

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ**

### **Διδακτικοί Στόχοι**

Μετά το πέρας της μελέτης του δεύτερου κεφαλαίου θα είστε ικανοί:

- Να αναφέρετε την ιστορική εξέλιξη των κινητήρων αεριώθησης, τις κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται, τις αρχές λειτουργίας τους και τα χαρακτηριστικά τους.
- Να περιγράψετε τον κύκλο λειτουργίας των κινητήρων, τις διεργασίες που πραγματοποιούνται κατά τις διάφορες φάσεις του και τις τροποποιήσεις που βελτιώνουν την απόδοσή του.
- Να αναγνωρίζετε τα κύρια χαρακτηριστικά των κινητήρων και τις κατηγορίες στις οποίες αυτοί διακρίνονται.
- Να διακρίνετε τα κύρια εξαρτήματα των κινητήρων και να περιγράψετε τη λειτουργία τους.
- Να διακρίνετε τα διάφορα συστήματα (λίπανσης, ψύξης κλπ) των κινητήρων και να περιγράψετε τη λειτουργία τους.

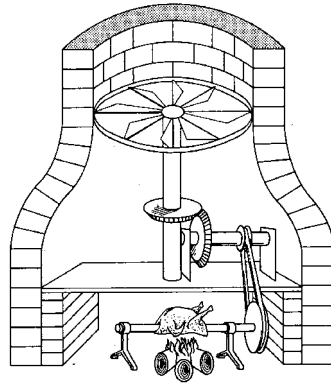
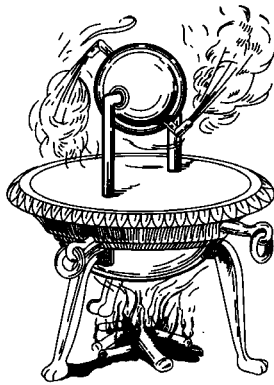
### **2.1 Γενικά για την αεριώθηση**

#### **2.1.1 Ιστορική εξέλιξη**

Ανατρέχοντας την Ιστορία δε θα βρει κανείς ποιος ήταν εκείνος στον οποίο ανήκει το προνόμιο της ανακάλυψης της αρχής της **αεριώθησης (jet propulsion)**. Ο Έλληνας επιστήμονας **Ήρωνας**, που έζησε στην Αλεξάνδρεια τον 1<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ.<sup>1</sup>, λαμβάνει πολλές φορές την τιμή να αναφέρεται ως εκείνος που πραγματοποίησε την πρώτη εφαρμογή της αεριώθησης. Ο Ήρωνας επινόησε και κατασκεύασε μία μηχανή, γνωστή ως **μηχανή του Ήρωνα ή αιολοπύλη (Hero's aeolipile)**, η οποία θεωρείται πρόδρομος των αεριοστρόβιλων κινητήρων. Πιθανώς να είχε τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Ένα κλειστό δοχείο με νερό θερμαινόταν ώστε να παραχθεί ατμός. Αυτός μεταφερόταν μέσω δύο κάθετων σωλήνων σε μία σφαίρα, η οποία έφερε αυλούς στη διεύθυνση της ακτίνας της. Καθώς η σφαίρα γέμιζε με ατμό, περιστρέφονταν και ο ατμός εύρισκε οδό διαφυγής από τους ακτινικούς αυλούς.

---

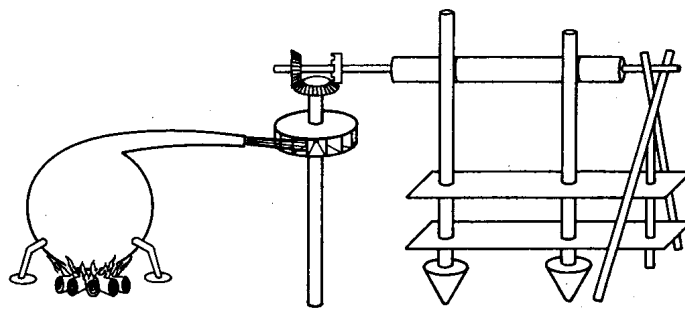
<sup>1</sup> Αυτή η ημερομηνία θεωρείται η επικρατέστερη, αν και υπάρχουν απόψεις, σύμφωνα με τις οποίες ο Ήρωνας έζησε περί το 150 π.Χ., ή περί το 250 μ.Χ.



Σχήμα 2.1 Η μηχανή του Ήρωνα Σχήμα 2.2 Η μηχανή του Da Vinci

Στην Κίνα, τον 8<sup>ο</sup> αιώνα μ. Χ. χρησιμοποιούσαν βεγγαλικά, η λειτουργία των οποίων στηρίζεται στο γνωστό ως τρίτο νόμο του Νεύτωνα: «σε κάθε δράση αντιστοιχεί μία ίση και αντίθετη, σε φορά, αντίδραση». Όπως θα δούμε στη συνέχεια, οι κινητήρες αερίωσης εφαρμόζουν αυτήν ακριβώς την αρχή κατά τη λειτουργία τους. Το 1232, στην Κίνα χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ένα όπλο που ονομάζοταν «Βέλος του ιπτάμενου πυρός» που προωθούνταν με πυρίτιδα. Το 1505 μ.Χ. ο Ιταλός **Leonardo Da Vinci** σχεδίασε μία μηχανή η οποία χρησιμοποιήθηκε αργότερα για το ψήσιμο φαγητού μέσα σε καμίνι (Σχήμα 2.2)!

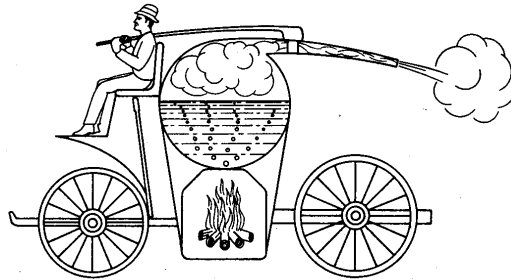
Το 1629, ο Ιταλός μηχανικός **Giovanni Branca** σχεδίασε τον πρώτο, ουσιαστικά, στρόβιλο. Ατμός, παραγόμενος σε θερμαινόμενο δοχείο, περιστρέφει δίσκο που έφερε κοιλότητες στην περιφέρειά του. Η περιστροφή του δίσκου μεταφερόταν μέσω συστήματος γραναζιών σε άλλον άξονα Σχήμα 2.3. Το σύστημα βρήκε εφαρμογή σε μύλο ελαιολιβερίου.



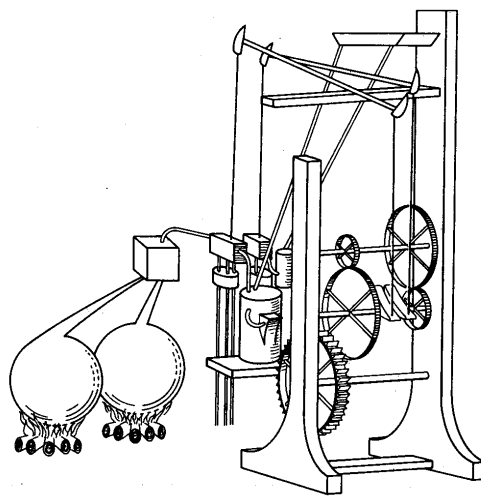
Σχήμα 2.3 Ο στρόβιλος του Branca

Ο **Ισαάκ Νεύτων**, βασισμένος στον τρίτο νόμο του, σχεδίασε το 1687 ένα όχημα το οποίο κινούταν με ώθηση παραγόμενη από ατμό Σχήμα 2.4. Το μειονέκτημα ήταν ότι το όχημα διέθετε πολύ μικρή ισχύ. Ο σχεδιασμός

παρόμοιου οχήματος χρεώνεται και στον Ολλανδό **Willem Jako Gravesande**.



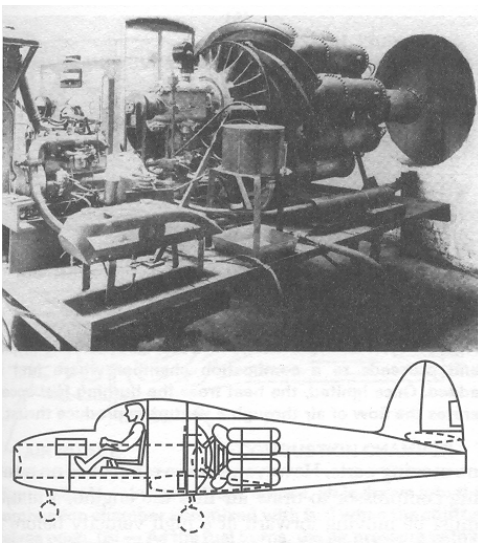
**Σχήμα 2.4 Το ατμοκινούμενο όχημα του Νεύτωνα**



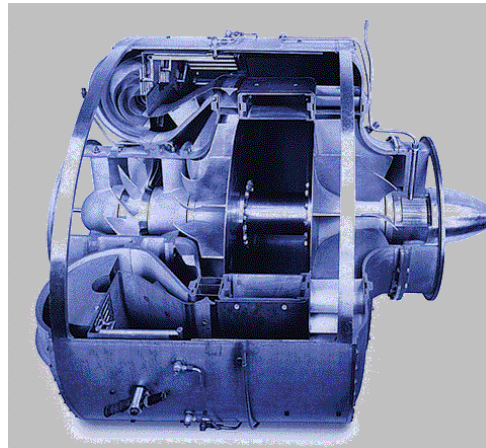
**Σχήμα 2.5 Η κατασκευή του Barber**

Το 1791, ο Άγγλος **John Barber** σχεδίασε ένα σύστημα το οποίο λειτουργούσε με το θερμοδυναμικό κύκλο του σύγχρονου αεριοστρόβιλου κινητήρα (Σχήμα 2.5). Το 1808, ο Άγγλος **John Bumbell** κατασκεύασε έναν αεριοστρόβιλο παρόμοιο με τους σημερινούς, μα χωρίς σταθερά πτερύγια. Αρκετές ομοιότητες με τους αεριοστρόβιλους της εποχής μας παρουσίαζε και ο κινητήρας που κατασκεύασε το 1837 ο Γάλλος **Bresson**. Το 1850, ο **Fernihough** επινόησε τον πρώτο αεριοστρόβιλο κινητήρα που είχε τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί ως εργαζόμενα μέσα ατμό ή αέρα. Η κατασκευή του πρώτου αεριοστρόβιλου που λειτούργησε με αέρα, ξεφεύγοντας από τη χρήση του ατμού, ανήκει στον **F. Stoltz**, το 1872. Το 1900, ο **Sanford Moss** κατέθεσε αρκετές νέες ιδέες πάνω στη λειτουργία των αεριοστροβίλων. Αργότερα, δουλεύοντας για την **General Electric** εφάρμοσε τις ιδέες του πάνω στη σχεδίαση των στρόβιλο-υπερπληρωτών (turbo-superchargers), βασιζόμενος σε κάποιες ιδέες του Γάλλου μηχανικού **Rateau**.

Οι κατασκευές του Moss επηρέασαν το μηχανικό **Frank Whittle** ο οποίος το 1930 κατοχύρωσε την κατασκευή που θεωρείται ο πρώτος επιτυχημένος αεροστρόβιλος κινητήρας για την κίνηση αεροσκάφους. Στις 14 Μαΐου 1944, στην Αγγλία, πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές πτήσεις με τον κινητήρα του Whittle (γνωστό ως W1) να δίνει κίνηση στο αεροσκάφος **Gloster E28/39** (Σχήμα 2.6) με ταχύτητες περί τα 400 μίλια ανά ώρα (miles per hour, mph). Παράλληλα, ο Γερμανός μηχανικός **Hans Von Ohain** σχεδίασε και κατασκεύασε έναν **κινητήρα αερίωσης (jet engine)** ο οποίος δοκιμάστηκε, με επιτυχία, στις 27 Αυγούστου 1939 στο αεροσκάφος **Heinkel He-178** (Σχήμα 3-4). Αυτή αναγνωρίζεται, πρακτικά, ως η πρώτη πτήση αεριωθούμενου αεροσκάφους.



Σχήμα 2.6 Ο κινητήρας του Whittle

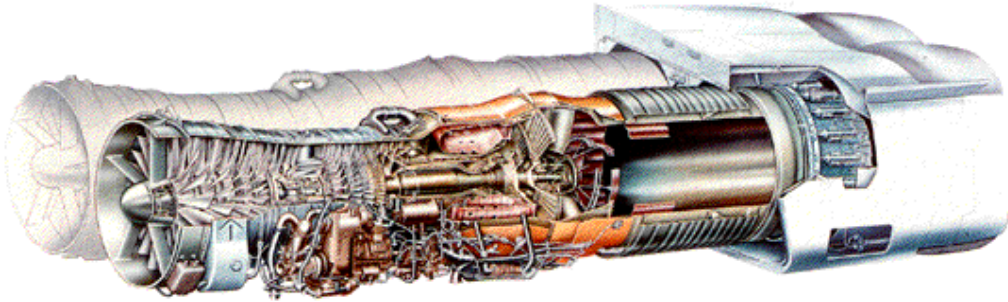


Σχήμα 2.7 Ο κινητήρας του von Ohain

Στην Αμερική, ήταν μόλις τον Οκτώβριο του 1942 οπότε ένα αεροσκάφος χρησιμοποίησε με επιτυχία κινητήρα αερίωσης (δύο, για την ακρίβεια). Αυτός ήταν ο **GE-1A** της General Electric, του οποίου η ανάπτυξη βασίστηκε σε σχέδια του Frank Whittle και χρησιμοποιήθηκε στο αεροσκάφος **Bell XP-59 «Airacomet»**.

Στην εποχή μας, τα επιβατικά, εμπορικά και στρατιωτικά αεροσκάφη χρησιμοποιούν στην πλειοψηφία τους κινητήρες αερίωσης. Ένα σημαντικό βήμα προόδου ήταν η σχεδίαση και η κατασκευή κινητήρων αερίωσης που έχουν την ικανότητα να κινούν ένα αεροσκάφος με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτήν του ήχου. Το μαχητικό **SR-71 Blackbird** πετά με ταχύτητα πέντε φορές μεγαλύτερη από αυτήν του ήχου.

Στο πολιτικό νηολόγιο το αεροσκάφος **Concorde** (Σχήμα 2.8), προϊόν άγγλο - γαλλικής συνεργασίας στα μέσα της δεκαετίας του 1970, με κινητήρα Olympus 593 B, πετούσε με 2,2 φορές μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτήν του ήχου. Στις 24 Οκτωβρίου 2003 πραγματοποιήθηκε η τελευταία πτήση του.



**Σχήμα 2.8 Ο κινητήρας Olympus, διάφορες εκδόσεις του οποίου χρησιμοποιήθηκαν στο αεροσκάφος Concorde**

Ανάλογη υπερηχητική ταχύτητα ανέπτυξε και το ρωσικό αεροσκάφος Tu-144.

### 2.1.2 Αρχές αερίωσης

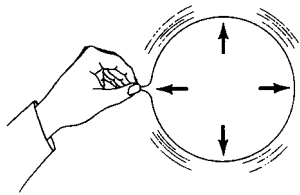
Ο κινητήρας αερίωσης παράγει **προωθητική δύναμη (ώση, thrust)**, προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, εξαναγκάζοντας μία μάζα αερίου να κινηθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση. Εφαρμόζει, δηλαδή, τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, που αναφέραμε παραπάνω. Ως δράση θεωρούμε τη δύναμη που εξασκείται σε μία μάζα καυσαερίων προς το οπίσθιο τμήμα του κινητήρα του αεροσκάφους.<sup>1</sup> Ως αντίδραση στην έξοδο της μάζας αυτής λαμβάνεται μία δύναμη (ώση) προς το εμπρόσθιο τμήμα του κινητήρα και του αεροσκάφους. Το μέγεθος της δύναμης αυτής εξαρτάται από την ποσότητα της μάζας αερίου (ή αέρα) που εισέρχεται στον κινητήρα και το βαθμό της επιτάχυνσης που θα αποκτήσουν τα εξερχόμενα αέρια.

Ας χρησιμοποιήσουμε ένα παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση της αρχής δράσης – αντίδρασης, αλλά και της αερίωσης. Θεωρείστε ένα μπαλόνι το οποίο γεμίζετε με αέρα και κρατάτε, στη συνέχεια, το στόμιό του κλειστό. Ο αέρας που εμπεριέχεται είναι υπό πίεση, η οποία εξασκείται ομοιόμορφα σε όλες τις κατευθύνσεις και πιέζει εξίσου τα εσωτερικά τοιχώματα του μπαλονιού (Σχήμα 2.9). Έτσι, δεν εξασκείται δύναμη που θα

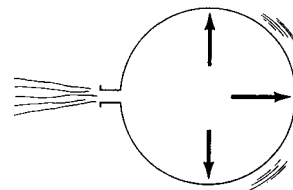
---

<sup>1</sup> Μία μάζα αέρα εισέρχεται στον κινητήρα, από την εισαγωγή, με συγκεκριμένη ταχύτητα. Μετά την καύση, αέρας και καυσαέρια εξέρχονται από την εξαγωγή με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα.

μπορούσε να κινήσει το μπαλόνι. Στη συνέχεια, απελευθερώνοντας το στόμιο του μπαλονιού, αυτό χάνει αέρα και μετά από μία σύντομη πτήση καταλήγει στο έδαφος. Μετά το άνοιγμα του στομίου, δεν εξασκείται πλέον δύναμη προς αυτήν την κατεύθυνση. Όλες οι άλλες δυνάμεις βρίσκονται σε ισορροπία, αλλά η δύναμη στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του στομίου δεν εξισορροπείται (Σχήμα 2.10). Μία δύναμη εξασκείται από τα τοιχώματα του μπαλονιού στον αέρα που περιέχει. Αυτή είναι ίση και αντίθετη προς αυτήν που εξασκεί ο αέρας στα τοιχώματα και εξαναγκάζει τον αέρα να εξέλθει από το στόμιο του μπαλονιού, ενώ αυτό κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση.



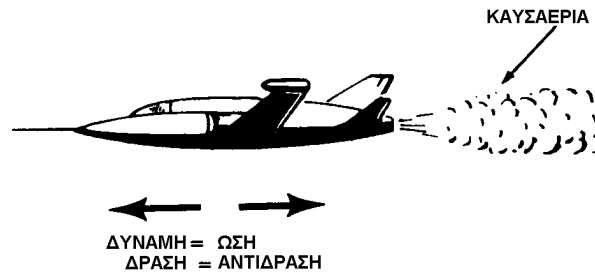
Σχήμα 2.9 Αέρας υπό πίεση στο εσωτερικό του μπαλονιού



Σχήμα 2.10 Απελευθέρωση του στομίου του μπαλονιού

Ένας κινητήρας αερίωσης κινείται κάτω από την επίδραση παρόμοιων δυνάμεων. Η πτήση του μπαλονιού μας ήταν σύντομη λόγω της πολύ γρήγορης πτώσης πίεσης του αέρα στα τοιχώματά του. Ας χρησιμοποιήσουμε μία αντλία ποδηλάτου για να εξασφαλίσουμε την συνεχή, σταθερή πίεση στα εμπρόσθια τοιχώματα του μπαλονιού. Έτσι, επιτυγχάνουμε σταθερή εξαγωγή αέρα από το στόμιο και σταθερή παραγωγή ώσης. Αντικαθιστώντας την αντλία με ένα συμπιεστή, μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερα μεγέθη. Ο συμπιεστής αυτός χρειάζεται μία διάταξη για την περιστροφή του. Ας το συνδέσουμε, μέσω ενός άξονα, με ένα στρόβιλο. Αυτός απαιτεί καύσιμο για την περιστροφή του. Ο αέρας που εξέρχεται από το συμπιεστή, θα αναμειγνύεται με καύσιμο και τα παραγόμενα καυσαέρια θα περιστρέφουν το στρόβιλο. Με την αύξηση της παροχής συμπιεσμένου αέρα θα επιτυγχάνεται και αύξηση της παραγόμενης ισχύος ή ώσης. Μέχρι αυτό το σημείο, συνδέσαμε στο μπαλόνι μας ένα **συμπιεστή (compressor)**, ένα **θάλαμο καύσης (combustion chamber)** του καυσίμου και την παραγωγή καυσαερίων και ένα **στρόβιλο (τουρμπίνα, turbine)** που συνδέεται με το συμπιεστή μέσω ενός άξονα. Μετατρέψαμε δηλαδή το μπαλόνι σε κινητήρα αερίωσης. Αν μεταβάλλουμε τη ροή του καυσίμου σε αυτόν, θα επιτύχουμε και ανάλογη παροχή ώσης, αρκεί να παρέχουμε και την ανάλογη ποσότητα καυσίμου.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι στον κινητήρα αερίωθησης τα καυσαέρια ωθούνται προς την εξαγωγή (δράση) και αυτά ασκούν μία δύναμη ή ώση (αντίδραση), στην αντίθετη κατεύθυνση, προς τον κινητήρα και το αεροσκάφος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.11.



**Σχήμα 2.11 Η δράση και η αντίδραση στην κίνηση του αεροσκάφους**

Μία κοινή, λανθασμένη ωστόσο, εντύπωση είναι ότι τα καυσαέρια ωθούν τον αέρα πίσω από τον κινητήρα για κινήσουν το αεροσκάφος αντίθετα. Η ώση προέρχεται από τις δυνάμεις που εξασκούν τα καυσαέρια **μέσα** στον κινητήρα. Αυτά εκτονώνονται και πιέζουν τα πλαϊνά τοιχώματα και το εμπρόσθιο μέρος του κινητήρα. Όσον αφορά το οπίσθιο μέρος του, αυτό αποτελεί ουσιαστικά μία τεράστια οπή, όπου δεν μπορεί να εξασκηθεί δύναμη. Έτσι, ο κινητήρας κινείται προς της κατεύθυνση της δύναμης που δεν εξισορροπείται, όπως ακριβώς στο μπαλόνι.

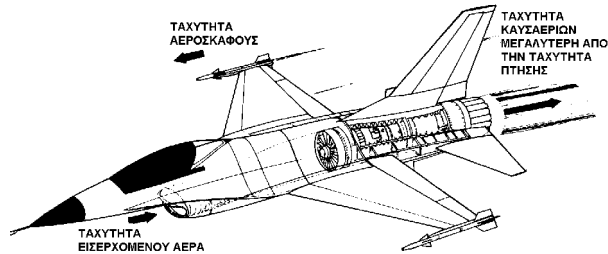
### 2.1.3 Ώση

Όπως αναφέραμε παραπάνω, **η ώση είναι μία δύναμη αντίδρασης**. Μετριέται σε kp, pounds ή lbf. Εξαρτάται από την επιτάχυνση μίας μάζας αερίου, σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα<sup>1</sup>. Για παράδειγμα, ένας κινητήρας αερίωθησης δίνει μεγάλη επιτάχυνση σε σχετικά μικρή μάζα αέρα ενώ ένας ελικοφόρος δίνει μικρή επιτάχυνση σε μεγαλύτερη μάζα αέρα. Η ποσότητα του αέρα και των καυσαερίων που επιταχύνονται καθώς και το μέγεθος της επιτάχυνσης – η τελική τους ταχύτητα δηλαδή, καθορίζουν και την παραγόμενη ώση. Επίσης, η διαφορά της πίεσης των εξερχόμενων καυσαερίων προς την ατμοσφαιρική συμμετέχει στη δημιουργία της ώσης.

Η **στατική ώση (static thrust, gross thrust)** ή μικτή ώση είναι η ποσότητα της ώσης που παράγει ένας κινητήρας όταν το αεροσκάφος βρίσκεται στο έδαφος ακίνητο. Η **καθαρή ώση (net thrust)** είναι η ώση που παράγεται

<sup>1</sup> «Η επιτάχυνση ενός σώματος είναι ανάλογη με τη δύναμη που την προκαλεί και αντιστρόφως ανάλογη με τη μάζα του σώματος»

κατά την πτήση. Για τον υπολογισμό της πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ταχύτητα του αεροσκάφους.



**Σχήμα 2.12 Η ταχύτητα των εξερχόμενων καυσαερίων είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα πτήσης του αεροσκάφους**

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ώση ενός κινητήρα αερίωθης διακρίνονται σε δύο τύπους: α) αυτούς που έχουν σχέση με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και β) αυτούς που έχουν σχέση με τις συνθήκες του περιβάλλοντος της πτήσης.

### 2.1.3.1 Λειτουργικοί παράγοντες

Οι λειτουργικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ώση ενός κινητήρα αερίωθης είναι οι ακόλουθοι:

- **Αριθμός στροφών λειτουργίας.** Θεωρείται ο πιο σημαντικός παράγοντας για τη δημιουργία της ώσης. Καθορίζει τη μάζα του αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα που, με τη σειρά της, είναι ανάλογη της ώσης που παράγεται.
- **Εισαγωγή αέρα.** Το μέγεθος και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού εισαγωγής του ρεύματος αέρα στον κινητήρα επηρεάζουν την ποσότητα του και, ανάλογα, και την ποσότητα της παραγόμενης ώσης.
- **Ροή καυσίμου.** Όσο αυξάνει η ποσότητα του εγχυόμενου καυσίμου, επιτυγχάνεται αύξηση του αριθμού στροφών και ανάλογη αύξηση της παραγόμενης ώσης.
- **Απαγωγή ποσότητας αέρα συμπίεσης.** Επιτυγχάνεται από ειδική βαλβίδα, όπως θα δούμε παρακάτω, και μειώνει την παραγόμενη ώση αφού μειώνεται η ποσότητα του συμπιεσμένου αέρα που εξέρχεται από το συμπιεστή.
- **Θερμοκρασία εισαγωγής των καυσαερίων στο στρόβιλο.** Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τόσο περισσότερη ενέργεια απορροφάται από το στρόβιλο με αποτέλεσμα την αύξηση των στροφών του



συμπιεστή, την εισροή μεγαλύτερης ποσότητας αέρα στον κινητήρα και, τελικά, την παραγωγή μεγαλύτερης ώσης.

- **Έγχυση νερού στον αγωγό εισαγωγής αέρα στον κινητήρα.** Με τον τρόπο αυτόν αυξάνεται η πυκνότητα και η μάζα του εισερχόμενου αέρα, με αποτέλεσμα την έγχυση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου και την αύξηση της παραγόμενης ώσης.
- **Ταχύτητα του αεροσκάφους.** Η επιτάχυνση του αεροσκάφους από μηδενική ταχύτητα, προκαλεί μείωση της παραγόμενης από τον κινητήρα ώσης. Στη συνέχεια, αυτή η εξάρτηση αναστρέφεται, εξαιτίας της αναρρόφησης μεγαλύτερης ποσότητας αέρα (**ram effect**) και περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ώσης.

### 2.1.3.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες που επηρεάζουν την ώση

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επηρεάζουν την παραγόμενη κατά την πτήση ώση είναι οι ακόλουθοι:

- **Θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα.** Η αύξησή της σημαίνει ότι ο εισερχόμενος αέρας στον κινητήρα είναι πιο αραιός, οπότε παρουσιάζεται μείωση της παραγόμενης ώσης.
- **Πίεση περιβάλλοντος αέρα.** Η μείωση της πίεσης του περιβάλλοντος αέρα αντιστοιχεί σε πυκνότητας του αέρα οπότε επέρχεται μείωση στην παραγόμενη ώση. Φυσικά, η πίεση του περιβάλλοντος αέρα είναι ανάλογη του ύψους στο οποίο πραγματοποιείται η πτήση του αεροσκάφους.

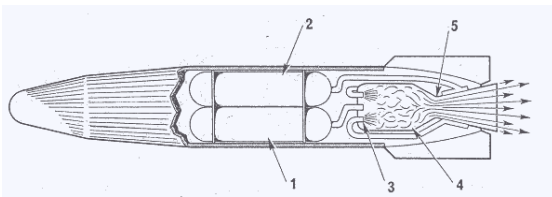
### 2.1.4 Μέθοδοι αερίωσης – Τύποι αεριοθητών

#### 2.1.4.1 Γενικά

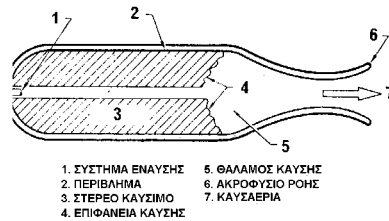
Διάφορα είδη αεροπορικών κινητήρων αερίωσης χρησιμοποιούν το νόμο «δράσης – αντίδρασης». Όλοι χρησιμοποιούν τον ίδιο τρόπο για την παραγωγή ώσης, επιταχύνουν μάζα αερίων στο εσωτερικό τους. Τα είδη αυτά είναι: ο πύραυλος, ο αθόδυλος ή αυλωθητής, ο παλμικός αθόδυλος ή παλμοθητής, ο αεριοστρόβιλος, ο στροβιλο-αθόδυλος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

### 2.1.4.2 Πύραυλος (rocket)

Ο πύραυλος δε χρησιμοποιεί ατμοσφαιρικό αέρα για την καύση. Μεταφέρει στο εσωτερικό του φιάλες οξυγόνου (ή άλλου οξειδωτικού μέσου), το οποίο αναμειγνύεται με το καύσιμο και παράγουν την απαιτούμενη ποσότητα καυσαερίων για την κίνησή του. Έτσι, έχει τη δυνατότητα να κινείται σε οποιοδήποτε ύψος, μέσα και έξω από την ατμόσφαιρα. Διακρίνουμε δύο τύπους πυραύλων: υγρών καυσίμων (Σχήμα 2.13) και στερεών καυσίμων (Σχήμα 2.14). Στον πρώτο τύπο, σύνηθες καύσιμο είναι η υδραζίνη ( $N_2H_4$ ) και συνηθέστερο οξειδωτικό το υγρό οξυγόνο ή το νιτρικό οξύ ( $HNO_3$ ).



Σχήμα 2.13 Πύραυλος υγρών καυσίμων



Σχήμα 2.14 Πύραυλος στερεών καυσίμων

Ο δεύτερος τύπος έχει αντικαταστήσει τον πύραυλο υγρών καυσίμων σε αρκετές εφαρμογές, όπως στην κίνηση βλημάτων, διαστημικών οχημάτων και στην παροχή περίσσειας ισχύος σε αεροσκάφη κατά την απογείωση (Σχήμα 2.15). Συνήθως χρησιμοποιείται βαλιστίτης ως στερεό καύσιμο και είναι αναμειγμένος με το οξειδωτικό.

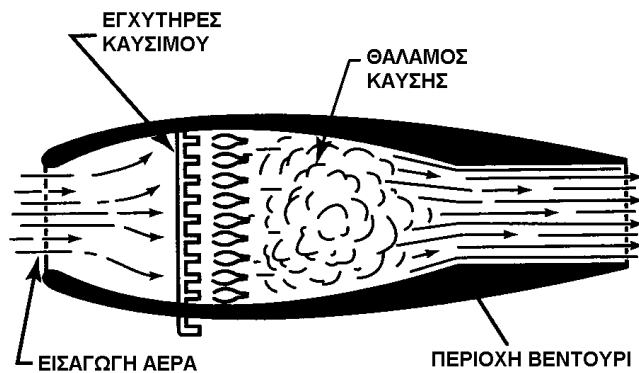


Σχήμα 2.15 Απογείωση αεροσκάφους με τη βοήθεια πυραύλου στερεών καυσίμου

### 2.1.4.3 Αθόδουλος (ram jet)

Ο αθόδουλος ονομάζεται και **αερο-θερμοδυναμικός αυλός (aero-thermodynamic duct)**. Αποτελεί τον απλούστερο κινητήρα αερίωθησης διότι δεν έχει κινητά μέρη. Ουσιαστικά αποτελείται από τους **ψεκαστήρες** και το **μετρητή καυσίμου**, τους **συγκρατητές της φλόγας (flame holders)**, τα οποία βρίσκονται μέσα σε σωλήνα με αποκλίνουσα εισαγωγή και

αποκλίνουσα – συγκλίνουσα (ή απλή συγκλίνουσα) εξαγωγή (Σχήμα 2.16). Η απουσία περιστρεφόμενου συμπιεστή δεν επιτρέπει την εισαγωγή επαρκούς ποσότητας αέρα στον αθόδουλο στις χαμηλές ταχύτητες. Πρέπει, έτσι, να κινηθεί με μεγάλη ταχύτητα προτού να είναι σε θέση να παράσχει ώση (ram effect). Όταν εισέλθει αέρα στον κινητήρα, εγχύεται καύσιμο και παράγονται τα απαιτούμενα καυσαέρια που επιταχύνονται και παράγουν ώση. Η ιδιομορφία αυτή του αθόδουλου επιβάλλει την τοποθέτησή του πάνω σε πύραυλο ή αεροσκάφος. Στη συνέχεια, υποβοηθά με την ώση που παράγει τον ίδιο το φορέα του ή αποσπάται από αυτόν και προωθεί άλλο σκάφος ή βαλλιστικό βλήμα, με τα οποία συνδέεται.

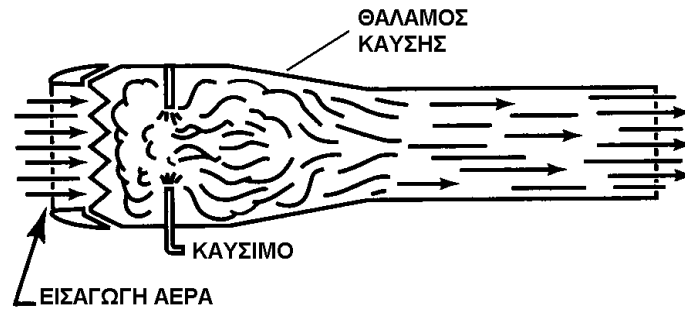


Σχήμα 2.16 Τα τμήματα του αθόδουλου

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

#### 2.1.4.4 Παλμικός αθόδουλος (Pulse jet)

Ο παλμικός αθόδουλος διαφέρει από τον αθόδουλο μόνο στην κατασκευή της εισαγωγής του αέρα. Εκεί, τοποθετούνται **βαλβίδες εισαγωγής** που διατηρούνται στην ανοικτή θέση με **ελατήρια** (Σχήμα 2.17). Έτσι, διέρχεται αέρας όπου αναμειγνύεται με το καύσιμο και το μείγμα καίγεται στο **θάλαμο καύσης**. Τα παραγόμενα καυσαέρια εκτονώνονται και εξαναγκάζουν τις βαλβίδες εισαγωγής να κλείσουν, οπότε και τα καυσαέρια επιταχύνονται προς την εξαγωγή. Τότε παράγουν την απαιτούμενη ώση. Τα ελατήρια ανοίγουν ξανά τις βαλβίδες εισαγωγής και ο κύκλος λειτουργίας επαναλαμβάνεται.

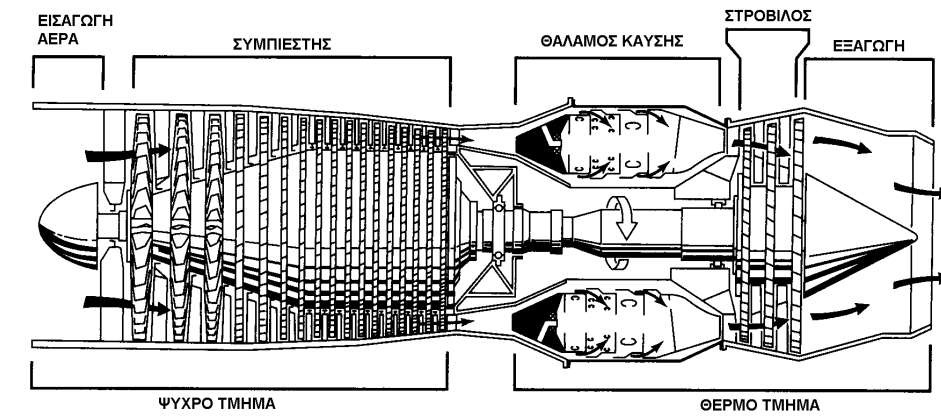


Σχήμα 2.17 Τα τμήματα του παλμικού αθόδυλου

Σε αντίθεση με τον αθόδυλο όπου παροχή ισχύος είναι συνεχής, στον παλμικό αθόδυλο είναι διακεκομμένη. Ο κινητήρας αυτός είναι θορυβώδης και έχει μικρή απόδοση, όμως μπορεί να λειτουργήσει από την ακινησία. Χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία από τη γερμανική αεροπορία κατά το 2<sup>ο</sup> Παγκόσμιο πόλεμο με την ονομασία «ιπτάμενη βόμβα». Βρίσκει κάποιες εφαρμογές στην περιστροφή πτερυγίων ελικοπτέρων.

#### 2.1.4.5 Βασικές αρχές αεριοστρόβιλου (gas turbine engine)

Ο αεριοστρόβιλος θεωρείται ως ο πιο αποτελεσματικός κινητήρας αερίωθσης που βρίσκεται σε χρήση στην εποχή μας. Χρησιμοποιείται σε αεροσκάφη επιβατικά, εμπορικά και στρατιωτικά. Τα βασικά του μέρη είναι ο συμπίεστης, ο θάλαμος κάυσης, ο στρόβιλος και το ακροφύσιο εξαγωγής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18.



Σχήμα 2.18 Τα βασικά μέρη του αεριοστρόβιλου

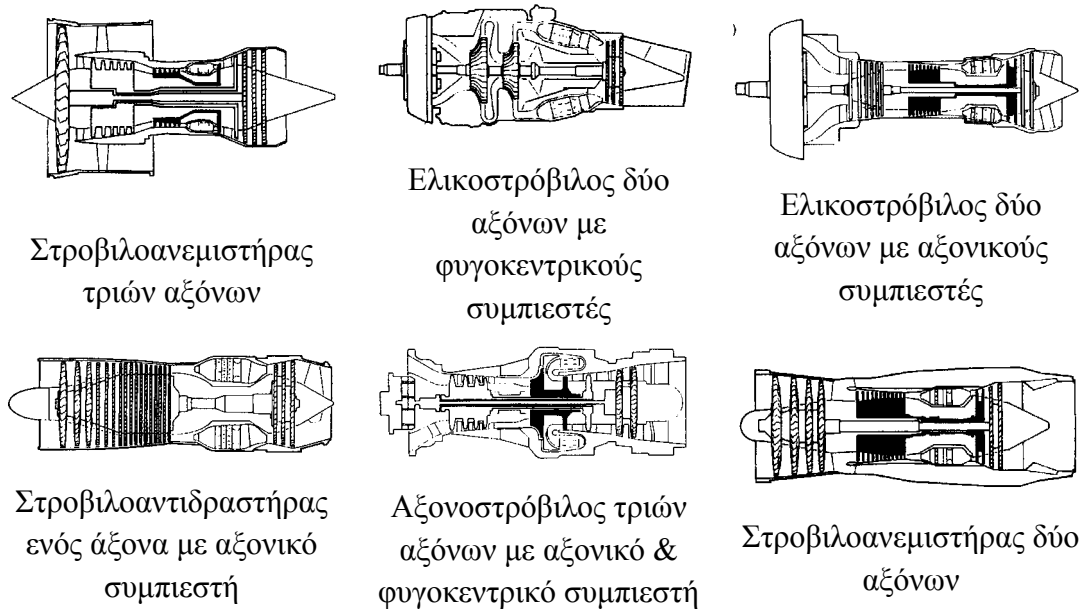
Γενικά, ο συμπίεστης αποτελεί το ψυχρό τμήμα του κινητήρα και ο θάλαμος καύσης με το στρόβιλο, το θερμό τμήμα. Μία μάζα αέρα οδηγείται από το τμήμα εισαγωγής στο συμπίεστη. Εκεί συμπιέζεται και οδηγείται στο θάλαμο καύσης. Αναμιγνύεται με εγχυόμενο καύσιμο και επιτυγχάνεται καύση. Τα παραγόμενα θερμά καυσαέρια εκτονώνονται και οδηγούνται προς την

εξαγωγή. Στη διαδρομή αυτήν προκαλούν την **περιστροφή του στρόβιλου** ο οποίος **συνδέεται με το συμπιεστή με κοινό άξονα**. Στη συνέχεια, τα καυσαέρια συνεχίζουν την εκτόνωσή τους και περνώντας από το ακροφύσιο εξόδου, εξέρχονται από τον κινητήρα έχοντας πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτήν της εισερχόμενης μάζας αέρα. Η διαφορά αυτή μεταξύ των δύο ταχυτήτων προκαλεί την παραγόμενη ώση.

Ανάλογα με τον τύπο του αεριοστρόβιλου, όπως θα δούμε στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται **περισσότεροι από ένας στρόβιλοι**. **Ο καθένας συνδέεται με τον αντίστοιχο συμπιεστή μέσω ξεχωριστού άξονα**. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δύο ή τρεις συμπιεστές και στρόβιλοι, αυτοί συνδέονται με συγκεντρικούς άξονες. Οι αεριοστρόβιλοι δηλαδή μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, ανάλογα με τον αριθμό των αξόνων τους, σε: **αεριοστρόβιλους απλού, διπλού και τριπλού άξονα ή τυμπάνου**.

Στον αεριοστρόβιλο, η παραγωγή ισχύος είναι ανάλογη του ποσού της θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση. Η θερμότητα αυτή δε μπορεί να μετρηθεί αλλά υπολογίζεται από τρεις άλλες, γνωστές παραμέτρους: τη θερμοκρασία, τη μάζα (ή το βάρος) και την ειδική θερμότητα. Η διαφορά του ρόλου της θερμότητας και της θερμοκρασίας στη λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου φαίνεται από το ακόλουθο παράδειγμα: υποθέστε τη λειτουργία δύο αεριοστροβίλων από τους οποίους ο ένας καταναλώνει τη δεκαπλάσια ποσότητα καυσίμου από τον άλλον. Και οι δύο κινητήρες λειτουργούν με την ίδια θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο. Όμως, ο μεγαλύτερος κινητήρας είναι σε θέση να αποδώσει περίπου δέκα φορές μεγαλύτερη ισχύ από το μικρότερο. Και αυτό διότι σε αυτόν εκλύεται δέκα φορές μεγαλύτερο ποσό θερμότητας από ότι στο μικρότερο, ενώ λειτουργούν στην ίδια θερμοκρασία. Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας καύσης οδηγεί σε μεγαλύτερη εκτόνωση των καυσαερίων. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας ώσης. Όμως, παρουσιάζεται ο περιορισμός της αντοχής των υλικών κατασκευής του θαλάμου καύσης και του στρόβιλου.

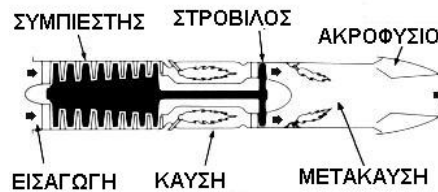
Ο αεριοστρόβιλος κινητήρας διακρίνεται σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους. Όλοι αποτελούνται από τα βασικά μέρη που είδαμε παραπάνω. Οι διαφορές τους βρίσκονται στον τύπο και τη διάταξη των βασικών αυτών μερών. Στο Σχήμα 2.19 διακρίνονται αεριοστρόβιλοι με διαφορετικές διατάξεις των βασικών τους μερών.



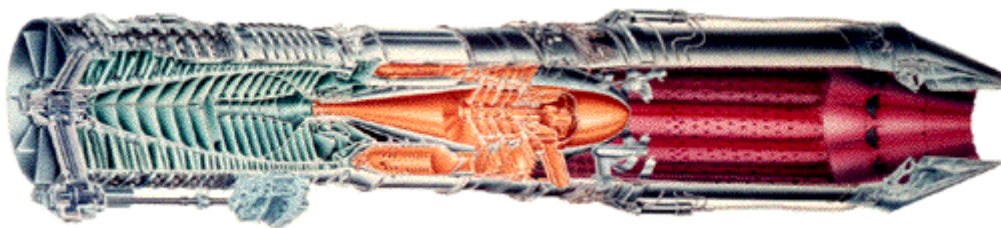
Σχήμα 2.19 Διάφοροι τύποι αεριοστροβίλων

### 2.1.5 Οι τύποι του αεριοστροβίλου

#### 2.1.5.1 Στροβιλοαντιδραστήρας (turbojet engine)



(α)



(β)

Σχήμα 2.20 (α) Τα βασικά μέρη ενός στροβιλοαντιδραστήρα, (β) Ο στροβιλοαντιδραστήρας GE J79

Η αρχή λειτουργίας του είναι παρόμοια με αυτήν που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο στροβιλοαντιδραστήρας (Σχήμα 2.20) αποτελεί την απλούστερη μορφή αεριοστροβίλου κινητήρα. Χρησιμοποιεί τη ροή των καυσαερίων που σχηματίζεται στο ακροφύσιο εξαγωγής ως το

**μοναδικό μέσο παραγωγής ώσης για την κίνηση του αεροσκάφους.** Η παραγωγή ώσης επιτυγχάνεται με την επιτάχυνση μικρών, σχετικά, μαζών αέρα σε υψηλές ταχύτητες.

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

Ένα σχετικό μειονέκτημα του στροβιλοαντιδραστήρα είναι ότι στις χαμηλές ταχύτητες πτήσης η παραγόμενη ώση είναι αναλογικά μικρή. Ο λόγος είναι ότι απαιτείται ικανοποιητική πίεση εισαγωγής αέρα (ram effect) στο συμπιεστή και, τελικά, ταχύτητα. Για το λόγο αυτό **ένας στροβιλοαντιδραστήρας χρειάζεται μεγάλο διάδρομο απογείωσης** ώστε να αυξηθεί ικανοποιητικά η πίεση εισαγωγής και, συνεπώς, η ώση κατά την απογείωση του αεροσκάφους. Επίσης, η αυξημένη κατανάλωση καυσίμου αποτελεί ένα χαρακτηριστικό μειονέκτημα του στροβιλοαντιδραστήρα. Τέλος, συγκριτικά με έναν ελικοφόρο κινητήρα, ο στροβιλοαντιδραστήρας επιτυγχάνει μικρότερη απόδοση σε ταχύτητες πτήσης κάτω των 750km/h.<sup>1</sup> Καθώς η απόδοση του έλικα που συνεργάζεται με τον ελικοφόρο κινητήρα μειώνεται σε ταχύτητες πτήσης άνω των 550km/h<sup>2</sup>, αναπτύχθηκαν νέοι τύποι αεροστροβίλων για την πιο αποτελεσματική λειτουργία σε αυτό το εύρος των ταχυτήτων πτήσης.

#### **2.1.5.2 Ελικοστρόβιλος (turboprop engine)**

Ο κινητήρας αυτός (Σχήμα 2.21) έχει ευρεία εφαρμογή. Ουσιαστικά, είναι όμοιος με το στροβιλοαντιδραστήρα με τη διαφορά ότι **χρησιμοποιείται ένα σύστημα γραναζιών ως μειωτήρας στροφών για τη μετάδοση κίνησης σε έναν έλικα<sup>3</sup>**. 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.

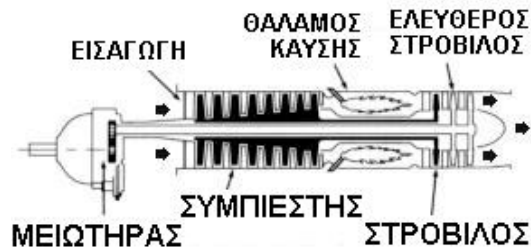
---

<sup>1</sup> Η προωθητική του απόδοση εξαρτάται από την ταχύτητα πτήσης.

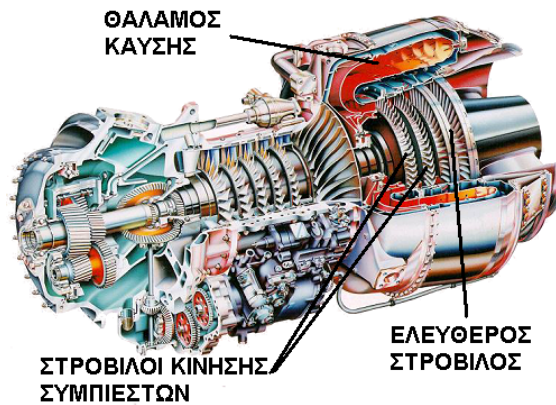
<sup>2</sup> Λόγω του φαινομένου της απώλειας αεροδυναμικής στήριξης που εμφανίζεται στα άκρα των πτερυγίων της έλικας αλλά και της δημιουργίας κυμάτων κρούσης.

<sup>3</sup> Ο μειωτήρας στροφών είναι απαραίτητος καθώς η βέλτιστη απόδοση της έλικας επιτυγχάνεται σε πολύ μικρότερες στροφές από αυτές της λειτουργίας του κινητήρα.

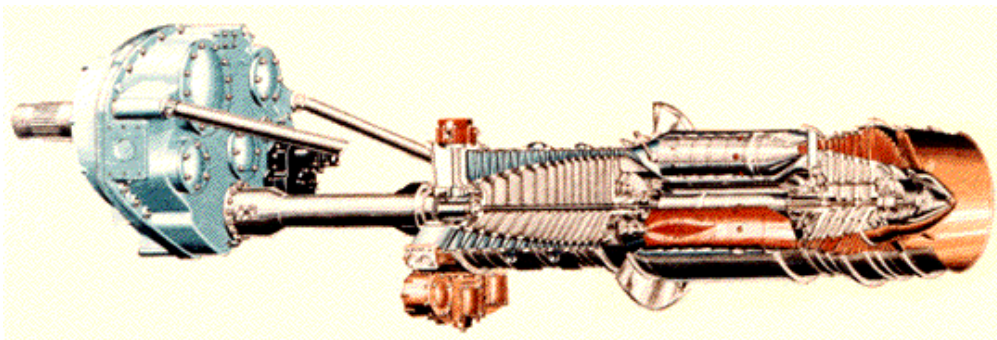
Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια των καυσαερίων ενός ελικοστρόβιλου κινητήρα αποδίδεται -σε ποσοστό έως 90%- ως ισχύς στον άξονα που κινεί τον έλικα. Μόνο το υπόλοιπο 10% της ενέργειας των καυσαερίων παρέχεται υπό μορφή ώσης.



(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 2.21 (α) Τα βασικά μέρη του ελικοστρόβιλου, (β) ο ελικοστρόβιλος T-53, (γ) ο ελικοστρόβιλος κινητήρα T-56**

Σε ορισμένους ελικοστρόβιλους χρησιμοποιείται ξεχωριστός στρόβιλος για την κίνηση του έλικα. Αυτός ονομάζεται **ελεύθερος στρόβιλος (free turbine ή power turbine)** και είναι συνδεδεμένος με ξεχωριστό άξονα με το μειωτήρα στροφών (Σχήμα 2.21(α, β)). Τα άλλα μέρη του κινητήρα



(συμπιεστής, θάλαμος καύσης και **στροβίλος καυσαερίων - gas turbine**) λειτουργούν για να παρέχουν καυσαέρια με υψηλή ενέργεια για την περιστροφή του ελεύθερου στροβίλου.

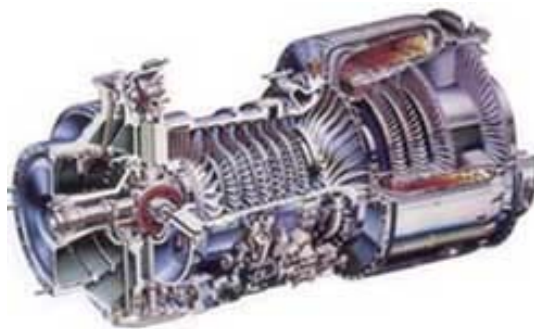
Σε άλλους ελικοστροβίλους δεν υπάρχει ξεχωριστός ελεύθερος στροβίλος και η κίνηση του έλικα επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση μέρους της ενέργειας των καυσαερίων που εκτονώνονται σε στροβίλο, ο οποίος κινεί και το συμπιεστή (Σχήμα 2.21 (γ))

Το μεγάλο **πλεονέκτημα του ελικοστροβίλου κινητήρα** είναι ότι επιτυγχάνει την **καλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου** συγκριτικά με οποιονδήποτε αεριοστροβίλο κινητήρα άλλου τύπου. Η συμβολή του έλικα επιτρέπει την επιτάχυνση μεγάλων μαζών αέρα σε μικρές, σχετικά, ταχύτητες<sup>1</sup>. Η παραγόμενη ώση είναι μεγάλη και το αεροσκάφος έχει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά στην απογείωση (μικρός διάδρομος) και στην άνοδο. Επιπλέον, η απόδοση του είναι ικανοποιητική ακόμη και σε σχετικά μεγάλα ύψη πτήσεων (6.000 m).

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα μειώνονται όταν αυξάνεται η ταχύτητα (άνω των 650km/h) και το ύψος της πτήσης (άνω των 7.000 m). Ακόμη, ένα μειονέκτημα του ελικοστροβίλου 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.

### 2.1.5.3 Αξονοστροβίλος (turboshaft engine)

Αυτός ο τύπος αεριοστροβίλου (Σχήμα 2.22) παρέχει ισχύ σχεδόν αποκλειστικά στον άξονά του ενώ ελάχιστη είναι η παραγωγή ώσης.



Σχήμα 2.22 Τομή αξονοστροβίλου κινητήρα

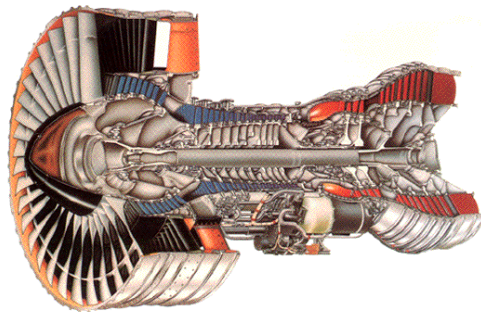
---

<sup>1</sup> Όταν το αεροσκάφος κινείται με μικρές, ως προς το έδαφος, ταχύτητες.

Όπως εύκολα καταλαβαίνει κάποιος, η ομοιότητα με τον ελικοστρόβιλο είναι μεγάλη. Στην περίπτωση που ο **ελεύθερος στρόβιλος** του ελικοστρόβιλου κινητήρα δε συνδέεται με έλικα αεροσκάφους, αλλά με τον άξονα του στροφείου ενός **ελικοπτέρου** τότε έχουμε τον **αξονοστρόβιλο**. Επίσης, ο κινητήρας αυτός χρησιμοποιείται, σε κάποιες περιπτώσεις, και ως εναλλακτικό μέσο παροχής ισχύος (**Auxiliary Power Unit, APU**) σε ένα αεροσκάφος. Βέβαια, ξεχωριστά από τις αεροπορικές εφαρμογές, ο ελεύθερος στρόβιλος μπορεί να συνδεθεί και με τον άξονα στροφείου πλοίου, αυτοκινήτου, ηλεκτρογεννήτριας. Η έξοδος του αξονοστρόβιλου ορίζεται από την παραγόμενη ισχύ στον άξονα (αξονική ισχύς) του ελεύθερου στροβίλου.

#### 2.1.5.4 Στροβιλοανεμιστήρας (turbofan engine)

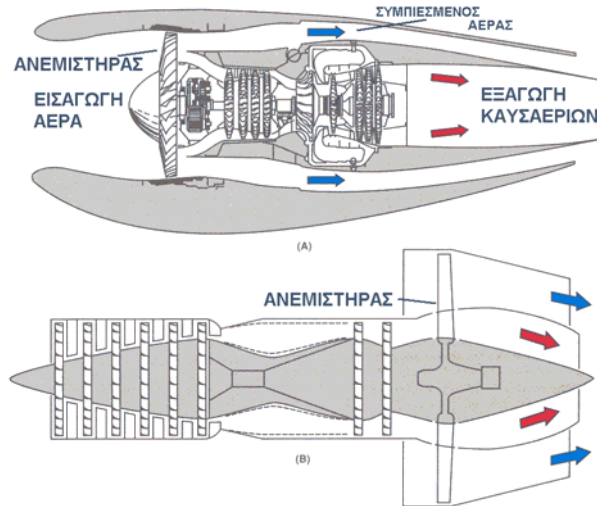
Η παραλλαγή αυτή του στροβιλοαντιδραστήρα (φαίνεται σε τομή στο Σχήμα 2.23) αποτελεί μία από τις σπουδαιότερες τεχνικές εξελίξεις του αεροστρόβιλου. Ο κινητήρας αυτός **συνδυάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του στροβιλοαντιδραστήρα και ελικοστρόβιλου**.



Σχήμα 2.23 Τυπικός στροβιλοανεμιστήρας σε τομή

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

Ουσιαστικά, ο στροβιλοανεμιστήρας είναι ένας ελικοστρόβιλος με τον έλικα – δηλαδή τον ανεμιστήρα (fan) – μέσα στον κινητήρα. Ο ανεμιστήρας βρίσκεται στο μπροστινό (Σχήμα 2.24α) ή στο οπίσθιο τμήμα του κινητήρα (Σχήμα 2.24β).



Σχήμα 2.24 Θέσεις του ανεμιστήρα στο στροβιλοανεμιστήρα

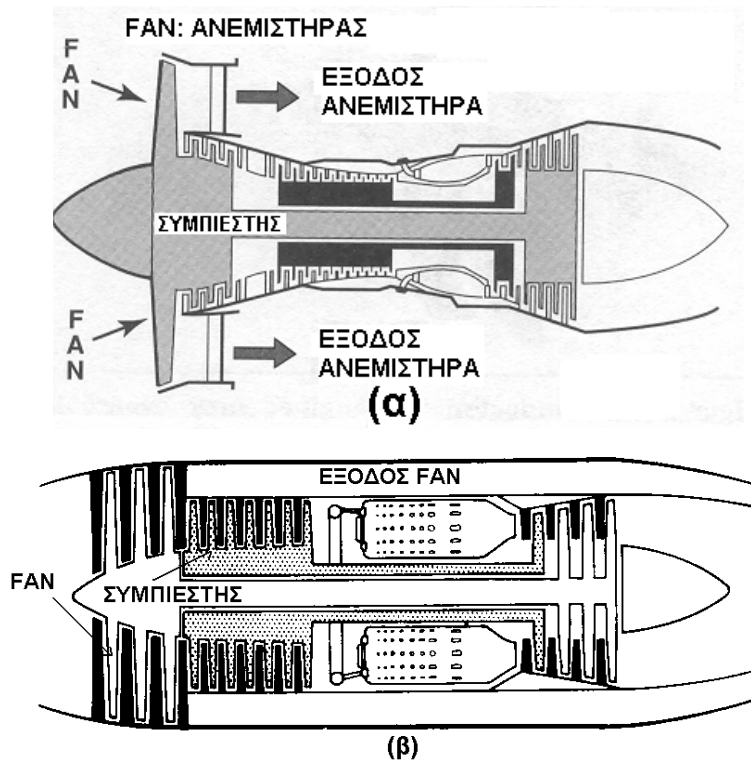
Η ροή του αέρα εισαγωγής διασπάται σε δύο ρεύματα: το θερμό και το ψυχρό. Το πρώτο ρεύμα διέρχεται μέσα από τον κινητήρα, κατά τα γνωστά. Το ψυχρό ρεύμα περνά περιφερειακά του σώματος του κινητήρα, με την ίδια, βέβαια, αξονική διεύθυνση (**ροή παράκαμψης - bypass**). Το ρεύμα αυτό συνεισφέρει στην παραγωγή του 80% της ώσης του κινητήρα<sup>1</sup>. Ο ανεμιστήρας επιταχύνει ψυχρό αέρα προς το οπίσθιο τμήμα του κινητήρα, χωρίς αυτός να αναμειγνύεται με καύσιμο και να καίγεται. Έτσι, παράγεται ώση που προστίθεται στην ολική ώση του κινητήρα. Ο λόγος του ψυχρού ρεύματος προς το θερμό ρεύμα αέρα καλείται **λόγος παράκαμψης (bypass ratio)** και είναι χαρακτηριστικό του στροβιλοανεμιστήρα. Οι τιμές του κυμαίνονται από 2:1 έως 10:1<sup>2</sup>. Ανάλογα με τις τιμές του λόγου, ένας στροβιλοανεμιστήρας χαρακτηρίζεται ως υψηλού ή χαμηλού λόγου παράκαμψης. Χαρακτηριστικά δείγματα φαίνονται στο Σχήμα 2.25 (α) και (β), αντίστοιχα.

<sup>1</sup> Γενικά, η ώση που παράγει ο ανεμιστήρας κυμαίνεται μεταξύ 30 – 80% της ολικής, ανάλογα με το λόγο παράκαμψης.

<sup>2</sup> Αντίστοιχα, ο λόγος της ροής αέρα από την έλικα προς τη ροή αέρα μέσα σε έναν ελικοστρόβιλο είναι της τάξης του 50:1.

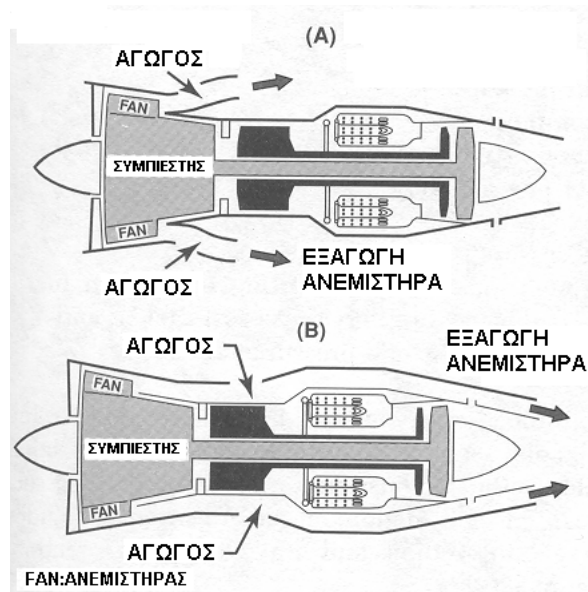
Η έξοδος του αέρα παράκαμψης πραγματοποιείται από **ειδικό αγωγό (duct)** που βρίσκεται περιφερειακά του κύριου σώματος του κινητήρα. Το μήκος του αγωγού είναι μικρό – συνήθως στην περίπτωση χρήσης ανεμιστήρα μεγάλης διαμέτρου ή μεγάλο - ο αγωγός εκτείνεται σε όλο το μήκος του κινητήρα<sup>1</sup> – κατά περίπτωση (Σχήμα 2.26).

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 στροβίλους.



Σχήμα 2.25 Στροβιλοανεμιστήρας (α) υψηλού και (β) χαμηλού λόγου παράκαμψης

<sup>1</sup> Στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνεται μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης και του θορύβου του κινητήρα.



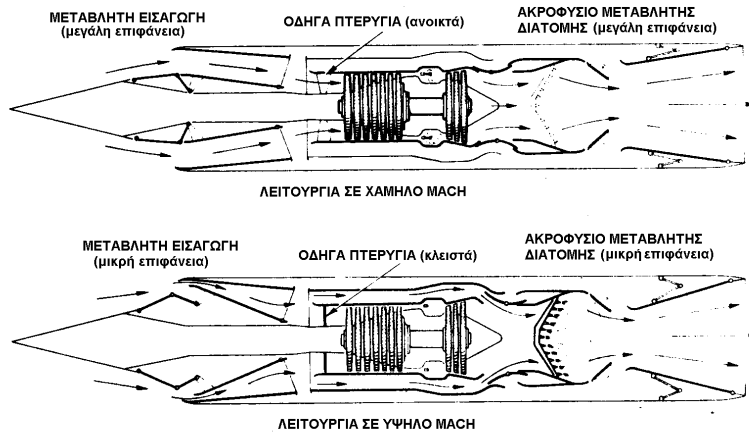
Σχήμα 2.26 Έξοδος αέρα παράκαμψης από αγωγό (Α) μικρού και (Β) μεγάλου μήκους

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

#### 2.1.5.5 Στροβιλο-αθόδυλος (turboramjet)

Αποτελεί συνδυασμό του στροβιλοαντιδραστήρα και του αθόδουλου. Ο κινητήρας διαθέτει αγωγό μεταβλητού ανοίγματος εισαγωγής, μετακαυστήρα<sup>1</sup> και ακροφύσιο μεταβλητής διατομής, εκτός από τη διάταξη του στροβιλοαντιδραστήρα (Σχήμα 2.27). 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.

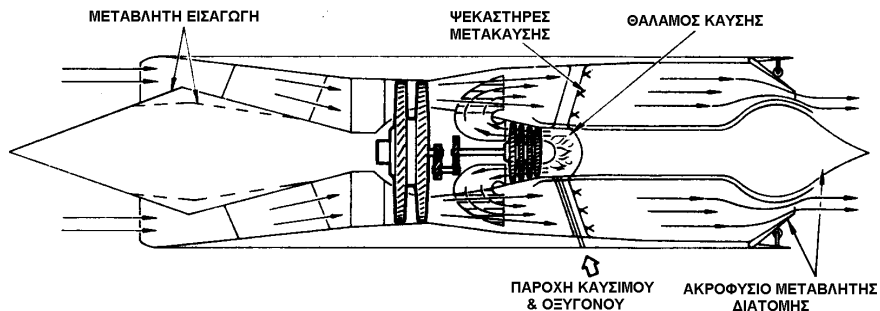
<sup>1</sup> Η μετάκαυση πραγματοποιείται με την έγχυση καυσίμου στο χώρο μεταξύ στροβίλου και εξαγωγής, το οποίο καίγεται μετά την ανάμειξή του με τα καυσαέρια. Χρησιμοποιείται για την αύξηση της ώσης.



Σχήμα 2.27 Ο στροβιλο-αθόδυλος

### 2.1.5.6 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 2.28). 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 2.28 Ο πυραυλο-στρόβιλος

### 2.1.6 Σύγκριση μεταξύ των ειδών και των τύπων των κινητήρων

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

**2.1.6.1 Παλινδρομικοί κινητήρες και κινητήρες αερίωσης**

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

- ο **μικρότερος όγκος** και το **μικρότερο βάρος** του,
- η περιστροφική λειτουργία του, που **μειώνει τις απώλειες από τριβές** και την **πιθανότητα εμφάνισης κραδασμών**,
- η **απλούστερη κατασκευή** και οι πιο εύκολες διαδικασίες **συντήρησης** και **ελέγχων**, και
- η δυνατότητα επίτευξης **διηχητικών** και **υπερηχητικών πτήσεων**.

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

Ως **μειονεκτήματα** των αεριοστρόβιλων κινητήρων θεωρούνται η **αυξημένη ειδική κατανάλωση καυσίμου** σε σχέση με τους παλινδρομικούς κινητήρες. Βέβαια, η λειτουργία των στροβιλοελικοφόρων κινητήρων, με τις αρκετά μειωμένες τιμές ειδικής κατανάλωσης, έχει επιφέρει κάποια ισορροπία στο ζήτημα αυτό. Επίσης, οι αεριοστρόβιλοι κινητήρες παρουσιάζουν **μεγάλο κόστος κατασκευής**, ενώ αυξημένος θεωρείται και ο κίνδυνος της ανεπανόρθωτης ζημίας σε ζωτικά μέρη τους λόγω αναρρόφησης ξένων σωμάτων (**Foreign Object Damage, FOD**) κατά τη λειτουργία τους.

**2.1.6.2 Σύγκριση αεριοστρόβιλων με αθόδουλους και πυραύλους**

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

Ειδικότερα, ο αθόδυλος σε ταχύτητας έως Mach 2,6 περίπου παρουσιάζει χειρότερη απόδοση από τον αεριοστρόβιλο. Επίσης, δεν είναι σε θέση να

εκκινήσει από μηδενική ταχύτητα αλλά χρειάζεται τη συνδρομή άλλου μέσου. Βέβαια, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της απλότητας στην κατασκευή και του μικρού βάρους ανά μονάδα παραγόμενης ώσης.

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

### 2.1.7 Χρήσεις των κινητήρων αεριώθησης

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

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

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

Πολύ διαδεδομένη, επίσης, είναι **η χρήση αεριοστροβίλων για την κίνηση ελικοπτέρων**. Απαιτείται, βέβαια, ένα πολύπλοκο σύστημα μετάδοσης της κίνησης και υποπολλαπλασιασμού των στροφών του κινητήρα για την κανονική λειτουργία του έλικα.

Μία άλλη συνήθης **χρήση των αεριοστροβίλων** είναι ως **βοηθητική πηγή ενέργειας (APU)**, κατά την παραμονή του αεροσκάφους στο έδαφος, ή σε περίπτωση ανάγκης. Χρησιμοποιούν καύσιμο από τις δεξαμενές του



αεροσκάφους και παρέχουν ενέργεια για το σύστημα κλιματισμού και, γενικά, ηλεκτρική ενέργεια για οποιαδήποτε χρήση.

Τέλος, **αεριοστρόβιλοι ανύψωσης** χρησιμοποιούνται στα **αεροσκάφη κάθετης απογείωσης και προσγείωσης**.

### **2.1.8 Σχεδίαση, κατασκευή, υλικά κατασκευής**

Η σχεδίαση – μελέτη και κατασκευή ενός κινητήρα αερίωσης είναι χρονοβόρα. Με την προσθήκη της κατασκευής και της δοκιμής του πρότυπου κινητήρα, ο συνολικός χρόνος ανάπτυξης του ως προϊόν μπορεί να φτάσει τα δέκα χρόνια. Ας ληφθεί, επίσης, υπόψη ότι ακόμη και μετά τη έναρξη της λειτουργίας του νέου κινητήρα στο αεροσκάφος, οι επιδόσεις και, γενικά, η λειτουργία του παρακολουθούνται. Με τον τρόπο αυτόν, εξασφαλίζεται ο εντοπισμός και η βελτίωση πιθανών αδύνατων λειτουργικών χαρακτηριστικών. Σε αυτήν τη διαδικασία, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει το γεγονός ότι η σχεδίαση του νέου κινητήρα έχει βασιστεί σε πολύ μεγάλο βαθμό σε προγενέστερο κινητήρα (ίδια οικογένεια κινητήρων, όπως συνηθίζεται να λέγεται). Οι κινητήρες της ίδιας οικογένειας έχουν την ίδια βασική σχεδίαση, οπότε και οι τεχνικοί υπεύθυνοι γνωρίζουν σε ποιους λειτουργικούς παράγοντες πρέπει να δώσουν ιδιαίτερη προσοχή κατά την αρχικό στάδιο λειτουργίας του κινητήρα ως έτοιμου προϊόντος.

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

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

Κάθε ένα από τα τμήματα του κινητήρα ελέγχεται, μετά την κατασκευή του, ξεχωριστά και, στη συνέχεια, ως μέρος του κινητήρα. Οι δοκιμές επί του εδάφους πραγματοποιούνται σε **δοκιμαστήρια (test cells)**. Αυτά διαθέτουν τον απαραίτητο εξοπλισμό για τη λειτουργία του κινητήρα σε συνθήκες όμοιες με αυτές που επικρατούν κατά τη διάρκεια της πτήσης ενός

αεροσκάφους. Εκεί, πραγματοποιούνται οι μετρήσεις όλων των λειτουργικών μεγεθών που κρίνονται απαραίτητα για την καλή λειτουργία του κινητήρα στο αεροσκάφος. Η δοκιμή του κινητήρα επί του αεροσκάφους ακολουθεί τον επιτυχή έλεγχο στο δοκιμαστήριο. Σε κάθε δοκιμή καταγράφονται όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και οι τυχόν παρατηρήσεις, σε ειδικό βιβλίο για κάθε έναν κινητήρα ξεχωριστά.

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

Οι συνεχώς βελτιωμένες τεχνικές σχεδίασης και κατασκευής των κινητήρων αεριώθησης, καθώς και η χρήση όλο και πιο ανθεκτικών υλικών σε αυτούς, διευρύνει τις προοπτικές της χρήσης τους. Οι προσπάθειες εστιάζονται σε τομείς όπως:

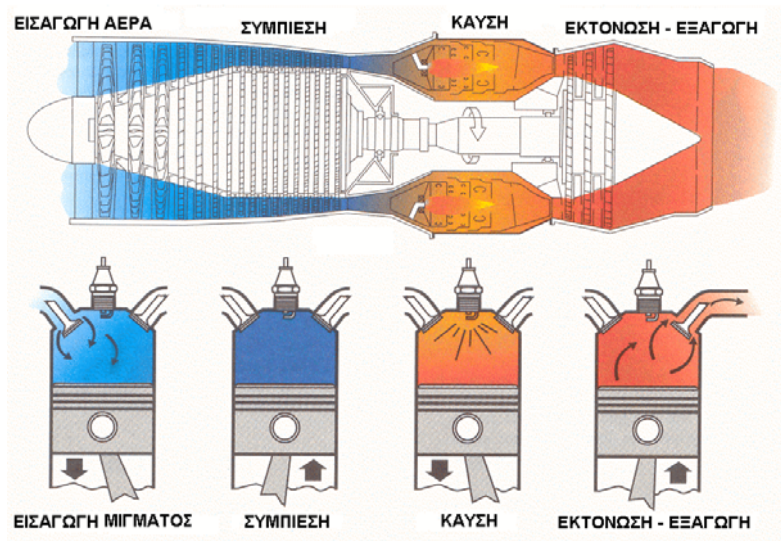
- η βελτίωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και του λόγου παραγόμενης ώσης προς βάρος,
- η αύξηση της παραγόμενης ώσης, του λόγου συμπίεσης και της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης (με παράλληλη χρήση πιο ανθεκτικών υλικών κατασκευής του θαλάμου καύσης και του στροβίλου),
- η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

**2.2 Κύκλος λειτουργίας αεριοστρόβιλον**

**2.2.1 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 2.29.



**Σχήμα 2.29 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<sup>1</sup>.

### 2.2.2 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:

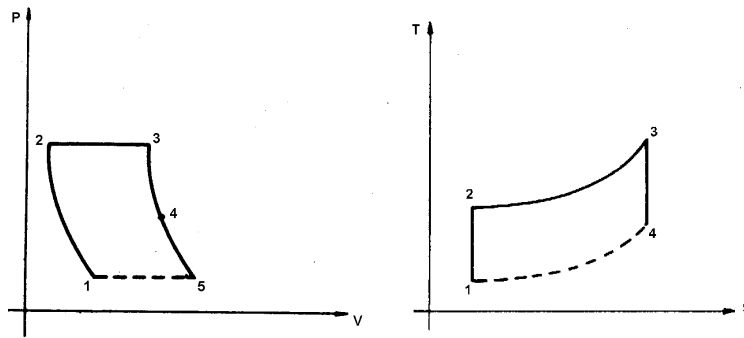
- Οι διαδικασίες συμπίεσης και εκτόνωσης είναι αντιστρεπτές και αδιαβατικές, δηλαδή ισεντροπικές.
- Η μεταβολή της κινητικής ενέργειας του εργαζόμενου μέσου μεταξύ εισόδου και εξόδου από κάθε συνιστώσα του κύκλου είναι αμελητέα.
- Σε κανένα σημείο του κύκλου δεν εμφανίζονται απώλειες πίεσης.
- Το εργαζόμενο 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 2.30), ας εξετάσουμε με περισσότερη λεπτομέρεια τις φάσεις του θεωρητικού κύκλου λειτουργίας του (όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.31).



Σχήμα 2.30 Τα μέρη του αεριοστρόβιλου κινητήρα

<sup>1</sup> Η συνεχής παραγωγή ισχύος έχει το μειονέκτημα της μεγάλης κατανάλωσης καυσίμου.



**Σχήμα 2.31 Το διάγραμμα του κύκλου Μπράιτον σε συντεταγμένες  $p-v$  και  $T-s$**

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

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι βασική διαφορά μεταξύ του αεριοστρόβιλου και του εμβολοφόρου κινητήρα είναι ότι στον πρώτο, η καύση πραγματοποιείται υπό σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) πίεση. Αντίθετα, στον τετράχρονο εμβολοφόρο βενζινοκινητήρα η διεργασία της καύσης είναι ισόχωρη και οι

πολύ υψηλές πιέσεις που αναπτύσσονται, βοηθούν στην επίτευξη μεγάλης ποσότητας έργου από συγκεκριμένη ποσότητα καυσίμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή θερμική απόδοση του εμβολοφόρου κινητήρα.

Οι πιέσεις λειτουργίας του αεριοστρόβιλου είναι σχετικά χαμηλές οπότε κατασκευάζονται θάλαμοι καύσης χαμηλού βάρους και χρησιμοποιούνται καύσιμα με χαμηλό βαθμό οκτανίων. Όμως, η θερμική απόδοση του αεριοστρόβιλου περιορίζεται από την ικανότητα του συμπιεστή να αναπτύξει υψηλό λόγο συμπίεσης χωρίς παράλληλη υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα. Η επιφάνεια που σχηματίζεται από τον κύκλο του διαγράμματος (1-2-3-4-5-1, Σχήμα 2.31) παριστάνει το ωφέλιμο έργο που παράγεται από τον αεριοστρόβιλο κινητήρα. Η οποιαδήποτε αύξηση της επιφάνειας αυτής υποδηλώνει και τη διαθεσιμότητα μεγαλύτερου ποσού ενέργειας προς παραγωγή έργου, και συνακόλουθα ώσης. Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία του αεριοστρόβιλου απαιτούν τη χρήση ειδικών υλικών κατασκευής στο θερμό τμήμα του κινητήρα.

Συγκρίνοντας τους κύκλους λειτουργίας του αεροπορικού αεριοστρόβιλου και του αεριοστρόβιλου αξονικής ισχύος παρατηρούμε ότι, στον πρώτο, ένα μέρος ή το σύνολο της αποδιδόμενης ισχύος παράγεται ως αποτέλεσμα εκτόνωσης σε ακροφύσιο πρόωσης (Σχήμα 2.31, γραμμή 4-5). Επίσης, στον υπολογισμό της απόδοσης του αεροπορικού αεριοστρόβιλου πρέπει να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της ταχύτητας του αεροσκάφους καθώς και το ύψος πτήσης.

### 2.2.3 Κριτήρια λειτουργικής απόδοσης

Θεωρώντας ότι η ποσότητα του καυσίμου στη σύνθεση των καυσαερίων είναι αμελητέα και συμβολίζοντας ως: **m** τη παροχή της μάζας αέρα, **V<sub>a</sub>** την ταχύτητα του αεροσκάφους, **V<sub>j</sub>** 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<sub>j</sub>**) κατά την έξοδό τους από το ακροφύσιο εξαγωγής είναι μεγαλύτερη από την πίεση του ρεύματος αέρα στην εισαγωγή (**P<sub>a</sub>**), τότε θα υπάρξει επιπρόσθετη ώση πίεσης στην επιφάνεια εξόδου των καυσαερίων (**A<sub>j</sub>**). Η ολική ώση, λοιπόν, θα είναι ίση με το άθροισμα της ώσης ορμής και της ώσης πίεσης:

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

Στη 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**)  $n_p$  ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος ώσης προς το άθροισμα της ισχύος ώσης και της μη χρησιμοποιηθείσας κινητικής ενέργειας των 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 παροχτευτόμενο καύσιμο. Ισχύει:

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

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):

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

Η παραπάνω σχέση ισχύει για δεδομένο καύσιμο.

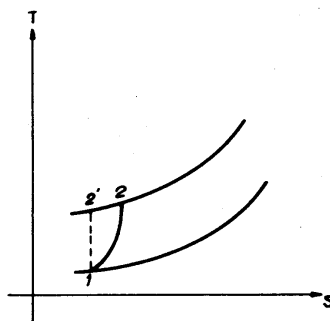
### 2.2.4 Πραγματικός κύκλος λειτουργίας

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

- Τα παρελκόμενα συστήματα του κινητήρα (αντλία ελαίου, αντλία καυσίμου, γεννήτρια ρεύματος κ.λ.π.) λαμβάνουν για τη λειτουργία τους ένα ποσοστό από την ενέργεια που παράγεται στο στρόβιλο.
- Η συμπίεση του εισερχόμενου ρεύματος αέρα στο συμπιεστή καθώς και η εκτόνωση των καυσαερίων στο στρόβιλο δεν αποτελούν αδιαβατικές διαδικασίες. Υπάρχουν πάντα απώλειες θερμότητας.
- Η διαδικασία της καύσης δεν είναι ισοβαρής. Η πίεση ελαττώνεται λόγω των αντιστάσεων στη ροή των καυσαερίων στο θάλαμο καύσης.
- Η ενέργεια που υπολογίζεται θεωρητικά για την κίνηση του συμπιεστή από το στρόβιλο, είναι μικρότερη από αυτήν που απαιτείται πραγματικά.

Πριν παρουσιάσουμε τη μορφή του πραγματικού κύκλου λειτουργίας, ας εξετάσουμε τις μορφές απώλειας ενέργειας που αναφέραμε παραπάνω.

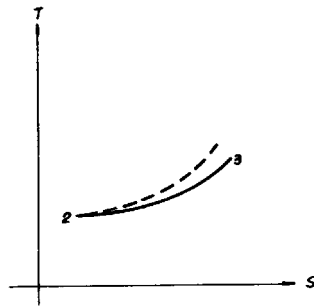
- **Απώλειες στο συμπιεστή:** η ενέργεια που μεταφέρεται από το στρόβιλο στο συμπιεστή, διαμέσου του κοινού τους άξονα, μετατρέπεται σε μεγάλο μέρος της, σε θερμότητα λόγω τριβών. Η θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα - Σημείο 2, έτσι, είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται θεωρητικά - Σημείο 2' (Σχήμα 2.32). Η απώλεια αυτή της ενέργειας υπολογίζεται από το βαθμό απόδοσης συμπίεσης. Αυτός ισούται με το λόγο του θεωρητικού έργου συμπίεσης προς το πραγματικό έργο συμπίεσης. Οι τιμές που λαμβάνει ο λόγος απόδοσης συμπίεσης κυμαίνονται από 0.80 έως 0.85.



Σχήμα 2.32 Απώλειες συμπιεστή στο διάγραμμα Μπράιτον



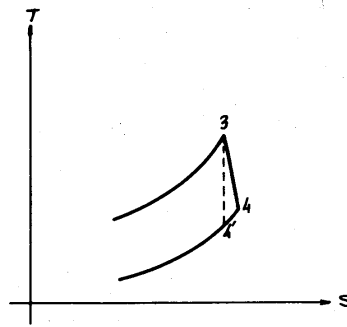
- **Απώλειες στο θάλαμο καύσης:** κατά μήκος του θαλάμου καύσης παρουσιάζεται πτώση της πίεσης των καυσαερίων της τάξης του 10% (Σχήμα 2.33, γραμμή 2-3). Η πτώση αυτή οφείλεται στις διατάξεις που τοποθετούνται στο θάλαμο καύσης ώστε να επιτύχουν το βέλτιστο βαθμό ανάμιξης του εισερχόμενου αέρα με το καύσιμο.



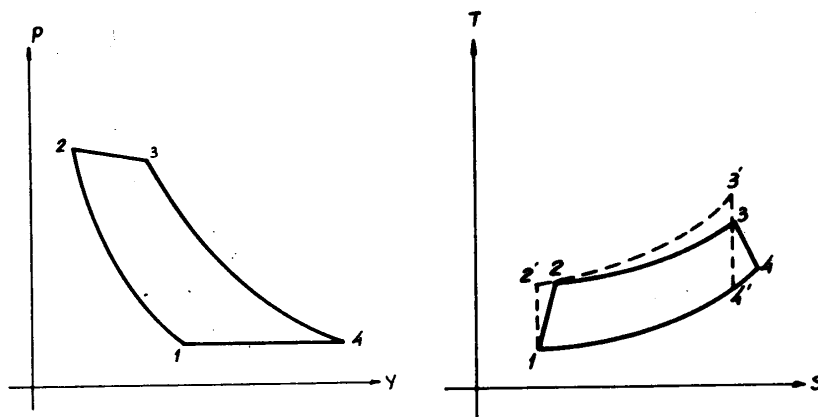
**Σχήμα 2.33 Οι απώλειες στο θάλαμο καύσης όπως φαίνονται στο διάγραμμα Μπράιτον**

- **Απώλειες κατά την εκτόνωση:** λόγω των τριβών που αναπτύσσονται κατά την εκτόνωση των καυσαερίων στο στρόβιλο και το ακροφύσιο εξαγωγής, το παραγόμενο από αυτά έργο είναι μικρότερο από το θεωρητικό. Η θερμοκρασία μετά την εκτόνωση - Σημείο 4, λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές από τη θεωρητική - Σημείο 4' (Σχήμα 2.34). 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 2.35 (τα τονούμενα σημεία αντιστοιχούν στη θεωρητική λειτουργία), αν συνυπολογίσουμε τις προαναφερόμενες απώλειες και τις αλλαγές που επιφέρουν στο θεωρητικό κύκλο λειτουργίας.



Σχήμα 2.34 Απώλειες κατά την εκτόνωση



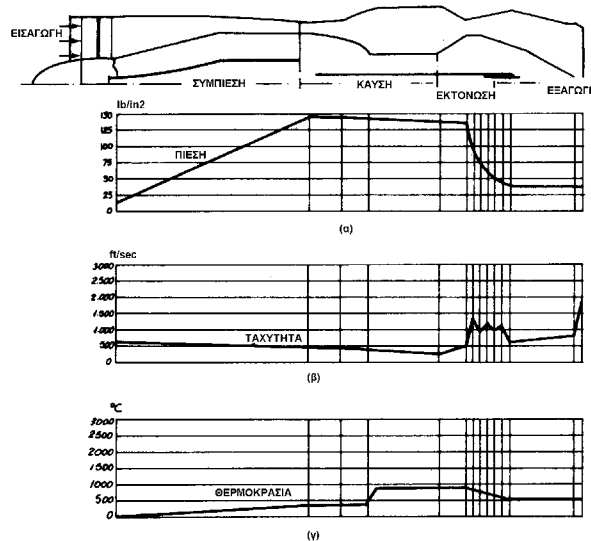
Σχήμα 2.35 Το διάγραμμα πραγματικής λειτουργίας του κύκλου Μπράιτον σε συντεταγμένες  $p-v$  και  $T-s$

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<sup>1</sup>. Εκεί, εγχύεται το καύσιμο από κατάλληλους εγχυτήρες σε υψηλή πίεση. Δημιουργείται το καύσιμο μείγμα και αναφλέγεται, αρχικά (κατά την εκκίνηση) μέσω σπινθήρα και στη συνέχεια, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν εκεί. Η θερμοκρασία της καύσης ανέρχεται έως τους  $1.800^{\circ}\text{C}$ . Στη συνέχεια, όμως, περίσσεια αέρα αναμιγνύεται με τα καυσαέρια και η θερμοκρασία μειώνεται στους  $1.000^{\circ}\text{C}$  περίπου. Μετά την έξοδό τους από το θάλαμο καύσης, τα καυσαέρια συναντούν το στρόβιλο. Εκεί, αποδίδεται μέρος της ενέργειάς τους για την κίνηση του συμπιεστή (ή

<sup>1</sup> Η ποσότητά του αέρα είναι, γενικά, τέσσερις φορές περίπου μεγαλύτερη από αυτήν που απαιτείται για τη διεργασία της καύσης.

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 mph.

Στο Σχήμα 2.36 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 2.36 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 HP, περίπου.

Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε κάθε τμήμα ενός αεριοστρόβιλου κινητήρα. Θεωρείστε το Σχήμα 2.18 ως αναφορά.

## **2.3 Εισαγωγή αέρα**

### **2.3.1 Γενικά**

Η εισαγωγή του αέρα, που πραγματοποιείται από ειδικό αεραγωγό εισαγωγής (air inlet duct), ουσιαστικά αποτελεί τμήμα του αεροσκάφους και όχι του κινητήρα. Καθώς, όμως, η παροχή του αέρα είναι πολύ σημαντική για τη λειτουργία του 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 πίεση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ανάκτηση πίεσης (ram recovery)**. Για το λόγο αυτό, η διατομή του αεραγωγού αυξάνεται κατά μήκος του τμήματος αυτού.

Το σχήμα και η θέση του αεραγωγού εισαγωγής εξαρτάται από τον τύπο του αεροσκάφους (σχήμα, αριθμός κινητήρα κ.λ.π.). 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)**.

### 2.3.2 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 2.37).



**Σχήμα 2.37 Το τμήμα εισαγωγής αέρα θεωρείται μέρος του κινητήρα όταν αυτός τοποθετείται στα πτερύγια του αεροσκάφους**

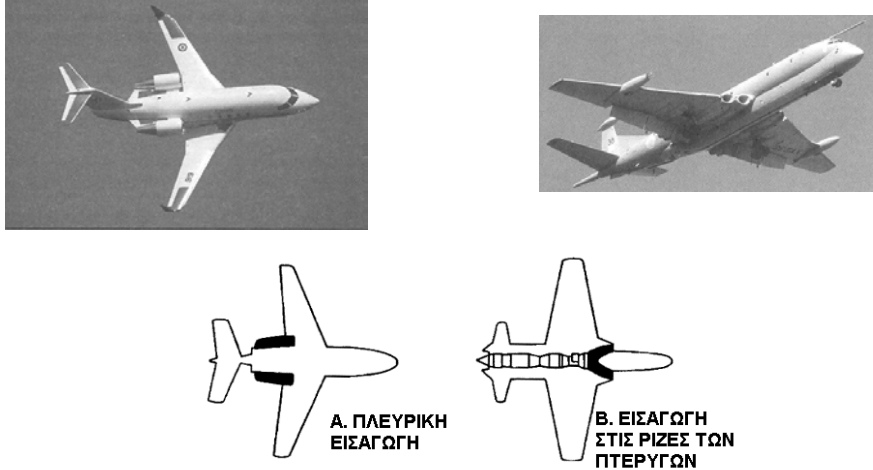
Στα μαχητικά αεροσκάφη, συνήθως ο κινητήρας τοποθετείται μέσα στην άτρακτο, με ανάλογη διαμόρφωση του αεραγωγού εισαγωγής (Σχήμα 2.38). Γενικότερα, οι αεραγωγοί εισαγωγής για τους αεριοστρόβιλους κινητήρες διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Αεραγωγός ως τμήμα της ατράκτου** του αεροσκάφους, στον ίδιο άξονα με το κινητήρα (Σχήμα 2.38).



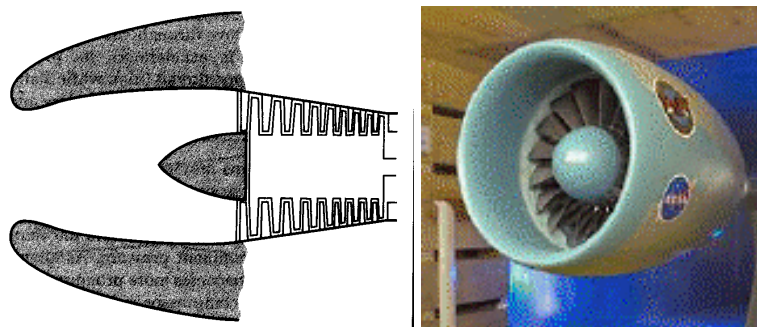
**Σχήμα 2.38 Αεραγωγός εισαγωγής στην άτρακτο του αεροσκάφους**

- **Διαιρετή εισαγωγή.** Αποτελείται από δύο εισαγωγές στα πλευρά της ατράκτου ή στις ρίζες των πτερύγων που ενώνονται σε κοινή εισαγωγή στην περίπτωση μονοκινητήριου αεροσκάφους (Σχήμα 2.39).



Σχήμα 2.39 Διαιρετή εισαγωγή

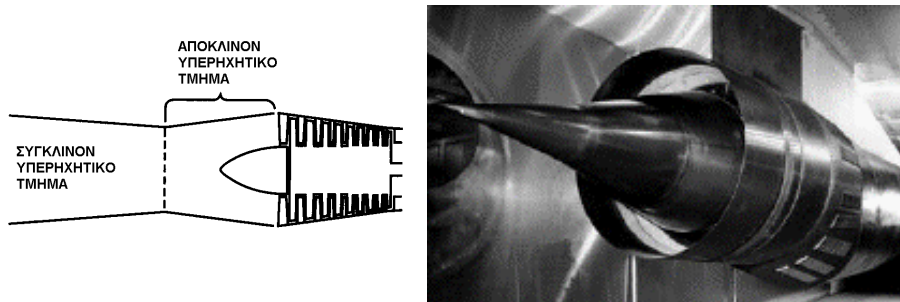
- **Υποηχητική εισαγωγή.** Χρησιμοποιείται σε κινητήρες που κινούν αεροσκάφη υψηλών υποηχητικών ταχυτήτων. Η διάμετρος του αεραγωγού αυξάνεται καθώς αυξάνεται το μήκος του, δίνοντάς του τη μορφή διαχύτη (Σχήμα 2.40). Η μορφή αυτή βοηθά τον αεραγωγό να λειτουργεί ως σωλήνας Βεντούρι. Η ταχύτητα του αέρα μειώνεται με παράλληλη αύξηση της πίεσης. Γενικά, η ταχύτητα του αέρα ακριβώς πριν το συμπιεστή λαμβάνει τιμές 0,5 Mach περίπου.



Σχήμα 2.40 Υποηχητική εισαγωγή

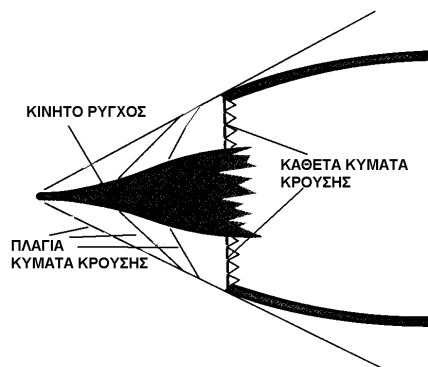
- **Υπερηχητική εισαγωγή.** Ο αεραγωγός σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να έχει τη μορφή συγκλίνοντος – αποκλίνοντος αγωγού (Σχήμα 2.41). Στο συγκλίνον τμήμα, η υπερηχητική ροή του εισερχόμενου αέρα επιβραδύνεται σε διηχητική και στη συνέχεια, το αποκλίνον τμήμα λειτουργεί όπως είδαμε στην προηγούμενη περίπτωση, ως διαχύτης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι αεραγωγοί υπερηχητικών αεροσκαφών φέρουν λαιμό μεταβλητής διατομής, ώστε να έχουν τη δυνατότητα να

λειτουργούν αποδοτικά σε διαφορετικές συνθήκες ταχύτητας του αεροσκάφους. Σε άλλες περιπτώσεις, η γεωμετρία της εισαγωγής είναι τέτοια, ώστε να δημιουργούνται διαδοχικά πλάγια κύματα κρούσης, πριν από την είσοδο του αέρα στον αγωγό εισαγωγής (Σχήμα 2.42). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται εξωτερική συμπίεση της ροής, λόγω της ανάπτυξης πλαγίων κυμάτων κρούσης.



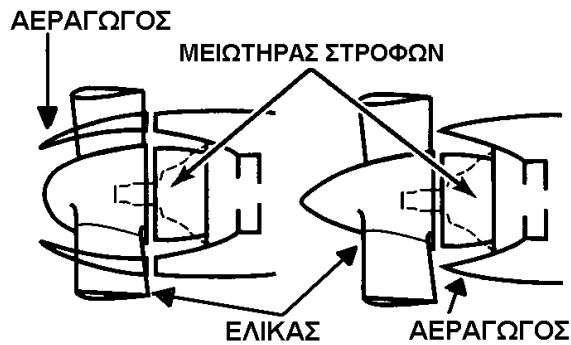
Σχήμα 2.41 Υπερηχητική εισαγωγή

- **Εισαγωγές μεταβλητής διατομής.** Χρησιμοποιούνται όπως είδαμε παραπάνω σε υπερηχητικά αεροσκάφη (Σχήμα 2.42). Υπάρχουν και υποηχητικές εφαρμογές.



Σχήμα 2.42 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 2.43.



Σχήμα 2.43 Μορφές αεραγωγών ελικοστρόβιλων κινητήρων

### 2.3.3 Φίλτρα κατακράτησης σωματιδίων

Για την προσπάθεια αποφυγής της αναρρόφησης ξένων σωμάτων από τον κινητήρα, χρησιμοποιούνται φίλτρα στην είσοδο του αεραγωγού εισαγωγής. Η χρήση τους αφορά κατά κύριο λόγο κινητήρες ελικοπτέρων.

Όμως, τα φίλτρα αυτά επιφέρουν πρόσθετο βάρος στον κινητήρα, αυξάνουν τις απώλειες πίεσης στην εισαγωγή του αέρα, είναι ιδιαίτερα ευπαθή σε παγοποίηση και, όταν φθαρούν, υπάρχει πιθανότητα να αποτελέσουν τα ίδια ένα ξένο σώμα που ίσως αναρροφηθεί από τον κινητήρα. Για τους λόγους αυτούς τα φίλτρα χρησιμοποιούνται μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (απογείωση, προσγείωση, πτήση σε περιοχές με σμήνη πουλιών).

### 2.3.4 Συστήματα αντί- και από-πάγωσης εισαγωγής αέρα

Στην περίπτωση πτήσης σε συνθήκες δημιουργίας παγετού, εγκυμονεί ο κίνδυνος εμφάνισης πάγου τόσο στον αεραγωγό εισαγωγής όσο και στα οδηγία πτερύγια. Το φαινόμενο αυτό επιφέρει ανωμαλία στη ροή του αέρα κατά την διόδό του στον αεραγωγό και, τελικά, στο βαθμό απόδοσης του κινητήρα. Επιπρόσθετα, υπάρχει η πιθανότητα μεγάλα κομμάτια πάγου να εισέλθουν στον κινητήρα και να προκαλέσουν ζημίες στα πτερύγια του συμπιεστή. Για την αποφυγή αυτών των φαινομένων, οι αεραγωγοί εισαγωγής είναι εφοδιασμένοι με συστήματα προστασίας από την παγοποίηση. Τονίζεται ότι η χρήση τέτοιων συστημάτων αποσκοπεί στην αποφυγή σχηματισμού πάγου (**αντιπαγωτικό σύστημα – anti-icing**) και όχι στην αντιμετώπισή του όταν αυτός έχει ήδη σχηματιστεί. Ένα τέτοιο σύστημα, που εφαρμόζεται πολύ συχνά, χρησιμοποιεί ποσότητα αέρα από το συμπιεστή με τη βοήθεια της **βαλβίδας αποτόνωσης ή αποφόρτωσης του συμπιεστή (bleed valve)**. Όταν αυτή ενεργοποιηθεί, ποσότητα θερμού αέρα από το συμπιεστή οδηγείται σε διάφορα σημεία του αεραγωγού εισαγωγής, εμποδίζοντας με τον τρόπο αυτό το σχηματισμό πάγου. Το μειονέκτημα της

μεθόδου είναι ότι κατά τη χρονική διάρκεια της λειτουργίας της παραπάνω βαλβίδας η απόδοση του κινητήρα μειώνεται<sup>1</sup>.

Όταν στον αεραγωγό εισαγωγής υπάρχουν οδηγία πτερύγια, αυτά έχουν εσωτερικές διόδους για την κυκλοφορία θερμού αέρα ή λαδιού ως προστασία έναντι σχηματισμού πάγου.

Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται επίσης συστήματα **αποπάγωσης (de-icing)**. Αυτά δεν επηρεάζουν την απόδοση του κινητήρα. Αποπάγωση μπορεί να επιτευχθεί μέσω ηλεκτρικού συστήματος, αλλά και με την κυκλοφορία λαδιού λίπανσης. Χαρακτηριστική περίπτωση χρήσης ηλεκτρικού ρεύματος για αποπάγωση, είναι η τοποθέτηση θερμαντικών στοιχείων – αντιστάσεων σε επιλεγμένα μέρη του αεραγωγού εισαγωγής ή στα χείλη προσβολής του έλικα (**de-icer boots**).

## 2.4 Συμπιεστές

### 2.4.1 Γενικά

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

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

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

<sup>1</sup> Σημειώνεται άνοδος της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από το στρόβιλο καθώς και διαφοροποίηση των τιμών της κατανάλωσης καυσίμου και του λόγου συμπίεσης.



- 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.

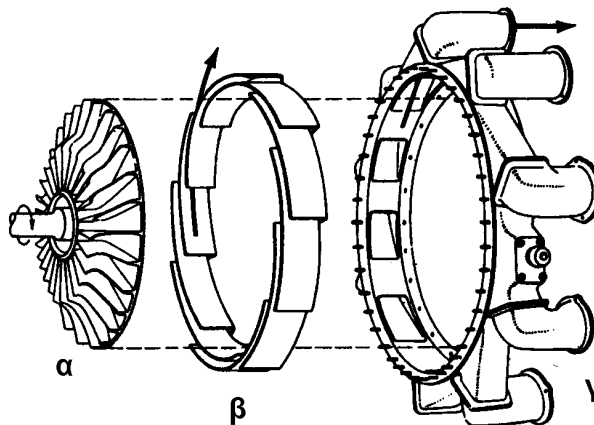
Οι τύποι των συμπιεστών που χρησιμοποιούνται στους αεριοστροβίλους κινητήρες είναι:

- 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.

#### **2.4.2 Φυγοκεντρικοί συμπιεστές**

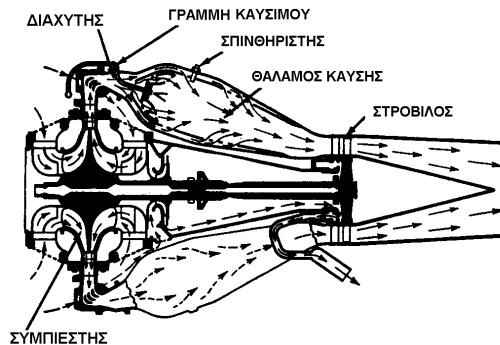
Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής (**centrifugal compressor**), ή συμπιεστής φυγοκεντρικής ροής, χρησιμοποιήθηκε στους πρώτους κινητήρες αεριώθησης. Αποτελείται από τρία μέρη: τον **πτερυγιοφόρο δίσκο** (στροφείο ή ρότορας, **impeller**), το **διαχύτη** (**diffuser**) και, σε ορισμένες περιπτώσεις, την **πολλαπλή σωλήνωση** (**manifold**) εξαγωγής του συμπιεσμένου αέρα στο επόμενο τμήμα του κινητήρα (Σχήμα 2.44).



**Σχήμα 2.44 Τα μέρη του φυγοκεντρικού συμπιεστή: α) το στροφείο, β) ο διαχύτης, γ) η πολλαπλή σωλήνωση εξαγωγής**

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

Ο άξονας που συνδέει το φυγόκεντρικό συμπιεστή με το στρόβιλο, που του παρέχει την κίνηση, εδράζεται σε **τριβείς κύλισης** (σφαιρικούς ή / και κυλινδρικούς). Σε αρκετές περιπτώσεις αποτελείται από δύο τμήματα που ενώνονται με ειδικό σύνδεσμο, κατάλληλο για εύκολη αποσυναρμολόγηση. Στο Σχήμα 2.45 φαίνεται η τομή αεριοστρόβιλου κινητήρα με φυγόκεντρικό συμπιεστή.

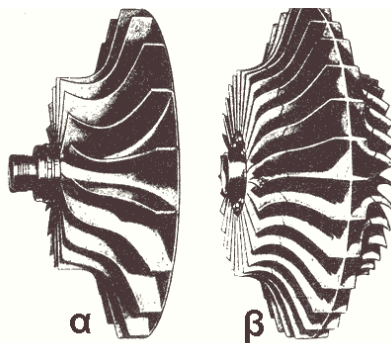


**Σχήμα 2.45 Αεριοστρόβιλος κινητήρα με φυγόκεντρικό συμπιεστή διπλής εισόδου**

Ο φυγόκεντρικός 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 στις δύο πλευρές του (**διπλής εισόδου, double entry**). Στο Σχήμα 2.46 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 μία κλίση προς την κατεύθυνση της περιστροφής.

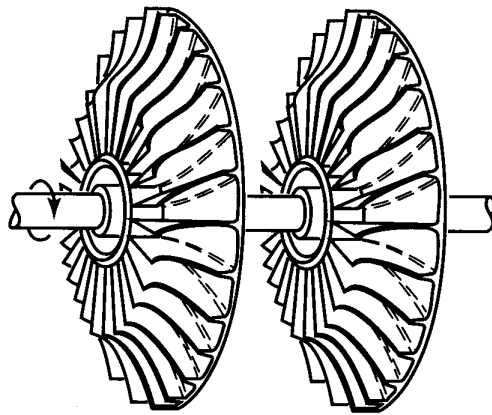


**Σχήμα 2.46 Στροφείο φυγοκεντρικού συμπιεστή (α) απλής και (β) διπλής εισόδου**

Ως υλικό κατασκευής χρησιμοποιείται κράμα αλουμινίου αλλά και τιτάνιο, σε σύγχρονες εφαρμογές. Το τμήμα εισαγωγής μπορεί να είναι και χαλύβδινο<sup>1</sup>. 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 στροφείο 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 στροφείο απλής εισόδου. Σε κάποιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα στροφεία 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 στροφείο στο άλλο, ενώ τίθεται και θέμα αυξημένου βάρους. Πρακτικά, σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται δύο στροφεία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.47 (διβάθμιος φυγοκεντρικός συμπιεστής, ή δύο βαθμίδων).

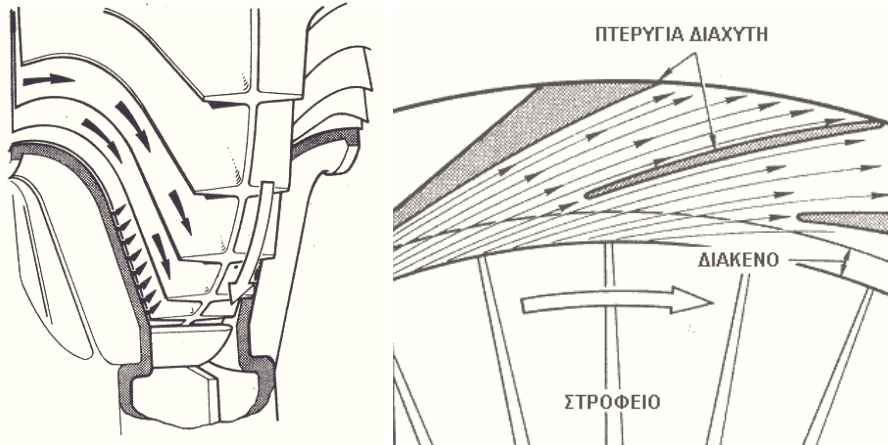
---

<sup>1</sup> Το υλικό κατασκευής του περιβλήματος είναι, συνήθως, κράμα αλουμινίου ή μαγνησίου ενώ η οπίσθια πλευρά είναι από χάλυβα.



Σχήμα 2.47 Φυγοκεντρικός 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 διαχύτων, που ονομάζεται **διάκενο**, είναι πολύ σημαντική για την ομαλή λειτουργία του κινητήρα (Σχήμα 2.48).



Σχήμα 2.48 Το διάκενο μεταξύ του στροφείου και του διαχύτη

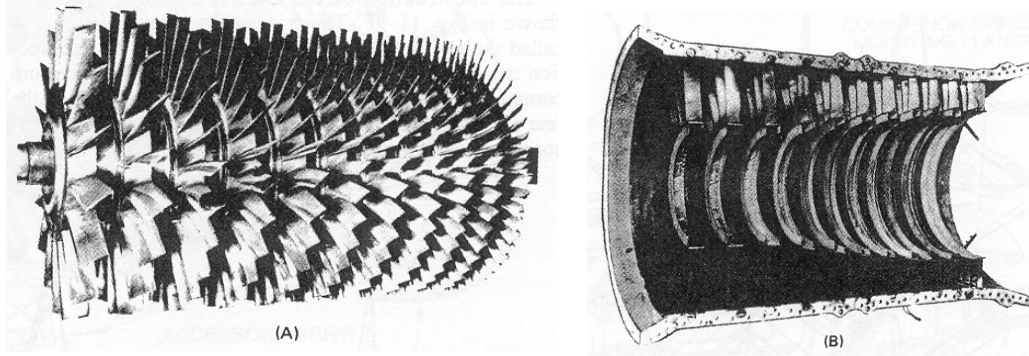
Αν η τιμή του είναι μεγαλύτερη από αυτήν που προβλέπει ο κατασκευαστής, τότε θα υπάρξει υπερβολική **διαρροή (απώλεια) αέρα** από το στροφέιο. Αντίθετα, αν το διάκενο είναι μικρότερο από την φυσιολογική του τιμή, υπάρχει κίνδυνος να δημιουργηθεί **ασταθής ροή και κραδασμοί**. Και αυτό γιατί, καθώς αυξάνεται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

### 2.4.3 Αξονικοί συμπιεστές

#### 2.4.3.1 Γενικά

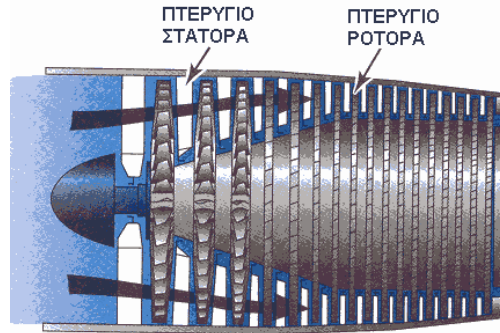
Ο αξονικός συμπιεστής (**axial flow compressor**), ή **συμπιεστής αξονικής ροής**, αποτελείται από δύο βασικά μέρη: ένα περιστρεφόμενο, που ονομάζεται **ρότορας (rotor)**, και ένα σταθερό, που ονομάζεται **στάτορας (stator)**. Ο ρότορας αποτελείται από ένα **στροφείο (spindle)** πάνω στο οποίο είναι προσαρμοσμένα, με κατάλληλο τρόπο, τα **κινητά πτερύγια (blades)**, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.49Α. Ο στάτορας είναι συνήθως διαιρεμένος σε δύο ημικυκλικά τμήματα στην εσωτερική περιφέρεια των οποίων προσαρμόζονται τα **σταθερά πτερύγια (vanes)**, Σχήμα 2.49Β. 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.



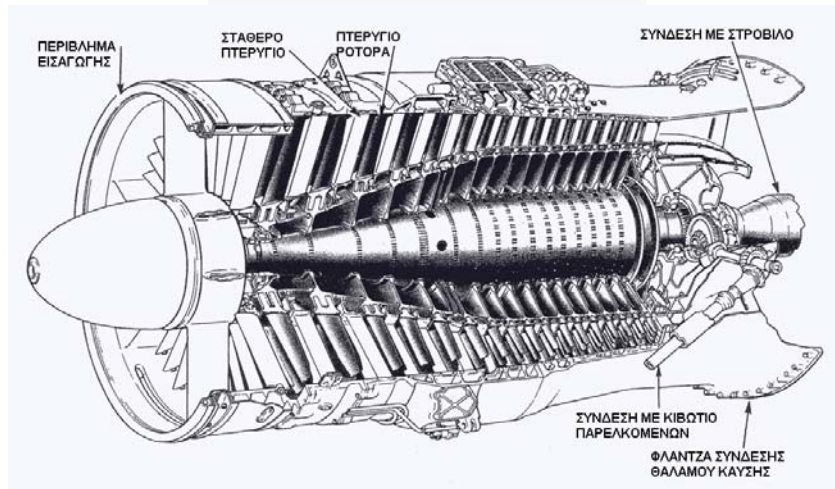
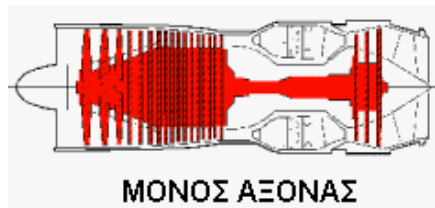
**Σχήμα 2.49 (α) Τα κινητά και (β) τα σταθερά πτερύγια του αξονικού συμπιεστή**

Τα κινητά και τα σταθερά πτερύγια έχουν την αεροδυναμική μορφή της πτέρυγας ή του έλικα ενός αεροσκάφους. Για το λόγο αυτόν, η λειτουργία και η απόδοση τους βασίζεται στα αεροδυναμικές αρχές που διέπουν τις πτέρυγες των αεροσκαφών, με ορισμένες πρόσθετες λειτουργικές συνθήκες, όπως η επίδραση της περιστροφής των άλλων πτερυγίων και η ύπαρξη των σταθερών πτερυγίων. Όπως στις πτέρυγες των αεροσκαφών το παραγόμενο ωφέλιμο μέγεθος είναι η άνωση, στα πτερύγια του αξονικού συμπιεστή είναι η πίεση. Αυτή παράγεται, γενικά, κατά τον ίδιο τρόπο που μία πτέρυγα παράγει άνωση. Από το μπροστινό προς το οπίσθιο τμήμα του συμπιεστή (δηλαδή από το χαμηλή προς την υψηλή πίεση) δημιουργείται μία σταδιακή μείωση της διατομής ανάμεσα στο 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 2.50). Η μείωση της διατομής επιτυγχάνεται με την εφαρμογή κωνικότητας στο περίβλημα ή / και στο στροφείο.



Σχήμα 2.50 Μείωση δακτυλίου ροής κατά μήκος του αξονικού συμπιεστή



Σχήμα 2.51 Μονός αξονικός συμπιεστής (single spool)

Ο αξονικός συμπιεστής **μονού άξονα** ή **απλού τυμπάνου (single spool)** αποτελείται από ένα στροφείο, 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 2.51).

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

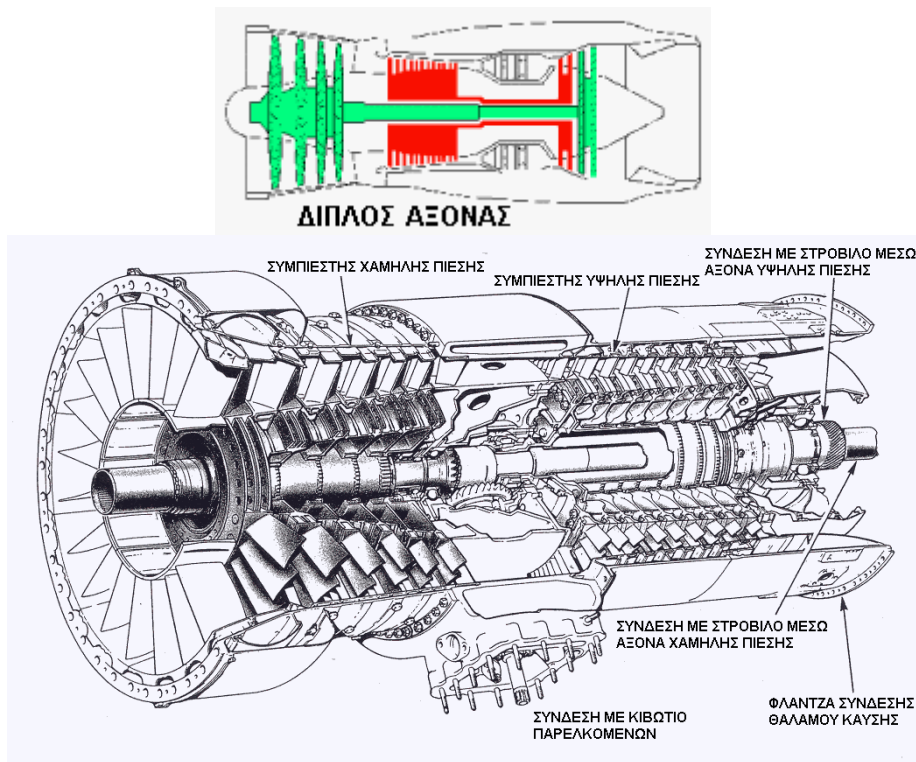
- Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται πολλές βαθμίδες (στο ίδιο στροφέιο), αυτές που βρίσκονται στην περιοχή της αυξημένης πίεσης λειτουργούν με μειωμένη απόδοση, ενώ αυτές που βρίσκονται στις αρχικές θέσεις, συνήθως, υπερφορτίζονται.
- Εξαιτίας της μεγάλης αδρανειακής του μάζας, αντιδρά σχετικά αργά σε απότομες μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας (π.χ. εξαιτίας εντολών του χειριστή).

Ο τρόπος για να ξεπεραστούν τα προβλήματα αυτά ήταν η διαίρεση του συμπιεστή σε δύο ή τρία τμήματα. Σε ανάλογο αριθμό τμημάτων χωρίζεται και ο στρόβιλος. Τα τμήματα του συμπιεστή συνδέονται με τα αντίστοιχα του 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 2.52. Το πρώτο τμήμα ονομάζεται **συμπιεστής χαμηλής πίεσης (low pressure compressor)** ή **συμπιεστής  $N_1$** . 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.

---

<sup>1</sup> Η αρίθμηση των βαθμίδων υπολογίζεται από το εμπρόσθιο προς το οπίσθιο τμήμα του κινητήρα.

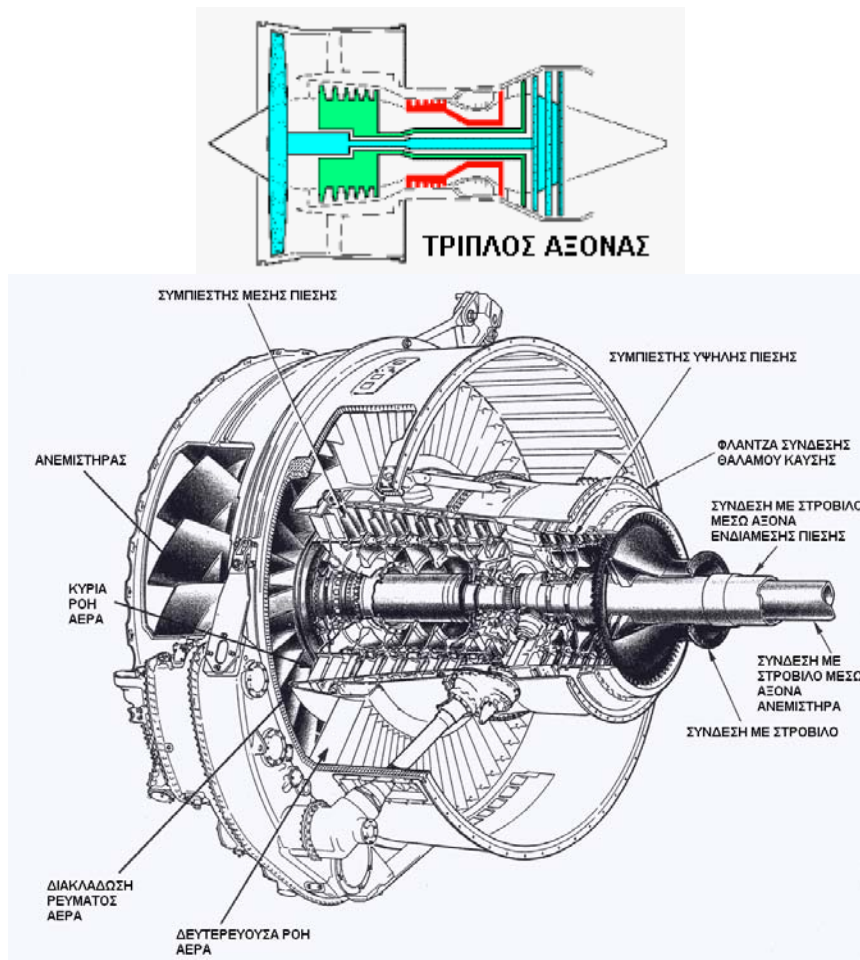


**Σχήμα 2.52 Διπλός αξονικός συμπιεστής (double spool compressor)**

Σε αρκετούς στροβιλοανεμιστήρες κινητήρες ο συμπιεστής διαιρείται σε τρία τμήματα και ονομάζεται **τριπλός (triple-spool compressor, Σχήμα 2.53)**. 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 πολύ **μεγαλύτερη μάζα αέρα** από τους δύο άλλους. Το μεγάλο ποσοστό του αέρα – το **ψυχρό ρεύμα** – παρακάμπτει τους δύο άλλους συμπιεστές και εξέρχεται στην ατμόσφαιρα από ένα **ιδιαίτερο δακτυλιοειδές ακροφύσιο**. Η υπόλοιπη μάζα του αέρα – το **θερμό ρεύμα** – συμπιέζεται από τους άλλους συμπιεστές και οδηγείται στο θάλαμο καύσης.

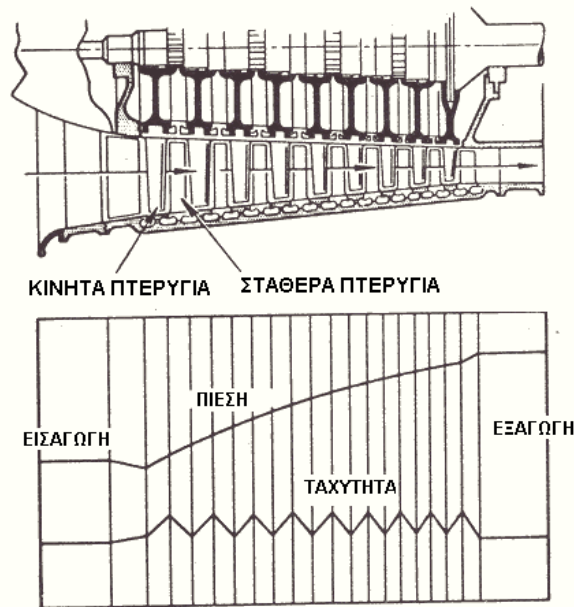




Σχήμα 2.53 Ο τριπλός αξονικός συμπιεστής (triple-shaft compressor)

#### 2.4.3.2 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 2.54. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, παρατηρείται μία σταδιακή αύξηση στη θερμοκρασία του αέρα.



Σχήμα 2.54 Οι μεταβολές των τιμών πίεσης και ταχύτητας κατά μήκος του συμπιεστή

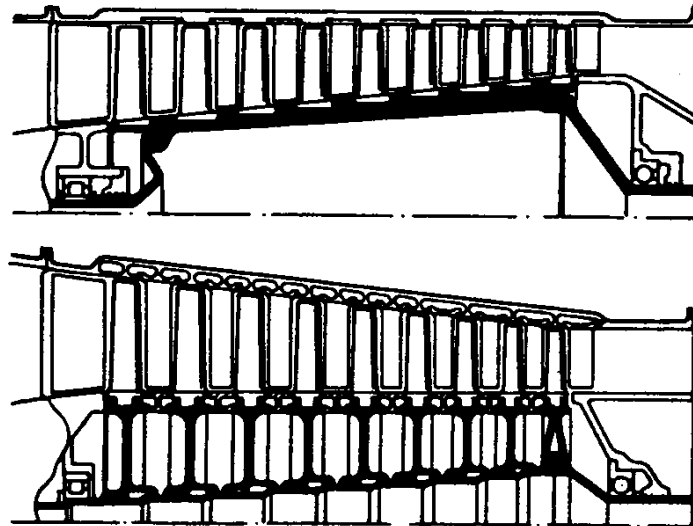
Τα **πλεονεκτήματα** που συγκεντρώνει ο αξονικός συμπιεστής (σε σύγκριση με το φυγοκεντρικό) είναι τα ακόλουθα:

- 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 κατασκευαστικές απαιτήσεις** με αποτέλεσμα η τιμή του να είναι υψηλή.

### 2.4.3.3 Στροφεία

Το στροφείο του αξονικού συμπιεστή είναι **τύμπανο** ή **συναρμογή αριθμού δίσκων**, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.55. Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και συνδυασμός των δύο τύπων.



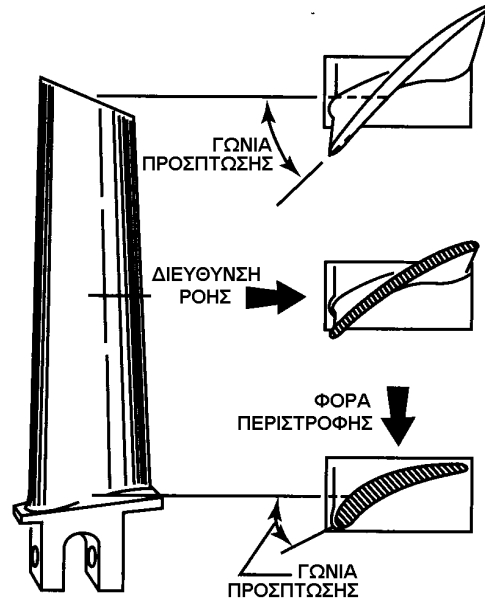
Σχήμα 2.55 Στροφείο αξονικού συμπιεστή (α) σε μορφή τυμπάνου, (β) με κατάλληλη συναρμογή αριθμού δίσκων

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 με το στρόβιλο. Μεταξύ των δίσκων κάθε βαθμίδα τοποθετούνται **δακτύλιοι απόστασης (spacers)**, οι οποίοι παραλαμβάνουν τα **αξονικά φορτία**. Τα **ακτινικά φορτία** παραλαμβάνονται από τους **δίσκους**, οι τελευταίοι από τους οποίους παραλαμβάνουν και τη συνολική ώση.

### 2.4.3.4 Κινητά πτερύγια

Τα κινητά πτερύγια έχουν σχήμα αεροτομής (Σχήμα 2.56) 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 καμπυλότητάς

του<sup>1</sup>. Το μήκος των πτερυγίων μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση που έχουν κατά μήκος του συμπιεστή. Τα μπροστινά είναι μεγαλύτερα (θυμηθείτε τους τρόπους μείωσης του δακτυλίου ροής που εξετάσαμε παραπάνω).

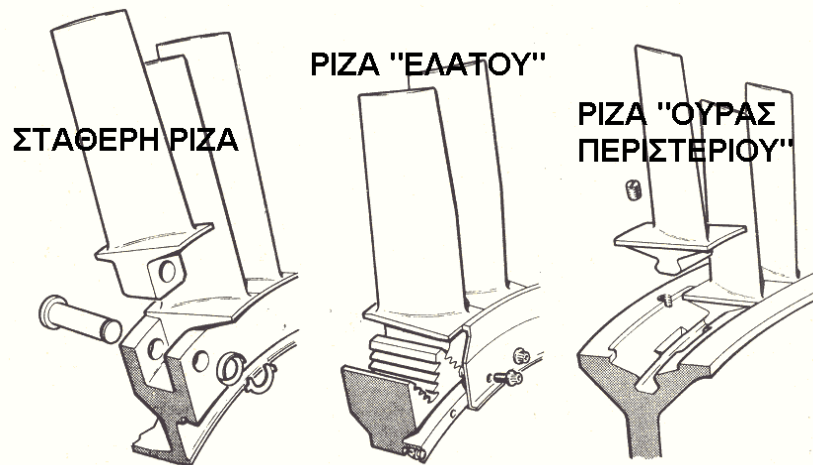


**Σχήμα 2.56 Κινητό πτερύγιο συμπιεστή**

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 «παίζει» 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 στροφείο. Οι πιο συνηθισμένοι φαίνονται στο Σχήμα 2.57:

- **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.

<sup>1</sup> Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση του κινητού πτερυγίου από τον άξονα περιστροφής, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητά του.

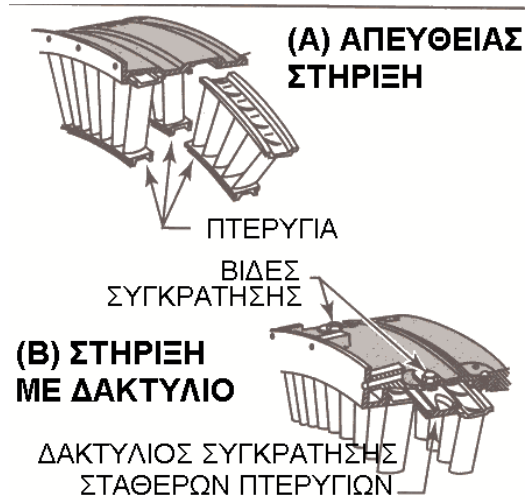


Σχήμα 2.57 Τρόποι συναρμογής κινητών πτερυγίων συμπιεστή στο τύμπανο ή τους δίσκους

#### 2.4.3.5 Σταθερά πτερύγια

Τα 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 2.58β). Σε πολλές περιπτώσεις τα πτερύγια ασφαίζονται και στο ακροπτερύγιο για την αποφυγή των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων.



Σχήμα 2.58 Σταθερά πτερύγια συμπιεστή

#### 2.4.3.6 Υλικά κατασκευής

Γενικά, τα υλικά κατασκευής των τμημάτων του συμπιεστή πρέπει να παρουσιάζουν αντοχή στις υψηλές πιέσεις συμπίεσης και την άνοδο της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά τη συμπίεση. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται και στην αντοχή των υλικών κατασκευής για την αντιμετώπιση της αναρρόφησης ξένου σώματος.

Το περίβλημα του συμπιεστή κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου ή μαγνησίου στο μπροστινό τμήμα του, ενώ για το οπίσθιο χρησιμοποιείται, συνήθως, χάλυβας. Για τα **κινητά** και τα **σταθερά πτερύγια** χρησιμοποιούνται **κράματα αλουμινίου, χάλυβας, νικέλιο ή τιτάνιο**, ανάλογα με τη θέση και τις συνθήκες λειτουργίας τους. Σε κάποιες εφαρμογές, σε χαμηλές θερμοκρασίες συμπίεσης, χρησιμοποιούνται **πτερύγια από συνθετικό υλικό**, οπότε επιτυγχάνεται εξοικονόμηση βάρους.

#### 2.4.3.7 Απόλεια στήριξης - πάλμωση

Οι βαθμίδες των συμπιεστών διακρίνονται μεταξύ τους από τα χαρακτηριστικά ροής τους. Ο αποτελεσματικός συνδυασμός των χαρακτηριστικών αυτών επιτυγχάνει την αποδοτική λειτουργία του συμπιεστή. 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 συμπιεστή, δημιουργούνται οι συνθήκες εμφάνισης των φαινομένων της **πάλμωσης (compressor surge)** και της **απόλεια στήριξης (compressor stall)**. Στην ελληνική βιβλιογραφία, ο όρος «πάλμωση» μπορεί να

συναντηθεί και ως «αστάθεια λειτουργίας» ή και «απώλεια πίεσης» του συμπιεστή 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 συμπιεστή 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 2.59.

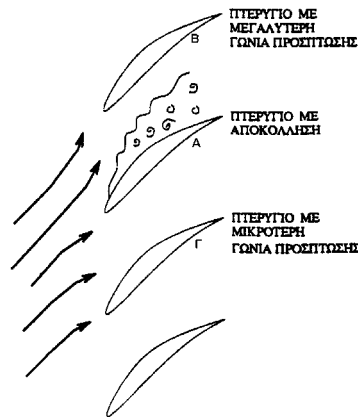


**Σχήμα 2.59 Ρεύμα αέρα εισαγωγής με (α) υψηλή ταχύτητα, (β) χαμηλή ταχύτητα**

Τότε, παρατηρούνται περιοχές αποκόλλησης της ροής<sup>1</sup>. Αυτές κινούνται περιφερειακά με ταχύτητα μικρότερη της ταχύτητας περιστροφής του άξονα

<sup>1</sup> Πρακτικά, παρουσιάζονται στροβιλισμοί του ρεύματος αέρα ανάμεσα στα πτερύγια του συμπιεστή.

του κινητήρα και με την ίδια φορά. Στο Σχήμα 2.60 παρουσιάζεται μία προσπάθεια ερμηνείας του φαινομένου.



**Σχήμα 2.60 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 προσβολής 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 θα μεταφερθεί και στα υπόλοιπα πτερύγια. Αναπτύσσεται, με τον 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 της έξοδο του συμπιεστή αλλά και το αντίθετο αμέσως μετά.

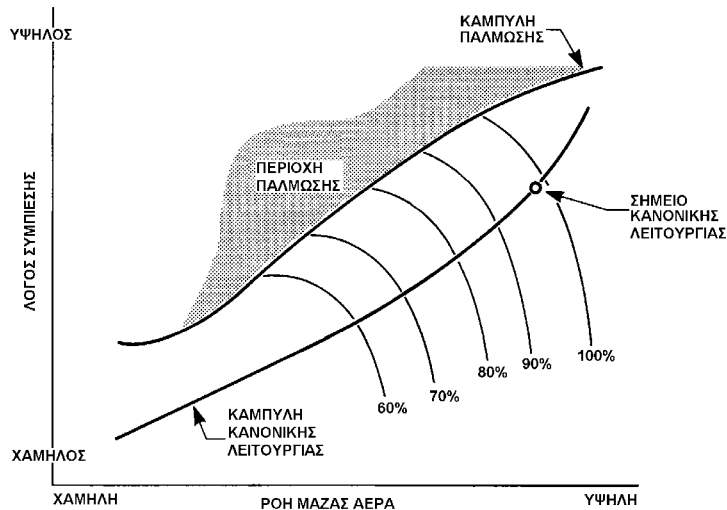
Η απώλεια στήριξης μικρής έντασης συνοδεύεται από ελαφρύ κραδασμό ή καθυστέρηση μεταβολής των στροφών σε επιτάχυνση ή επιβράδυνση του κινητήρα. Συνήθως, σε αυτή την ένταση δεν επηρεάζει τη λειτουργία του κινητήρα και αποκαθίσταται αμέσως<sup>1</sup> χωρίς την ανάγκη κάποιας διορθωτικής κίνησης από το 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 2.61, 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

---

<sup>1</sup> Υπάρχει και η πιθανότητα να περάσει απαρατήρητη.

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 2.61 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 της ροής που παρατηρείται κατά την εμφάνιση της πάλμωσης μπορεί να οδηγήσει σε αναρρόφηση φλόγας από το θάλαμο καύσης και καταστροφή του συμπιεστή.

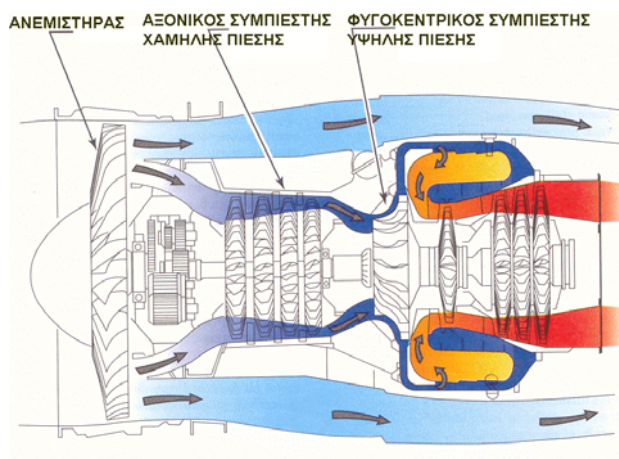
Γενικά, τα φαινόμενα της απώλειας στήριξης και της πάλμωσης αντιμετωπίζονται με τους ακόλουθους τρόπους:

- Αποτελεσματική λειτουργία του εξαρτήματος του **αυτόματου 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.
- Μείωση της γωνίας προσβολής των **μπροστινών βαθμίδων του συμπιεστή** ώστε να μην υπερβεί την κρίσιμη τιμή της.
- Χρήση **συστήματος αυτόματου 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.

- **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.
- **Χρήση διβαθμίου 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 2.62. 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.

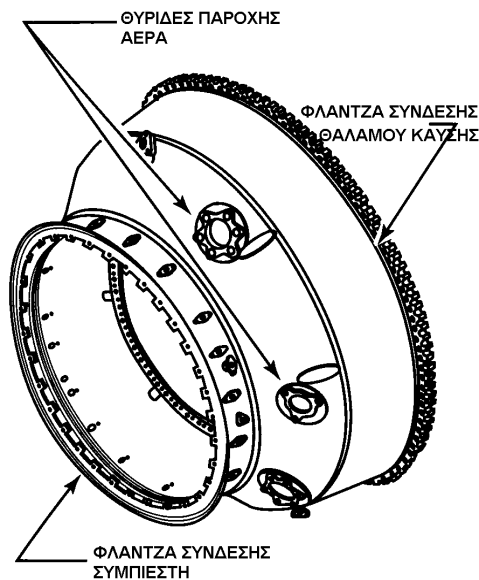


**Σχήμα 2.62** Συνδυασμός αξονικού και φυγοκεντρικού συμπιεστή

## 2.5 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 εγχύεται.

Ο διαχύτης αποτελεί συνέχεια του περιβλήματος του συμπιεστή ή μπορεί να είναι και διαφορετικό κομμάτι (Σχήμα 2.63). Και στις δύο περιπτώσεις φέρει θυρίδες για την παροχέτευση πεπιεσμένου αέρα για την εκτέλεση διάφορων βοηθητικών λειτουργιών του αεροσκάφους. Όπως είδαμε και παραπάνω, θυρίδες παροχέτευσης πεπιεσμένου αέρα υπάρχουν και στο τμήμα του συμπιεστή.



Σχήμα 2.63 Γενική μορφή διαχύτη