου στροβίλου ή λόγου πιέσεων κινητήρα, για τις ατμοσφαιρικές συνθήκες λειτουργίας. Η λειτουργία σε αυτή την ώση περιορίζεται στην απογείωση, έχει υψομετρικό περιορισμό διάρκειας και φυσικά υπάρχει μόνο στους κινητήρες, που έχουν σύστημα έγχυσης νερού.

## **3. Στρατιωτική ώση (military thrust)**

Αυτή είναι η ώση απογείωσης αεριοστροβίλου, χωρίς σύστημα έγχυσης νερού. Επιτυγχάνεται ή με την θέση του μοχλού ισχύος στην εντελώς μπροστινή θέση ή με κατάλληλη θέση του για επίτευξη προκαθορισμένης ένδειξης λόγου πιέσεων κινητήρα ή πίεσης εξόδου του στροβίλου. Η λειτουργία σε αυτή την ώρα συνεχώς επιτρέπεται μέχρι 30 λεπτά.

## **4. Κανονική ώση (normal rated thrust)**

Αυτή επιτυγχάνεται με την κατάλληλη θέση του μοχλού ισχύος, ώστε να έχουμε ένδειξη προκαθορισμένου λόγου πιέσεων ή πίεση εξόδου του στροβίλου. Η λειτουργία σε αυτή την ώση και στις χαμηλότερες από αυτή επιτρέπεται συνέχεια.

## **5. Ώσης βραδείας λειτουργίας (idle thrust)**

Επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του μοχλού ισχύος, στην υπάρχουσα εγκοπή βραδείας λειτουργίας. Οι στρατιωτικές περιοχές λειτουργίας καθορίζονται από ειδική στρατιωτική προδιαγραφή, την MIL-E-5008 A.

### **423) Χρονικοί περιορισμοί**

Οι χρονικοί περιορισμοί στην λειτουργία του αεριοστροβίλου σε ορισμένη περιοχή λειτουργίας (engine rating), έχουν καθορισθεί για αύξηση και δυνατότητα πρόβλεψης της ζωής του αεριοστροβίλου μεταξύ γενικών επισκευών. Οι περιορισμοί των 5 λεπτών για ώση απογείωσης, των 15 λεπτών για ώση μετάκαυσης και των 30 λεπτών για την μέγιστη ξηρή ώση, θεωρούνται αρκετοί. Ο κατασκευαστής ενός αεριοστροβίλου στην αρχή καθορίζει το χρονικό διάστημα μεταξύ γενικών επισκευών. Στην συνέχεια υπολογίζει τα ποσοστά αυτού του χρόνου που ο κινητήρας θα λειτουργήσει στις διάφορες περιοχές λειτουργίας. Γνωρίζει βέβαια την χρονική αντοχή του σε κάθε μια περιοχή κι έτσι προσδιορίζει τους χρονικούς περιορισμούς για τις κρίσιμες περιοχές. Αν λοιπόν, κατά την κανονική λειτουργία η δοκιμή, ο

αεριοστρόβιλος υπερβεί τους περιορισμούς, μειώνεται το όριο ζωής του. Δεν υπάρχουν κανόνες, που να καθορίζουν πόσο χρειάζεται να λειτουργήσει ο αεριοστρόβιλος σε μειωμένη ώση, μετά την λειτουργία σε μια ψηλή περιοχή λειτουργίας για χρόνο ίσο με τον οριακά επιτρεπτό, ώστε να μπορεί με ασφάλεια να ξαναλειτουργήσει σ' αυτήν. Αυτά τα διαστήματα καθορίζονται από την εμπειρία των χειριστών ή από οδηγίες της κάθε μιας εταιρίας. Μια καλή σύσταση είναι, να λειτουργεί ο κινητήρας σε μειωμένη ώση, τουλάχιστον τόσο χρόνο, όσο λειτούργησε σε οριακή περιοχή, πριν επιταχυνθεί πάλι σ' αυτή. Γενικά πάντως πρέπει να παρατηρήσουμε, ότι πρέπει ο αεριοστρόβιλος να λειτουργεί σε χαμηλές ώσεις, όταν αυτό είναι δυνατό.

#### **424) Θερμοκρασιακοί περιορισμοί**

Οι θερμοκρασιακοί περιορισμοί προστατεύουν τον κινητήρα από μείωση του ορίου ζωής του. Έχει αποδειχθεί, ότι μεγάλο μέρος των πρόωρων αντικαταστάσεων των αεριοστρόβιλων οφείλεται σε υπέρβαση των θερμοκρασιακών ορίων. Για αποφυγή των υπερβάσεων ακολουθούμε πιστά τις σχετικές οδηγίες του κατασκευαστή. Οι χειριστές και οι μηχανικοί, αναπτύσσουν μια εμπειρική ικανότητα πρόληψης των υπερβάσεων. Η μόνη μέθοδος αποφυγής υπερθέρμανσης, όταν παρατηρηθεί απότομη αύξηση θερμοκρασιών, είναι η μείωση των στροφών ή ακόμη και το σβήσιμο του κινητήρα. Ιδιαίτερα επικίνδυνα στάδια λειτουργίας είναι η εκκίνηση και η επιτάχυνση. Πρέπει να έχουμε υπόψη μας, ότι οι χρονικοί περιορισμοί για τις διάφορες οριακές περιοχές λειτουργίας, δεν αναφέρονται στις μέγιστες επιτρεπτές θερμοκρασίες για αυτές τις περιοχές, Δηλαδή το γεγονός ότι επιτρέπεται και για 5 λεπτά στην ώση απογείωσης, δεν σημαίνει, ότι επιτρέπεται και για 5 λεπτά λειτουργίας στην μέγιστη θερμοκρασία. Υπάρχει σαφέστατη σχέση από πλευράς αντοχής, μεταξύ των ψηλών θερμοκρασιών και των ψηλών στροφών, γιατί οι δεύτερες προσδιορίζουν την μηχανική καταπόνηση των μερών του αεριοστρόβιλου. Στιγμιαίες θερμοκρασιακές υπερβάσεις μπορούν να σημαίνουν σοβαρή βλάβη των πτερυγίων του αεριοστρόβιλου, που μπορεί να προκαλέσει άμεση η μελλοντική καταστροφή του.

#### **425) Περιορισμοί στροφών**

Αυτοί αναφέρονται κατά βάση στις περιοχές λειτουργίας μέγιστης ώσης και επιτάχυνση και θέτουν τα όρια της μηχανικής καταπόνησης του αεριοστρόβιλου (σε συνδυασμό φυσικά με τις αντίστοιχες ψηλές θερμοκρασίες καυσαερίων).

### **4.3) ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΩΣΗΣ**

Για τον προσδιορισμό της τιμής της ώσης του αεριοστρόβιλου πρέπει, φυσικά, να χρησιμοποιηθεί κάποια παράμετρος λειτουργίας η οποία να μεταβάλλεται με την ώση. Στους αεριοστρόβιλους με φυγοκεντρικό

αεροσυμπιεστή θεωρείται ικανοποιητική για αυτό το σκοπό η χρησιμοποίηση των στροφών του κινητήρα. Στους αξονικούς όμως αεριοστρόβιλους είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση του λόγου πιέσεων του κινητήρα (Engine Pressure Ratio, E.P.R.). Αυτός είναι ο λόγος στην πίεσης εξαγωγής του αέρα. Όταν λοιπόν υπάρχει τέτοιο όργανο στο αεροπλάνο, ο λόγος δείχνεται αμέσως. Αν υπάρχει μόνο όργανο ένδειξης της πίεσης εξαγωγής στον συμπιεστή. Αυτή για στατικό κινητήρα θεωρείται ίση με την ατμοσφαιρική πίεση (διορθωμένη για απώλειες εισαγωγής), ενώ για αεριοστρόβιλο σε πτήση υπολογίζεται με βάση την ταχύτητα του αέρα και του ύψους πίεσης. Η ένδειξη στροφών δεν ανταποκρίνεται στην ώση, που δημιουργείται, για αξονικούς αεριοστρόβιλους, ούτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έλεγχο της καλής λειτουργίας του κινητήρα. Οι λόγοι είναι:

α) Η ταχύτητα του συμπιεστή ( του συμπιεστή ψηλής πίεσης για αεριοστρόβιλους διπλού άξονα) ρυθμίζεται από τον ρυθμιστή καυσίμου και επομένως, δεν απεικονίζει την λειτουργία όλου του κινητήρα.

β) Η αντιστοιχία των στροφών και ώσης διαφέρει από κινητήρα σε κινητήρα λόγω διαφορετικής ρύθμισης του κάθε ενός.

γ) Σε αλλαγή των στροφών του συμπιεστή χαμηλής πίεσης και του συμπιεστή ψηλής πίεσης κατά 1% αντιστοιχεί αλλαγή ώσης κατά 4% και 5% αντίστοιχα. Αλλαγή του λόγου πιέσεων κατά 0,01 αντιστοιχεί σε αλλαγή ώσης μόνο 1,5%.

δ) Η ώση δεν μεταβάλλεται αναλογικά με τις στροφές σε όλες τις περιοχές λειτουργίας.

#### **4.4) ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ**

Παρακάτω δίνουμε μερικές βασικές αρχές λειτουργίας των αεριοστρόβιλων, έχοντα υπόψη μας βέβαια, ότι για κάθε κινητήρα ισχύουν και πρέπει να ακολουθούνται οι οδηγίες του κατασκευαστή.

##### **4.4.1) Εκκίνηση και έλεγχος πριν την εκκίνηση**

Κατά τον έλεγχο πριν την εκκίνηση δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην εισαγωγή αέρα του αεριοστρόβιλου, την κατάσταση και ελεύθερη περιστροφή των συγκροτημάτων του συμπιεστή και του στρόβιλου και την κατάσταση του χώρου στάθμευσης πριν και πίσω από τον κινητήρα. Η εκκίνηση γίνεται με την χρήση ενός τύπου εκκινήτηρα, από όσους έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σε πολυκινητήρια αεροπλάνα μετά την εκκίνηση του ενός αεριοστρόβιλου, οι υπόλοιποι εκκινούν με παροχή αέρα από αυτόν.

Η κανονική διαδικασία εκκίνησης είναι :

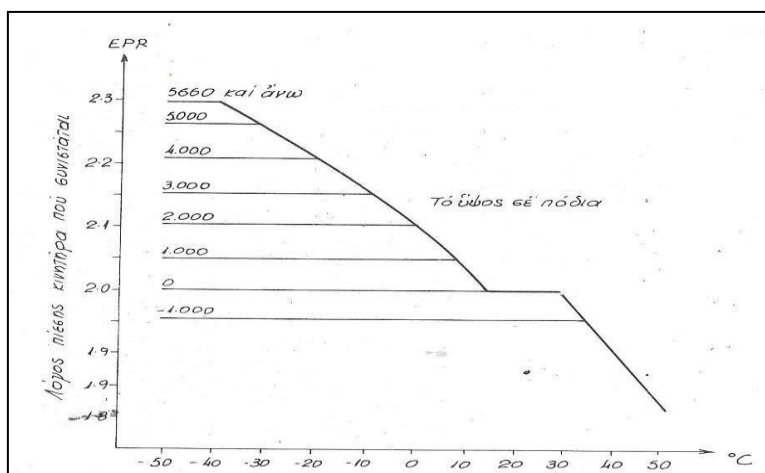
1. Ενεργοποιούμε το σύστημα εκκίνησης και περιστρέφουμε τον κινητήρα.
2. Ενεργοποιούμε το σύστημα ανάφλεξης.
3. Ανοίγουμε την βαλβίδα καυσίμου του κινητήρα ή μετακινώντας τον μοχλό ισχύος στην θέση βραδείας λειτουργίας ή με κίνηση ειδικού μοχλού εκκίνησης ή αντίστοιχου διακόπτη.

Κατά την εκκίνηση κάθε αεριοστρόβιλου, πρέπει να ακολουθούμε τις οδηγίες του κατασκευαστή του, για να αποφύγουμε θερμή εκκίνηση. Κατά την εκκίνηση, το πρώτο που αντιλαμβανόμαστε, είναι μια άνοδος στις θερμοκρασίες των καυσαερίων. Αν δεν επιτευχθεί ανάφλεξη μέσα σε ορισμένο χρόνο ή υπερβούμε ένα όριο θερμοκρασιών, πρέπει να επαναλάβουμε την διαδικασία εκκίνησης. Οι θερμές εκκινήσεις δεν είναι συχνές και συνήθως μπορούν να προληφθούν έγκαιρα, εφόσον παρατηρούμε το όργανο ένδειξης θερμοκρασίας καυσαερίων. Η πιο σωστή ενέργεια, όταν αντιληφθούμε τάση υπερθέρμανσης, είναι να σβήσουμε τον κινητήρα. Αν απαιτείται μπορούμε να καθαρίσουμε τον αεριοστρόβιλο από παγιδευμένο καύσιμο ή αέρια, με περιστροφή του κινητήρα με τον εκκινητήρα, χωρίς να ενεργοποιήσουμε το σύστημα ανάφλεξης και το σύστημα καυσίμου. Κατά την εκκίνηση επίσης παρατηρούμε το όργανο πίεσης λιπαντικού. Αν αυτό δεν δείξει κάποια άνοδο με την εκκίνηση, τότε πρέπει να σβήσουμε τον κινητήρα και να διερευνήσουμε την ύπαρξη βλάβης.

#### **4.4.2) Απογείωση**

Οι πιο πολλοί αεριοστρόβιλοι δεν έχουν ανάγκη μακρόχρονης προθέρμανσης ακόμη και με κρύο καιρό. Τα όργανα και τα συστήματα του αεροσκάφους μπορούν να ελέγχονται μετά του διάρκειας της τροχοδρόμησης του αεροπλάνου, προς την άκρη του διαδρόμου για απογείωση. Μ' αυτόν τον τρόπο σώζεται χρόνος πολύτιμος για πολιτικά και πολεμικά αεροπλάνα. Δεν υπάρχει ανάγκη για δοκιμή κινητήρα με μερική ή μέγιστη ισχύ πριν την απογείωση, όπως απαιτείται στους εμβολοφόρους κινητήρες. Η τροχοδρόμηση και η λειτουργία σε βραδεία λειτουργία πρέπει να διαρκούν το δυνατόν λιγότερο, γιατί η κατανάλωση καυσίμου είναι σχετικά ψηλή κατά την διάρκεια τους. Επίσης πρέπει να αποφεύγεται η τροχοδρόμηση πολύ κοντά ή πίσω από άλλα αεροπλάνα, γιατί τα καυσαέρια τους μπορούν να δημιουργήσουν αιώρηση μικρών αντικειμένων και αναρρόφηση από τους κινητήρες. Όταν το αεροπλάνο βρίσκεται σε θέση απογείωσης με τα φρένα κρατημένα, γίνεται ένας τελικός έλεγχος οργάνων και ώσης (ή ισχύος). Στη συνέχεια αφήνονται τα φρένα και αρχίζει η τροχοδρόμηση απογείωσης με ενεργοποίηση του συστήματος έγχυσης νερού ή μετάκαυσης (αν υπάρχουν και απαιτούνται). Αν δεν υπάρχουν χρονικά περιθώρια για την παραπάνω

διαδικασία, είναι δυνατό να αφεθούν τα φρένα και να αρχίσει η διαδρομή απογείωσης, αμέσως μόλις επιλεχθεί η ώση απογείωσης. Τότε ο έλεγχος οργάνων και κινητήρων γίνεται κατά την αρχική φάση αυτής της διαδρομής. Η ώση απογείωσης ρυθμίζεται ανάλογα προς την επιλογή του κατάλληλου λόγου πιέσεων του κινητήρα (EPR) από σχετικά διαγράμματα.



**Σχήμα 4.1:** Καθορισμός λόγου πίεσης κινητήρα ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και το ύψος πίεσης για ώση απογείωσης (JT 8D-9).

#### 4.4.3) Άνοδος (Climb)

Η επιλογή του κατάλληλου λόγου πιέσεων του κινητήρα για την φάση της ανόδου γίνεται από διάγραμμα με βάση διάφορες παραμέτρους. Αυτές είναι το ύψος, η ολική θερμοκρασία εισαγωγής στον συμπιεστή και το βάρος του αεροπλάνου, από το οποίο εξαρτάται άμεσα η απαραίτητη ώση. Αν δεν υπάρχει όργανο για λόγο πιέσεων, αλλά μόνο για πίεση εξαγωγής καυσαερίων, τότε θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη και την πίεση εισαγωγής στον συμπιεστή. Στα στρατιωτικά αεροπλάνα για την άνοδο χρησιμοποιούμε την Κανονική Ώση (Normal Rated) η μεγαλύτερη, όπως την Πολεμική Ώση (Military). Και στις δύο περιπτώσεις η άνοδος στο καθορισμένο ύψος γίνεται περίπου στον ίδιο χρόνο. Στην δεύτερη όμως ο αεριοστρόβιλος καταπονείται περισσότερο. Έτσι συνήθως χρησιμοποιούμε την πρώτη ώση, εκτός αν υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις. Στα πολιτικά αεροπλάνα συνιστάται η χρήση της Κανονικής Ώσης σαν της μεγαλύτερης ώσης για απογείωση. Αν είναι δυνατό χρησιμοποιούμε μικρότερη ώση, πράγμα το οποίο ωφελεί τον αεριοστρόβιλο, χωρίς να έχει συνήθως μεγάλη επίδραση στην επίδοση του όλου ταξιδιού. Για λόγους σχεδίασης της πτήσης υπάρχουν ειδικά διαγράμματα, που δίνουν την κατανάλωση καυσίμου κατά την άνοδο. Το πλήρωμα πρέπει να διαθέτει εκτός από τον λόγο πιέσεων και τιμές άλλων παραμέτρων του κινητήρα για έλεγχο της λειτουργίας του. Αυτές είναι συνήθως η θερμοκρασία καυσαερίων, η ροή καυσίμου και οι στροφές, που δίνονται από διάγραμμα.

#### **4.4.4) Πλεύση (Cruise)**

Για τον καθορισμό του λόγου πίεσεων κινητήρα, που απαιτείται για την ύπαρξη δεδομένης ώσης κατά την πλεύση, χρησιμοποιούνται τα ίδια διαγράμματα, όπως και προηγουμένως. Εκεί καθορίζουμε τον λόγο πίεσεων για δεδομένη περιοχή ώσης ανάλογα προ το ύψος και την θερμοκρασία εισαγωγής στον συμπιεστή. Φυσικά η επιλογή της ώσης έχει σχέση με την επιθυμητή ταχύτητα πτήσης και το βάρος του αεροπλάνου. Κατά την διάρκεια της πλεύσης δεν αρκεί η παρακολούθηση των οργάνων του λόγου πίεσης, της ταχύτητας και των ατμοσφαιρικών συνθηκών για διαπίστωση της καλής λειτουργίας του αεριοστρόβιλου. Απαιτείται ο έλεγχος και της θερμοκρασίας των καυσαερίων, των στροφών και της ροής καυσίμου. Αυτές οι ενδείξεις θα πρέπει να είναι στα όρια τα προκαθορισμένα με βάση σχετικά διαγράμματα. Η κατανάλωση καυσίμου υπολογίζεται επίσης από σχετικό διάγραμμα. Η πλεύση και η επίδραση της εξαρτώνται κατά μεγάλο ποσοστό, από την ικανότητα του πληρώματος να προσαρμόζει την λειτουργία των κινητήρων προς τις μεταβαλλόμενες συνθήκες.

#### **4.4.5) Κάθοδος, προσέγγιση και προσγείωση (Descent, Approach, Landing)**

Τα αεροπλάνα με αεριοστρόβιλους έχουν δυνατότητα πολύ γρήγορης καθόδου και η σχεδίαση του τρόπου προσέγγισης βασίζεται σε αυτό το χαρακτηριστικό. Σε συνθήκες πτήσης με όργανα (I.F.R), το ύψος αναμονής (Holding altitude) είναι μεγάλο. Όταν λοιπόν δοθεί άδεια προσγείωσης η κάθοδος μέχρι την αρχή της διαδικασίας προσέγγισης, πρέπει να είναι πού γρήγορη. Λόγω της σχετικά αργής επιτάχυνσης των αεριοστρόβιλων (σε σχέση με τους εμβολοφόρους κινητήρες) συνίσταται διατήρηση ψηλών στροφών κατά την προσέγγιση, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα γρήγορης επίτευξης της μέγιστης ώσης, αν απαιτηθεί ματαίωση της προσγείωσης. Αν διατίθεται δυνατότητα αναστροφής ώσης, αυτή χρησιμοποιείται μετά την προσγείωση και σε σχετικά ψηλή ακόμη ταχύτητα. Στην περίπτωση των αεριοστρόβιλων αυτό είναι απαραίτητο, για να αποφευχθεί η ανακύκλωση των καυσαερίων και η εισαγωγή τους στον κινητήρα. Στους ελικοστρόβιλους εξάλλου είναι απαραίτητο, γιατί στις ψηλές ταχύτητες είναι πιο αποτελεσματικό το σύστημα αναστροφής.

#### **4.4.6) Διακοπή λειτουργίας (Shut Down)**

Η διακοπή λειτουργίας στο έδαφος επιτυγχάνεται με την διακοπή παροχής καυσίμου και την ελεύθερη επιβράδυνση του συμπιεστή μέχρι την πλήρη ακινησία. Πριν την διακοπή λειτουργίας μετά από περίοδο λειτουργίας σε μεγάλο αριθμό στροφών, μερικοί αεριοστρόβιλοι χρειάζονται μια σύντομη περίοδο ψύξης στην βραδεία λειτουργία. Μετά την διακοπή του καυσίμου, κλείνουμε όλους τους διακόπτες και βαλβίδες του κινητήρα με την σειρά, που



παρέχεται από τις σχετικές διαδικασίες. Κατά την επιβράδυνση του συμπιεστή παρακολουθούμε την μείωση στροφών στο όργανο, για να διαπιστώσουμε, αν αυτός περιστρέφεται ελεύθερα. Σε μερικούς αεριοστρόβιλους μετρούμε τον χρόνο αυτής της επιβράδυνσης και τον συγκρίνουμε με ένα κατώτατο όριο.

#### **4.4.7) Διαδικασίες ανάγκης (Emergency Procedures)**

Οι αεριοστρόβιλοι είναι αξιόπιστοι κινητήρες και μπορούν να παράγουν ώση ακόμη και σε περιπτώσεις βλαβών, όπου αντίστοιχα ένας εμβολοφόρος θα διέκοπτε την λειτουργία του. Εν τούτοις είναι δυνατό να παρουσιαστούν βλάβες κατά την πτήση και υπάρχουν οι αντίστοιχες διαδικασίες ανάγκης. Σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας του κινητήρα στον αέρα, τότε είναι δυνατό να γίνει, επανεκκίνηση με την διαδικασία και τους περιορισμούς, που έχουμε αναφέρει στα αντίστοιχα κεφάλαια. Αν ο κινητήρας σβήσει σε επίγεια λειτουργία, τότε συνήθως πριν επανεκκινήσουμε, περιστρέφουμε τον συμπιεστή με τον εκκινητήρα με κλειστά τα συστήματα ανάφλεξης και καυσίμου, ώστε να εξαχθεί όλη η ποσότητα καυσίμου, που τυχόν υπάρχει ακόμη. Όταν το πλήρωμα αναφέρει βλάβες του κινητήρα, θα πρέπει η περιγραφή των συμπτωμάτων να είναι πλήρης, ώστε να είναι κατά το δυνατό εύκολη η διάγνωση. Οι μηχανικοί εδάφους δεν προβαίνουν σε καμία διόρθωση, αν δεν είναι βέβαιοι για την προέλευση και αιτία της βλάβης.

## **5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ**

### **5.1) ΓΕΝΙΚΑ**

Οι κανονισμοί συντήρησης κινητήρων, όπως και όλου του αεροπορικού υλικού υπόκεινται στις διατάξεις των αντίστοιχων βιβλίων συντήρησης, ενώ η γενική πολιτική συντήρηση ακολουθεί τις οδηγίες της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας κάθε χώρας. Στην χάραξη αυτής της πολιτικής λαμβάνονται υπόψη οι υποδείξεις του κατασκευαστικού και της εταιρίας, που χρησιμοποιεί τον κινητήρες. Όταν λέμε συντήρηση εννοούμε τις εργασίες που χρειάζονται-προγραμματισμένες και μη για να διατηρηθεί ο κινητήρας σε λειτουργία για ένα χρονικό διάστημα, που ορίζεται μεταξύ δύο Γενικών Επισκευών (T.B.O, Time between Overhaul).Αυτός ο χρόνος καθορίζεται από τον τρόπο εκμετάλλευσης του αεροπλάνου, από τον τρόπο συντήρησης και από τις τελειοποιήσεις, που έχουν ενσωματωθεί σ' αυτόν από την κατασκευή του. Ο χρόνος μεταξύ Γενικών Επισκευών δεν είναι ο ίδιος σε όλη τη ζωή ενός τύπου κινητήρων. Ξεκινά χαμηλά και ανάλογα προς τη συμπεριφορά των κινητήρων, που χρησιμοποιούνται ανεβαίνει σταδιακά, με πρόταση της εταιρίας, που τους έχει και σύμφωνη γνώμη της αρμόδιας Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας.

## 5.2) ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΕΝΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Μ' αυτόν τον όρο περιλαμβάνουμε κάθε εργασία, που γίνεται στον κινητήρα βάσει ορισμένων ημερολογιακών ή χρονικών περιορισμών. Αυτή συνήθως συνδέεται με τον κύκλο συντήρησης του αεροπλάνου και ο μικρότερος είναι το διάστημα ανάμεσα σε δύο πτήσεις του. Ακολουθεί ο παρακάτω πίνακας της παραγραμματισμένης συντήρησης ενός αεροσκάφους (στα αγγλικά).

ITEM	NOT EXCEED LIMIT	REQUIREMENT
Engine oil tank	Flight termination	Check oil level. Replenish as necessary. Record amount taken
Cowls	Transit	Check the pod cowls for damage and external evidence of fuel and oil leaks
Caps and access panels	Transit	Check secure
Engine intake	Transit	Check clear. Free from damage and loose objects
Turbine and exhaust collector	Transit	Visually inspect for signs of damage and metal deposits
Engine intake	25 hours	Visually inspect front of engine through air intake for signs of damage paying particular attention to intake guide vanes and leading stage rotor blades
Turbine and exhaust collector	25 hours	Visually inspect L.P.2 turbine blades, nozzle guide vanes and mixer unit for cracking with damage by viewing from rear using a strong spot light
Fuel filter	125 hours	Drain sample and check for water contamination
Magnetic chip detector	200 hours	Remove and inspect
Igniter plugs	200 hours	Audibly check operation
Oil pressure filter	600 hours	Check and clean filter element
Fuel filter	800 hours	Remove filter and renew

Η βελτιωμένη ανάλυση των στοιχείων λειτουργίας του κινητήρα σε συνδυασμό με την αυξανόμενη χρησιμοποίηση βελτιωμένων μεθόδων ελέγχου της κατάστασής του από πλευράς κατασκευής και λειτουργίας, μειώνουν συνεχώς τις απαιτήσεις προγραμματισμένης συντήρησης. Παραπάνω παραθέτουμε ένα τμήμα υποθετικού πίνακα προγραμματισμένης συντήρησης μερικών τμημάτων ενός κινητήρα.

### **5.3) ΜΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΕΝΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ**

Μ' αυτόν τον όρο εννοούμε εργασίες συντήρησης, που προκύπτουν σας βλάβες κατά την χρησιμοποίηση του κινητήρα. Ο τρόπος των επισκευών, που απαιτούνται σε κάθε περίπτωση, περιλαμβάνει συνήθως στα σχετικά βιβλία συντήρησης. Σ' αυτή έχουμε επιδιόρθωση βλάβης, ρύθμιση ενός συστήματος ή αντικατάσταση κάποιου τμήματος.

### **5.4) ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ**

Για την εκτέλεση των διαφόρων προγραμματισμένων και απρογραμματίστων εργασιών συντήρησης, εκτός από τα κοινά εργαλεία απαιτούνται και πολλά ειδικά εργαλεία, που αναφέρονται στα βιβλία συντήρησης του κατασκευαστή και πολλές φορές δίνονται κι απ' αυτόν. Πέρα από αυτά και σε αυξανόμενο ρυθμό τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές είτε για ακριβή έλεγχο λειτουργίας και ρύθμισης είτε για έλεγχο της κατασκευής και αντοχής των διαφόρων τμημάτων του κινητήρα. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων επισκευών είναι συσκευές διακρίβωσης θερμοκρασιών ή πιέσεων ή στροφών λειτουργίας και συσκευές ακτινών Χ, βοροσκοπικού ελέγχου κ.λπ.

### **5.5) ΕΥΚΟΛΙΑ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ**

Μ' αυτόν τον όρο εννοούμε την ευκολία, με την οποία μπορούν να εκτελεστούν διάφορες εργασίες συντήρησης. Όπως μεταφορά, αποθήκευση, τοποθέτηση, αφαίρεση, αντικατάσταση παρελκομένων κ.λπ. Αυτή η ευκολία προσδιορίζεται κύρια, από την προσπάθεια του κατασκευαστή να την επιτύχει με την κατάλληλη σχεδίαση της κατασκευής και ανάρτησης του κινητήρα.



**Σχήμα 5.1:** Συντήρηση κινητήρα αεροσκάφους.

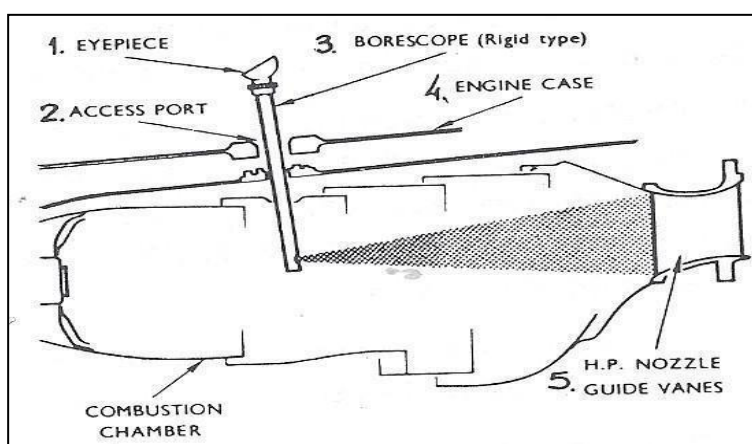
Ιδιαίτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια δίνεται στην ευκολία αφαίρεσης ή επιθεώρησης τμημάτων, που περιορίζουν τη ζωή του κινητήρα. Έχει καταβληθεί προσπάθεια αυτές οι εργασίες, να μπορούν να γίνονται επάνω στο αεροπλάνο, χωρίς να απαιτείται αφαίρεση του κινητήρα, και τοποθέτηση του σε κλίση συντήρησης. Σημαντικό επίτευγμα είναι, ότι σε μερικούς τελευταίους κινητήρες έχει επιτευχθεί η αφαίρεση και επανατοποθέτηση μεγάλων συγκροτημάτων, όπως τμημάτων του συμπιεστή με τον κινητήρα στη θέση του ( Σχήμα 5.1). Είναι γεγονός ότι σήμερα οι κατασκευαστές αφιερώνουν πολύ χρόνο από την όλη μελέτη του κινητήρα ακριβώς στην εξεύρεση τρόπων, για διευκόλυνση των εργασιών συντήρησης. Σ' αυτό βέβαια έχουν πιεσθεί από τις αεροπορικές εταιρίες λόγω του κόστους εργασίας, που αυξάνει συνέχεια.

### **5.6) ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ**

Μ' αυτόν τον όρο (condition monitoring) εννοούμε την προσπάθεια πρόληψης της εμφάνισης βλαβών, με προληπτική επιδιορθωτική ενέργεια, που προκαλείται από παρακολούθηση διαφόρων λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα και εντοπισμό των πιθανών σημείων που επίκειται φθορά ή βλάβη. Η αρχική μέθοδος, που χρησιμοποιήθηκε ήταν η αντιγραφή σε ειδικό τμήμα των φύλλων του βιβλίου του αεροπλάνου ( log book) διαφόρων χαρακτηριστικών της λειτουργίας του κινητήρα και στη συνέχεια η τροφοδότηση των δεδομένων και επεξεργασία τους από ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Στα σημερινά αεροπλάνα έχουν προστεθεί ή τελειοποιηθεί όργανα, που αναφέρονται στη λειτουργία του κινητήρα, όπως :

- Μετρητές ταλαντώσεων
- Ενδείκτες θερμοκρασίας επιστροφής του λιπαντικού
- Ενδείκτες ποσότητας λιπαντικού
- Ενδείκτες απώλειας στήριξης του συμπιεστή
- Ενδείκτες εκκεντρικής περιστροφής στρεπτών τμημάτων
- Ενδείκτες θερμοκρασίας, που βασίζονται σε πυρόμετρα για μέτρηση θερμοκρασίας πτερυγίων.

Επίσης, έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές, που κατά την διάρκεια της πτήσης καταγράφουν σε μαγνητικές ταινίες διάφορα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα για επεξεργασία από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Σημαντική εξέλιξη αποτελεί η χρησιμοποίηση συσκευής για την καταγραφή των μεταβολών της θερμοκρασίας σχετικά με τον χρόνο. Με αυτήν μπορούμε να καθορίζουμε τη ζωή του κινητήρα, ανάλογα με τη συνολική χρονική θερμοκρασιακή καταπόνησή του κι όχι μόνο ανάλογα με τις ώρες λειτουργίας. Οι συσκευές ελέγχου στο έδαφος περιλαμβάνουν συγκρότημα λειτουργικού ελέγχου, όπως ελέγχου θερμοκρασιών, ταλαντώσεων, κ.λ.π, και συγκροτήματα ελέγχου της κατάστασης διαφόρων τμημάτων και συστημάτων του αεροστροβίλου.



1. Θέση ματιού
2. Θυρίδα προσιτότητας
3. Βοροσκόπιο (στερεό)
4. Περίβλημα κινητήρα
5. Οδηγά πτερυγία ακροφυσίου ψηλής πίεσης

**Σχήμα 5.2:** Επιθεώρηση των οδηγών πτερυγίων ακροφυσίου ψηλής πίεσης.

Συσκευές εσωτερικής παρατήρησης χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της κατάστασης του συμπιεστή, του στροβίλου, των οδηγών πτερυγίων, του θαλάμου καύσης κ.λπ. (Σχήμα 5.2). Οι συσκευές μπορεί να είναι εύκαμπτες ή στερεές ανάλογα με την περίπτωση και εισάγονται προς την περιοχή που θα ελεγχθεί, μέσω ειδικών οπών, στρατηγικά τοποθετημένα στα περιβλήματα του κινητήρα. Μέσω αυτών έχουμε δυνατότητα ή απευθείας οπτικής παρατήρησης ή φωτογράφισης ή και κινηματογράφησης και μετάδοσης από κλειστό κύκλωμα τηλεόρασης.

Οι ενδείκτες κατάστασης του κινητήρα περιλαμβάνουν τα φίλτρα λιπαντικού και καυσίμου κι επίσης μερικές φορές μαγνητικά φίλτρα. Αυτά ελέγχονται στο έδαφος σε τακτά χρονικά διαστήματα ή για διερεύνηση βλάβης, που διαπιστώθηκε στη πτήση ή καταγράφηκε στο σύστημα καταγραφής του αεροπλάνου. Ο έλεγχος των φίλτρων του λιπαντικού μπορεί να δώσει μία έγκαιρη προειδοποίηση για φθορά ή βλάβη κάποιου τμήματος ή συστήματος του αεριοστρόβιλου. Μερικές εταιρίες καταγράφουν την ιστορία των αποτελεσμάτων ελέγχου των φίλτρων. Τα φίλτρα καυσίμου μερικές φορές περιέχουν ένα ασημένιο έλασμα για την ανακάλυψη ψιλής περιεκτικότητας θείου στο καύσιμο.

### 5.7) ΠΡΟΦΥΛΑΞΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Κατά την συντήρηση του αεριοστρόβιλου πρέπει να λαμβάνονται ορισμένες προφυλάξεις. Το σύστημα ανάφλεξης μπορεί να προκαλέσει ακόμη και θάνατο κι έτσι πριν γίνει οποιαδήποτε εργασία στα τμήματα υψηλής τάσης – σπινθηριστές και καλωδίωση θα πρέπει να αποσυνδέουμε την παροχή χαμηλής τάσης και να αφήνουμε να περάσει τουλάχιστον ένα λεπτό πριν την αποσύνδεση του αγωγού υψηλής τάσης. Επίσης, πριν εργαστούμε σε συγκροτήματα, που συνδέονται προς το ηλεκτρικό σύστημα, θα πρέπει ή να διακόπτουμε το ρεύμα ή να βγάζουμε τις ασφάλειες του τμήματος και να κρεμάμε προειδοποιητικές λωρίδες. Όταν κάνουμε πλήρωση λιπαντικού, πρέπει να προσέχουμε να μην χύνεται, γιατί προκαλεί φθορές στα χρώματα και μερικά μονωτικά πλαστικά ηλεκτρικών καλωδιώσεων. Επίσης το λιπαντικό μπορεί να προκαλέσει ζημιά στην ανθρώπινη επιδερμίδα λόγω της τοξικότητάς του. Πριν επιθεωρήσουμε τα τμήματα εισαγωγής και εξαγωγής, πρέπει να βεβαιωθούμε, ότι δεν υπάρχει περίπτωση εκκίνησης. Μετά από οποιαδήποτε επισκευή, αντικατάσταση ή ρύθμιση, πρέπει να επιθεωρούμε την εισαγωγή κι εξαγωγή του αεριοστρόβιλου για περίπτωση ύπαρξης και των πιο μικρών αντικειμένων μέσα τους. Αν δεν υπάρχουν αντίθετοι κανονισμοί, πρέπει να προστατεύουμε την εισαγωγή και εξαγωγή με ειδικά καλύμματα, όταν δεν λειτουργεί ο αεριοστρόβιλος.

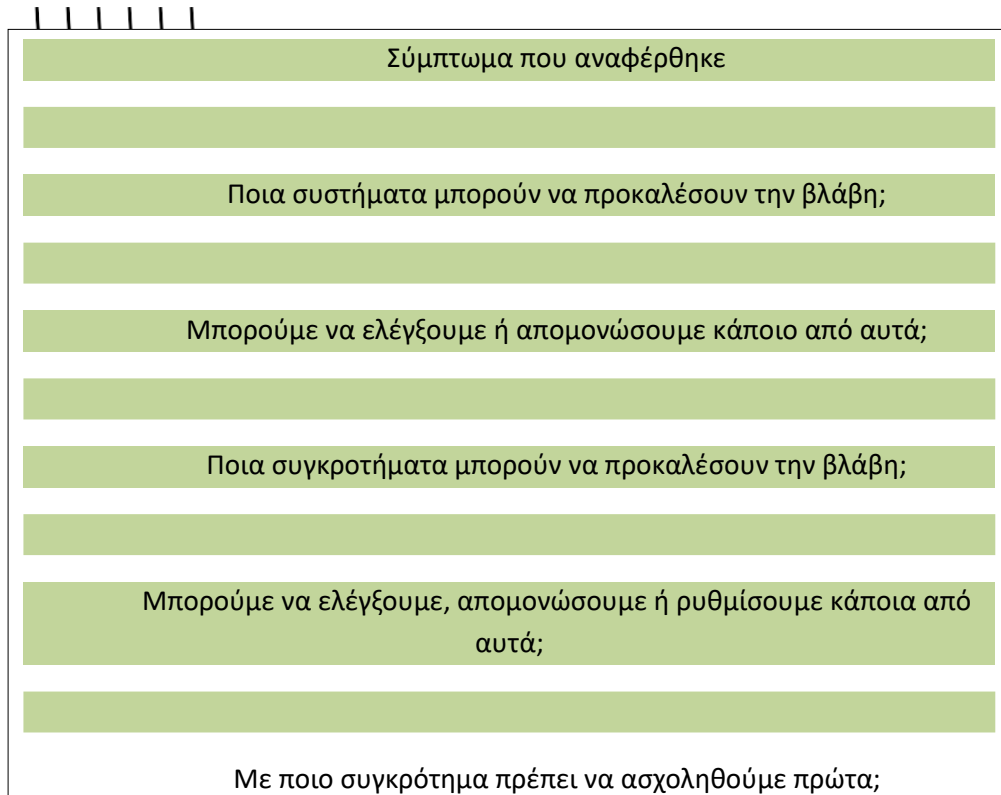


**Σχήμα 5.3:** Τεχνικοί συντήρησης στροβίλου αεροσκάφους.



## 5.8) ΕΞΑΚΡΙΒΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ

Η εξακρίβωση βλαβών του κινητήρα, ο εντοπισμός τους και η εξεύρεση της διορθωτικής ενέργειας, δεν απαιτούν μόνο ικανοποιητική γνώση των συστημάτων και κατασκευής του, αλλά και ακολούθηση λογικής σειράς σκέψεων και γνώση της γενικότερης λειτουργίας του.



**Σχήμα 5.4:** Λογική ακολουθία διερεύνησης βλαβών κινητήρα.

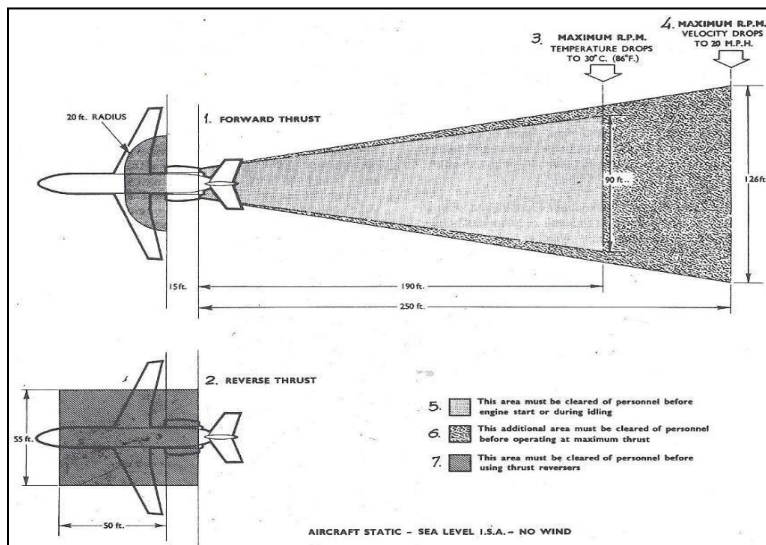
Ο κατασκευαστής, για τις συνηθισμένες τουλάχιστον βλάβες, δίνει τις πιθανές αιτίες και τις απαραίτητες διορθώσεις σε ειδικά ευκολόχρηστα διαγράμματα ( Σχήμα 5.4). Το σύμπτωμα, που αναφέρθηκε, θα προέρχεται συχνά από ενδείξεις των οργάνων του πιλοτηρίου, αν έχουμε αμφιβολία για την ακρίβεια των ενδείξεων, πρέπει, πριν προχωρήσουμε σε οποιαδήποτε άλλη ενέργεια, να τα ελέγξουμε. Επίσης σαν γενική αρχή εφαρμόζουμε πρώτα τους μικρούς ελέγχους και κατόπιν προχωρούμε στις πιο σύνθετες εργασίες. Η προοδευτική εισαγωγή βελτιωμένων και αξιόπιστων συσκευών ελέγχου της κατάστασης του κινητήρα, θα επηρεάσει τις διαδικασίες διερεύνησης βλαβών. Αυτό γιατί κύριος σκοπός αυτών των συσκευών είναι ο προσδιορισμός του βλαμμένου συστήματος ή συγκροτήματος έγκαιρα. Η ανάπτυξη κατάλληλων δοκιμαστικών συσκευών επίσης, μπορεί να απαλείψει την ανάγκη επίγειας δοκιμής του κινητήρα μετά την διερεύνηση και επισκευή της βλάβης.

## 5.9) ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ

Υπάρχουν συνήθως αρκετές ρυθμίσεις, που μπορούν να γίνουν στα συστήματα ελέγχου του αεριοστρόβιλου. Πρόβλεψη π.χ. υπάρχει για τις στροφές βραδείας λειτουργίας, για τις μέγιστες στροφές, για τους χρόνους επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, για την λειτουργία της βαλβίδας απαέρωσης του συμπιεστή κ.λπ.. Ρύθμιση σε ένα κινητήρα πρέπει να κάνουμε μόνο, αν είναι σίγουρο, ότι δεν υπάρχει κάποια βλάβη, που να προκαλεί το συγκεκριμένο σύμπτωμα. Οποσδήποτε πρέπει να ακολουθούμε τις οδηγίες του κατασκευαστή. Μερικές φορές μπορεί να γίνει κάποια ρύθμιση με τον κινητήρα σε λειτουργία στο έδαφος. Τα ρυθμιστικά συνήθως σχεδιάζονται με κάποια πρόβλεψη ασφάλισης, όπως ασφαλιστικά περικόχλια, πλάκες, σύρμα ασφαλείας κ.λπ. Μερικοί κινητήρες έχουν πρόβλεψη προσαρμογής συσκευών ρύθμισης από μακριά κατά την διάρκεια της επίγειας δοκιμής του αεριοστρόβιλου.

## 5.10) ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Οι βασικοί σκοποί της επίγειας δοκιμής ενός αεριοστρόβιλου είναι η διαπίστωση της κατάστασης του από πλευράς επιδόσεων, έλεγχος μιας βλάβης και η εξακρίβωση της επιτυχίας μιας επιδιορθωτικής ενέργειας. Η επίγεια δοκιμή είναι απαραίτητη μετά την αντικατάσταση κινητήρα. Η καλή κατάσταση του αεριοστρόβιλου κατά την διάρκεια της προηγούμενης πτήσης αποτελεί την εγγύηση της καλής κατάστασης του και για την επόμενη πτήση. Για λόγους οικονομίας και λόγω του προβλήματος του θορύβου, οι επίγειες δοκιμές γίνονται, μόνον, όταν είναι εντελώς απαραίτητες. Με τις βελτιωμένες μεθόδους συντήρησης και την ύπαρξη ειδικών δοκιμαστικών συσκευών ελέγχου, η ανάγκη για επίγεια δοκιμή αρχίζει να μειώνεται. Πριν εκτελεσθεί μια επίγεια δοκιμή, πρέπει να ακολουθηθούν ορισμένες διαδικασίες και να ληφθούν ορισμένα προφυλακτικά μέτρα για αποφυγή βλάβης του κινητήρα ή του αεροπλάνου ή του προσωπικού. Λόγω της μεγάλης μάζας του αέρα, που απορροφάται και της ταχύτητας και θερμοκρασίας των καυσαερίων, υπάρχουν επικίνδυνες περιοχές και μπροστά και πίσω από τον αεριοστρόβιλο (Σχήμα 5.5). Σε αρκετή απόσταση από την εξαγωγή δεν πρέπει να υπάρχουν κτίρια, αεροπλάνα ή άλλος εξοπλισμός και οι τεχνικοί που ασχολούνται με την δοκιμή, δεν πρέπει να φορούν ενδύματα χαλαρά, που μπορεί να απορροφηθούν. Σε περίπτωση δοκιμής της μέγιστης ισχύος, το προσωπικό, που ασχολείται, πρέπει να φορά ωτοασπίδες. Σε μερικά αεροδρόμια υπάρχουν και ειδικές εγκαταστάσεις αντίστοιχες προς τις εξαγωγές του αεροπλάνου, που μειώνουν σημαντικά τον θόρυβο δοκιμής χωρίς να επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του αεροπλάνου.



1. Εμπρόςθια ώση
2. Ανάστροφη ώση
3. Μέγιστες στροφές, η θερμοκρασία πέφτει στους 30°C
4. Μέγιστες στροφές, η ταχύτητα πέφτει στα 20 MPM
5. Δεν πρέπει να υπάρχει προσωπικό σε αυτή την περιοχή πριν την εκκίνηση και κατά τη βραδεία λειτουργία.
6. Στη μέγιστη ώση δεν πρέπει να υπάρχει προσωπικό και σε αυτή την πρόσθετη περιοχή.
7. Δεν πρέπει να υπάρχει προσωπικό σε αυτή την περιοχή πριν την χρησιμοποίηση αναστροφών ώσης.

**Σχήμα 5.5:** Επικίνδυνες περιοχές σε επίγεια δοκιμή

Κατά τος δοκιμές του κινητήρα το αεροπλάνο πρέπει πάντα να είναι στραμμένο προς τον άνεμο που πνέει και να είμαστε βέβαιοι για την καλή του ασφάλιση πέρα από την χρήση των φρένων του. Στην δοκιμή πρέπει να υπάρχουν προσιτά πυροσβεστικά μέσα. Πριν γίνει η εκκίνηση ελέγχονται η εισαγωγή και η εξαγωγή του αεριοστρόβιλου και γίνεται η απαραίτητη από κάθε κατασκευαστή επιθεώρηση. Η διαδικασία εκκίνησης και λειτουργικού ελέγχου διαφέρει από αεροπλάνο σε αεροπλάνο, και εξαρτάται και από την συγκεκριμένη περίπτωση βλάβης.

### **5.11) ΣΥΣΚΕΥΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ (JET CALIBRATION TEST UNIT)**

Αυτή είναι μια συσκευή, που συνδέονται κατάλληλα με τα ενδεικτικά συστήματα του κινητήρα και μιας επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο ορισμένων λειτουργικών στοιχείων του κατά τις επίγειες δοκιμές. Η συσκευή είναι φορητή και είναι γνωστή με το όνομα Jetcal. Κύρια τμήματα της είναι οι ενδείκτες θερμοκρασίας καυσαερίων και στροφών και τα κυκλώματα δοκιμής της αντίστασης και μόνωσης των θερμοηλεκτρικών ζευγών. Φυσικά υπάρχουν οι απαραίτητου διακόπτες, καλωδιώσεις προσαρμογής κ.λπ..

Από τους ελέγχους, που μπορούμε να εκτελέσουμε με την συσκευή, αναφέρουμε:

- Έλεγχο στροφών και θερμοκρασίας καυσαερίων με μεγάλη ακρίβεια.
- Έλεγχο του συστήματος ένδειξης θερμοκρασιών χωρίς να λειτουργεί ο αεριοστρόβιλος.
- Έλεγχο αντίστασης και μόνωσης του συστήματος.
- Έλεγχο των οργάνων θερμοκρασίας.
- Έλεγχο των συστημάτων ανακάλυψης πυρκαγιάς και υπερθέρμανσης καθώς και του συστήματος πρόληψης της παγοποίησης με την χρησιμοποίηση κατάλληλων βυσμάτων (tempcal probes).
- Εξασφάλιση κανονικής σχέσης μεταξύ στροφών και θερμοκρασιών κατά την ρύθμιση της διατομής σταθερού ακροφυσίου εξαγωγής (με προσθήκη ή αφαίρεση ειδικών ελασμάτων).

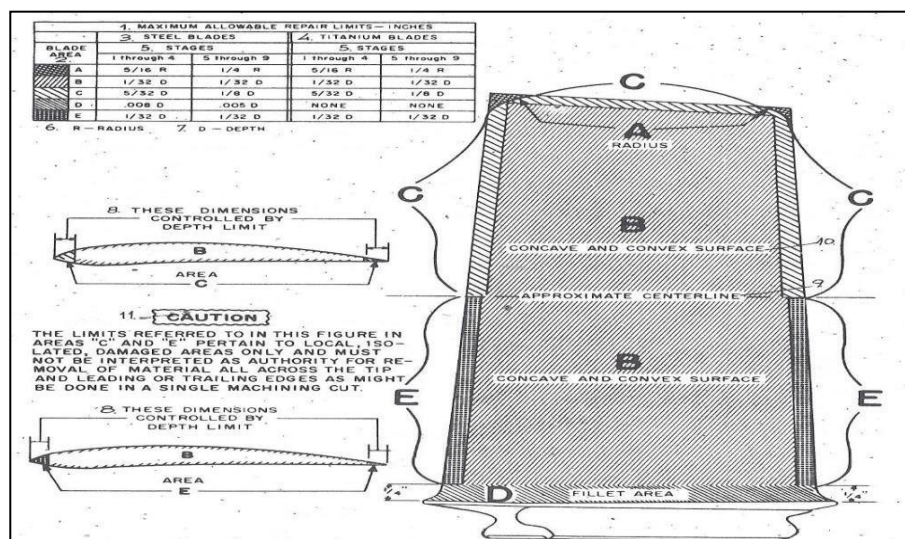
Οι ακριβείς οδηγίες για κάθε μια από τις παραπάνω επιθεωρήσεις δίνονται στο σχετικό εγχειρίδιο συντήρησης.

### **5.12) ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ**

Η συντήρηση του συμπιεστή ή ψυχρού τμήματος, όπως ονομάζεται, αποτελεί βασική εργασία, γιατί η καταστροφή ενός πτερυγίου του μπορεί να προκαλέσει σημαντική βλάβη του κινητήρα. Κύρια αιτία καταστροφής των πτερυγίων είναι η αναρρόφηση ξένων σωμάτων από την εισαγωγή. Η αναρρόφηση ακαθαρσιών δημιουργεί σοβαρά προβλήματα, γιατί αυτές (σκόνη-λάδι κ.λπ) συγκεντρώνονται στην περιφέρεια, επικάθονται στα πτερύγια και το περίβλημα και μεταβάλουν εντελώς τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του συμπιεστή. Μ' αυτόν τον τρόπο προκαλείται ανύψωση των θερμοκρασιών εξαγωγής και επίσης μη ικανοποιητική επιτάχυνση. Στην τελική φάση αυτή η επικάθηση ξένων σωμάτων μπορεί να προκαλέσει καταστροφή του αεριοστρόβιλου. Για αποφυγή των παραπάνω επιθεωρούμε τακτικά τα πτερύγια, εκτελούμε καθαρισμό και τα επισκευάζουμε όταν χρειασθεί.

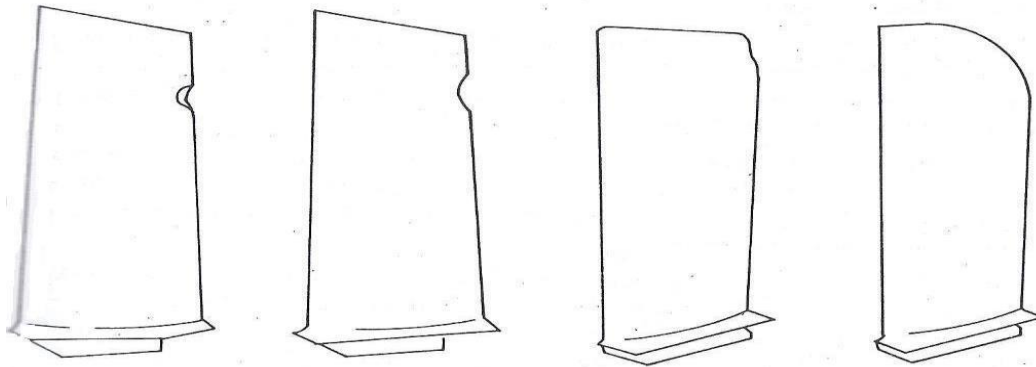
### 5.12.1) Επιθεώρηση και καθαρισμός (Inspection and cleaning)

Μικρές βλάβες στα πτερύγια μπορούν να επισκευασθούν, αν αυτά μπορούν να αφαιρεθούν, χωρίς να υπερβούν ορισμένα όρια του κατασκευαστή. Τυπικά τέτοια όρια φαίνονται στο (σχήμα 5.6). Στρογγυλεμένη βλάβη στο χείλος προσβολής και εκφυγής του εξωτερικού μισού του πτερυγίου επιτρέπεται, εφόσον η εγκοπή δεν υπερβαίνει τα όρια.



Σχήμα 5.6: Τυπικά όρια επισκευής βλάβης πτερυγίου συμπιεστή.

1. Όρια μέγιστης επιτρεπτής επισκευής (ίντσες)
2. Περιοχή πτερυγίου
3. Χαλύβδινα πτερύγια
4. Πτερύγιο από τιτάνιο
5. Βαθμίδες
6. Ακτίνα
7. Βάθος
8. Αυτές οι διαστάσεις ελέγχονται από το οριακό βάθος
9. Προσέγγιση κεντρική γραμμή
10. Κοίλη και κυρτή επιφάνεια
11. ΠΡΟΣΟΧΗ: Τα όρια που αναφέρονται στο σχήμα για της περιοχές C και E, αντιστοιχούν σε τοπικές, μεμονωμένες βλαμμένες περιοχές και δεν πρέπει να θεωρηθούν σαν άδεια για αφαίρεση υλικού σε όλο το μήκος του χείλους προσβολής και εκφυγής.



1. Βλαμμένο πτερύγιο
2. Βλαμμένο πτερύγιο μετά την εξομάλυνση

**Σχήμα 5.8:** Επισκευή πτερυγίων συμπιεστή

Επισκευή στο εσωτερικό μισό του πτερυγίου μπορεί να γίνεται με μεγάλη προσοχή. Μετά από οποιαδήποτε επισκευή πτερυγίου επακολουθεί μαγνητικός έλεγχος ή έλεγχος με διεισδυτικό υγρό. Οι επισκευασμένες περιοχές πρέπει να εξομαλύνονται εντελώς (σχήμα 5.8). Όλη η επισκευή γίνεται με το χέρι με χρησιμοποίηση λιμών, τροχιστικών λίθων ή σμυριδόπανου. Σε φυγοκεντρικούς κινητήρες συνήθως απαιτείται αφαίρεση του φίλτρου εισαγωγής, για να επιθεωρήσουμε τα πτερύγια εισαγωγής του συμπιεστή. Μετά την αφαίρεση του φίλτρου καθαρίζουμε τα πτερύγια και τα φωτίζουμε με ισχυρό φως για επιθεώρηση. Η επισκευή και εξομάλυνση των βλαμμένων περιοχών γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.

#### **5.12.2) Αιτίες βλαβών πτερυγίων**

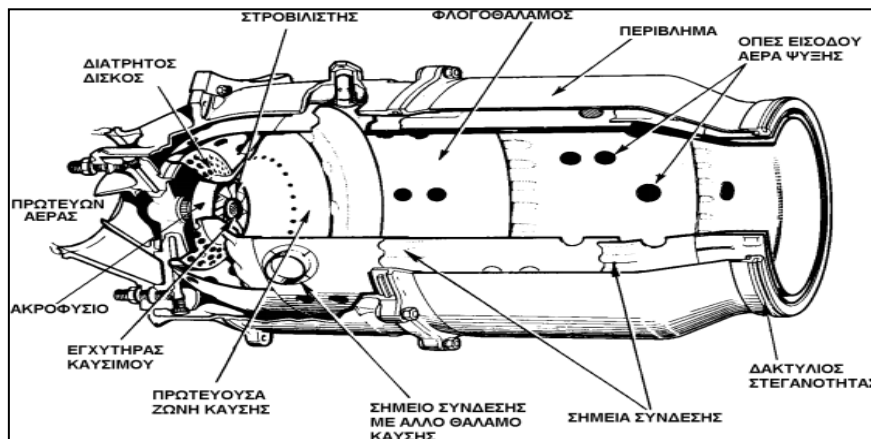
Ξένα αντικείμενα αναρροφώνται στον συμπιεστή συμπτωματικά η κατά λάθος του προσωπικού. Οι τεχνικοί δεν πρέπει να φέρουν χαλαρά αντικείμενα στα ενδύματα τους όταν εργάζονται κοντά στο αεριοστρόβιλο. Μπορεί να προκληθεί ολική καταστροφή του συμπιεστή από αναρρόφηση εργαλείων παρατημένων στην εισαγωγή του ή και περιστροφή του. Οι φθορές των σταθερών και κινητών πτερυγίων έχουν πολλές μορφές και οφείλονται εκτός από αναρρόφηση ξένων σωμάτων και σε διάβρωση, σε υπερφόρτιση, υπερθέρμανση, κακή επισκευή κ.λπ..

Ποτέ δεν επιχειρούμε επισκευή πτερυγίων με οποιαδήποτε μέθοδο συγκολλήσεως. Επισκευή και εξομάλυνση βλάβης κοίλων πτερυγίων (σταθερών) είναι περιορισμένη και χρειάζεται προσοχή.



### 5.13) ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

Η ζωή του κινητήρα εξαρτάται σημαντικά από την επιθεώρηση και επισκευή των φθορών των θαλάμων καύσης. Η συνηθισμένη βλάβη τους είναι ρωγμές, που μπορούν να παρουσιασθούν από διάφορες αιτίες, και σε διάφορες μορφές. Η επισκευή τους γίνεται με τρόπο καθορισμένο από τον κατασκευαστή. Αν αφαιρεθεί κάποιος θάλαμος καύσης, τότε καθαρίζεται με καθαριστικά τύπου γαλακτώματος ή με χλωριούχα διαλυτικά. Μετά τον καθαρισμό εφαρμόζουμε ψεκασμό με αντιδιαβρωτικό διάλυμα, για να προστατεύσουμε τα καθαρισμένα τμήματα από διάβρωση και σκουριά. Για να επιθεωρήσουμε το θερμό τμήμα των θαλάμων, θα πρέπει να αφαιρέσουμε το εξωτερικό περίβλημα. Κατά την αφαίρεση πρέπει να προσέχουμε την τοποθέτηση των τμημάτων που βγάζουμε, ώστε να μην παραμορφωθούν. Κατά την επανατοποθέτηση δεν πρέπει να παραμείνει στο σύστημα κανένα ξένο αντικείμενο. Αν χρειασθεί να σημαδέψουμε προσωρινά μερικά από τα συγκροτήματα, που βγάλαμε, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κιμωλία για τμήματα, που είναι εκτεθειμένα στην ροή των καυσαερίων. Η χρησιμοποίηση κοινών μολυβιών απαγορεύεται, γιατί μπορεί να προκαλέσει διάβρωση.



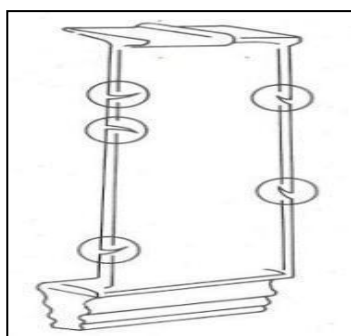
Σχήμα 5.9: Τυπικός θάλαμος καύσης

Η επιθεώρηση των θαλάμων καύσης και των περιβλημάτων γίνεται συνήθως με διεισδυτικό υγρό. Τα επιτρεπτά όρια επισκευών καθορίζονται από τον κατασκευαστή. Αν υπάρχουν δύο ρωγμές από ελεύθερο άκρο και τείνουν να συναντηθούν, τότε απορρίπτουμε τον θάλαμο. Ρωγμές στο διάτρητο διάφραγμα εισαγωγής επιτρέπονται. Αν μια ρωγμή συνδέει περισσότερες από δύο οπές, πρέπει να επισκευαστεί. Αν παρουσιασθούν ρωγμές στον κώνο, τότε αντικαθιστούμε τον θάλαμο. Επίσης ρωγμές στα πτερύγια στροβιλισμού συνεπάγονται αντικατάσταση του περιβλήματος. Ρωγμές στο μπροστινό περίβλημα, που ξεκινούν από τις οπές, επιτρέπονται, εφόσον δεν υπερβαίνουν τα καθορισμένα όρια. Αν ενώνονται δύο ή περισσότερες ρωγμές, τότε πρέπει να επισκευασθούν. Αν από την ίδια οπή ξεκινούν δύο αντιδιαμετρικές ρωγμές, το περίβλημα είναι αποδεκτό. Ακτινικές ρωγμές, που ξεκινούν από την οπή του σπινθηριστή ή από την οπή

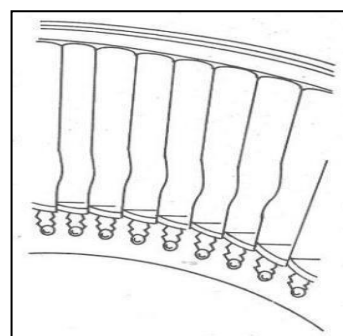
του συνδετικού σωλήνα, επιτρέπονται εφόσον δεν τέμνονται μεταξύ τους. Περιφερειακές οπές στην οπή του σπινθηριστή, πρέπει να επισκευάζονται, πριν την χρησιμοποίηση του περιβλήματος. Οποιοδήποτε τμήμα του θαλάμου, που κατά λάθος έπεσε σε σκληρό δάπεδο κατά την συντήρηση, θα πρέπει να επιθεωρείται προσεκτικά για μικρές ρωγμές, που μπορούν να επιμηκυνθούν με την χρήση.

#### 5.14) ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Η επιθεώρηση του δίσκου του στροβίλου για ρωγμές είναι οπτική και γίνεται συνήθως με μεγεθυντικό φακό. Σε περίπτωση, που θα βρεθούν ρωγμές ο δίσκος χρειάζεται αντικατάσταση. Τα πτερύγια του στροβίλου καθαρίζονται και επιθεωρούνται, όπως και τα αντίστοιχα του συμπιεστή. Λόγω όμως των ψηλών θερμοκρασιών, στις οποίες εργάζονται αυτά, υπόκεινται ευκολότερα σε φθορές. Αυτές συνήθως είναι οι μικρές ρωγμές στα χείλη προσβολής και εκφυγής (σχήμα 5.10) η παραμόρφωση του χείλους προσβολής (σχήμα 5.11). Η παραμόρφωση παρουσιάζεται σαν κυμάτωση μιας περιοχής ή σαν μεταβολή του πάχους της αεροτομής κατά μήκος του χείλους προσβολής της. Αν ανακαλυφθεί παραμόρφωση πτερυγίων, τότε κάνουμε έλεγχο υπερθέρμανσης. Αν χρειασθεί να αφαιρέσουμε πτερύγια για λεπτομερέστερη επιθεώρηση, τότε τα αριθμούμε για να τα επανατοποθετήσουμε στην αρχική τους θέση. Μπορούμε να αντικαταστήσουμε πτερύγια του στροβίλου μέχρις ένα ορισμένο αριθμό. Όταν αντικαθιστούμε ένα πτερύγιο, πάντα αντικαθιστούμε και το αντιδιαμετρικό του. Κάθε πτερύγιο στην βάση του έχει γραμμένα κώδικα, που δείχνουν το βάρος του. Τα αντιδιαμετρικά πτερύγια είναι πάντα ίδια.



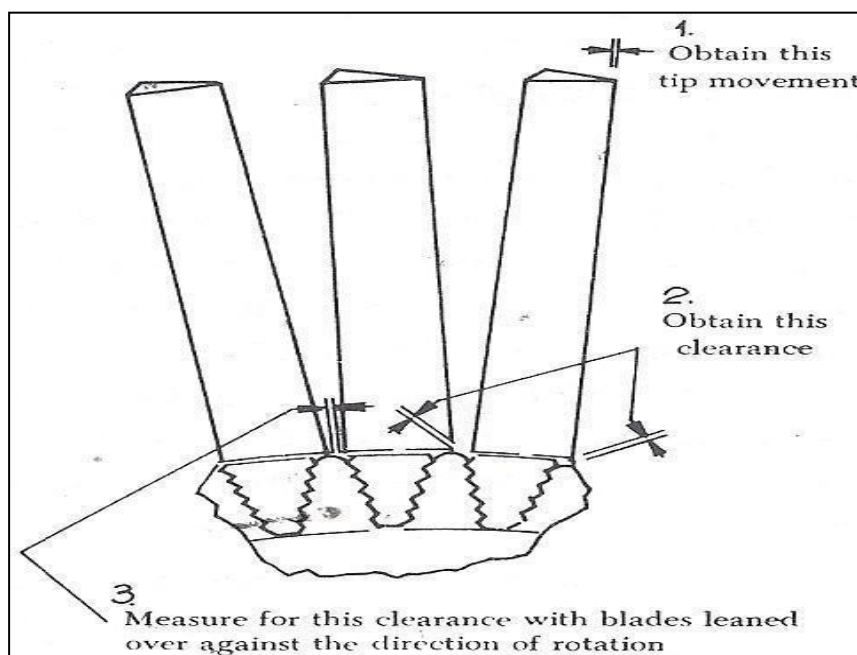
Σχήμα 5.10: Ρωγμές από υπερφόρτιση



Σχήμα 5.11: Κυμάτωση πτερυγίων

Κατά την τοποθέτηση νέων πτερυγίων ελέγχουμε ορισμένες ανοχές, όπως φαίνεται στο (σχήμα 5.12). Έτσι ελέγχουμε την ανοχή μεταξύ του ακρώνα του πτερυγίου και του δίσκου, την ανοχή μεταξύ των ακρώνων δύο διαδοχικών πτερυγίων (σπρώχνοντας το νέο κατά την διεύθυνση περιστροφής) και την περιφερειακή ανοχή του ακροπτερυγίου.

Αν κάποια από αυτές είναι έξω από τα όρια, τότε μπορούμε να αφαιρέσουμε υλικό από την βάση του πτερυγίου, για να το φέρουμε στην κανονική ανοχή. Οι ανοχές δίδονται στα εγχειρίδια του κατασκευαστή. Η πρώτη βαθμίδα σταθερών πτερυγίων του στροβίλου μπορεί να επιθεωρηθεί μετά την αφαίρεση του περιβλήματος του θαλάμου καύσης. Η τελευταία βαθμίδα σταθερών πτερυγίων μπορεί να επιθεωρηθεί με ισχυρό φως μέσω της τελευταίας βαθμίδας των κινητών πτερυγίων.



1. Μετρήστε την κίνηση του ακροπτερυγίου
2. Μετρήστε αυτή την ανοχή
3. Μετρήστε αυτή την ανοχή με τα πτερύγια να ωθούνται προς την διεύθυνση περιστροφής

**Σχήμα 5.12:** Ανοχές πτερυγίου στροβίλου

### 5.15) ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΕΞΑΓΩΓΗΣ

Το τμήμα της εξαγωγής επιθεωρείται για εντοπισμό ρωγμών, λόγω υπερθερμάνσεων. Ρωγμές είναι πολύ πιθανές στο τμήμα του αναστροφέα ώσης. Τα όρια και η επισκευή τους περιγράφονται στο αντίστοιχο βιβλίο συντήρησης του κάθε κατασκευαστή.

## 5.16) ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΔΙΟΔΩΝ ΑΕΡΑ

Ο καθαρισμός των διόδων αέρα ενός αξονικού συμπιεστή μπορεί να γίνει με την εισαγωγή ενός καθαριστικού υγρού κατά την λειτουργία του αεριοστρόβιλου. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται σε αεριοστρόβιλους, που παρουσιάζουν μείωση των επιδόσεων λειτουργίας τους, που οφείλεται στην επικάλυψη ακαθαρσιών στα σταθερά και κινητά πτερύγια. Η μείωση επιδόσεων μπορεί να χαρακτηρίζεται από την τακτική ανάγκη αύξησης των στροφών ρύθμισης του κινητήρα για να διατηρήσουμε τα κανονικά όρια ώσης του. Όταν δεν μπορούμε πια να αυξήσουμε τις στροφές ρύθμισης, για να μη υπερβούμε το ανώτερο όριο ρύθμισης, τότε πρέπει να καθαρίσουμε τις διόδους του συμπιεστή σύμφωνα με τα παραπάνω. Αν παρόλα αυτά δεν επιτευχθεί η επάνοδος του αεριοστρόβιλου στα κανονικά του όρια, πρέπει να τον αντικαταστήσουμε. Τα υγρά και ο τρόπος καθαρισμού πρέπει να συμφωνούν απόλυτα με τις οδηγίες του κάθε κατασκευαστή. Η συνηθισμένη διαδικασία είναι η παρακάτω: Αφαιρούμε από τον κινητήρα όλα εκείνα τα τμήματα, που θα μπορούσαν να βλάπτουν από την επίδραση του καθαριστικού υγρού. Επίσης καλύπτουμε τα ανοίγματα απαέρωσης. Το δοχείο με το καθαριστικό τοποθετείται ψηλότερα και λίγο μπροστά από την εισαγωγή και από το κάτω μέρος του εκκινούν δύο σωλήνες που καταλήγουν μπροστά από την εισαγωγή κι έχουν ροή, που ελέγχεται μέσω αντίστοιχων βαλβίδων. Ο αεριοστρόβιλος λειτουργεί για καθορισμένη διάρκεια σε χαμηλές και στη συνέχεια σε ψηλές στροφές, αναρροφώντας καθαριστικό υγρό. Μετά των καθαρισμό σβήνει ο κινητήρας και αφαιρούνται τυχόν πρόσθετα προστατευτικά καλύμματα. Κατόπιν ακολουθεί πάλι λειτουργία του κινητήρα για να απομακρυνθούν και οι μικρές ποσότητες υγρού, που έχουν τυχόν απομείνει. Μετά το δεύτερο σβήσιμο τοποθετούνται όσα τμήματα είχαν αφαιρεθεί. Πρέπει να έχουμε υπόψη μας, ότι μετά τον καθαρισμό ακολουθεί πάντα ρύθμιση του κινητήρα. Τέλος, σημειώνουμε, ότι μερικοί κινητήρες πολεμικών αεροπλάνων υφίστανται τέτοιο καθαρισμό σε τακτικά χρονικά διαστήματα, όταν λειτουργούν σε περιοχές με μεγάλη υγρασία κοντά σε θάλασσα, όπου υπάρχει περίπτωση συσσώρευσης ακαθαρσιών, που περιέχουν και άλατα.

## 6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΥΤΩΝ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία είδαμε ότι από την εμφάνιση του πρώτου αεροκινητήρα έχει σημειωθεί σημαντική εξέλιξη στους κινητήρες σε τεχνολογικό και κατασκευαστικό επίπεδο, πετυχαίνοντας καλύτερες επιδόσεις. Αυτό έχει επιτευχθεί με την χρήση καλύτερων δομικών υλικών και αυτοματοποιημένων συστημάτων ελέγχου. Στη συνέχεια ασχοληθήκαμε με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αεροσκαφών με έμφαση τόσο στα πολιτικά(επιβατηγά) όσο και στα μαχητικά. Έπειτα, περιγράψαμε και αναλύσαμε τα συστήματα πρόωσης των αεροσκαφών, δηλαδή το σχεδιασμό τους, τα εξαρτήματα που τα αποτελούν, την αρχή λειτουργίας τους, τον κύκλο λειτουργίας τους, καθώς και τη σύγκριση μεταξύ των τύπων και ειδών των αεριοστροβίλων. Παράλληλα, έγινε εμβάθυνση στη λειτουργία αεριοστροβίλων ως προς τις περιοχές λειτουργίας τους. Επίσης, μέσα από την διπλωματική εργασία τονίστηκε το πόσο απαιτητική και πολύπλοκη είναι η λειτουργία των αεριοστροβίλων κινητήρων, αλλά και το πόσο απαιτητική είναι η συντήρησή τους. Ωστόσο, η σωστή συντήρηση των κινητήρων είναι πολύ σημαντική διότι η εμφάνιση κάποιας βλάβης από λάθος στην διαδικασία της συντήρησης, σε ώρα πτήσης μπορεί να επιφέρει θανατηφόρο ατύχημα. Γι' αυτό το λόγο, οι μηχανικοί που θα ασχοληθούν με την συντήρηση των αεροκινητήρων θα πρέπει να έχουν γνώση, εμπειρία, να είναι ακέραιοι χαρακτήρες, οργανωτικοί και τελειομανείς με την εργασία τους αλλά και πιστοποιημένοι ότι μπορούν να ικανοποιήσουν τις εργασίες συντήρησης. Συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν οι αεριοστροβίλοι κινητήρες με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, με έμφαση στα συστήματα πρόωσης πολιτικών και μαχητικών αεροσκαφών. Τέλος, μετά το πέρας της ανάγνωσης αυτής της διπλωματικής εργασίας ο αναγνώστης θα έχει κατανοήσει:

- Την αρχή λειτουργίας των προωθητικών συστημάτων, την βασική δομή τους καθώς και τις διαφορές πολιτικών και μαχητικών αεροσκαφών.
- Τις κύριες κατηγορίες στις οποίες αυτοί διακρίνονται, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα μεταξύ αυτών.
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά πολιτικών και μαχητικών καθώς και τα καινοτόμα είδη αυτών.
- Τους βασικούς τύπους συντήρησης, τα μέρη του κινητήρα στα οποία απαιτείται συντήρηση, οι πιο συχνές βλάβες σε αυτά καθώς και τη διαδικασία πιστοποίησης των μηχανικών αεροσκαφών

Εν κατακλείδι με την παρούσα πτυχιακή εργασία δίνεται βήμα στους συναδέλφους του Τμήματος των Μηχανολόγων Μηχανικών αλλά και σε άτομα που ενδιαφέρονται να προχωρήσουν σε βελτιώσεις και σε καινοτομίες των παραπάνω συστημάτων πρόωσης τόσο των πολιτικών όσο και των μαχητικών αεροσκαφών που προαναφέραμε.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Απόστολος Πολυζάκης, Λειτουργία Αεροστροβίλων και Παραγωγή Ισχύος – Προώθηση, 1<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Power Heat Cool, Πτολεμαΐδα, 2018.
2. Απόστολος Πολυζάκης, Ρευστοδυναμικές Μηχανές, Στροβιλομηχανές – Υδροδυναμικές Μηχανές, 2<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Power Heat Cool, Πτολεμαΐδα, 2019.
3. Απόστολος Πολυζάκης, Ζώρας Σταμάτης, Παπαγεωργίου Κωνσταντίνος Μετάδοση Θερμότητας και συσκευές διεργασιών, 1<sup>η</sup> έκδοση Εκδόσεις Power Heat Cool, Πτολεμαΐδα, 2018.
4. Nicholas Cursty, Προωθητική Ροϊκών Δεσμών, 2<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2018.
5. David Gordon Wilson and Theodosios Karakianitis, 2<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2018.
6. Μιχαλάς Ε., <<Συντήρηση αεροσκαφών>>, Εκδόσεις ΑΛΦΑ, Αθήνα, 2002.
7. Σπαθόπουλος Β., <<Εισαγωγή στη Μηχανική Πτήσης>>, 1<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις ΙΩΝ, Ελλάδα, 2011.

## ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

8. [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%80%CE%BB%CE%AC%CE%BD%CE%BF%CE%91%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%83%CE%BA%CE%AC%CF%86%CE%BF%CF%82-\(Αεροπλάνο-Αεροσκάφος\)](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%80%CE%BB%CE%AC%CE%BD%CE%BF%CE%91%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%83%CE%BA%CE%AC%CF%86%CE%BF%CF%82-(Αεροπλάνο-Αεροσκάφος))
9. <https://sites.google.com/site/humantrytofly/intro>  
(Η προσπάθεια του ανθρώπου να πετάξει).
10. [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%80%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AC\\_%CE%BA%CE%B1%CF%8D%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%80%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AC_%CE%BA%CE%B1%CF%8D%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B1) (Αεροπορικά Καύσιμα)
11. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%84%CF%81%CF%8C%CE%B2%CE%B9%CE%BB%CE%BF%CF%82>  
(Στρόβιλος)
12. [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82\\_%CE%B1%CE%B5%CF%81%CE%B9%CF%8E%CE%B8%CE%B7%CF%83%CE%B7%CF%82#%CE%9C%CE%AD%CF%81%CE%B7\\_%CE%BA](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82_%CE%B1%CE%B5%CF%81%CE%B9%CF%8E%CE%B8%CE%B7%CF%83%CE%B7%CF%82#%CE%9C%CE%AD%CF%81%CE%B7_%CE%BA)  
(Κινητήρας Αεριώθησης)
13. [https://valadis-kotorlos.blogspot.com/2016/07/blog-post\\_22.html](https://valadis-kotorlos.blogspot.com/2016/07/blog-post_22.html) (Μετάκαυση)
14. <http://digilib.teiimt.gr/jspui/bitstream/123456789/3361/1/01X00Z01Z0005.pdf> (Πτυχιακή Εργασία - Συστήματα Πρόωσης Αεροσκαφών – Ιωάννης Λιάπης).



15. <http://okeanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/4618/%CE%A0%CE%A4%CE%A5%CE%A7%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%97%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%99%CE%91%CE%A0%CE%95%CE%A0%CE%A0%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%91%CE%9A%CE%91%CE%A1%CE%97.pdf?sequence=1&isAllowed=y>  
(Πτυχιακή εργασία -Αυτοματισμοί και αισθητήριες διατάξεις στην αεροπορική βιομηχανία- Πέππας Αθανάσιος, Τάκαρη Αγγελική)