

**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|           |   |             |
|-----------|---|-------------|
| <b>11</b> | <b>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ</b>   |             |
|           | <b>ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ</b>   | <b>11.2</b> |
| 11.1      | ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ<br>ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ   | 11.2        |
| 11.2      | ΕΚΤΟΣ ΣΧΕΔΙΣΜΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΥ<br>ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ   | 11.5        |
| 11.3      | ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΑΕΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ  | 11.8        |
| 11.3.1    | Λειτουργία αερογεννήτριας συζευγμένης με ελεύθερο στρόβιλο<br>ισχύος  | 11.10       |
| 11.3.2    | Λειτουργία εκτός σημείου σχεδιασμού στροβιλοκινητήρα<br>(αερογεννήτριας συζευγμένης με προωστικό ακροφύσιο) | 11.14       |

## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

### 11.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙ ΜΕΡΟΥΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ

(Horlock (1973), Dixon (1978), Cohen et al (1972), Boyce (2002)).

Η λειτουργική απόδοση ενός συμπιεστή μπορεί να καθοριστεί μέσω των καμπυλών της πίεσης και της θερμοκρασίας στην έξοδό του, συναρτήσει της παροχής για διαφορετικές τιμές των στροφών (rpm). Αυτές οι χαρακτηριστικές (καμπύλες λειτουργικής απόδοσης), όπως λέγονται για συντομία, εξαρτώνται και από μια σειρά λειτουργικών παραμέτρων όπως π.χ. πίεση και θερμοκρασία εισόδου, φυσικές ιδιότητες του εργαζομένου ρευστού κλπ. Για να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των αναγκαίων λειτουργικών παραμέτρων για την περιγραφή των λειτουργικών χαρακτηριστικών των στροβιλομηχανών, γίνεται χρήση των «αδιάστατων» παραμέτρων όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3. Έτσι οι πλήρεις χαρακτηριστικές καμπύλες της λειτουργικής απόδοσης ενός συμπιεστή μπορούν να καθοριστούν επί τη βάση δυο μόνο ομάδων καμπυλών, όπως φαίνεται στα σχήματα 11.1α, β (Cohen et al (1972)) που είναι αντιπροσωπευτικά της περιγραφής της λειτουργίας των συμπιεστών. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται σε «αδιάστατη μορφή» δηλαδή ο λόγος πιέσεων  $P_{02}/P_{01}$ , και η ισεντροπική απόδοση,  $\eta_c$ , σχεδιάζονται στο διάγραμμα συναρτήσει της «αδιάστατης» παροχής,  $\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}$ ,

για διαφορετικές σταθερές τιμές του «αδιάστατου» αριθμού στροφών,  $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$ . Όπως φαίνεται

από το σχήμα 11.1α η μέγιστη απόδοση παραμένει η ίδια για όλες τις καμπύλες τα δε σημεία μέγιστης απόδοσης δημιουργούν ένα τόπο σημείων που σημειώνεται από την διακεκομμένη γραμμή του σχήματος 11.1α. Ιδανικά η μηχανή θα έπρεπε να σχεδιάζεται έτσι ώστε ο συμπιεστής να εργάζεται πάντα επάνω σ' αυτήν την γραμμή. Δυο άλλες αδιάστατοι παράμετροι που συχνά χρησιμοποιούνται αντί της αδιάστατης μάζας  $\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}$  και των

αδιάστατων στροφών  $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$  είναι η ισοδύναμη παροχή  $\frac{m\sqrt{\theta}}{\delta}$  και οι ισοδύναμες στροφές

$\frac{N}{\sqrt{\theta}}$  όπου  $\theta = \frac{T_{01}}{T_{ref}}$  και  $\delta = \frac{P_{01}}{P_{ref}}$  και η κατάσταση αναφοράς αντιστοιχεί κατά ISA

(Παράρτημα) σε επίπεδο θαλάσσης δηλαδή 288 K και 1.013 bar.

Στο σχήμα 11.1β φαίνονται τυπικές χαρακτηριστικές αξονικού συμπιεστή. Είναι εμφανές, σε σύγκριση με το διάγραμμα χαρακτηριστικών του φυγοκεντρικού συμπιεστή, ότι οι χαρακτηριστικές καμπύλες για ευσταθή λειτουργία εδώ καλύπτουν ένα πολύ μικρότερο εύρος «αδιάστατων» παροχών. Σε μεγάλες παροχές ο περιορισμός τίθεται λόγω στραγγαλισμού της ροής ενώ σε μικρές παροχές λόγω πάλμωσης (κεφάλαιο 10). Σε συμπιεστές υψηλών αποδόσεων στην περιοχή λειτουργίας που οι καμπύλες σταθερών στροφών λόγω του στραγγαλισμού της ροής εισόδου γίνονται κατακόρυφες, σχημα 11.1γ (Boyce (2002)), χρειάζεται να σχεδιαστεί και η απόδοση συναρτήσει του λόγου πιέσεων. Επιπλέον παρατηρούμε ότι, για τους αξονικούς συμπιεστές, τα σημεία μέγιστης απόδοσης βρίσκονται κοντά στη γραμμή πάλμωσης (surge) και το εύρος ευσταθούς λειτουργίας είναι μικρό και συνεπώς χρειάζεται μεγάλη προσοχή στη σύζευξη του συμπιεστή με τις υπόλοιπες συνιστώσες.

Παρόμοια με τους συμπιεστές, η λειτουργία των στροβίλων περιγράφεται μέσω αναλόγων χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργικής απόδοσης. Και εδώ τα διαγράμματα παρουσιάζονται σε «αδιάστατη» μορφή σχεδιάζοντας τώρα την απόδοση,  $\eta$ , και την "αδιάστατη" μάζα  $\frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$  συναρτήσει του λόγου πιέσεων  $\frac{P_{03}}{P_{04}}$  για διάφορες τιμές του λόγου

$\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$ . Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα χαρακτηριστικών στροβίλου δίδονται στο σχήμα

11.2α, (Cohen et al (1972)) και 11.2β, (Boyce (2002)), (3 και 4 αναφέρονται στην είσοδο και έξοδο του στροβίλου). Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η απόδοση είναι σχεδόν σταθερή για ένα μεγάλο εύρος στροφών και λόγων πιέσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιταχυνόμενη φύση της ροής στα διάκενα των πτερυγίων του στροβίλου επιτρέπει στην πτερώωση να εργάζεται χωρίς σοβαρές απώλειες σε ένα μεγαλύτερο εύρος γωνιών πρόσπτωσης. Λόγω του στραγγαλισμού της ροής που συνήθως εμφανίζεται στον στάτορα, (ή ακροφύσιο-nozzle) οι χαρακτηριστικές για διάφορες σταθερές στροφές σχεδόν συμπίπτουν (σχήμα 10.2) και αυτό το εκμεταλλευόμαστε στον υπολογισμό της απόδοσης για λειτουργία εκτός σημείου σχεδιασμού χρησιμοποιώντας μια μόνο καμπύλη.

Ως εδώ αναφερθήκαμε στις χαρακτηριστικές καμπύλες των επιμέρους συνιστωσών. Στα κατωτέρω θα αναφερθούμε στις χαρακτηριστικές της πληρούς μονάδας.

Από τις μεθόδους υπολογισμού των κύκλων του κεφαλαίου 2 είναι δυνατό να εκτιμηθεί ο λόγος πιέσεων που για δεδομένη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου θα δώσει τη

*ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ*

μέγιστη απόδοση και η παροχή που απαιτείται για να επιτευχθεί η ισχύς σχεδιασμού. Αφού γίνουν αυτοί οι προκαταρκτικοί υπολογισμοί κατόπιν μπορούν να επιλεγούν όλα τα υπόλοιπα κατάλληλα στοιχεία σχεδιασμού για την δεδομένη εφαρμογή. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να σχεδιασθεί κάθε μια από τις επιμέρους συνιστώσες του αεριοστροβίλου έτσι ώστε η πλήρης μονάδα να έχει την ζητούμενη λειτουργική απόδοση όταν εργάζεται στο σημείο σχεδιασμού (design point). Εδώ θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι σημείο σχεδιασμού είναι εκείνο όπου ο αεριοστροβίλος εργάζεται σε συγκεκριμένες στροφές, λόγο πίεσεων και παροχή, για τις οποίες οι επιμέρους συνιστώσες έχουν σχεδιασθεί. Το πρόβλημα που απομένει λοιπόν είναι να ευρεθεί η μεταβολή των χαρακτηριστικών λειτουργικής απόδοσης του αεριοστροβίλου για το πλήρες εύρος λειτουργικών συνθηκών (δηλαδή για μια σειρά από στροφές, λόγους πίεσης και παροχές). Η απόδοση σε αυτές τις συνθήκες λέγεται συνήθως λειτουργική απόδοση εκτός σημείου σχεδιασμού (off-design performance).

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες απόδοσης (characteristics) κάθε μιας από τις συνιστώσες μπορούν να εκτιμηθούν είτε με βάση προηγούμενη εμπειρία ή να υπολογιστούν από πραγματικές μετρήσεις. Όταν βέβαια οι επιμέρους συνιστώσες είναι συζευγμένες μεταξύ τους στην πλήρη μονάδα, το εύρος των δυνατών λειτουργικών συνθηκών για κάθε μια περιορίζεται σημαντικά. Το πρόβλημα είναι τότε να ευρεθούν τα αντίστοιχα (κοινά) σημεία λειτουργίας επί των χαρακτηριστικών (καμπυλών απόδοσης) κάθε συνιστώσας όταν η μηχανή εργάζεται υπό σταθερές στροφές, ή όπως συχνά αναφέρεται, υπό ισορροπία (equilibrium), ή αλλιώς υπό ευσταθή λειτουργία.

Τα σημεία λειτουργίας ισορροπίας για μια σειρά διαφορετικών στροφών μπορούν να σχεδιαστούν επί του διαγράμματος χαρακτηριστικών του συμπιεστή και να ενωθούν για να σχηματίσουν την γραμμή λειτουργίας ισορροπίας (equilibrium running line) το δε πλήρες διάγραμμα που προκύπτει καλείται διάγραμμα λειτουργίας ισορροπίας. Όταν προσδιορισθεί το πλήρες εύρος λειτουργικών συνθηκών είναι σχετικά απλός ο υπολογισμός των καμπυλών λειτουργικής απόδοσης όπως της ισχύος εξόδου, της ώσης και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Το διάγραμμα λειτουργίας ισορροπίας υποδεικνύει επίσης την εγγύτητα της γραμμής λειτουργίας (ή ζώνης λειτουργίας) προς την γραμμή πάλμωσης. Εάν η γραμμή λειτουργίας τέμνει την γραμμή πάλμωσης τότε ο αεριοστροβίλος δεν θα μπορεί να εργασθεί υπό μέγιστες στροφές και κάποια διορθωτική μεταβολή πρέπει να γίνει. Τέλος το διάγραμμα αυτό δείχνει κατά πόσο η μηχανή εργάζεται σε περιοχή επαρκούς απόδοσης του συμπιεστή. Η γραμμή λειτουργίας, όπως προαναφέρθηκε, ιδανικά θα έπρεπε να κείται επάνω στα σημεία μέγιστης απόδοσης του συμπιεστή.

Σε εφαρμογές όπου η μηχανή εργάζεται για μεγάλη διάρκεια σε χαμηλές ισχύς, η μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (sfc) με ελάττωση της ισχύος, κάτι που

συνήθως αναφέρεται και σαν λειτουργική απόδοση υπό μερικό φορτίο (part load performance), είναι ύψιστης σημασίας. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι αεριοστρόβιλοι οχημάτων όπου η λειτουργική απόδοση υπό μερικό φορτίο είναι χαμηλή λόγω υψηλής κατανάλωσης σε χαμηλές στροφές. Παρόμοιας σημασίας είναι η περίπτωση καθυστερήσεων των αεροσκαφών στους διαδρόμους απογείωσης όπου η μηχανή δουλεύει σε χαμηλή ισχύ. Ένας άλλος σημαντικός παράγων στον υπολογισμό της εκτός σημείου σχεδιασμού απόδοσης είναι και η επίδραση των συνθηκών του περιβάλλοντος, όπως π.χ. οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες και πιέσεις. Επίγειες εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων πρέπει να δύνανται να εργάζονται από  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  στην Ανταρκτική μέχρι και  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  στις τροπικές περιοχές και σε υψόμετρα από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι και 3.000 μέτρα ενώ οι αεροπορικοί αεριοστρόβιλοι υφίστανται ακόμη μεγαλύτερες διακυμάνσεις στις πιέσεις και τις θερμοκρασίες εισαγωγής.

Στο επόμενο υποκεφάλαιο θα περιγραφούν οι βασικές μέθοδοι υπολογισμού της υπό ισοζύγιο εκτός σημείου σχεδιασμού λειτουργικής απόδοσης (equilibrium off-design performance) μερικών απλών διατάξεων αεριοστροβίλων όπως φαίνονται στο σχήμα 11.3 (Cohen et al (1972)). Αυτές είναι: α) της μονοαξονικής μονάδας ισχύς, β) της διάταξης του σχήματος 11.3β όπου το κύριο τμήμα του αεριοστροβίλου (που λέγεται και αεριογεννήτρια-gas generator) είναι (αεροδυναμικά) συζευγμένο με ελεύθερο στρόβιλο ισχύος και γ) της απλής μηχανής turbojet όπου εδώ τώρα η χρήσιμη ισχύς εμπεριέχεται στο υψηλής ταχύτητας jet που παράγεται στο ακροφύσιο. Τα χαρακτηριστικά του κύκλου και της ροής του ελεύθερου στρόβιλου ισχύος και του προωστικού ακροφυσίου είναι όμοια, επιβάλλουν όμοιους περιορισμούς στην κύρια αερογεννήτρια, ώστε ο ελεύθερος στρόβιλος ισχύος και το προωστικό ακροφύσιο να είναι θερμοδυναμικά όμοια. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εδώ βασίζονται και οι πολλές μετατροπές των κινητήρων αεροσκαφών σε μονάδες ισχύος.

Όλοι οι υπολογισμοί για την εκτός σχεδιασμού λειτουργία βασίζονται στην εξασφάλιση των ουσιαστικών συνθηκών της συμβατότητας της παροχής, του έργου και των στροφών μεταξύ των διαφόρων συνιστωσών. Για ακριβείς υπολογισμούς είναι αναγκαίο να θεωρηθούν και οι απώλειες πίεσης στο τμήμα εισαγωγής, στον θάλαμο καύσης και στο τμήμα εξαγωγής. Επειδή αυτά είναι δευτερεύουσες επιδράσεις, οι αρχικοί υπολογισμοί θα παρουσιαστούν με βάση αμελητέες απώλειες στο τμήμα εισόδου και εξόδου και απώλειες θαλάμου καύσης που είναι σταθερό ποσοστό της πίεσης εξόδου του συμπιεστή. Για πιο λεπτομερείς υπολογισμούς είναι απαραίτητη η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

**11.2 ΕΚΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΥ  
ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ**

Σύμφωνα με τα λεγόμενα του προηγούμενου υποκεφαλαίου, για το μονοαξονικό αεριοστρόβιλο του σχήματος 11.3α ο λόγος πιέσεων στον στρόβιλο υπολογίζεται από τον λόγο πιέσεων στο συμπιεστή και τις απώλειες πίεσης στον θάλαμο καύσης. Η ροή μάζας στο στρόβιλο θα είναι ίση με την παροχτευόμενη μάζα από το συμπιεστή μείον τις διάφορες εκροές συν τη μάζα του καυσίμου. Σε γενικές γραμμές η εκρέουσα μάζα μπορεί να θεωρηθεί ίση με τη μάζα του καυσίμου. Εν γένει η διαδικασία υπολογισμού ενός σημείου λειτουργίας ισορροπίας (equilibrium running point) έχει ως ακολούθως :

- α) Επί της χαρακτηριστικής του συμπιεστή επιλέγεται μια καμπύλη σταθερών στροφών και ένα οποιοδήποτε σημείο επ' αυτής. Εξ αυτού υπολογίζονται οι τιμές των:

$$\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}, \frac{P_{02}}{P_{01}}, \eta_c, \frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$$

- β) Τα αντίστοιχα σημεία επί της χαρακτηριστικής του στροβίλου λαμβάνονται εκ της συμβατότητας στροφών και παροχής.
- γ) Έχοντας ταιριάσει τις χαρακτηριστικές του συμπιεστή και του στροβίλου πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι το έργο που αντιστοιχεί στο επιλεγμένο σημείο λειτουργίας είναι συμβατό με αυτό που απαιτείται από το οδηγούμενο φορτίο. Αυτό απαιτεί γνώση της μεταβολής της ισχύος με τις στροφές, πράγμα που εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο απορροφάται η ισχύς.

Ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι συζευγμένοι απ' ευθείας και συνεπώς η συμβατότητα των στροφών τους δίδει:

$$\frac{N}{\sqrt{T_{03}}} = \frac{N}{\sqrt{T_{01}}} \sqrt{\frac{T_{01}}{T_{03}}} \quad [11.1]$$

Λόγω της συμβατότητας των ροών μπορεί να γραφεί :

**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ**

$$\underbrace{\frac{m_3 \sqrt{T_{03}}}{P_{03}}}_{\text{συνάρτηση του λόγου πίεσης του στροβίλου}} = \frac{m_1 \sqrt{T_{01}}}{P_{01}} \cdot \frac{P_{01}}{P_{02}} \cdot \underbrace{\frac{P_{02}}{P_{03}}}_{\text{σταθερό ποσοστό της κατάθλιψης του συμπιεστή}} \cdot \underbrace{\frac{\sqrt{T_{03}}}{\sqrt{T_{01}}}}_{\text{υπολογίζεται}} \cdot \frac{m_3}{m_1}$$

Επειδή  $\frac{P_{03}}{P_{02}} = 1 - \left( \frac{\Delta P_b}{P_{02}} \right)$  στον θάλαμο καύσης και  $m_1 = m_3 = m$  έχουμε :

$$\frac{m \sqrt{T_{03}}}{P_{03}} = \frac{m \sqrt{T_{01}}}{P_{01}} \cdot \frac{P_{01}}{P_{02}} \cdot \frac{P_{02}}{P_{03}} \cdot \sqrt{\frac{T_{03}}{T_{01}}}$$

Τώρα τα  $\frac{m \sqrt{T_{01}}}{P_{01}}$  και  $\frac{P_{02}}{P_{01}}$  είναι δεδομένα από το επιλεγμένο σημείο λειτουργίας στην

χαρακτηριστική του συμπιεστή. Το  $P_{03}/P_{02}$  υποτίθεται σταθερό και το  $\frac{m \sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$  είναι

συνάρτηση του λόγου πιέσεων του στροβίλου  $P_{03}/P_{04}$ . Αγνοώντας τις απώλειες πίεσης έχουμε  $P_a = P_{01} = P_{04}$  και συνεπώς  $\frac{P_{03}}{P_{04}} = \frac{P_{03}}{P_{02}} \cdot \frac{P_{02}}{P_{01}}$ . Συνεπώς όλοι οι όροι στην εξίσωση 11.2 με

την εξαίρεση του  $\sqrt{\frac{T_{03}}{T_{01}}}$  μπορούν να ληφθούν από τις χαρακτηριστικές καμπύλες του

συμπιεστή και του στροβίλου. Η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου  $T_{03}$  λοιπόν, μπορεί να υπολογιστεί όταν είναι γνωστή η θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{01}$ . Από εκεί μπορούμε να

υπολογίσουμε από την εξίσωση 11.1 τις στροφές  $\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$  και κατόπιν την απόδοση του

στροβίλου  $\eta_t$  από τη χαρακτηριστική του στροβίλου, με γνωστά τα  $\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$  και  $\frac{P_{03}}{P_{04}}$ . Η

θερμοκρασιακή πτώση στο στροβίλο και στο συμπιεστή υπολογίζεται από:

$$\Delta T_{034} = \eta_t T_{03} \left[ 1 - \left( \frac{P_{04}}{P_{03}} \right)^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} \right] \quad [11.3]$$



$$\Delta T_{012} = \frac{T_{01}}{\eta_c} \left[ \left( \frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} - 1 \right] \quad [11.4]$$

Η καθαρή ισχύς που αντιστοιχεί στο επιλεγμένο σημείο λειτουργίας δίδεται από:

$$\text{Καθαρή ισχύς εξόδου} = mc_{pg} \Delta T_{034} - \frac{1}{\eta_m} mc_{pa} \Delta T_{012} \quad [11.5]$$

όπου  $\eta_m$  είναι η μηχανική απόδοση της μηχανικής σύζευξης συμπιεστή- στροβίλου και το  $m$  δίδεται από  $\left( \frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}} \right) \cdot \left( \frac{P_a}{\sqrt{T_a}} \right)$  για δεδομένες συνθήκες περιβάλλοντος.

Τέλος είναι αναγκαίο να ελέγξουμε την πιστότητα της λύσης μέσω της χρήσης των καμπύλων του φορτίου για την δεδομένη εφαρμογή. Για παράδειγμα αν η μηχανή εργαζόταν σε μια εγκατάσταση μέτρησης (test bed) συζευγμένη με ένα δυναμόμετρο, το φορτίο θα μπορούσε να επιλεγεί ανεξαρτήτως των στροφών και η μηχανή θα ήταν δυνατόν να εργάζεται σε οποιοδήποτε σημείο των χαρακτηριστικών του συμπιεστή αρκεί να είμαστε μέσα στα όρια θερμοκρασιών ασφαλείας. Όταν όμως από την άλλη μεριά το φορτίο αποτελεί μια έλικα η απορροφούμενη ισχύς μεταβάλλεται με τον κύβο των στροφών της έλικας. Όταν δε, είναι γνωστά η μηχανική απόδοση και ο λόγος του κιβωτίου υπάρχει δεδομένη (και δεσμευτική) χαρακτηριστική καμπύλη του φορτίου συναρτήσει της ισχύος και των στροφών όπως φαίνεται στο σχήμα 11.4. Το πρόβλημα είναι τότε να ευρεθεί το μόνο σημείο επάνω σε κάθε γραμμή σταθερών στροφών στο διάγραμμα χαρακτηριστικών του συμπιεστή που θα δώσει την απαιτούμενη ισχύ σ' αυτές τις στροφές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω «δοκιμής και λάθους» δοκιμάζοντας διάφορα σημεία επάνω στις χαρακτηριστικές του συμπιεστή και υπολογίζοντας την ισχύ εξόδου που τους αντιστοιχεί. Εάν η υπολογιζόμενη ισχύς δεν είναι ακριβώς ίση με την απαιτούμενη για αυτές τις στροφές, η μηχανή δεν θα εργάζεται υπό ισοζύγιο και θα επιβραδύνει ή επιταχύνει ανάλογα με την έλλειψη ή περίσσεια ισχύος. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για κάθε γραμμή σταθερών στροφών προκύπτει μια σειρά από σημεία λειτουργίας που όταν ενωθούν σχηματίζουν γραμμές λειτουργίας ισορροπίας όπως στο σχήμα 11.5.

Ένας άλλος πολύ κοινός τύπος φορτίου που χρησιμοποιείται με τον μονοαξονικό αεριοστρόβιλο είναι η ηλεκτρογεννήτρια που εργάζεται με σταθερές στροφές και το ηλεκτρικό φορτίο μεταβάλλεται. Εδώ η γραμμή λειτουργίας ισορροπίας, για μια ομάδα γεννητριών, αντιστοιχεί σε μια γραμμή σταθερών "αδιάστατων" στροφών όπως φαίνεται στο

σχήμα 11.5 και κάθε σημείο της γραμμής παριστά διαφορετικές θερμοκρασίες εισόδου του στροβίλου και ισχείς εξόδου. Επιπλέον και εδώ μπορεί να ευρεθεί με “δοκιμή και λάθος” το σημείο λειτουργίας του συμπιεστή που αντιστοιχεί σε μηδενική ισχύ εξόδου και η γραμμή λειτουργίας χωρίς φορτίο (no load) δείχνεται στο σχήμα 11.5.

Οι υπολογισμοί που περιγράφησαν προηγουμένως βοηθούν στην εκτίμηση όλων των παραμέτρων που απαιτούνται για ένα πλήρη υπολογισμό της λειτουργικής απόδοσης σε διάφορα σημεία εκτός σχεδιασμού. Με την  $T_{03}$  γνωστή η νέα  $T_{02} = \Delta T_{012} + T_{01}$ . Συνεπώς η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω καύσης είναι γνωστή και ο λόγος καυσίμου/αέρα  $f$  μπορεί να υπολογιστεί από το διάγραμμα του σχήματος 2.15 υποθέτοντας μια τιμή της απόδοσης καύσης  $\eta_b$ . Η ροή καυσίμου είναι  $m \cdot f$  και έτσι μπορεί να υπολογισθεί η μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (sfc) με το φορτίο. Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται σε συγκεκριμένες συνθήκες εισόδου ( $T_{01}=T_a$ ,  $P_{01}=P_a$ ) αλλά η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί για μια σειρά από διαφορετικές συνθήκες εισόδου.

### **11.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΑΕΡΙΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ**

Όπως σημειώθηκε στην αρχή του κεφαλαίου ότι η αεριογεννήτρια προσφέρει την ίδια λειτουργική σκοπιμότητα και για ένα ελεύθερο στρόβιλο ισχύος και για ένα προωστικό ακροφύσιο. Διατηρεί μια σταθερή παροχή υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης που εκτονούμενη παράγει είτε έργο άξονα είτε υψηλής ταχύτητας προωστικό jet. Έτσι πριν διερευνηθεί η λειτουργία καθενός από τους παραπάνω συνδυασμούς είναι απαραίτητο να διερευνηθεί η αεριογεννήτρια ξεχωριστά (σχήματα 11.3β, γ).

Η συμβατότητα στροφών και παροχής όπως εκφράστηκε προηγουμένως μέσω των εξισώσεων 11.1 και 11.2 ισχύει και εδώ. Τώρα όμως ο λόγος πιέσεων στο στρόβιλο είναι άγνωστος και πρέπει να υπολογιστεί εξισώνοντας το έργο του στροβίλου και του συμπιεστή και υπολογίζοντας κατ' αρχάς την θερμοκρασιακή πτώση στον στρόβιλο. Έτσι αντί για την εξίσωση 11.5 έχουμε ότι :

$$\eta_m \cdot c_{pg} \cdot \Delta T_{034} = c_{pa} \cdot \Delta T_{012}$$

και:

$$\frac{\Delta T_{034}}{T_{03}} = \frac{\Delta T_{012}}{T_{01}} \cdot \frac{T_{01}}{T_{03}} \cdot \frac{c_{pa}}{c_{pg} \eta_m} \quad [11.6]$$

Οι εξισώσεις 11.1, 11.2 και 11.6 συνδέονται μέσω του λόγου θερμοκρασιών  $T_{03}/T_{01}$  και είναι ανάγκη να υπολογισθεί, μέσω “δοκιμής και λάθους”, η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο για τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας στην χαρακτηριστική του συμπιεστή. Η διαδικασία έχει ως ακολούθως :

- α) Επιλέγοντας ένα σημείο στην χαρακτηριστική του συμπιεστή προσδιορίζονται οι τιμές των  $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$ ,  $\frac{P_{02}}{P_{01}}$ ,  $\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}$  και  $\eta_c$  και το  $\Delta T_{012}/T_{01}$  μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση 11.4.
- β) Υποθέτοντας μια τιμή του  $P_{03}/P_{04}$  η τιμή του  $\frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$  προσδιορίζεται από την χαρακτηριστική του στρόβιλου και έτσι υπολογίζεται ο λόγος  $T_{03}/T_{01}$  από την εξίσωση συμβατότητας της ροής 11.2.
- γ) Από την τιμή του  $T_{03}/T_{01}$  υπολογίζεται το  $\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$  από την εξίσωση 11.1.
- δ) Με γνωστά τα  $\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$  και  $\frac{P_{03}}{P_{04}}$  προσδιορίζεται η απόδοση του στρόβιλου από τις χαρακτηριστικές καμπύλες.
- ε) Η αδιάστατη θερμοκρασιακή πτώση  $\frac{\Delta T_{034}}{T_{03}}$  μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση 11.3 και να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την εξίσωση 11.6 για τον υπολογισμό μιας άλλης τιμής του λόγου  $T_{03}/T_{01}$
- ζ) Η νέα τιμή του λόγου  $T_{03}/T_{01}$  δε θα συμφωνεί, εν γένει, με την προηγούμενη που υπολογίστηκε από την εξίσωση 11.2 υποδηλώνοντας ότι η υποθετίσα τιμή του λόγου  $P_{03}/P_{04}$  δεν είναι η σωστή για ένα σημείο λειτουργίας ισορροπίας.
- η) Μια καινούργια τιμή του λόγου  $P_{03}/P_{04}$  πρέπει να υποθεθεί και οι υπολογισμοί β-ζ να επαναληφθούν έως ότου οι τιμές του λόγου  $T_{03}/T_{01}$  που υπολογίζονται από τις εξισώσεις 11.2 και 11.6 συμπέσουν.
- θ) Σύγκλιση των δυο τιμών σημαίνει ότι το σημείο λειτουργίας του στρόβιλου είναι συμβατό με το αρχικά επιλεγμένο σημείο λειτουργίας του συμπιεστή όταν η παροχή καυσόμου είναι τέτοια ώστε να παράγει την, κατόπιν επαναλήψεων, υπολογιζόμενη τιμή του λόγου  $T_{03}/T_{01}$ . Η όλη διαδικασία συνοψίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 11.6 α.

Φυσικά θα ήταν δυνατό να επαναληφθεί η συνολική διαδικασία για ένα μεγάλο αριθμό σημείων επί της χαρακτηριστικής του συμπιεστή και τα αποτελέσματα να εκφραστούν συνδέοντας σημεία με σταθερό  $T_{03}/T_{01}$  επί των χαρακτηριστικών του συμπιεστή όπως φαίνεται στο σχήμα 11.7. Αυτό όμως στην πράξη δεν είναι αναγκαίο διότι η επιπλέον απαίτηση για ροική συμβατότητα με την συνιστώσα κάταντι της αεριογεννήτριας, είτε αυτή είναι ελεύθερος στρόβιλος ισχύος είτε προωστικό ακροφύσιο, περιορίζει σημαντικά την ζώνη λειτουργίας επί της χαρακτηριστικής του συμπιεστή. Στα επόμενα θα περιγραφεί ο υπολογισμός της πλήρους μονάδας.

### 11.3.1 Λειτουργία αεριογεννήτριας συζευγμένης με ελεύθερο στρόβιλο ισχύος

#### **A. Σύζευξη της αεριογεννήτριας με τον ελεύθερο στρόβιλο**

Η σύζευξη της αεριογεννήτριας με τον ελεύθερο στρόβιλο προέρχεται από την απαίτηση συμβατότητας των μεταξύ τους παροχών σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ο διαθέσιμος λόγος πιέσεων για τον ελεύθερο στρόβιλο προσδιορίζεται από τους λόγους πιέσεων του συμπιεστή και του στροβίλου της αεριογεννήτριας. Η χαρακτηριστική του στροβίλου ισχύος (power turbine ή free turbine) θα είναι παρόμοια με αυτή του σχήματος

11.2β αλλά οι παράμετροι θα είναι τώρα οι  $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}, \frac{P_{04}}{P_a}, \frac{N_p}{\sqrt{T_{04}}}, \eta_p$ .

Προηγουμένως περιγράφηκε πως οι συνθήκες λειτουργίας της αεριογεννήτριας μπορούν να προσδιοριστούν για κάθε σημείο της χαρακτηριστικής του συμπιεστή. Η τιμή του  $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$  στην έξοδο της αεριογεννήτριας μπορεί να υπολογιστεί από:

$$\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}} = \frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}} \cdot \frac{P_{03}}{P_{04}} \cdot \sqrt{\frac{T_{04}}{T_{03}}} \quad [11.7]$$

όπου:

$$\frac{\Delta T_{034}}{T_{03}} = \eta_t \left[ 1 - \left( \frac{P_{04}}{P_{03}} \right)^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} \right] = 1 - \frac{T_{04}}{T_{03}}$$

Ο αντίστοιχος λόγος πιέσεων στον στρόβιλο ισχύος υπολογίζεται από:

$$\frac{P_{04}}{P_a} = \frac{P_{02}}{P_{01}} \cdot \frac{P_{03}}{P_{02}} \cdot \frac{P_{04}}{P_{03}} \quad [11.8]$$

Έχοντας υπολογίσει τον λόγο πιέσεων στον ελεύθερο στρόβιλο η τιμή του  $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$  μπορεί να ευρεθεί από τις χαρακτηριστικές καμπύλες του στροβίλου ισχύος και να συγκριθεί με την τιμή που βρέθηκε από την εξίσωση 11.7. Εάν δεν έχει επιτευχθεί συμφωνία των τιμών είναι αναγκαίο να επιλεγεί ένα άλλο σημείο στην ίδια γραμμή σταθερών στροφών της χαρακτηριστικής του συμπιεστή και να επαναληφθεί η όλη διαδικασία μέχρις ότου ικανοποιηθεί η απαίτηση συμβατότητας παροχών μεταξύ των δυο στροβίλων. Η όλη διαδικασία για την σύζευξη του ελεύθερου στροβίλου ισχύος δίδεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 11.6β.

Για κάθε γραμμή σταθερών στροφών  $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$  επί της χαρακτηριστικής του συμπιεστή θα υπάρχει μόνο ένα σημείο που θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις συμβατότητας για το έργο της αεριογεννήτριας και για την παροχή των δυο στροβίλων. Εάν τα σημεία που προκύπτουν σε διαφορετικές γραμμές σταθερών στροφών συνδεθούν, δημιουργούν την γραμμή ισοζυγιακής λειτουργίας όπως φαίνεται στο σχήμα 11.7.

Η γραμμή λειτουργίας του ελεύθερου στροβίλου ισχύος είναι ανεξάρτητη του φορτίου και προσδιορίζεται από την ικανότητα απορρόφησης έργου από τον στρόβιλο ισχύος σε αντίθεση προς την μονοαξονική μονάδα (στο σχήμα 11.5).

### **B. Σύζευξη δυο στροβίλων**

Η μελέτη της συμπεριφοράς δυο στροβίλων εν σειρά είναι χρήσιμη για την μελέτη πλέον πολύπλοκων διατάξεων και για τη σύζευξη άλλων τμημάτων κάταντι της αεριογεννήτριας.

Δείχτηκε προηγουμένως ότι μέσω της εξίσωσης 11.7 η τιμή  $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$  στην έξοδο του στροβίλου της αεριογεννήτριας μπορεί να ληφθεί για κάθε σημείο λειτουργίας της και ότι επιπλέον είναι συνάρτηση των  $\frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$ ,  $\frac{P_{03}}{P_{04}}$ ,  $\eta_i$ . Η τιμή του  $\eta_i$  μπορεί να ληφθεί από την

χαρακτηριστική του πρώτου στροβίλου αφού είχε υπολογισθεί το  $\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$  για το δεδομένο

σημείο λειτουργίας στην διαδικασία υπολογισμού της αεριογεννήτριας. Στην πράξη όμως η μεταβολή στο  $\eta_t$  σε δεδομένο λόγο πιέσεων είναι μικρή (βλέπε σχήμα 11.2α, β) και ιδιαίτερα στο περιορισμένο εύρος λειτουργίας του στροβίλου της αεριογεννήτριας. Επιπλέον και αυτή

η μεταβολή έχει μικρή επίδραση επί του  $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$  επειδή η μεταβολή του  $\sqrt{\frac{T_{03}}{T_{04}}}$  είναι μικρή.

Πολλές φορές είναι επαρκές να λαμβάνεται μια μέση τιμή για το  $\eta_t$  σε κάθε λόγο πιέσεων

έτσι ώστε το  $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$  να γίνεται συνάρτηση μόνο των  $\frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$  και  $\frac{P_{03}}{P_{04}}$ . Εάν γίνει αυτό, μια

μόνο καμπύλη που αναπαριστά την χαρακτηριστική της «αδιάστατης» παροχής εξόδου του στροβίλου είναι ανάγκη να σχεδιαστεί μέσω εφαρμογής της εξίσωσης 11.7 για διάφορα σημεία επί της (μόνης επίσης) χαρακτηριστικής καμπύλης της παροχής εισόδου για τον ίδιο στροβίλο. Το αποτέλεσμα δείχνεται στην διακεκομμένη γραμμή του σχήματος 11.8.

Το αποτέλεσμα της εν σειρά λειτουργίας δυο στροβίλων επίσης δείχνεται στο σχήμα 11.8. Καθ' όσον ο στροβίλος ισχύος εργάζεται με στραγγαλισμένη ροή (choked), ο στροβίλος της αεριογεννήτριας εργάζεται σε σταθερό «αδιάστατο» σημείο, δηλαδή στον λόγο πιέσεων που προσδιορίζεται από το σημείο (α) στο σχήμα 11.8. Όταν ο στροβίλος ισχύος λειτουργεί χωρίς στραγγαλισμό, η αεριογεννήτρια και πάλι περιορίζεται να λειτουργεί υπό καθορισμένο λόγο πιέσεων για κάθε λόγο πιέσεων του στροβίλου ισχύος, σημεία (β) και (γ) στο σχήμα 11.8. Μια περαιτέρω συνέπεια του συσχετισμού αυτών των λόγων πιέσεων μεταξύ των στροβίλων είναι ότι μπορούμε να σχεδιάσουμε τον λόγο  $P_{03}/P_{04}$  συναρτήσει του λόγου πιέσεων του συμπιεστή  $P_{02}/P_{01}$  από την σχέση :

$$\frac{P_{03}}{P_{04}} = \frac{P_{03}}{P_{02}} \cdot \frac{P_{02}}{P_{01}} \cdot \frac{P_a}{P_{04}} \quad [11.9]$$

Ο λόγος  $P_{03}/P_{02}$  προσδιορίζεται από τις απώλειες πίεσης στον θάλαμο καύσης και το  $P_{04}/P_a$  λαμβάνεται από το σχήμα 11.8 για κάθε τιμή του λόγου  $P_{03}/P_{04}$ . Μια τέτοια καμπύλη φαίνεται στο σχήμα 11.9. Από εδώ, για κάθε τιμή του λόγου πιέσεων του συμπιεστή, ο λόγος πιέσεων του στροβίλου της αεριογεννήτριας μπορεί να προσδιοριστεί. Έτσι οι τιμές των

$\frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$  και  $\frac{\Delta T_{034}}{T_{03}}$  που απαιτούνται για χρήση στις εξισώσεις 10.2 και 10.6, καθορίζονται απ'

ευθείας. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η επαναληπτική διαδικασία για τον καθορισμό

του λόγου πιέσεων του στροβίλου της αεριογεννήτριας και για κάθε γραμμή σταθερών στροφών μόνο μια επανάληψη είναι αναγκαία για τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας ισορροπίας.

**Γ. Μεταβολή της ισχύος, της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της ροπής συναρτήσει των στροφών του στροβίλου ισχύος**

Η παροχή ενέργειας του στροβίλου ισχύος είναι:

$$\text{ενέργεια εξόδου} = m C_p \Delta T_{045} \quad [11.10]$$

όπου:

$$\Delta T_{045} = \eta_p T_{04} \left[ 1 - \left( \frac{P_a}{P_{04}} \right)^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} \right]$$

Για κάθε σημείο λειτουργίας ισορροπίας (ένα για κάθε γραμμή σταθερών στροφών του συμπιεστή) το  $P_{04}/P_a$  θα είναι γνωστό και το  $T_{04}$  υπολογίζεται από :

$$\frac{\Delta T_{034}}{T_{03}} = \eta_t \left[ 1 - \left( \frac{P_{04}}{P_{03}} \right)^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} \right] = 1 - \frac{T_{04}}{T_{03}} \quad [11.11]$$

Η παροχή λαμβάνεται από το  $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$  για υποθεθείσες τιμές των  $P_a$  και  $T_a$ .

$$\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}} = \frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}} \frac{P_{03}}{P_{04}} \sqrt{1 - \eta_t \left[ 1 - \left( \frac{P_{04}}{P_{03}} \right)^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} \right]} =$$

[υποθέτοντας ότι η επίδραση επί του  $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$  λόγω μεταβολής στο  $\eta_t$  είναι αμελητέα]  $\approx$

$$f\left(\frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}, \frac{P_{03}}{P_{04}}\right)$$

Η κύρια άγνωστη παράμετρος είναι η απόδοση του στροβίλου ισχύος  $\eta_p$ . Μπορεί να

υπολογιστεί από την χαρακτηριστική του στροβίλου ισχύος αλλά εξαρτάται όχι μόνο από το

$P_{04}/P_a$  αλλά και από το  $\frac{N_p}{\sqrt{T_{04}}}$ . Ελεύθεροι στρόβιλοι χρησιμοποιούνται για να οδηγούν μια

ομάδα φορτίων όπως π.χ. αντλίες, έλικες, ηλεκτρογεννήτριες, κάθε ένα με την δική του χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-στροφών. Γι' αυτό τον λόγο συνηθίζεται να υπολογίζεται η ισχύς εξόδου για ένα εύρος στροφών του στροβίλου για κάθε σημείο λειτουργίας ισορροπίας (δηλαδή για κάθε αριθμό στροφών του συμπιεστή). Τα αποτελέσματα μπορούν να σχεδιαστούν όπως στο σχήμα 11.10.

Η κατανάλωση καυσίμου μπορεί επίσης να υπολογισθεί για κάθε σημείο λειτουργίας ισορροπίας με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 11.2 για την μονοαξονική μονάδα. Επειδή εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους της αεριογεννήτριας θα υπάρχει μια μόνο τιμή για κάθε αριθμό στροφών του συμπιεστή. Όταν όμως η κατανάλωση (sfc) δίδεται συναρτήσει της ισχύος, τότε είναι φανερό ότι θα είναι συνάρτηση των στροφών και του συμπιεστή και του στροβίλου ισχύος. Για αυτό συνηθίζεται να παρουσιάζεται η εκτός σημείου σχεδιασμού λειτουργική απόδοση σε διαγράμματα κατανάλωσης-ισχύος για διάφορους αριθμούς στροφών του στροβίλου ισχύος όπως φαίνεται στο σχήμα 11.11.

Στην περίπτωση της μονάδας αξονικής ισχύος, η σχέση ροπή-στροφές για δεδομένη ισχύ είναι επίσης σημαντική μια και καθορίζει την καταλληλότητα της μονάδας για διαφορετικές εφαρμογές π.χ. υψηλή ροπή εκκίνησης είναι ιδιαίτερα σημαντική στις εφαρμογές έλξης. Ο συμπιεστής της μονοαξονικής μηχανής λειτουργεί σε στροφές που περιορίζονται σε κάποιο πολλαπλάσιο των στροφών του φορτίου, που καθορίζεται από την σχέση μετάδοσης του κιβωτίου, και συνεπώς ελάττωση των στροφών του φορτίου σημαίνει ελάττωση των στροφών του συμπιεστή. Αυτό σημαίνει ελάττωση της παροχής και συνεπώς της ροπής εξόδου όπως φαίνεται από την καμπύλη (α) του σχήματος 11.12. Αυτός ο τύπος αεριοστροβίλου είναι ακατάλληλος λοιπόν για εφαρμογές έλξης. Η πιο επίπεδη καμπύλη της ροπής μιας εμβολοφόρου μηχανής εσωτερικής καύσης αντιπαρατίθεται για σύγκριση (διακεκομμένη γραμμή) στο σχήμα 11.12.

Εν αντιθέσει, η μονάδα με ελεύθερο στρόβιλο ισχύος έχει χαρακτηριστικά ροπής ακόμη καλύτερα και από την εμβολοφόρο μηχανή εσωτερικής καύσης, καμπύλη (β) σχήμα 11.12. Αυτό συμβαίνει επειδή η ισχύς εξόδου και η παροχή του συμπιεστή εδώ είναι ανεξάρτητες των στροφών του φορτίου και του στροβίλου ισχύος αντίστοιχα. Βέβαια και ένας άλλος παράγων που υπεισέρχεται εδώ είναι και η απόδοση στις χαμηλές στροφές που είναι πράγματι χαμηλή ενώ η κατανάλωση είναι υψηλή.



11.3.2 Λειτουργία εκτός σημείου σχεδιασμού στροβιλοκινητήρα

(αερογεννήτριας συζευγμένης με προωστικό ακροφύσιο)

**A. Χαρακτηριστικά προωστικού ακροφυσίου**

Η επιφάνεια του προωστικού ακροφυσίου ενός στροβιλοκινητήρα προσδιορίζεται από τους υπολογισμούς στο σημείο σχεδιασμού όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 και παίζει σημαντικό ρόλο στην εκτός σημείου σχεδιασμού λειτουργία. Η χαρακτηριστική (καμπύλη)

ενός ακροφυσίου συναρτήσει της «αδιάστατης» παροχής  $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$  και του λόγου πιέσεων

$P_{04}/P_{03}$  (βλέπε σχήμα 11.3c για συμβολισμούς) μπορεί να υπολογισθεί ως εξής :

Η παράμετρος ροής (ή παροχής) δίδεται από :

$$\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}} = C_5 A_5 \rho_5 \frac{\sqrt{T_{04}}}{P_{04}} = \frac{C_5}{\sqrt{T_{04}}} \times \frac{A_5}{R} \times \frac{P_5}{P_{04}} \times \frac{T_{04}}{T_5} \quad (11.12)$$

όπου  $A_5$  είναι η ενεργός επιφάνεια του ακροφυσίου. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του κεφαλαίου 2.2.2 το  $\frac{C_5}{\sqrt{T_{04}}}$  υπολογίζεται από :

$$\frac{C_5^2}{T_{04}} = 2 C_p \eta_j \left[ 1 - \left( \frac{1}{\frac{P_{04}}{P_5}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (11.13)$$

και το  $T_5/T_{04}$  από :

$$\frac{T_5}{T_{04}} = 1 - \frac{T_{04} - T_5}{T_{04}} = 1 - \eta_j \left[ 1 - \left( \frac{1}{\frac{P_{04}}{P_5}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (11.14)$$

Συνεπώς για ένα ακροφύσιο δεδομένης επιφάνειας και απόδοσης το  $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$  μπορεί να υπολογισθεί συναρτήσει του λόγου πιέσεων  $P_{04}/P_5$ . Αλλά οι εξισώσεις 11.13 και 11.14 ισχύουν μόνο για λόγους πιέσεων μέχρι την κρίσιμη τιμή που δίδεται από την εξίσωση :

$$\frac{P_{04}}{P_c} = \frac{1}{\left[1 - \frac{1}{\eta_j} \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right)\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}$$

και μέχρι τον κρίσιμο λόγο ισχύει  $P_5=P_c$ . Για λόγους πιέσεων  $P_{04}/P_c$  μεγαλύτερους του κρίσιμου το  $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$  παραμένει σταθερό στην μέγιστη τιμή (στραγγαλισμού) δηλαδή είναι ανεξάρτητο του λόγου  $P_{04}/P_c$  (και  $P_5 = P_c > P_a$ ). Έτσι το  $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$  μπορεί να σχεδιαστεί συναρτήσει του ολικού λόγου πιέσεων του ακροφυσίου  $P_{04}/P_a$  όπως φαίνεται στο σχήμα 11.13 και φυσικά οι ομοιότητες μεταξύ των χαρακτηριστικών του ακροφυσίου και του στροβίλου είναι εμφανείς. Μέχρι την συνθήκη στραγγαλισμού το  $T_5/T_{04}$  δίδεται από την εξίσωση 11.14 ενώ για ακροφύσιο στραγγαλισμένο δίδεται από την εξίσωση :

$$\frac{T_c}{T_{04}} = \frac{2}{\gamma+1} \quad (11.16)$$

Ομοίως με το ακροφύσιο να λειτουργεί χωρίς στραγγαλισμένη ροή το  $\frac{C_5}{\sqrt{T_{04}}}$  δίδεται από την εξίσωση 11.13, ενώ όταν είναι στραγγαλισμένο η  $C_5$  είναι η ταχύτητα του ήχου και ο αριθμός  $M_5=1$ . Επειδή  $C = M \sqrt{\gamma RT}$  και  $T_o = T \left[1 + \frac{(\gamma-1)M^2}{2}\right]$  έχουμε τη γενική σχέση (κεφάλαιο 4) :

$$\frac{C}{\sqrt{T_o}} = \frac{M \sqrt{\gamma R}}{\sqrt{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)}} \quad (11.17)$$

Έτσι όταν το ακροφύσιο εργάζεται στραγγαλισμένο (δηλαδή  $\eta_5 = 1$ ) έχουμε :

$$\frac{C_5^2}{T_{04}} = \frac{C_5^2}{T_{05}} = \frac{2\gamma R}{\gamma + 1} \quad (11.18)$$

Οι εξισώσεις 11.15-11.18 θα χρησιμοποιηθούν αργότερα όταν θα υπολογισθεί η ώση.

### **B. Σύζευξη της αερογεννήτριας με το προωστικό ακροφύσιο**

Οι ομοιότητες των χαρακτηριστικών (καμπύλων) ροής μεταξύ ενός ακροφυσίου και ενός στροβίλου ισχύος συνεπάγεται ότι και τα δύο επιβάλλουν παρόμοιους περιορισμούς στη λειτουργία της αερογεννήτριας. Συνεπώς όταν θεωρούμε την λειτουργία ενός στροβιλοκινητήρα υπό στατικές συνθήκες, δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ του ακροφυσίου και του στροβίλου ισχύος. Η καμπύλη λειτουργίας υπό ισοζύγιο μπορεί να υπολογισθεί βάσει του διαγράμματος του σχήματος 11.6 β και της περιγραφής του υποκεφαλαίου 11.3.1. Συνεπώς το σχήμα 11.7 είναι αντιπροσωπευτικό τυπικό διάγραμμα λειτουργίας ισορροπίας για στροβιλοκινητήρα υπό στατικές συνθήκες.

Τώρα είναι φυσικά αναγκαίο να θεωρήσουμε την επίδραση της ταχύτητας πτήσεως επί του διαγράμματος λειτουργίας. Η ταχύτητα πτήσεως εκφράζεται συνήθως συναρτήσει του αριθμού Mach. Όπως δείχτηκε στο κεφάλαιο 2.2.2 κατά την πτήση παράγεται ένας λόγος πιέσεων εμβολισμού (ram pressure ratio) που είναι συνάρτηση του αριθμού Mach πτήσης και της απόδοσης του τμήματος εισαγωγής  $\eta_i$ . Αυτός ο εμβολισμός θα αυξήσει την πίεση εξόδου του συμπιεστή που με την σειρά του θα οδηγήσει σε υψηλότερες πιέσεις προ του ακροφυσίου συνεπώς αυξάνοντας τον λόγο πιέσεων του ακροφυσίου. Όταν όμως το ακροφύσιο στραγγαλισθεί θα επιτευχθεί η μέγιστη παροχή που θα είναι ανεξάρτητη του λόγου πιέσεων του ακροφυσίου και συνεπώς ανεξάρτητη της ταχύτητας πτήσης. Η σπουδαιότητα αυτού του γεγονότος έγκειται στο ότι το σημείο λειτουργίας του στροβίλου θα παραμένει και αυτοαμετάβλητο από εδώ και πέρα λόγω των απαιτήσεων συμβατότητας της ροής μεταξύ στροβίλου και ακροφυσίου. Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι καθ' όσον το ακροφύσιο είναι στραγγαλισμένο η γραμμή λειτουργίας ισορροπίας θα προσδιορίζεται μοναδικά από το καθορισμένο σημείο λειτουργίας του στροβίλου και θα είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας πτήσης.

Στην πράξη, με τους λόγους πιέσεων των σύγχρονων κύκλων, σχεδόν όλοι οι στροβιλοκινητήρες εργάζονται με το ακροφύσιο στραγγαλισμένο κατά την απογείωση,

*ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ*

ανύψωση και σταθερή πτήση (take-off, climb, cruise) και το ακροφύσιο αποστραγγαλίζεται μόνο σε περίπτωση σημαντικής ελάττωσης της ώσης. Αυτό συμβαίνει συνήθως κατά την προσγείωση και την πορεία επί του διαδρόμου (landing και taxiing). Παρ' όλα αυτά που δείχτηκαν παραπάνω είναι αναγκαίο να θεωρηθεί η επίδραση της ταχύτητας πτήσης επί της γραμμής λειτουργίας ισορροπίας διότι στις χαμηλές στροφές κυρίως η γραμμή λειτουργίας προσεγγίζει τη γραμμή πάλμωσης.

Τώρα ο λόγος πιέσεων του ακροφυσίου συνδέεται με τον λόγο πιέσεων εμβολισμού (στο τμήμα εισόδου) ως εξής :

$$\frac{P_{04}}{P_{\alpha}} = \frac{P_{04}}{P_{03}} \times \frac{P_{03}}{P_{02}} \times \frac{P_{02}}{P_{01}} \times \frac{P_{01}}{P_{\alpha}} \quad (11.19)$$

Αυτή η σχέση διαφέρει από την σχέση για τον ελεύθερο στρόβιλο (εξίσωση 11.8) μόνο κατά τον όρο  $P_{01}/P_{\alpha}$ . Από το κεφάλαιο 2.2.2 έχουμε ότι :

$$\frac{P_{01}}{P_{\alpha}} = \left[ 1 + \eta_i \left( \frac{\gamma - 1}{2} \right) M_{\alpha}^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (11.20)$$

Συνεπάγεται από τις εξισώσεις 11.19 και 11.20 ότι για δεδομένο  $\eta_i$  το  $P_{04}/P_{\alpha}$  είναι συνάρτηση των παραμέτρων της αεριογεννήτριας και του αριθμού Mach πτήσης,  $M_{\alpha}$ . Η διαδικασία του υποκεφαλαίου 11.3.1 (σχήμα 11.6 β) μπορεί να ακολουθηθεί και εδώ αντικαθιστώντας την εξίσωση 11.8 με την εξίσωση 11.19. Επιπλέον για κάθε γραμμή σταθερών στροφών του συμπιεστή ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται για αρκετές τιμές του  $M_{\alpha}$  που καλύπτουν το επιθυμητό εύρος ταχυτήτων πτήσης. Το αποτέλεσμα είναι μια ομάδα γραμμών λειτουργίας ισορροπίας σταθερού  $M_{\alpha}$ . Όπως φαίνεται και στο σχήμα 11.14 οι γραμμές αυτές συγκλίνουν για τις υψηλότερες στροφές του συμπιεστή όπου το ακροφύσιο τότε είναι στραγγαλισμένο.

**Γ. Μεταβολή της ώσης συναρτήσει των στροφών, της ταχύτητας πτήσης και του υψομέτρου.**

Έχουμε συζητήσει στο κεφάλαιο 2.2.2 ότι όταν το ακροφύσιο εργάζεται χωρίς στραγγαλισμό της ροής η καθαρή ώση  $F$  προέρχεται μόνο από το εκτονούμενο jet αέρα και είναι  $F=m(C_5-C_{\alpha})$  όπου  $C_{\alpha}$  είναι η ταχύτητα πτήσης. Όταν το ακροφύσιο είναι στραγγαλισμένο τότε μέρος της εκτόνωσης επιτυγχάνεται εκτός του προωστικού ακροφυσίου

*ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ*

και επειδή  $P_5 > P_\alpha$  θα υπάρχει μια επιπρόσθετη ώση πίεσης (pressure thrust). Σ' αυτήν την περίπτωση η συνολική ώση δίδεται από την γενικότερη έκφραση :

$$F = m(C_5 - C_\alpha) + (P_5 - P_\alpha)A_5 \quad (11.21)$$

Για να σχηματίσουμε τις καμπύλες της ώσης του στροβιλοκινητήρα για το πλήρες εύρος λειτουργικών πιέσεων και θερμοκρασιών εισόδου, ταχυτήτων πτήσης και στροφών χρησιμοποιούνται οι πληροφορίες που λαμβάνονται από το διάγραμμα λειτουργίας ισορροπίας. Για κάθε σημείο λειτουργίας του διαγράμματος οι τιμές όλων των θερμοδυναμικών παραμέτρων όπως  $\frac{P_{01}}{P_\alpha}$ ,  $\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}$ ,  $\frac{P_{02}}{P_{01}}$ ,  $\frac{T_{03}}{T_{01}}$ ,  $\frac{T_{04}}{T_{03}}$ ,  $\frac{P_{03}}{P_{04}}$  και  $\frac{P_{04}}{P_\alpha}$  προσδιορίζονται για συγκεκριμένες τιμές των  $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$  και  $M_\alpha$  (και του  $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$  μόνο στην περιοχή που το ακροφύσιο είναι στραγγαλισμένο). Η ώση τελικά μπορεί να εκφρασθεί συναρτήσει αυτών των αδιάστατων παραμέτρων. Έτσι η εξίσωση 11.21 μπορεί να εκφρασθεί ως :

$$\frac{F}{P_\alpha} = \frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}} \frac{P_{01}}{P_\alpha} \left[ \frac{C_5}{\sqrt{T_{04}}} \sqrt{\left(\frac{T_{04}}{T_{03}} \times \frac{T_{03}}{T_{01}}\right)} - \frac{C_\alpha}{\sqrt{T_{01}}} \right] + \left(\frac{P_5}{P_\alpha} - 1\right) A_5 \quad (11.22)$$

(Η πραγματική αδιάστατη ώση είναι  $\frac{F}{(P_\alpha D^2)}$  αλλά για μηχανή με δεδομένη γεωμετρία η χαρακτηριστική διάσταση μπορεί να παραλειφθεί). Χρησιμοποιώντας και την εξίσωση 11.17 έχουμε :

$$\frac{C_\alpha}{\sqrt{T_{01}}} = \frac{C_\alpha}{\sqrt{T_{0\alpha}}} = \frac{M_\alpha \sqrt{\gamma R}}{\sqrt{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_\alpha^2\right)}}$$

Όταν το ακροφύσιο δεν είναι στραγγαλισμένο το  $\frac{C_5}{\sqrt{T_{04}}}$  μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση 11.13 με το  $P_{04}/P_5$  να αντικαθίσταται από το  $P_{04}/P_\alpha$  και τότε η ώση πίεσης είναι

μηδέν διότι  $P_5=P_a$ . Όταν το ακροφύσιο είναι στραγγαλισμένο το  $\frac{C_5}{\sqrt{T_{04}}}$  δίδεται από την

εξίσωση 11.18 και το  $P_5/P_a$  μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση :

$$\frac{P_5}{P_a} = \frac{P_5}{P_{04}} \times \frac{P_{04}}{P_a} = \frac{P_c}{P_{04}} \times \frac{P_{04}}{P_a}$$

όπου  $P_c/P_{04}$  είναι το αντίστροφο του κρίσιμου λόγου που δίδεται από την εξίσωση 11.15 δηλαδή είναι συνάρτηση του  $\gamma$  του αέρα και της απόδοσης του ακροφυσίου  $\eta_j$ . Το  $P_{04}/P_a$  υπολογίζεται από την εξίσωση 11.19. Στο σχήμα 11.15 δείχνεται μια τυπική μεταβολή της ώσης συναρτήσει των στροφών και της ταχύτητας πτήσης για διάφορους αριθμούς πτήσης  $M_a$ . Η μεταβλητή του οριζόντιου άξονα είτε μπορεί να μείνει ως δείχνεται,  $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$ ,

είτε μπορεί να μετατραπεί σε  $\frac{N}{\sqrt{T_a}}$  χρησιμοποιώντας την σχέση :

$$\frac{N}{\sqrt{T_a}} = \frac{N}{\sqrt{T_{01}}} \times \sqrt{\frac{T_{01}}{T_a}} \quad \text{και} \quad \frac{T_{01}}{T_a} = \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_a^2 \right)$$

Αν και είναι πίο σύνηθες η λειτουργική απόδοση και συμπεριφορά να εκφράζεται συναρτήσει των «αδιάστατων» στροφών, αυτό που θέτει το πραγματικά σημαντικό όριο (λόγω των μηχανικών τάσεων των πτερυγίων του στροβίλου) είναι οι πραγματικές στροφές  $N$ . Λόγω δε της έντονης εξάρτησης της ώσης από τις στροφές χρειάζεται απαραίτητα ακριβής έλεγχος των στροφών. Εάν οι στροφές ρυθμιστούν σε τιμή χαμηλότερη του ορίου, η μέγιστη απαιτούμενη ώση κατά την απογείωση θα ελαττωθεί σημαντικά. Εάν τώρα οι στροφές υπερβούν το όριο το πρόβλημα γίνεται ακόμη πιο σοβαρό μια και η φυγοκεντρική καταπόνηση των πτερυγίων αυξάνεται με το τετράγωνο των στροφών αλλά και επίσης αυξάνει σημαντικά και γρήγορα η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο. Αυτό το τελευταίο μπορεί να γίνει αντιληπτό από τον τρόπο που η γραμμή λειτουργίας τέμνει τις γραμμές  $T_{03}/T_{01}$  στο σχήμα 11.14. Τυπικά μια αύξηση 2% στις στροφές υπεράνω του ορίου μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα μια αύξηση της  $T_{03}$  κατά 50 K. Επειδή η διάρκεια ζωής των πτερυγίων προσδιορίζεται από την αντοχή σε ερπυσμό ο χρόνος που επιτρέπονται οι υψηλές στροφές ελέγχεται αυστηρά. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες στροφές φυσιολογικά περιορίζονται σε περιόδους μικρότερες των 5 min και αντιστοιχούν στην τιμή των στροφών της απογείωσης

*ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ*

(take-off rating). Η τιμή των στροφών κατά την ανύψωση (climb rating) προκύπτει από μικρή ελάττωση καυσίμου και συνεπώς στροφών και συνήθως αντιστοιχεί σε μια περίοδο 30 min. Η τιμή των στροφών σταθερής πλεύσης (cruise rating) προκύπτει από την περαιτέρω ελάττωση καυσίμου και στροφών που επιτρέπεται για λειτουργία απεριορίστου χρόνου. Οι τιμές αυτές των στροφών (ratings) για τον κινητήρα Rolls-Royce Viper 20 σε στατική κατάσταση σε επίπεδο θαλάσσης (Sea Level Static-SLS) δίδονται στον παρακάτω πίνακα (Cohen et al (1972)). Η μηχανή αυτή είναι ένα απλό turbojet με χαμηλό λόγο πιέσεων.

Rolls-Royce Viper 20, SLS, συνθήκες ISA

|                   | Στροφες μηχανης<br>(% $N_{max}$ ) | Ώση<br>(KN) | s.f.c.<br>$\left( \frac{Kg}{KN h} \right)$ |
|-------------------|-----------------------------------|-------------|--|
| Απογείωση (5 min) | 100                               | 13.35       | 100.4                                      |
| Ανύψωση (30 min)  | 98                                | 12.30       | 95.2                                       |
| Σταθερή πτήση     | 95                                | 10.90       | 95.1                                       |

Ένας άλλος σημαντικός παράγων λειτουργίας για τον κατασκευαστή και τον χρήστη είναι η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος επί των στροφών απογείωσης (take-off rating). Με την βοήθεια του διαγράμματος λειτουργίας βλέπουμε ότι μια αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος  $T_a$ , ενώ η μηχανή λειτουργεί υπό σταθερές μέγιστες στροφές, θα επιφέρει μια ελάττωση του  $\frac{N}{\sqrt{T_a}}$  η  $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$ . Αυτό θα προκαλέσει μια μετάθεση του σημείου λειτουργίας κατά μήκος της γραμμής λειτουργίας προς χαμηλότερες τιμές των  $\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}$  και  $\frac{P_{02}}{P_{01}}$  πράγμα που αντιστοιχεί σε μείωση των στροφών. Σε συνδυασμό και με την ελάττωση της παροχής, λόγω υψηλότερων θερμοκρασιών περιβάλλοντος το αποτέλεσμα αυτής της θερμοκρασιακής αύξησης είναι μια σημαντική ελάττωση της ώσης όπως δείχνεται στο σχήμα 11.15. Πέραν αυτών η αύξηση της  $T_a$  προκαλεί και αύξηση στην θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου και συνήθως είναι αναγκαίο να ελαττωθούν οι στροφές με συνέπεια περαιτέρω μείωση της ώσης. Το σχήμα 11.15 επίσης δείχνει ότι η ώση μεταβάλλεται ανάλογα με την πίεση περιβάλλοντος-λόγω μείωσης της παροχής με ελάττωση της πίεσης περιβάλλοντος. Σύμφωνα με τον ISA η πίεση και η θερμοκρασία ελαττώνονται με το ύψος (βλέπε κεφάλαιο 2) και η θερμοκρασία μένει σταθερή από τα 11000 m και πάνω. Λόγω της γραμμικής εξάρτησης της ώσης από την πίεση η ελάττωση της ώσης με ελάττωση της πίεσης

υπερβαίνει την αύξηση της ώσης λόγω της ελάττωσης της θερμοκρασίας. Έτσι η ώση μιας μηχανής ελαττώνεται με αύξηση του υψομέτρου και είναι σύνηθες τα αεροσκάφη να μειώνουν το χρήσιμο φορτίο τους (payload) σε αεροδρόμια που είναι σε υψόμετρο. Το αεροδρόμιο της Πόλης του Μεξικού είναι ένα παράδειγμα.

**Δ. Μεταβολή της κατανάλωσης συναρτήσει των στροφών, της ταχύτητας και του ύψους πτήσης.**

Η κατανάλωση του στροβιλοκινητήρα σε συνδυασμό με το μέγεθος της δεξαμενής καυσίμων του αεροσκάφους προσδιορίζουν την ακτίνα δράσης του και η ειδική κατανάλωση καυσίμου, sfc, (παροχή καυσίμου ανά μονάδα ώσης του κινητήρα) είναι ένας κατάλληλος δείκτης του πόσο οικονομική είναι η μονάδα. Η sfc μπορεί να υπολογισθεί συναρτήσει των

$$\frac{N}{\sqrt{T_a}} \text{ η } \frac{N}{\sqrt{T_{01}}} \text{ και } M_a. \text{ Με δεδομένη την απόδοση καύσης } \eta_b \text{ η κατανάλωση μπορεί να}$$

υπολογισθεί από την παροχή αέρα και το διάγραμμα του σχήματος 2.15 για τον λόγο καυσίμου/αέρα, f, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 11.3.1 για τον μονοαξονικό αεριοστρόβιλο. Με δεδομένες τιμές για τα  $P_a$ ,  $T_a$  προκύπτουν τα m,  $T_{03}$  και  $T_{02}$  και η παροχή καυσίμου είναι λοιπόν, εν γένει, συνάρτηση των

$$\frac{N}{\sqrt{T_a}}, M_a, P_a \text{ και } T_a. \text{ Η εξάρτηση της}$$

παροχής καυσίμου μπορεί να απαλοφεί σχεδιάζοντας τα αποτελέσματα συναρτήσει της

$$\text{αδιάστατης παροχής καυσίμου, } \frac{m_f Q_{net,p}}{D^2 P_a \sqrt{T_a}}. \text{ Για δεδομένο καύσιμο και μηχανή η καλορική}$$

τιμή και η χαρακτηριστική διάσταση διαγράφονται και στην πράξη χρησιμοποιείται η

$$\text{παράμετρος } \frac{m_f}{P_a \sqrt{T_a}}. \text{ Το σχήμα 11.16α δείχνει μια τυπική ομάδα καμπυλών κατανάλωσης.}$$

Αντίθετα με την  $F/P_a$  η παράμετρος καυσίμου εξαρτάται ασθενώς από τον  $M_a$  (ως εξαρτώμενη κυρίως από την μεταβολή στις συνθήκες εισόδου του συμπιεστή και όχι από την

$$\text{ορμή οπισθέλκουσας). Εάν το } \frac{m_f}{P_{01} \sqrt{T_{01}}} \text{ σχεδιαστεί συναρτήσει του } \frac{N}{\sqrt{T_{01}}} \text{ όπως στο σχήμα}$$

11.16 β οι καμπύλες συμπίπτουν όταν το ακροφύσιο είναι στραγγαλισμένο. Εδώ θα πρέπει να υποσημειωθεί ότι αν και η απόδοση καύσης είναι υψηλή και σταθερή για το μέγιστο τμήμα του εύρους λειτουργίας, μπορεί να ελαττωθεί δραματικά σε μεγάλα ύψη λόγω χαμηλών πιέσεων στον θάλαμο καύσης. Καμπύλες "αδιάστατων" sfc προκύπτουν με συνδυασμό των δεδομένων των σχημάτων 11.15 και 11.16α. Το σχήμα 11.17 δείχνει την

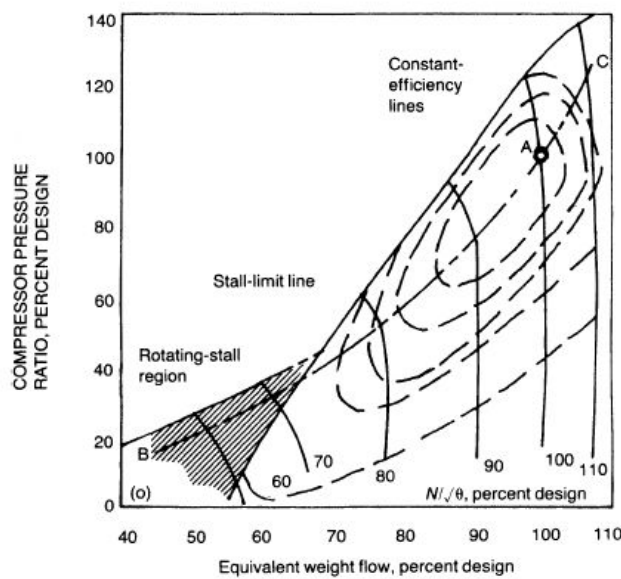
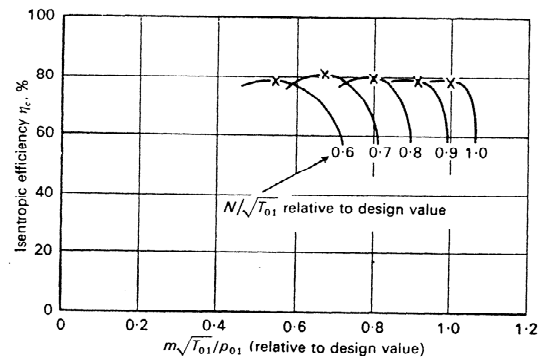
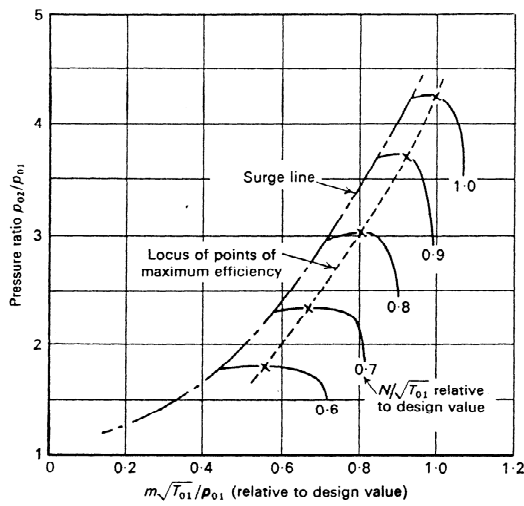
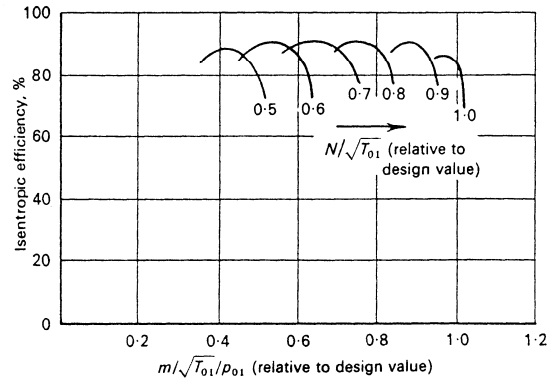
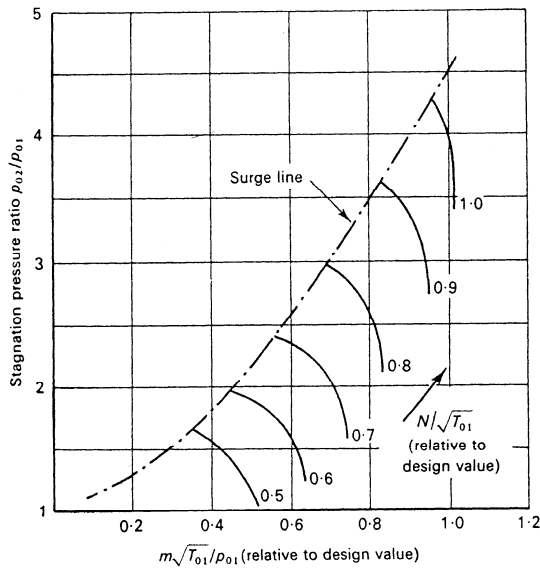
$$\text{παράμετρο } \frac{sfc}{\sqrt{T_a}} \text{ σχεδιασμένη συναρτήσει του } \frac{N}{\sqrt{T_{01}}} \text{ για διάφορες τιμές του } M_a. \text{ Εμφανώς η}$$



*ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΩΝ*

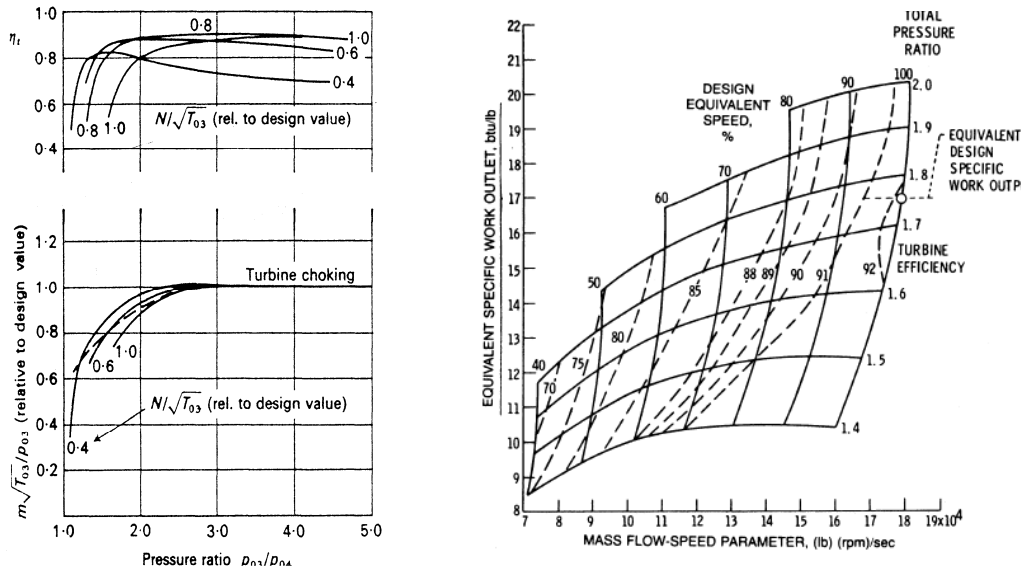
sfc αυξάνεται με αύξηση του ύψους λόγω ελάττωσης της θερμοκρασίας. Επειδή το sfc είναι συνάρτηση μόνο του  $\sqrt{T_a}$  και όχι του  $P_a$  η επίδραση του ύψους δεν είναι τόσο έντονη όπως στην περίπτωση της ώσης. Τυπικά διαγράμματα της sfc συναρτήσει του ύψους πτήσης και του αριθμού Mach πτήσης δείχνονται στα σχήματα 11.18 α, β, γ. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνει με τον αριθμό Mach. Η ώση αρχικά ελαττώνεται με τον  $M_a$  και κατόπιν αυξάνει όταν η επίδραση του «εμβολισμού» στο τμήμα εισόδου υπερβαίνει την επίδραση της αύξησης της ώσης οπισθέλκουσας (momentum thrust). Η παροχή καυσίμου όμως θα αυξάνει σταθερά με τον αριθμό Mach λόγω της αυξημένης παροχής αέρα και της υψηλότερης πίεσης λίμνασης στο τμήμα εισόδου και αυτή είναι η επίδραση που κυριαρχεί.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΩΝ

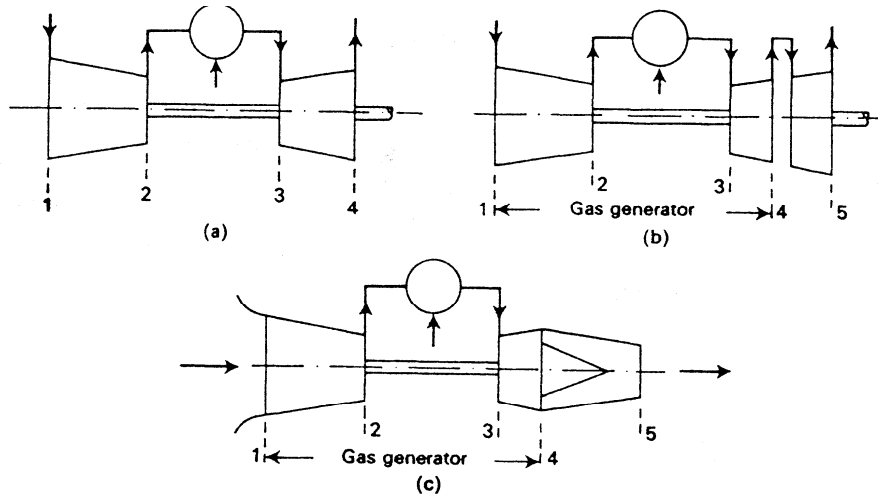


Σχήμα 11.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες και διαγράμματα λειτουργίας συμπιεστή α)αξονικός, β)φυγοκεντρικός, γ)γενική μορφή – αξονικός

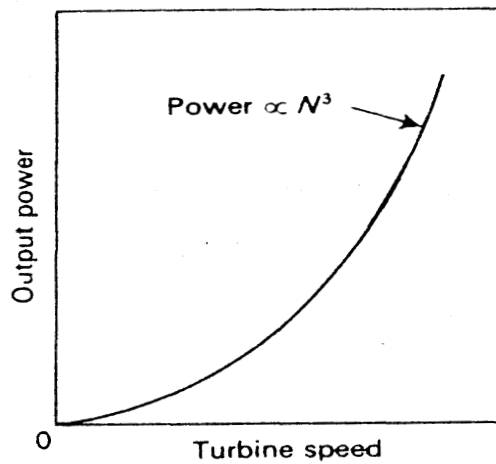
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ



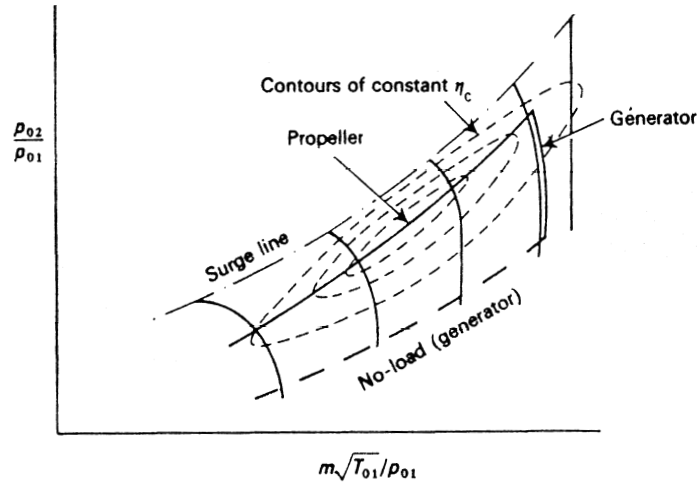
Σχήμα 11.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες και διαγράμματα λειτουργίας στροβίλου.



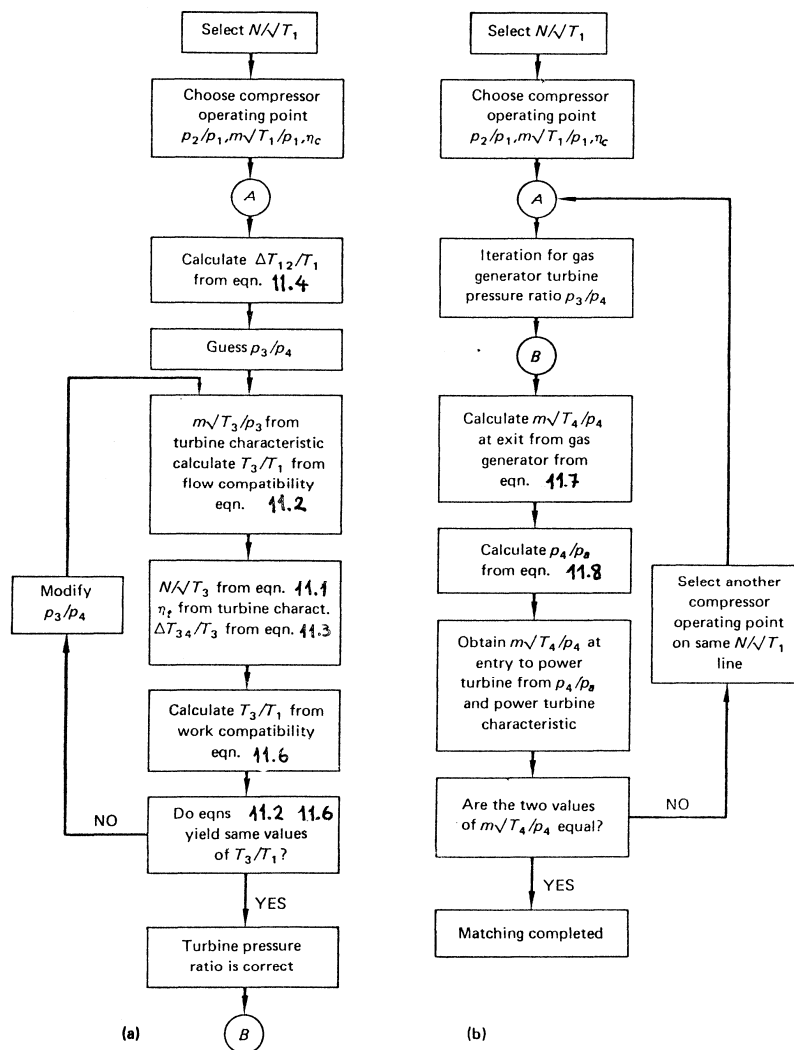
Σχήμα 11.3 Απλές μονάδες αεροστροβίλων



Σχήμα 11.4 Χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου

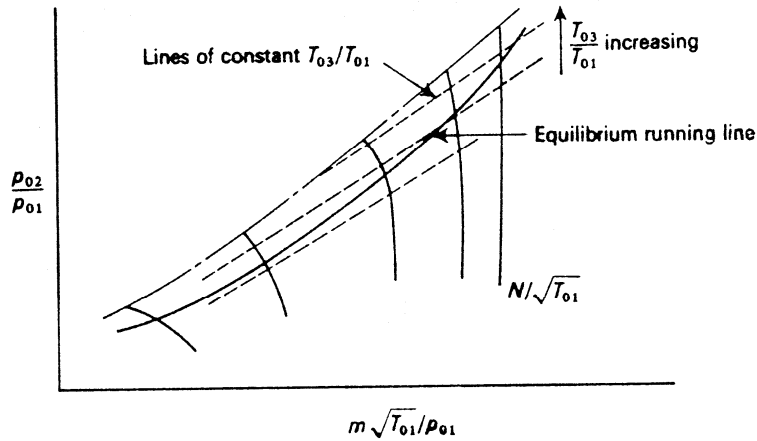


Σχήμα 11.5 Γραμμές λειτουργίας ισορροπίας

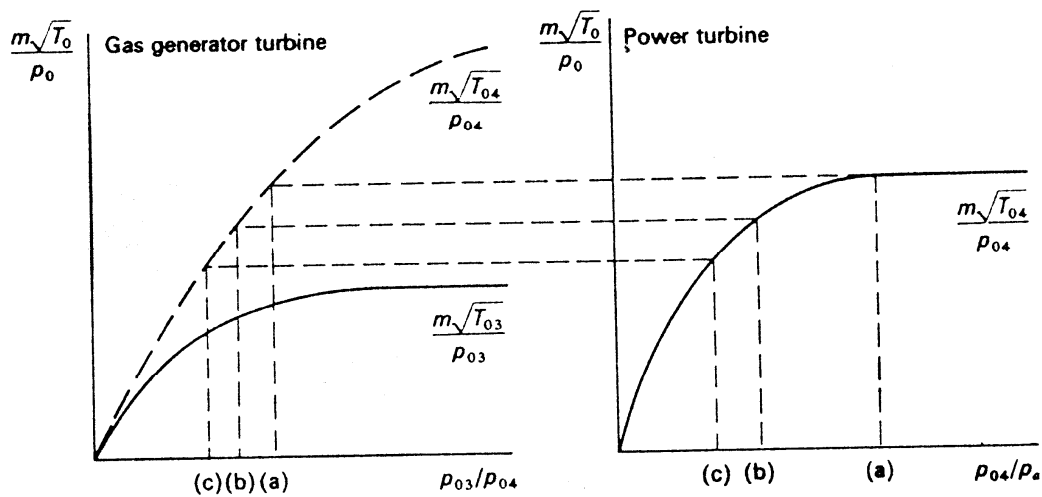


Σχήμα 11.6 α) Επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού αερογεννήτριας  
β) συνολική επαναληπτική διαδικασία για μονάδα με ελεύθερο στρόβιλο ισχύος (Cohen et al (1972))

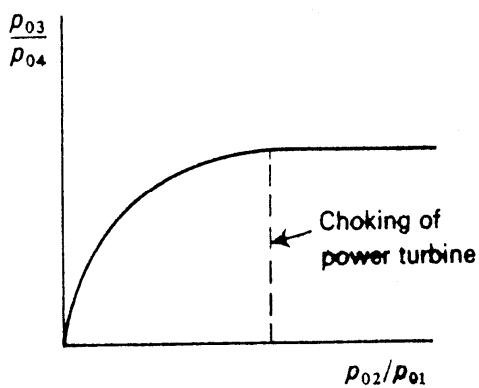
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ



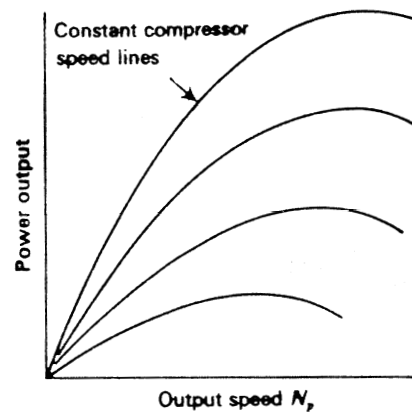
Σχήμα 11.7 Γραμμή λειτουργίας ισορροπίας για ελεύθερο στρόβιλο



Σχήμα 11.8 Λειτουργία στροβίλων εν σειρά

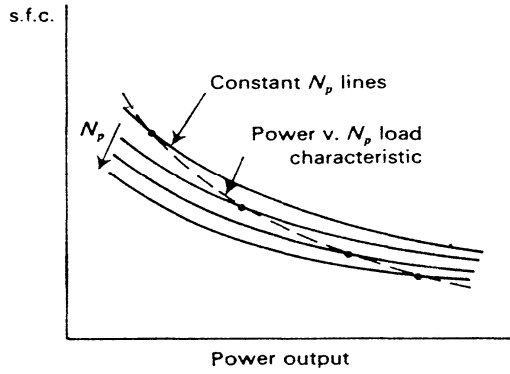


Σχήμα 11.9 Λειτουργία ελεύθερου στρόβιλου υπό στραγγαλισμό της ροής

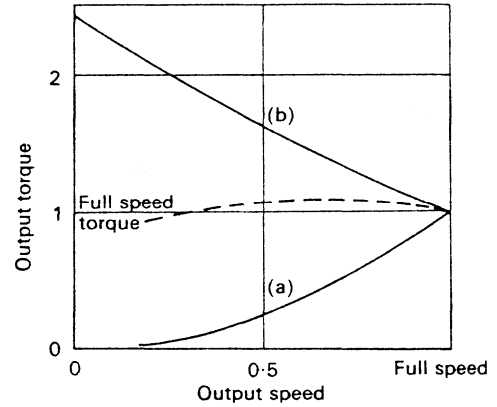


Σχήμα 11.10 Διάγραμμα λειτουργίας ελεύθερου στρόβιλου: Ισχύς συναρτήσσει των στροφών

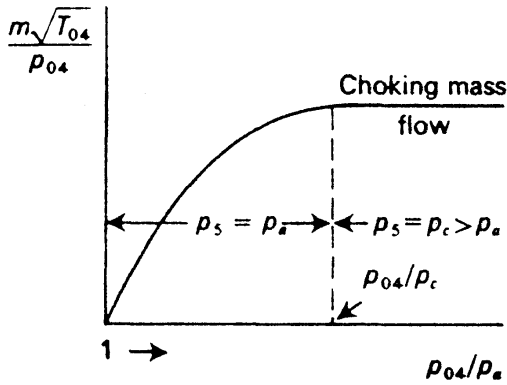
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ



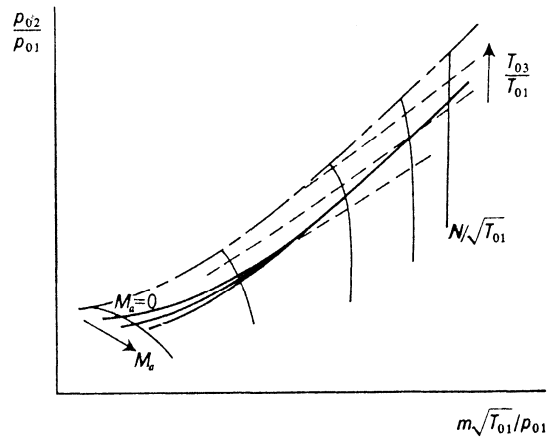
Σχήμα 11.11 Διάγραμμα λειτουργίας ελεύθερου στροβίλου: κατανάλωση συναρτήσει της ισχύος



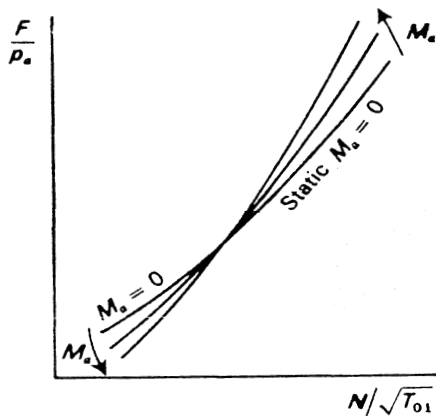
Σχήμα 11.12 Διάγραμμα λειτουργίας ελεύθερου στροβίλου: ροπή συναρτήσει των στροφών



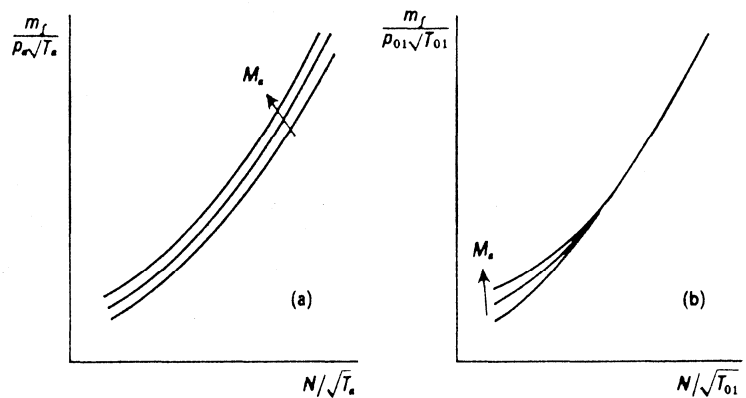
Σχήμα 11.13 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας ακροφυσίου



Σχήμα 11.14 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας στροβιλοκινητήρα turbojet

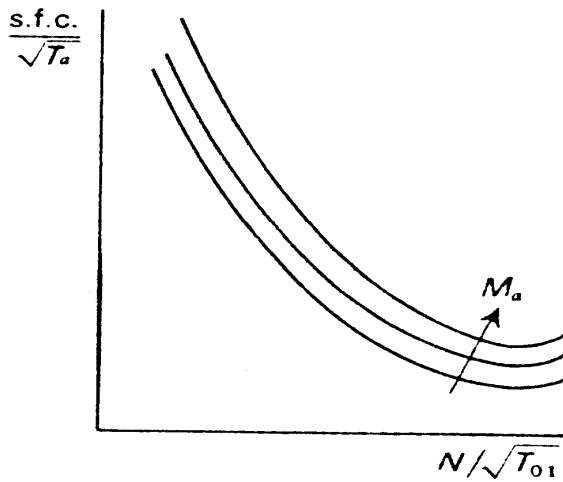


Σχήμα 11.15 Τυπικές καμπύλες ώσης στροβιλοκινητήρα turbojet

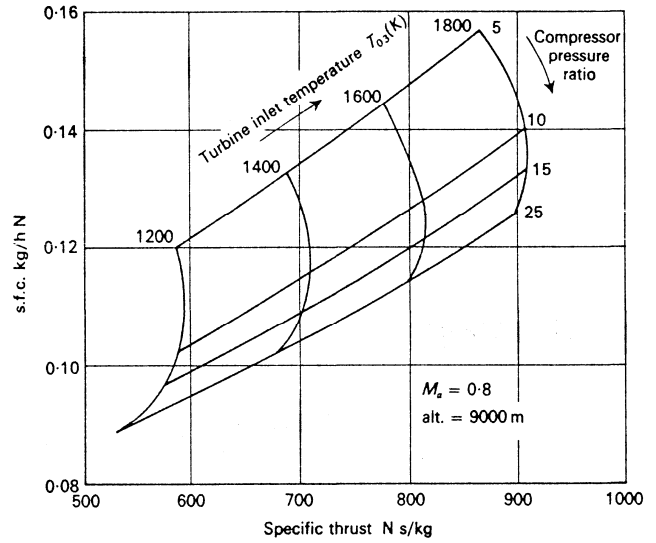


Σχήμα 11.16 Τυπικές καμπύλες κατανάλωσης στροβιλοκινητήρα turbojet

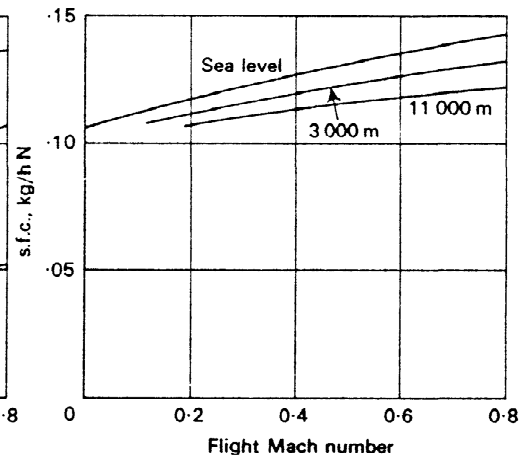
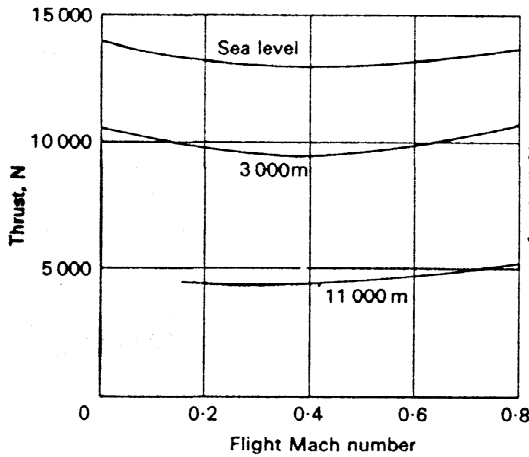
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ



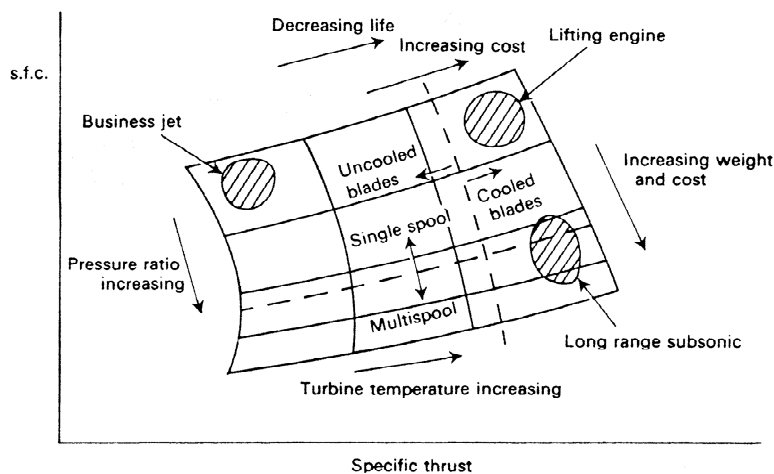
Σχήμα 11.17 Τυπικές καμπύλες sfc



Σχήμα 11.18α) Τυπική λειτουργική απόδοση στροβιλοκινητήρα turbojet



Σχήμα 11.18β) Τυπική απόκλιση ώσης και sfc συναρτήσει του αριθμού Mach και του κύκλου πτήσης για στροβιλοκινητήρα turbojet



Σχήμα 11.18γ) Περιοχές λειτουργίας και επιδόσεις μηχανών turboprop

*ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

THE INTERNATIONAL  
STANDARD ATMOSPHERE (I.S.A.)

| ALTITUDE<br>(h) |         | AMBIENT TEMPERATURE<br>(T <sub>0</sub> )                              |         |         | AMBIENT PRESSURE<br>(P <sub>0</sub> ) |           | SPEED OF SOUND<br>(a <sub>0</sub> )                              |       |         |
|-----------------|---------|---|---------|---------|---------------------------------------|-----------|--|-------|---------|
| Feet            | Metres  | Deg. K.   | Deg. C. | Deg. F. | lb./sq. in.                           | millibars | ft./sec.   | knots | m./sec. |
| -1,000          | -304.8  | 290.13  | +16.98  | 62.6    | 15.24                                 | 1050.4    | 1120.3   | 663.3 | 341.5   |
| 0               | 0       | 288.15  | 15.00   | 59.0    | 14.69                                 | 1013.2    | 1116.6   | 661.1 | 340.3   |
| +1,000          | +304.8  | 286.17  | 13.02   | 55.4    | 14.17                                 | 977.1     | 1112.6   | 658.8 | 339.1   |
| 2,000           | 609.6   | 284.19  | 11.04   | 51.9    | 13.66                                 | 942.1     | 1108.7   | 656.5 | 337.9   |
| 3,000           | 914.4   | 282.21  | 9.06    | 48.3    | 13.17                                 | 908.1     | 1104.9   | 654.2 | 336.8   |
| 4,000           | 1219.2  | 280.23  | 7.08    | 44.7    | 12.69                                 | 875.1     | 1100.9   | 651.9 | 335.6   |
| 5,000           | 1524.0  | 278.24  | 5.09    | 41.2    | 12.23                                 | 843.0     | 1097.1   | 649.6 | 334.4   |
| 6,000           | 1828.8  | 276.26  | 3.11    | 37.6    | 11.78                                 | 811.9     | 1093.2   | 647.8 | 333.2   |
| 7,000           | 2133.6  | 274.28  | 1.13    | 34.0    | 11.34                                 | 781.8     | 1089.3   | 644.9 | 332.0   |
| 8,000           | 2438.4  | 272.30  | -0.85   | 30.5    | 10.92                                 | 752.6     | 1085.3   | 642.6 | 330.8   |
| 9,000           | 2743.2  | 270.32  | -2.83   | 26.9    | 10.51                                 | 724.3     | 1081.4   | 640.3 | 329.6   |
| 10,000          | 3048.0  | 268.34  | -4.81   | 23.3    | 10.11                                 | 696.8     | 1077.4   | 637.9 | 328.4   |
| 11,000          | 3352.8  | 266.36  | -6.79   | 19.8    | 9.72                                  | 670.2     | 1073.4   | 635.6 | 327.2   |
| 12,000          | 3657.6  | 264.38  | -8.77   | 16.2    | 9.35                                  | 644.4     | 1069.4   | 633.2 | 325.9   |
| 13,000          | 3962.4  | 262.39  | -10.76  | 12.6    | 8.98                                  | 619.4     | 1065.4   | 630.8 | 324.7   |
| 14,000          | 4267.2  | 260.41  | -12.74  | 9.1     | 8.63                                  | 595.2     | 1061.4   | 628.4 | 323.5   |
| 15,000          | 4572.0  | 258.43  | -14.72  | 5.5     | 8.29                                  | 571.7     | 1057.3   | 626.0 | 322.3   |
| 16,000          | 4876.8  | 256.45  | -16.70  | 1.9     | 7.97                                  | 549.1     | 1053.3   | 623.6 | 321.1   |
| 17,000          | 5181.6  | 254.47  | -18.68  | -1.6    | 7.65                                  | 527.2     | 1049.2   | 621.2 | 319.8   |
| 18,000          | 5486.4  | 252.49  | -20.66  | -5.2    | 7.34                                  | 505.9     | 1045.1   | 618.8 | 318.5   |
| 19,000          | 5791.2  | 250.51  | -22.64  | -8.8    | 7.04                                  | 485.6     | 1040.9   | 616.4 | 317.3   |
| 20,000          | 6096.0  | 248.53  | -24.62  | -12.3   | 6.75                                  | 465.6     | 1036.9   | 613.9 | 316.1   |
| 21,000          | 6400.8  | 246.54  | -26.61  | -15.9   | 6.48                                  | 446.4     | 1032.7   | 611.5 | 314.8   |
| 22,000          | 6705.6  | 244.56  | -28.59  | -19.5   | 6.21                                  | 427.9     | 1028.6   | 609.0 | 313.5   |
| 23,000          | 7010.4  | 242.58  | -30.57  | -23.0   | 5.95                                  | 409.9     | 1024.4   | 606.5 | 312.2   |
| 24,000          | 7315.2  | 240.60  | -32.55  | -26.6   | 5.69                                  | 392.7     | 1020.2   | 604.1 | 310.9   |
| 25,000          | 7620.0  | 238.62  | -34.53  | -30.2   | 5.45                                  | 375.9     | 1015.9   | 601.6 | 309.7   |
| 26,000          | 7924.8  | 236.64  | -36.51  | -33.7   | 5.22                                  | 359.9     | 1011.8   | 599.1 | 308.4   |
| 27,000          | 8229.6  | 234.66  | -38.49  | -37.3   | 4.99                                  | 344.3     | 1007.5   | 596.6 | 307.1   |
| 28,000          | 8534.4  | 232.68  | -40.47  | -40.9   | 4.78                                  | 329.3     | 1003.2   | 594.0 | 305.8   |
| 29,000          | 8839.2  | 230.69  | -42.46  | -44.4   | 4.57                                  | 314.8     | 998.9  | 591.5 | 304.5   |
| 30,000          | 9144.0  | 228.71  | -44.44  | -48.0   | 4.36                                  | 300.9     | 994.7  | 588.9 | 303.2   |
| 31,000          | 9448.8  | 226.73  | -46.42  | -51.6   | 4.17                                  | 287.4     | 990.3  | 586.4 | 301.9   |
| 32,000          | 9753.6  | 224.75  | -48.40  | -55.1   | 3.98                                  | 274.5     | 986.0  | 583.8 | 300.5   |
| 33,000          | 10058.4 | 222.77  | -50.38  | -58.7   | 3.80                                  | 261.9     | 981.7  | 581.2 | 299.2   |
| 34,000          | 10363.2 | 220.79  | -52.36  | -62.3   | 3.63                                  | 249.9     | 977.3  | 578.7 | 297.9   |
| 35,000          | 10668.0 | 218.81  | -54.34  | -65.8   | 3.46                                  | 238.4     | 972.9  | 576.1 | 296.5   |
| 36,000          | 10972.8 | 216.83  | -56.32  | -69.4   | 3.29                                  | 227.3     | 968.5  | 573.4 | 295.2   |
| 36,089          | 11000.0 | 216.65  | -56.50  | -69.7   | 3.28                                  | 226.3     | 968.1  | 573.2 | 295.1   |
| 37,000          | 11277.6 | Ambient temperature remains constant from this point up to 65,617 ft. |         |         | 3.14                                  | 216.6     | Speed of sound remains constant from this point up to 65,617 ft. |       |         |
| 38,000          | 11582.4 |   |         |         | 2.99                                  | 206.5     |  |       |         |
| 39,000          | 11887.2 |   |         |         | 2.85                                  | 196.8     |  |       |         |
| 40,000          | 12192.0 |   |         |         | 2.72                                  | 187.5     |  |       |         |
| 45,000          | 13716.0 |   |         |         | 2.14                                  | 147.5     |  |       |         |
| 50,000          | 15240.0 |   |         |         | 1.68                                  | 115.9     |  |       |         |
| 55,000          | 16764.0 |   |         |         | 1.32                                  | 91.2      |  |       |         |
| 60,000          | 18288.0 |   |         |         | 1.04                                  | 71.7      |  |       |         |
| 65,000          | 19812.0 |   |         |         | 0.82                                  | 56.4      |  |       |         |