

ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

Ο ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ : Υπολογισμός θερμοδυναμικών παραμέτρων αεριοστροβίλου

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΤΣΙΡΩΖΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, ΔΟΜΟΧΤΟΥΔΗΣ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Διβινής Νικόλαος

ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ

2017

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ : Υπολογισμός θερμοδυναμικών παραμέτρων αεριοστροβίλου

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΤΣΙΡΩΖΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, ΔΟΜΟΧΤΟΥΔΗΣ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΑΜ : 5166, 4840

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ : 26/06/2017

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν ο υπολογισμός θερμοδυναμικών παραμέτρων αεριοστροβίλου, όπως αυτή διδάσκεται στα πλαίσια της θερμοδυναμικής II της σχολής μηχανικών εμπορικού ναυτικού Μακεδονίας, με την χρήση υπολογιστικού φύλλου excel.

Αυτό συμπεριλαμβάνει μια σειρά δεκαέξι βημάτων για τον υπολογισμό π.χ. του λόγου πιέσεων, της θερμοκρασίας του αέρα μετά τη συμπίεσή του, της θερμοκρασίας των καυσαερίων μετά την εκτόνωση τους, της θερμοκρασίας του συμπιεστή κατά την συμπίεση, της θερμοκρασίας του στροβίλου, το έργο που παράγει ο στρόβιλος και άλλων θερμοδυναμικών παραμέτρων. Επιπρόσθετα δημιουργήθηκαν διαγράμματα με την βοήθεια των οποίων έγινε σύγκριση σημαντικών παραμέτρων σε διάφορες περιπτώσεις.

Abstract

The purpose of this undergraduate thesis is to calculate - with the aid of excel- air turbine thermodynamic parameters.

This includes a series of sixteen steps in order to calculate i.e. pressure ratio, after compression air temperature, exhaust temperature, turbine temperature, turbine work. In addition, diagrams were created in order to compare several important thermodynamic parameters in various cases.

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Η επιστήμη της θερμοδυναμικής έχει τη βάση της σε τρεις θεμελιώδεις νόμους. Μέσα από τους νόμους εισάγονται δύο κεντρικές της έννοιες, η ενέργεια και η εντροπία.

Νόμοι της θερμοδυναμικής

Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής

Το ποσό θερμότητας (Q) που απορροφά ή αποβάλλει ένα θερμοδυναμικό σύστημα είναι ίσο με το αλγεβρικό άθροισμα της μεταβολής της εσωτερικής του ενέργειας και του έργου που παράγει ή δαπανά το σύστημα.

Η μαθηματική διατύπωση του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου είναι:

$$Q = \Delta U + W$$

όπου ΔU είναι η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος που μελετούμε, και W το έργο (που μπορεί να είναι μηχανικό, ηλεκτρικό, μαγνητικό, κτλ.) που παράγεται από το σύστημα και το ποσό της θερμότητας που απορροφά το σύστημα από το περιβάλλον του.

Ο **δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος** είναι ο ένας σημαντικός νόμος της θερμοδυναμικής. Υπάρχουν δύο ισοδύναμες βασικές διατυπώσεις του νόμου:

- *Κάθε θερμική μηχανή έχει απώλειες ενέργειας.*
- *Για τη λειτουργία μιας ψυκτικής μηχανής απαιτείται καταβολή ενέργειας.*

Ο **τρίτος νόμος** της θερμοδυναμικής ορίζει ότι η εντροπία ενός συστήματος σε απόλυτη θερμοκρασία ($T = 0 \text{ K}$) είναι μηδέν (δηλαδή $S = 0$). Η φυσική ερμηνεία αυτού του νόμου, υποδεικνύει ότι είναι αδύνατον η θερμοκρασία ενός συστήματος να φτάσει μέσω μιας διεργασίας στο απόλυτο μηδέν της κλίμακας Κέλβιν σε πεπερασμένο αριθμό βημάτων.

Οι δύο βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τη λειτουργία των αεριοστροβίλων είναι:

1. η απόδοση κάθε τμήματος (στρόβιλος, συμπιεστής, καυστήρας, εναλλάκτης κλπ.) και
2. η θερμοκρασία λειτουργίας (που εξαρτάται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται)

Πρέπει να τονισθεί ότι στον αεριοστρόβιλο οι διαδικασίες **συμπύεση - καύση - εκτόνωση** δεν γίνονται στην ίδια "μονάδα" όπως στους παλινδρομικούς κινητήρες. Οι διαδικασίες γίνονται σε ξεχωριστές "μονάδες", που λέγονται συνιστώσες του κινητήρα, και οι οποίες διαχωρίζονται με την έννοια ότι σχεδιάζονται, ελέγχονται και αναπτύσσονται χωριστά.

Οι αεριοστρόβιλοι κατατάσσονται σε δύο διακεκριμένες κατηγορίες του ανοικτού κύκλου και του κλειστού κύκλου. Στους αεριοστρόβιλους ανοικτού κύκλου, πραγματοποιείται συνεχής εισροή ατμοσφαιρικού αέρα μέσα στο συμπιεστή και η ενέργεια προστίθεται με την καύση ενός καυσίμου εντός του αέρα.

Τα βασικά εξαρτήματα είναι : (α) Το τμήμα εισαγωγής (*intake*), (β) Ο συμπιεστής (*compressor*), (γ) Ο θάλαμος καύσης (*combustion chamber*), (δ) Ο στρόβιλος (*turbine*), (ε) Το τμήμα εξαγωγής (*nozzle*), (στ) Οι θερμικοί εναλλάκτες (*heat exchanger*).

Σήμερα υπάρχει μια τεραστία ποικιλία αεριοστροβίλων. Μερικές κατηγορίες διαχωρισμού των ειδών είναι και οι παρακάτω:

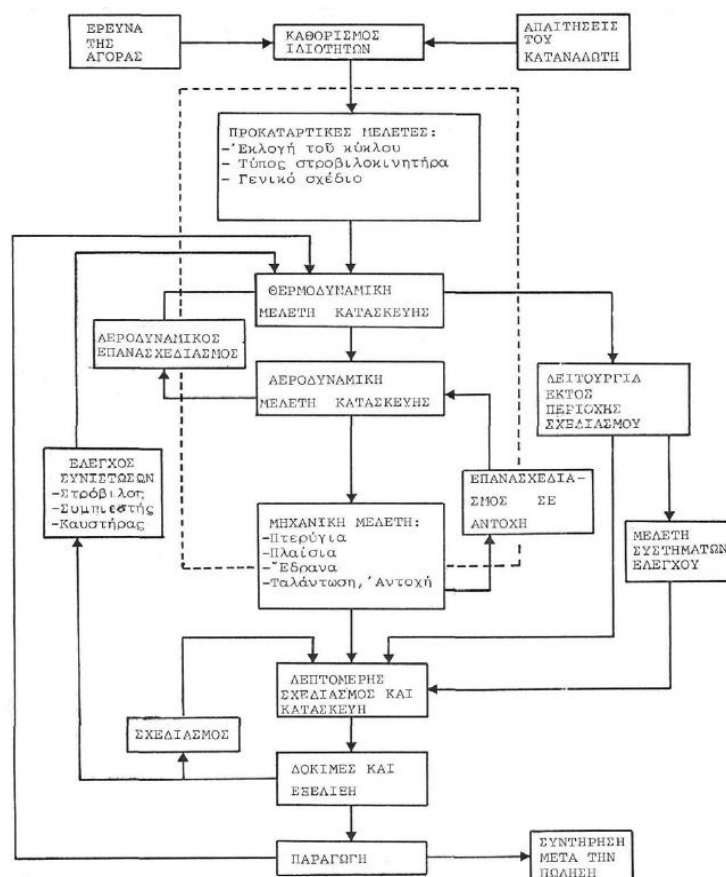
Κατά τον κύκλο, κατά τον άξονα, κατά τους θερμικούς εναλλάκτες και κατά την εφαρμογή.

Άλλα κύρια χαρακτηριστικά του κινητήρα πέρα από τα προαναφερθέντα είναι:

Η διαδικασία εκκίνησης, η διαδικασία διακοπής λειτουργίας και η επιτρεπόμενη περιοχή στροφών ανά λεπτό του άξονα.

Διαγραμμα σχεδιασμού ενός στροβιλοκινητήρα

Το σχήμα δίνει το αντιπροσωπευτικό διάγραμμα μιας τυπικής πορείας που ακολουθείται στο σχεδιασμό ενός αεριοστροβίλου. Οι διακεκομμένες γραμμές περιλαμβάνουν τα βασικά εσωτερικά βήματα του σχεδιασμού.



Περιγραφή αναφοράς κεφαλαίων

Στο δεύτερο κεφάλαιο, θα γίνει αναφορά στους κύκλους των αεριοστροβίλων και την ανάλυση τους καθώς και στις εξισώσεις ροής οι οποίες βοηθάνε στο σχεδιασμό των αεριοστροβίλων. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύετε η συμπιεστή ροή και οι εξισώσεις αυτής, μαζί με τα περιστρεφόμενα μέρη ενός αεριοστροβίλου. Στη συνέχεια, στο 4^ο κεφάλαιο αναπτύσσεται η θεωρία πτερυγώσεων η οποία περιλαμβάνει το ορισμό των πτερυγώσεων και τις παραμέτρους αυτής. Επίσης γίνεται αναφορά στις βαθμίδες αξονικών στροβίλων/συμπιεστών και τα εξαρτήματά τους. Στο 5^ο κεφάλαιο αναλύονται τα συστήματα θαλάμων καύσης αεριοστροβίλων συμπεριλαμβανομένων των γενικών χαρακτηριστικών λειτουργίας τους, τις απαιτήσεις απόδοσης και τα βασικά χαρακτηριστικά εξέλιξης και σχεδιασμού τους. Επίσης παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες και τα διαγράμματα λειτουργίας επιμέρους συνιστώσεων

Στο τελευταίο κεφάλαιο θα γίνει επίλυση ασκήσεων αεριοστροβίλου για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών παραμέτρων καθώς και δημιουργία διαγραμμάτων για τη σύγκριση των διαφόρων τιμών τους ανάλογα με τις συνθήκες της κάθε περίπτωσης.

Κεφάλαιο 2 - Ανάλυση Κύκλων και Εξισώσεις Ροής

Στην αρχή θα αναφερθεί ο ιδανικός κύκλος λειτουργίας, όπου το ειδικό έργο εξόδου και η απόδοση του κύκλου εξαρτώνται μόνο από το λόγο συμπίεσης και την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου. Οι καμπύλες λειτουργικής απόδοσης που προκύπτουν δείχνουν τα ανώτατα όρια λειτουργικής απόδοσης των πραγματικών κύκλων.

Χαρακτηριστικά ιδανικών κύκλων

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

1. Οι διαδικασίες συμπίεσης και εκτόνωσης είναι αντιστρεπτές και αδιαβατικές (δηλ. ισηντροπικές).
2. Η μεταβολή της κινητικής ενέργειας του αερίου μεταξύ εισόδου και εξόδου από κάθε συνιστώσα είναι αμελητέα.
3. Σε καμία συνιστώσα του κύκλου δεν εμφανίζονται απώλειες πίεσης.
4. Το αέριο διατηρεί την ίδια σύσταση εντός του κύκλου και είναι ιδανικό αέριο με σταθερές ειδικές θερμότητες.
5. Η παροχή μάζας παραμένει σταθερή.
6. Η μεταφορά θερμότητας στους εναλάκτες είναι «τέλεια» (χωρίς απώλειες).

Οι συνθήκες 4 και 5 ισχύουν με την έννοια ότι ο θάλαμος καύσης «αντικαθίσταται» από ένα θερμαντήρα που έχει μια εξωτερική πηγή θερμότητας. Έτσι στον υπολογισμό της λειτουργίας ενός ιδανικού κύκλου δεν λαμβάνεται υπ' όψιν αν πρόκειται για έναν ανοικτό ή κλειστό κύκλο

Κύκλοι ισχύος

Ο απλός ιδανικός κύκλος

Ο ιδανικός κύκλος λειτουργίας ενός απλού στροβιλοκινητήρα είναι ο κύκλος Joule (ή Brayton). Η εξίσωση της ενέργειας για το κύκλο αυτό είναι:

$$Q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2) + W$$

Όπου : Q =ειδική θερμότητα και W =ειδικό έργο ανα μονάδα μάζας

Η απόδοση του κύκλου αυτού εξαρτάται από:

1. Το λόγο πιέσεων (συμπίεσης)
2. Τη φύση του αερίου

Το ειδικό έργο εξόδου W . Από το οποίο εξαρτάται το μέγεθος της εγκατάστασης για δεδομένη ισχύ, εξάρταται όχι μόνο από το λόγο πιέσεων V_p αλλά και από τη μέγιστη θερμοκρασία T .

Η τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας T εξαρτάται από τα υλικά κατασκευής και συνήθως ονομάζεται «μεταλλουργικό όριο».

Τέλος το ειδικό έργο είναι μέγιστο όταν ο λόγος πιέσεων είναι τέτοιος που οι θερμοκρασίες εξόδου του συμπιεστή και του στροβίλου είναι ίσες.

Κύκλος με εναλλάκτη

Όταν η θερμοκρασία εξόδου του στροβίλου είναι μεγαλύτερη από αυτή του συμπιεστή μπορεί να αξιοποιηθεί ένας εναλλάκτης.

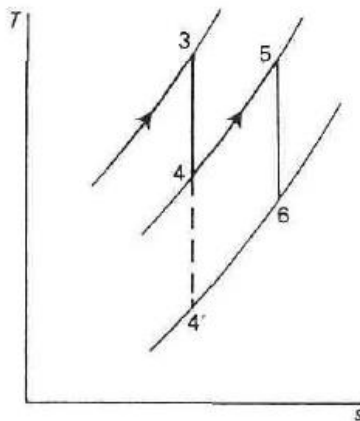
Η απόδοση του κύκλου με εναλλάκτη, εξαρτάται από την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου και αυξάνεται με το χρόνο. Όταν ο χρόνος είναι σταθερός, η απόδοση αυξάνεται όταν ο λόγος πιέσεων V_p μειώνεται (το αντίθετο συμβαίνει στον απλό κύκλο).

Με την προσθήκη του εναλλάκτη το ειδικό έργο εξόδου δεν μεταβάλλεται. Για να βελτιωθεί σημαντικά η απόδοση του κύκλου με εναλλάκτη θα πρέπει :

- (1) Η τιμή του r_p να είναι αρκετά μικρότερη από την βέλτιστη για την οποία αντιστοιχεί το μέγιστο ειδικό έργο εξόδου.
- (2) Εφ' όσον η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας του κύκλου αυξάνει δεν χρειάζεται να αυξηθεί η τιμή του λόγου πιέσεων (r_p)

Κύκλος με αναθέρμανση

Σημαντική αύξηση του ειδικού έργου επιτυγχάνεται με την αναθέρμανση του εκτονουμένου αερίου μεταξύ των στροβίλων υψηλής και χαμηλής πίεσης. Το σχήμα 2.1 δείχνει το σχετικό τμήμα του κυκλώ με αναθέρμανση στο T-S διαγράμμα. Επειδή η καθετη απόσταση μεταξύ ενός δεδομένου ζευγους ισοβαρων καμπυλων, στο T-S διαγραμμα, αυξάνει με την αύξηση της εντροπιας είναι προφανες οτι το εργο εξοδου του στροβιλοκινητηρα αυξάνει.



Σχήμα 2.1

Κύκλος με αναθέρμανση και εναλλάκτη

Η ελάττωση της απόδοσης του κύκλου με αναθέρμανση αντισταθμίζεται με την πρόσθεση ενός εναλλάκτη στο κύκλωμα. Με τη διατάξη αυτή αξιοποιείται η υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων για τη βελτίωση της απόδοσης του κύκλου, χωρίς ανάγκη αύξησης της προσαγόμενης θερμότητας. Η απόδοση του κύκλου με εναλλάκτη είναι μικρότερη από την απόδοση με εναλλάκτη και αναθέρμανση. Η οικογένεια των καμπυλών με σταθερό t έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με εκείνα για τον απλό κύκλο με εναλλάκτη. Κάθε καμπύλη για $r = 1$ έχει την τιμή του Carnot και αυξανόμενου του λόγου r η τιμή ελαττώνεται μέχρι να συναντήσει την αντίστοιχη καμπύλη της απόδοσης του κύκλου με αναθέρμανση και χωρίς εναλλάκτη στην τιμή εκείνη του r που αντιστοιχεί το μέγιστο ειδικό έργο εξόδου

Κύκλοι με ενδιάμεση ψύξη μεταξύ των συμπιεστών

Παρόμοια βελτίωση, του ειδικού έργου εξόδου, όπως στην περίπτωση της αναθέρμανσης επιτυγχάνεται με ενδιάμεση ψύξη του αέρα μεταξύ των συμπιεστών X.Π. και Y.Π.

Αν ο αέρας ενδιάμεσα ψύχεται στη θερμοκρασία τότε το ειδικό έργο εξόδου γίνεται μέγιστο όταν οι λόγοι των πιέσεων των συμπιεστών X.Π. και Y.Π. είναι ίσοι.

Επειδή τα συστήματα ψύξεως είναι ογκώδη και οι ποσότητες του ψυκτικού μέσου μεγάλες, η εφαρμογή τους στην πράξη είναι δύσκολη και έτσι το πλεονέκτημα ότι ο στροβιλοκινητήρας είναι συμπαγής (compact) χάνεται. Όπως και στην αναθέρμανση η απόδοση του κύκλου αυξάνει μόνο όταν συνδυάζεται ένας εναλλακτης.

Συμπεράσματα

Από τα προηγούμενα φαίνονται τα κύρια αποτελέσματα που προκύπτουν με την προσθήκη διαφόρων συστημάτων (αναθέρμανση, εναλλάκτης, ενδιάμεση ψύξη) στον ιδανικό απλό κύκλο. Είδαμε ότι η εκλογή του λόγου πίεσεως εξαρτάται από το αν θέλουμε υψηλή απόδοση ή υψηλό ειδικό έργο εξόδου και ότι σε κύκλους χωρίς εναλλάκτη μια υψηλότερη τιμή του λόγου πίεσεων χρησιμοποιείται για την αξιοποίηση της μέγιστης επιτρεπτής θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο.

Μέθοδοι υπολογισμού απωλειών

Η απόδοση ενός πραγματικού κύκλου διαφέρει από αυτήν του ιδανικού για τους εξής λόγους:

1. Επειδή οι ταχύτητες ροής είναι μεγάλες, η μεταβολή της κινητικής ενέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου από κάθε συνιστώσα δεν είναι αμελητέα. Επίσης η συμπίεση και η εκτόνωση δεν είναι αντιστρεπτές αδιαβατικές διαδικασίες με αποτέλεσμα την αύξηση της εντροπίας.
2. Φαινόμενα τριβής οδηγούν σε απώλειες πίεσεως στους θαλάμους καύσεως και στους εναλλάκτες καθώς επίσης και στους αγωγούς εισόδου και εξόδου.
3. (Οι απώλειες που σχετίζονται με τους αγωγούς που συνδέονται με τις διάφορες συνιστώσες του κινητήρα, υπολογίζονται συνήθως στις απώλειες της κάθε συνιστώσας).
4. Ο εναλλάκτης που χρησιμοποιείται σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι ο ενδεικνυόμενος με αποτέλεσμα π.χ. η θερμοκρασία εξόδου του συμπιεσμένου αέρα να είναι μικρότερη από την θερμοκρασία των καυσαερίων.
5. Στους πραγματικούς κύκλους το έργο το οποίο λαμβάνεται από το στρόβιλο είναι μεγαλύτερο από αυτό που χρειάζεται για την συμπίεση έτσι ώστε να καλύπτονται οι απώλειες τριβής και να εξασφαλίζεται η κίνηση βοηθητικών συστημάτων όπως είναι οι αντλίες λαδιού και καυσίμου.
6. Οι τιμές των C_p και γ μεταβάλλονται. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην αλλαγή της θερμοκρασίας και της χημικής σύστασης του αερίου.
7. Η απόδοση ενός ανοικτού κύκλου εξαρτάται από την καύση. Γνωρίζοντας την θερμοκρασία εξόδου από τον συμπιεστή, τη σύσταση του καυσίμου και την θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο είναι δυνατός ο καθορισμός i) του απαιτούμενου λόγου καυσίμου/αέρα και ii) της απόδοσης της καύσης. Έτσι θα είναι δυνατή μια σαφής έκφραση της λειτουργίας του κύκλου σαν συνάρτηση της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα καθαρού αποδιδόμενου έργου

(π.χ. σαν συνάρτηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου - specific fuel consumption). Για να συμπεριληφθούν τα παραπάνω στην απόδοση του κύκλου είναι απαραίτητο να υποτεθεί μια τιμή για την θερμότητα καύσης του καυσίμου.

8. Στους ανοιχτούς κύκλους η μάζα του αερίου μέσω του στροβίλου αυξάνεται λόγω της πρόσθεσης του καυσίμου. Στην πράξη περίπου 1-2% του συμπιεσμένου αέρα χρησιμοποιείται για την ψύξη των δίσκων του στροβίλου και των πτερυγίων. Έτσι στους συνήθεις υπολογισμούς θεωρείται ότι η απώλεια αυτή αντισταθμίζεται από το προστιθέμενο καύσιμο. Στα επόμενα κεφάλαια θα θεωρηθεί ότι η παροχή μάζας διαμέσου του στροβιλοκινητήρα παραμένει σταθερή.

Ιδιότητες λίμνασης

Οι όροι της κινητικής ενέργειας στην εξίσωση της μόνιμης ροής μπορούν να συμπεριληφθούν με την χρησιμοποίηση της έννοιας της ενθαλπίας λιμνάσεως (ή ολικής ενθαλπίας). Απο φυσικής απόψεως σαν ολική ενθαλπία ορίζεται η ενθαλπία, ενός αερίου ενθαλπίας h και ταχύτητας c , που θα είχε το αέριο αν φερόταν σε κατάσταση ηρεμίας αδιαβατικά και χωρίς μεταφορά έργου. Έτσι εφ' όσον χρησιμοποιούνται οι ολικές θερμοκρασίες (ή θερμοκρασίες λίμνασης) δεν υπάρχει λόγος να αναφέρονται οι μεταβολές της κινητικής ενέργειας. Ένα πρακτικό πλεονέκτημα είναι ότι πιο εύκολη είναι η μέτρηση της ολικής θερμοκρασίας ενός αερίου υψηλής ταχύτητας παρά η στατική θερμοκρασία. Όταν ένα αέριο επιβραδύνεται με αύξηση της θερμοκρασίας του τότε παρατηρείται ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης.

Έτσι η πίεση λίμνασης (ή ολική πίεση) ορίζεται με τον ίδιο τρόπο αλλά με την επιπρόσθετη συνθήκη ότι το αέριο πρέπει να φερθεί στην ηρεμία όχι μόνο αδιαβατικά αλλά και αντιστρεπτά (δηλ. ισεντροπικά). Σε αντιδιαστολή με την ολική θερμοκρασία, η ολική πίεση παραμένει σταθερή σε ροή με μεταφορά θερμότητας ή έργου αλλά και όταν το ιξώδες είναι αμελητέο. Έτσι η μεταβολή της ολικής πίεσης σε μια ροή ενός αερίου είναι μέτρο των απωλειών λόγω ιξώδους.

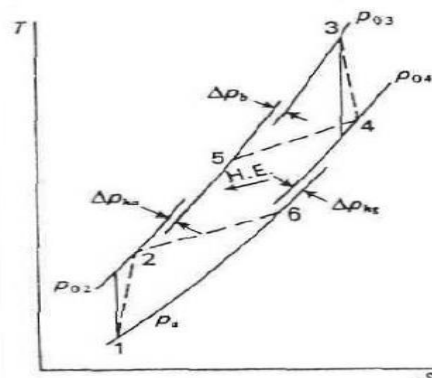
Απόδοση συμπίεστή και στροβίλου

Συνήθως η απόδοση μιας μηχανής, το αντικείμενο της οποίας είναι η απορρόφηση - η απόδοση έργου, εκφράζεται σαν συνάρτηση του λόγου του έργου που αποδίδεται στην πραγματικότητα προς το ιδανικό έργο. Επειδή κατά βάση οι στροβιλομηχανές εργάζονται αδιαβατικά, η ιδανική διαδικασία είναι ισεντροπική (και η απόδοση λέγεται «ισεντροπική απόδοση»).

Απώλειες πίεσης

Οι απώλειες πίεσης που εμφανίζονται στην είσοδο και στην έξοδο του αεριοστροβίλου. Επίσης εμφανίζονται απώλειες πίεσης στο θάλαμο καύσης, λόγω αντίστασης στους σταθεροποιητές της φλόγας και στους αναμίκτες καθώς και στη μεταβολή της ορμής του αερίου λόγω εξώθερμων χημικών αντιδράσεων. Τις απώλειες αυτές τις συμβολίζουμε με ΔP_b .

Όταν υπάρχει εναλλάκτης οι απώλειες λόγω πίεσης που εμφανίζονται στο τμήμα που κυκλοφορεί αέρας συμβολίζονται με Δp_{ha} ενώ στο τμήμα που κυκλοφορεί το αέριο με Δp_{hg} . Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2 οι απώλειες πίεσης έχουν σαν αποτέλεσμα να ελαττώνουν το λόγο πιέσεων του συμπιεστή και έτσι να ελαττώνουν το παραγόμενο έργο του συστήματος. Ο κύκλος ενός αεριοστροβίλου είναι πολύ ευαίσθητος στις αντιστρεπτότητες έτσι που οι απώλειες πίεσης να επηρεάζουν τη λειτουργία του κύκλου. Για να υπολογίσουμε τις απώλειες μπορούμε να υποθέσουμε σταθερές τιμές για τις απώλειες που θα χρησιμοποιούμε στον υπολογισμό του κύκλου. Αλλά υπάρχει το ερώτημα αν είναι σωστό να υποθέσουμε σταθερές τιμές για τις μεταβολές της ολικής πίεσης που αντιστοιχούν σε απώλειες πίεσης όταν συγκρίνονται κύκλοι με διαφορετικό λόγο πιέσεων. Οι απώλειες πίεσης λόγω τριβής είναι ανάλογες της δυναμικής πίεσης όπως στην περίπτωση ροής σε σωλήνα. Είναι λοιπόν λογικό να περιμένουμε πως οι απώλειες Δp_{ha} και Δp_{hg} θα αυξάνουν με το λόγο πιέσεων του κύκλου επειδή θα αυξάνει και η πυκνότητα του ρευστού στο τμήμα κυκλοφορίας του αέρα μέσα στον εναλλάκτη και μέσα στο θάλαμο καύσης. Ακόμα και αν η πυκνότητα ρ δεν είναι ανάλογη της πίεσης P επειδή η θερμοκρασία T αυξάνει, μια καλύτερη προσέγγιση είναι να παίρνουμε τα Δp_{ha} και Δp_{hg} σαν σταθερές αναλογίες της πίεσης εξόδου του συμπιεστή. (Ακολουθεί το σχήμα 2.2.)



Σχήμα 2.2

Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη

Οι εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούνται στους στροβιλοκινητήρες είναι πολλών ειδών (π.χ. αντιστρόφου ροής, σταυροειδούς ροής κ.α.). Για όλα τα είδη, χρησιμοποιώντας τους συμβολισμούς του σχήματος 2.2, η βασική διαδικασία είναι ότι τα θερμά καυσαέρια αποβάλλουν θερμότητα με ρυθμό $\dot{m}_t \cdot c_{p46} \cdot (T_{05} - T_{06})$, ενώ ο αέρας που εγκαταλείπει τον συμπιεστή παίρνει θερμότητα με ρυθμό $\dot{m}_c \cdot c_{p25} \cdot (T_{05} - T_{02})$.

Επειδή όμως οι T_{04} και T_{06} είναι άγνωστες χρειαζόμαστε μια εξίσωση για τον υπολογισμό τους. Η εξίσωση αυτή είναι εκείνη που εκφράζει την απόδοση του εναλλάκτη. Επειδή η μέγιστη τιμή που

μπορεί να πάρει η θερμοκρασία T05 είναι όταν ο «κρύος» αέρας φθάνει την θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων T04, τότε μια δυνατή μέθοδος υπολογισμού της απόδοσης του εναλλάκτη είναι από το λόγο της ενέργειας που απορροφάται στη πραγματικότητα προς τη μέγιστη δυνατή τιμή της. Επειδή η μέση ειδική θερμότητα του αέρα δεν είναι πολύ διαφορετική στα πεδία θερμοκρασιών που δουλεύουμε, είναι συνηθισμένο να ορίζουμε την απόδοση σαν συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας και να την ονομάζουμε «αποδοτικότητα» (effectiveness) του εναλλάκτη

Μηχανικές απώλειες

Σε όλους τους αεριοστροβίλους η ισχύς που χρειάζεται ο συμπιεστής λαμβάνεται κατ' ευθείαν από το στρόβιλο (χωρίς ενδιάμεσο σύστημα γραναζιών). Έτσι οι απώλειες που εμφανίζονται οφείλονται στις τριβές των εδράνων που στηρίζεται ο άξονας και είναι πολύ μικρές, δηλαδή της τάξεως του 1%.

Μεταβολή της ειδικής θερμότητας

Οι ιδιότητες c_p και γ παίζουν σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της απόδοσης ενός κύκλου και είναι αναγκαίο να λαμβάνονται υπ' όψιν οι μεταβολές των τιμών τους που οφείλονται σε αλλαγές συνθηκών κατά την διάρκεια του κύκλου. Γενικά για πραγματικά αέρια σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που αντιστοιχούν σε περιοχές κανονικής λειτουργίας,

η ειδική θερμότητα c_p είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας. Σε στρόβιλο ανοικτού κύκλου το λειτουργούν αέριο θα είναι μίγμα καυσαερίων. Οι περισσότεροι αεριοστροβίλοι εργάζονται με κηροζίνη (C_nH_{2n}). Εάν υποθεθεί μια τέτοια σύνθεση, η ανάλυση των προϊόντων μπορεί να υπολογιστεί για διάφορες τιμές του λόγου (καυσίμου)/(αέρα). Για κάθε τιμή του λόγου τα προϊόντα της καύσης είναι γνωστά και έτσι μπορεί να γίνει σχετική ανάλυση. Γνωρίζοντας τις ειδικές θερμότητες και τα ειδικά μοριακά βάρη των προϊόντων είναι απλό το να καθορισθούν οι μέσες τιμές των c_p και γ . Εάν ληφθεί υπ' όψιν η διάσπαση των μορίων τότε η ανάλυση των προϊόντων γίνεται πολύπλοκη επειδή η πίεση επιδρά σημαντικά πάνω στο ποσοστό διάστασης και επομένως και τα c_p και γ γίνονται συναρτήσεις της πίεσης. Σε τέτοιες αναλύσεις χρειάζεται η χρήση υπολογιστών. Το φαινόμενο της διάσπασης (dissociation) επιδρά πάνω από 1500 K στα γ και c_p και πάνω από αυτή τη θερμοκρασία οι καμπύλες εφαρμόζονται για πίεση 1 Atm. Ο λόγος για τον οποίο η χρήση σταθερών τιμών δεν οδηγεί σε υπερβολικές ανακρίβειες στους υπολογισμούς είναι ότι τα c_p και γ μεταβάλλονται κατ' αντίθετη κατεύθυνση με τη θερμοκρασία. Στην ανάλυση κύκλου ενδιαφερόμαστε στον υπολογισμό έργου στο συμπιεστή και στον στρόβιλο από το γινόμενο $c_p \cdot \Delta T$. Αν υποθεθεί ότι η θερμοκρασία, για την οποία οι τιμές c_p και γ αντιστοιχούν στις πραγματικές τους τιμές είναι χαμηλότερη από την πραγματικά υπάρχουσα θερμοκρασία τότε η τιμή του γ είναι υψηλότερη απ' αυτήν που θα έπρεπε να έχει και το ΔT θα υπερεκτιμηθεί. Αυτή η υπερεκτίμηση θα εξισορροπηθεί από το γινόμενο $c_p \cdot \Delta T$ θα είναι χαμηλότερο της πραγματικής του

τιμής. Εν γένει ακριβείς τιμές της θερμοκρασίας που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τον τελικό υπολογισμό των διαφόρων τμημάτων προϋποθέτουν χρήση υπολογιστών.

Λόγος καυσίμου/αέρα

Η απόδοση ενός πραγματικού κύκλου μπορεί να αποδοθεί επακριβώς σαν συνάρτηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (sfc) που καθορίζεται σαν παροχή μάζας του καυσίμου ανά μονάδα καθαρής παραγόμενης ισχύος. Για να υπολογιστεί ο ανωτέρω συντελεστής, πρέπει να υπολογιστεί ο λόγος (καυσίμου)/(αέρα), f .

Πρέπει να είναι γνωστή η θερμοκρασία T_{02} Δ· από το γεγονός ότι το c_p στην είσοδο του θαλάμου καύσης και επίσης η θερμοκρασία στην έξοδο T_{03} η οποία είναι και η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου. Η τελευταία συνήθως προκαθορίζεται

Εξισώσεις Ροής:

Ο σχεδιασμός των στροβιλομηχανών γίνεται με τη βοήθεια των εξισώσεων της ροής του εργαζόμενου ρευστού πολλές φορές κατόπιν σειράς υποθέσεων που απλοποιούν το όλο σύστημα.

Το σύστημα των εξισώσεων αυτών απαρτίζεται από τις παρακάτω:

(i) Την εξίσωση Συνέχειας : Η μαζική παροχή προς έναν όγκο ελέγχου ισούται με τη μαζική παροχή έξω από τον όγκο.

(ii) Την εξίσωση (γραμμικής) Ορμής: Το σύνολο των εξωτερικών δυνάμεων (πιέσεις, επιφανειακές και εσωτερικά διανεμόμενες τάσεις) που ασκούνται στον όγκο ελέγχου ισούται με το ρυθμό μεταβολής της ορμής του ρευστού που διέρχεται από τον όγκο ελέγχου.

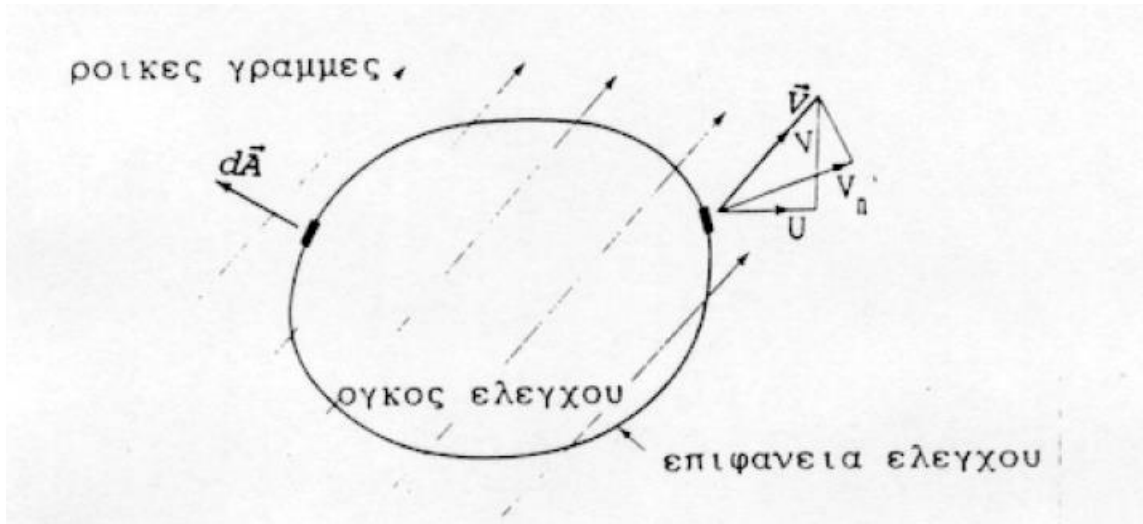
(iii) Την εξίσωση γωνιακής Ορμής (Στροφορμής): Το άθροισμα των εξωτερικά εφαρμοζόμενων ροπών στον όγκο ελέγχου ισούται με το ρυθμό μεταβολής της στροφορμής του ρευστού που διέρχεται από τον όγκο ελέγχου.

(iv) Την εξίσωση Ενέργειας: Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας προς τον όγκο ελέγχου μείον τη μηχανική ισχύ από τον όγκο ελέγχου ισούται με το ρυθμό μεταβολής της ολικής ενθαλπίας του ρευστού που διέρχεται από τον όγκο ελέγχου.

(v) Την εξίσωση Εντροπίας: Ο συνολικός ρυθμός του λόγου [μεταφερόμενη θερμότητα/τοπική θερμοκρασία] στα όρια του όγκου ελέγχου είναι μικρότερος (για μη αντιστρεπτές διεργασίες) ή ίσος (για αντιστρεπτές διεργασίες) με την καθαρή εκροή εντροπίας από τον όγκο ελέγχου. Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα σε δυο μορφές.

Η πρώτη αφορά την περίπτωση που εξετάζουμε τις μεταβολές σε μια ορισμένη μάζα (οπώς κάνουμε στη μηχανική του στερεού σωματιδίου η του στερεού σώματος) και η δεύτερη αφορά την

περίπτωση που εξετάζουμε τη ροή γύρω από την εξωτερική επιφάνεια κάποιου όγκου ελέγχου (control volume) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 που ακολουθεί.



Στον όγκο αυτό, ορίζουμε το διάνυσμα $d\vec{A}$ σαν το (τοπικά) κάθετο προς την εξωτερικά κάθετη κατεύθυνση του απειροελάχιστου εμβαδού $d\vec{A}$ και το διάνυσμα \vec{V} σαν το διάνυσμα ροής με συνιστώσες U, V για ορθογώνιο σύστημα (καρτεσιανών) συντεταγμένων η για σύστημα αξόνων που είναι κάθετοι-εφαπτόμενοι του κάθε σημείου της εξωτερικής επιφάνειας του όγκου ελέγχου.

Πίνακες των βασικών εξισώσεων της ροής

1. Διατήρηση μάζας (εξ. συνέχειας) :

$m = \text{constant}$	$\left(\frac{\partial m}{\partial t}\right)_{cv} = \int dm_{in} - \int dm_{out}$ $\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV = \int_{cv} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$ $= \int \rho V_n dA_{in} - \int \rho V_n dA_{out} = - \int_{cs} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}$
-----------------------	---

2. Διατήρηση Γραμμικής Ορμής :

$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \int \vec{V} dm = \int \frac{d\vec{V}}{dt} dm$ $\rightarrow \sum F_x = \int \frac{dU}{dt} dm$	$\sum \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{cv} \vec{V} dm \right) + \int \vec{V} dm_{out} - \int \vec{V} dm_{in} =$ $\int_{cv} (\rho \vec{V}) dV + \int_{cs} \vec{V} (\rho \vec{V} \cdot d\vec{A})$ $\sum \vec{F}_x = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{cv} U dm \right) + \int U dm_{out} - \int U dm_{in} =$ $\int_{cv} \frac{\partial}{\partial t} (\rho U) dV + \int (\rho U V_n \cdot dA_{out}) - \int (\rho U V_n \cdot dA_{in})$
--	--

3. Διατήρηση Γωνιακής Ορμής (Στροφορμής) :

$\sum \vec{F} \times \vec{r} = \frac{d}{dt} \int (\vec{V} \times \vec{r}) dm =$ $= \int \frac{d}{dt} (\vec{V} \times \vec{r}) dm$ $\sum rF_{\theta} = \int \frac{d}{dt} (rW) dm$	$\sum \vec{F} \times \vec{r} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{cv} (\vec{V} \times \vec{r}) dm \right) + \int (\vec{V} \times \vec{r}) dm_{out} - \int (\vec{V} \times \vec{r}) dm_{in} =$ $\int_{cv} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V} \times \vec{r}) dV + \int_{cs} (\vec{V} \times \vec{r}) (\rho \vec{V} \cdot d\vec{A})$ $\sum rF_{\theta} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{cv} (rW) dm \right) + \int rW dm_{out} - \int rW dm_{in} =$ $\int_{cv} \frac{\partial}{\partial t} (\rho rW) dV + \int \rho rW V_n \cdot dA_{out} - \int \rho rW V_n \cdot dA_{in}$
--	--

4. Διατήρηση Ενέργειας (1ο αξίωμα θερμοδυναμικής) :

$Q - W = \Delta \left(\int e dm \right)$	$\dot{Q} - \dot{W}_s = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{cv} e dm \right) + \int h_0 dm_{out} - \int h_0 dm_{in} =$ $\int_{cv} \frac{\partial}{\partial t} (\rho e) dV + \int_{cs} \rho h_0 \vec{V} \cdot d\vec{A}$
---	--

5. Εξίσωση Εντροπίας (2ο αξίωμα θερμοδυναμικής) :

$\frac{dQ}{T} \leq ds$	$\int_{cs} \frac{dQ}{T} \leq \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{cv} s dm \right) + \int s dm_{out} - \int s dm_{in} \leq$ $\left(\int_{cv} \frac{\partial}{\partial t} (\rho s) dV \right) + \int_{cs} \rho s \vec{V} \cdot d\vec{A}$
------------------------	--

Όπου, m: παροχή μάζας,

h₀: ολική ενθαλπία,

e, s: ειδική εσωτερική ενέργεια και εντροπία.

Παρακάτω οι εξισώσεις ορμής και ενέργειας δίδονται και στη διαφορική μορφή τους για ροή χωρίς χημικές αντιδράσεις.

A. Ξώδης Ροή (Viscous Flow)

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

$$\text{όπου: } \frac{D\Phi}{Dt} = \underbrace{\frac{\partial\Phi}{\partial t}}_{\text{local derivative}} + \underbrace{(\bar{\mathbf{V}}\nabla)\Phi}_{\text{convective derivative}} = \frac{\partial\Phi}{\partial t} + U \frac{\partial\Phi}{\partial x} + V \frac{\partial\Phi}{\partial y} + W \frac{\partial\Phi}{\partial z}$$

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z}$$

και

$$\bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla = U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial y} + W \frac{\partial}{\partial z}$$

Ορμή:

$$\text{x-συνιστώσα: } \rho \frac{DU}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x$$

$$\text{y-συνιστώσα: } \rho \frac{DV}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y$$

$$\text{z-συνιστώσα: } \rho \frac{DW}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z$$

και αναλύοντας τον τανυστή των τάσεων ως:

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= \lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial U}{\partial x} & \tau_{yy} &= \lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial V}{\partial y} & \tau_{zz} &= \lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial W}{\partial z} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) & \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z} \right) & \tau_{zy} = \tau_{yz} &= \mu \left(\frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} \right)\end{aligned}$$

όπου μ το μοριακό ιξώδες και λ ο συντελεστής ολικού ιξώδους:

$\lambda = -2/3 \mu$ λαμβάνουμε :

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho UV)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho UW)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial z} \right) \right) + \rho f_x\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho UV)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho VW)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} \right) \right) + \rho f_y\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho UW)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VW)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W^2)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial W}{\partial z} \right) + \rho f_z\end{aligned}$$

όπου $f_{x,y,z}$ πεδιακή δύναμη.

Ενέργειας :

$$\begin{aligned}\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \\ \frac{\partial(U\rho)}{\partial x} - \frac{\partial(V\rho)}{\partial y} - \frac{\partial(W\rho)}{\partial z} + \frac{\partial(U\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(U\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(U\tau_{zx})}{\partial z} + \\ \frac{\partial(U\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(U\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(U\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(U\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(U\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(U\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V}\end{aligned}$$

B. Ατριβη Ροή (Inviscid Flow, Εξισώσεις Euler)

Συνέγεια:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0$$

Ορμής :

$$\text{x-συνιστώσα: } \rho \frac{DU}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x$$

$$\text{y-συνιστώσα: } \rho \frac{DV}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_y$$

$$\text{z-συνιστώσα: } \rho \frac{DW}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho f_z$$

Ενέργειας :

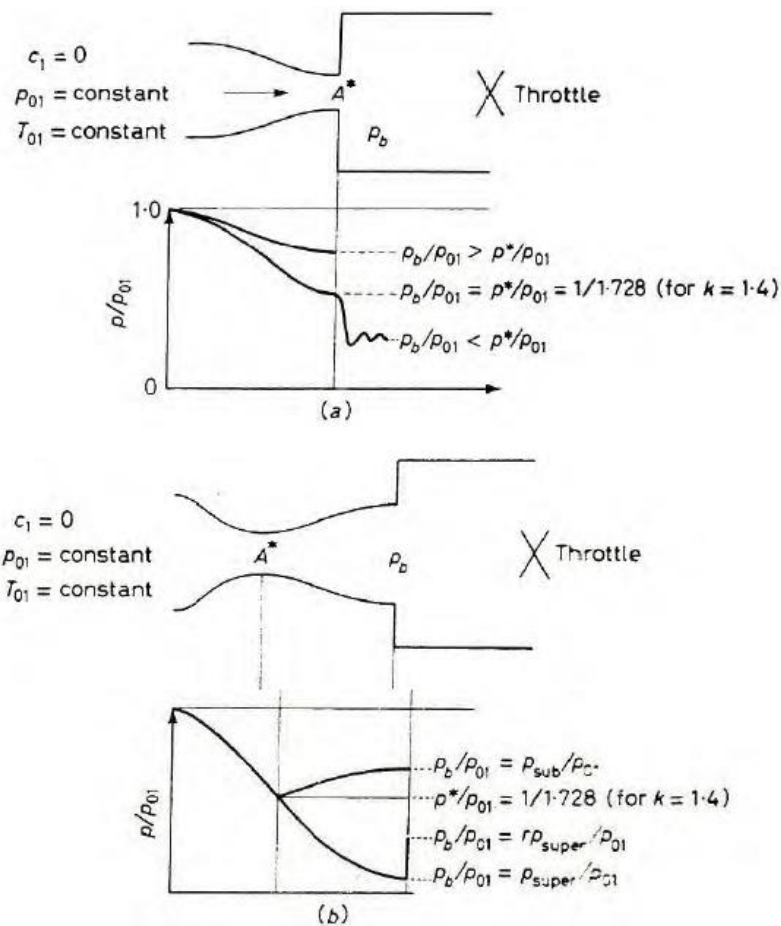
$$\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho q - \frac{\partial(U\rho)}{\partial x} - \frac{\partial(V\rho)}{\partial y} - \frac{\partial(W\rho)}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V}$$

Κεφάλαιο 3 - Συμπιεστή ροή και Τα περιστρεφόμενα μέρη

Πολλές φορές, η μεταβολή στην πυκνότητα του ρευστού στη ροή μέσα σε μια στροβιλομηχανή είναι σημαντική. Αν αυτή η μεταβολή συνοδεύεται και από αντίστοιχη μεγάλη τιμή του τοπικού αριθμού Mach, επιβάλλεται η χρήση των εξισώσεων της συμπιεστής ροής. Παρακάτω θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση των πιο σημαντικών στοιχείων της συμπιεστής ροής (compressible flow). Εν γένει όταν $M > 0.3$ η ροή πρέπει να θεωρηθεί συμπιεστή

Συμπιεστή ροή σε συγκλίνον ακροφύσιο

Θεωρούμε τη ροή σε ακροφύσιο του οποίου η διατομή A μειώνεται συνεχώς από την είσοδο έως και την έξοδο (Cohen et al (1972), Horlock (1973), Παπανίκας (1990)). Η ροή ξεκινά από λιμνάζουσα κατάσταση (ολική και στατική πίεση ίσες) και εκβάλλει σε κάποια δεξαμενή της οποίας η στατική πίεση παραμένει σταθερή (μέσω κάποιας βαλβίδας) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1

Η μεταβολή του λόγου (p/p_{01}) μέσα στο ακροφύσιο εξαρτάται από την πίεση στη δεξαμενή (p_b) .

Σε κάθε σημείο του ακροφυσίου ισχύει η σχέση:

$$\frac{p_{01}}{p} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

(Όταν δεν έχουμε απώλειες σε ολική πίεση, δηλ. σε ισηντροπική εκτόνωση).

Όταν ο τοπικός γ αριθμός Mach M γίνει ίσος με τη μονάδα ($M=1$), έχουμε:

$$\frac{p_{01}}{p_c} = \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = 1.893 \text{ για } \gamma = 1.4$$

, δηλαδή για αέρα σε πίεση 1Atm.

Η παροχή μάζας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$m = 0.397 \cdot P_{01} \frac{A^*}{\sqrt{T_{01}}} \quad (\gamma=1.4)$$

όπου: A^* , η διατομή στην οποία $M = 1$

Επειδή η ελάχιστη διατομή εμφανίζεται στην έξοδο όταν μειώνεται η P_b , ο αριθμός M θα γίνει ίσος με τη μονάδα εκεί.

Άρα όταν ισχύει:

$$\frac{P_b}{P_{01}} = \frac{P_b^*}{P_{01}} = \frac{1}{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \quad \left(= \frac{1}{1.893} \text{ για } \gamma=1.4\right)$$

Προκαλείται στραγγαλισμός της ροής στο ακροφύσιο (δηλ. για ορισμένη τιμή των P_{01} και του T_{01} έχουμε μέγιστη μαζική παροχή).

Όταν ισχύει:

$$\frac{P_b}{P_{01}} < \frac{P_b^*}{P_{01}} = \frac{1}{P^*}, \text{ όπου } P^* \text{ ο λόγος πιέσεων}$$

οι συνθήκες ροής μέσα στο ακροφύσιο δε μεταβάλλονται αλλά εμφανίζεται εκτόνωση τύπου Prandtl-Meyer στην έξοδο του ακροφυσίου (δηλαδή μια απότομη μείωση στη στατική πίεση).

Τα περιστρεφόμενα μέρη:

Ο βασικός κύκλος Brayton περιλαμβάνει δυο διεργασίες μετατροπής ενέργειας με την παραγωγή /απορρόφηση μηχανικού έργου, κατά τη συμπίεση και την εκτόνωση. Τα αντίστοιχα εξαρτήματα που πραγματοποιούν τις διεργασίες αυτές, κατά κύριο λόγο, είναι ο συμπιεστής (compressor) και ο στρόβιλος (turbine).

Στους σημερινούς αεριοστρόβιλους τόσο ο συμπιεστής, όσο και ο στρόβιλος είναι περιστρεφόμενα (γύρω από κάποιον άξονα) εξαρτήματα.

Η εναλλαγή ενέργειας μεταξύ στροφείου (rotor) και ρευστού

Η διεργασία της ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ των πτερυγίων του στροφείου και του ρευστού, σε όλα τα είδη των στροβιλομηχανών είναι δυναμική,

δηλαδή επιτυγχάνεται μέσω της μεταβολής ως προς το χρόνο, της τιμής των παραμέτρων που ρυθμίζουν την κατάσταση του ρευστού (δηλαδή πίεση, πυκνότητα, θερμοκρασία κλπ).

Αν εξετάσουμε ένα στοιχειώδη όγκο ελέγχου ο οποίος περικλείει μια ορισμένη ποσότητα ρευστού, το πρώτο αξίωμα της θερμοδυναμικής μας λέγει ότι $\delta E = \delta Q - P\delta(1/\rho)$

Όπου : E = εσωτερική ενέργεια

W = έργο που παράγεται

$P\delta(1/\rho)$ Q = εναλλασσόμενη θερμότητα

Στις στροβιλομηχανές, εν γένει, οι ταχύτητες είναι υψηλές και τα ποσα θερμότητας που μπορούν να μεταφερθούν απο/προς τις διάφορες επιφάνειες πολύ μικρά (της τάξης του 1% της ενέργειας του ρευστού). Για το λόγο αυτό $\delta Q \neq 0$, δηλαδή η όλη διεργασία συμπίεσης ή εκτόνωσης είναι (σχεδόν) αδιαβατική.

Σε ένα άτριβο, μη θερμικά αγώγιμο όγκο ελέγχου ρευστού, η ολική θερμοκρασία (και επομένως και η ολική πίεση) του ρευστού μπορεί να μεταβληθεί μόνο αν αυτό υποστεί κάποια ασταθή (μη μόνιμη) συμπίεση (αύξηση του p) εκτόνωση (μείωση του p).

Σε σταθερές μορφές συμπίεσης η εκτόνωσης (απο διαχύτες ή ακροφύσια) δε μπορεί να υπάρξει μεταφορά έργου. Τέλος, η ενέργεια του ρευστού μπορεί να αυξηθεί μόνο όταν αυξηθεί και η πίεση (δηλ. $\frac{\Delta P}{\Delta t} > 0$). Στις στροβιλομηχανές (συμπιεστές ή στροβίλους) ταδιάκενα μεταξύ των πτερυγίων σχηματίζουν διαχύτες ή ακροφύσια. Λόγω δε της περιστροφής των πτερυγίων αυτών, η ροή μέσα απο αυτά είναι ασταθής συνεπώς παράγεται ή απορροφάται έργο.

Η εξίσωση του Euler

Ορίζεται ως:

$$\begin{aligned} \Delta W_e &= \frac{W_e}{m} = \omega \left[(r \cdot W)_2 - (r \cdot W)_1 \right] \\ &= U_{2p} \cdot W_2 - U_{1p} \cdot W_1 \end{aligned}$$

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή σαν εξίσωση του Euler. Όταν $\Delta W > 0$ έχουμε συμπίεση και όταν $\Delta W < 0$ έχουμε εκτόνωση. Μηχανική λοιπόν, ισχύς μπορεί να ανταλλαχθεί μεταξύ πτερυγίων και ρευστού είτε λόγω αυξομείωσης της U_p (δηλαδή της ακτίνας r) είτε λόγω αυξομείωσης της W. Όταν η διεργασία γίνεται με $r_2 = r_1$ η στροβιλομηχανή αποκαλείται αξονική. Όταν $r_2 \neq r_1$ αποκαλείται φυγοκεντρική.

Η ανάλυση των στροβιλομηχανών

Η ανάλυση όλων των στροβιλομηχανών βασίζεται σε δυο στοιχεία:

1. Στη βαθμίδα, η οποία αποτελεί και την πιο απλή και βασική μορφή μιας στροβιλομηχανής.
2. Στο διαχωρισμό του πεδίου ροής (που είναι τρισδιάστατο) σε δυο απλούστερα επίπεδα, ένα κυλινδρικό (z, θ) και ένα μεσημβρινό (r, z).

Το πρώτο, μεταξύ δυο πτερυγίων είναι σχεδόν διδιάστατο και το δεύτερο εκπροσωπεί τη "μέση" ροή μεταξύ δυο πτερυγίων. Ο διαχωρισμός αυτός, είναι προσεγγιστικός και υπάρχουν διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας στη προσέγγιση. Δυο αναλύσεις που χρησιμοποιούνται συχνά είναι οι αναλύσεις των πτερυγώσεων στην μέση γραμμή και μέσω της απλής ακτινικής ισοροπίας.

Η βαθμίδα, λοιπόν, αποτελεί την πιο απλή μορφή στροβιλομηχανής. Αποτελείται πάντα από μια σειρά ακίνητων πτερυγίων, τοποθετημένων στο διάφραγμα και μια σειρά περιστρεφόμενων πτερυγίων τοποθετημένων σε δίσκο (που προσδένεται στον άξονα). Η πρώτη σειρά απαρτίζει το στάτορα. (Stator-S) και η άλλη το ρότορα (Rotor-R).

Η ανάλυση της διεργασίας συμπίεσης ή εκτόνωσης, σε μια βαθμίδα, σε διάγραμμα Mollier, H-S γίνεται με τη βοήθεια δυο αρχών:

1. Η πρώτη αρχή μας λέγει ότι η ολική ενθαλπία (H) δε μεταβάλλεται στα ακίνητα πτερύγια, δηλ. $H_1 = H_2$
2. Η δεύτερη αρχή μας λέγει ότι η ροθαλπία (I-rotational enthalpy) δε μεταβάλλεται στα περιστρεφόμενα πτερύγια.

*Ροθαλπία ορίζεται ως:

$$I = h + \frac{1}{2} \vec{V}^2 - U_p \cdot W = H - U_p \cdot W$$

Κεφάλαιο 4 - Θεωρία πτερυγώσεων και Οι βαθμίδες αξονικών στροβίλων/συμπιεστών

Ορισμός πτερύγωσης

Η ανάλυση του πεδίου ροής στο διάκενο μεταξύ δύο πτερυγίων ξεκινά με την υπόθεση ότι αυτό μπορεί να απλοποιηθεί σε δύο επιμέρους επίπεδα. Τα επίπεδα αυτά ορίζονται από ροϊκές γραμμές, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, για αξονική στροβιλομηχανή.

Τα επίπεδα S1 ορίζουν το πεδίο ροής μεταξύ δύο διαδοχικών αεροτομών στην ίδια "σταθερή" ακτίνα και τα επίπεδα S2 ορίζουν το πεδίο ροής στο μεσημβρινό επίπεδο, για κάποια γωνία $\theta = \theta_0 =$ σταθερή, μεταξύ των εσω και εξω άκρων του πτερυγίου.

Στην πράξη βέβαια τα "επίπεδα" S1 και S2 είναι καμπύλες επιφάνειες, όπως φαίνεται στο ανωτέρω σχήμα. Σε μια πρώτη, όμως θεώρηση τα θεωρούμε επίπεδα. Η θεωρία των πτερυγώσεων (cascade theory) προσδιορίζει λύσεις για το πεδίο ροής σε μια επιφάνεια S1, όταν αυτό αναπτυχθεί σε μια σειρά αεροτομών, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στις αξονικές στροβιλομηχανές.

Η τυπική γεωμετρία, οι αντίστοιχοι παράμετροι και η ονοματολογία της πτερύγωσης φαίνεται στο σχήμα 4.3.

Οι παράμετροι λοιπόν της πτερύγωσης είναι :

1. Η απόσταση (s) μεταξύ δύο διαδοχικών αεροτομών που ονομάζεται και διάκενο (pitch).
2. Η χορδή (chord), c, που είναι η ευθεία γραμμή μεταξύ των δύο άκρων της αεροτομής.
3. Η γραμμή καμπυλότητας (camber line), που είναι η καμπύλη γραμμή, σε ίση απόσταση από τις δύο εξωτερικές πλευρές που ορίζουν το σχήμα της αεροτομής.
4. Η κατανομή του πάχους (thickness) της αεροτομής ως προς την γραμμή καμπυλότητας.
5. Η γωνία πλευρίσματος (stagger angle), γ , που σχηματίζει η χορδή με την αξονική κατεύθυνση της ροής (εδώ είναι η κατεύθυνση X).
6. Η γωνία εισόδου της αεροτομής ($\alpha' 1$), που σχηματίζει η κατεύθυνση X με την εφαπτόμενη της γραμμής καμπυλότητας στο χείλος προσβολής.
7. Η γωνία εξόδου της αεροτομής ($\alpha' 2$), αντίστοιχα στο χείλος εκφυγής.
8. Η γωνία καμπυλότητας (camber) θ , όπου: $\theta = \alpha' 1 - \alpha' 2$
9. Η γωνία εισαγωγής του ρευστού (inlet flow angle) α_1 , μεταξύ του διανύσματος \vec{u}_1 (ή C_1) και της κατεύθυνσης X.

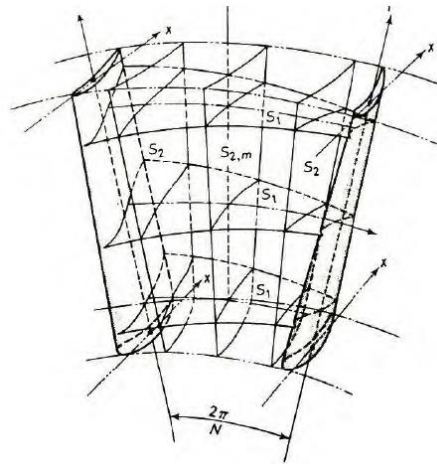
10. Η γωνία εξόδου του ρευστού, α_2 , μεταξύ του \vec{u}_2 (ή C2) και της X.

11. Η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle), i , όπου: $i = \alpha_1 - \alpha'_1$

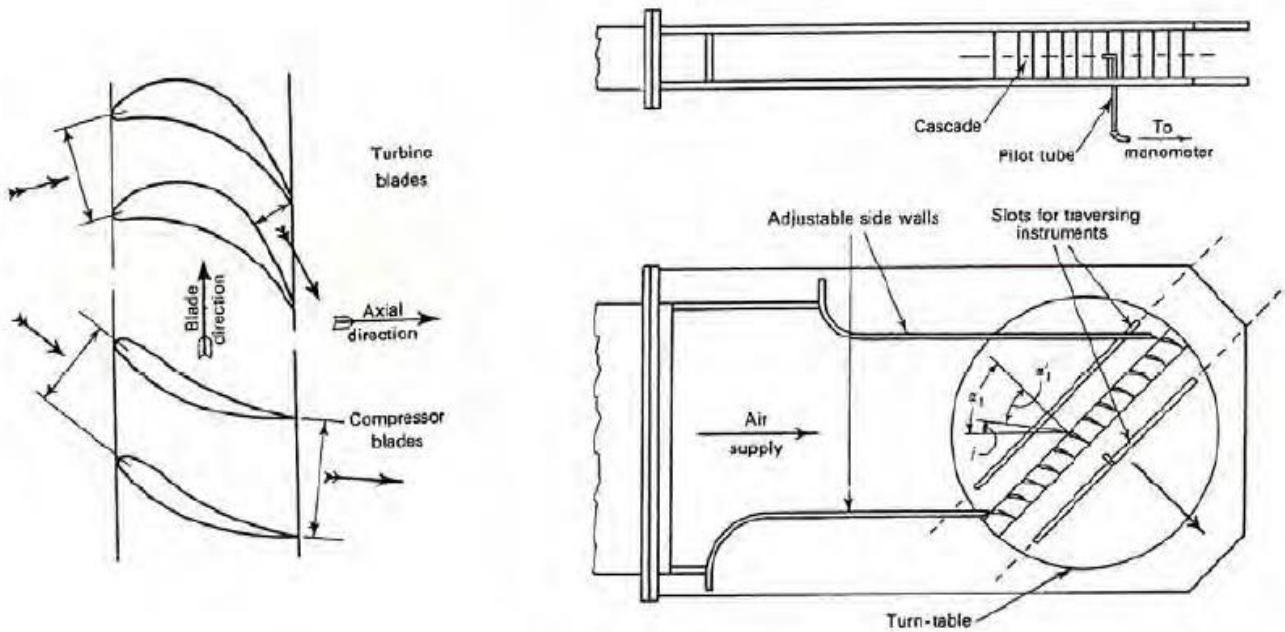
12. Οι γωνίες απόκλισης (deviation angle), δ , όπου: $\delta = \alpha_2 - \alpha'_2$

a. και εκτροπής, ϵ , όπου: $\epsilon = \alpha_1 - \alpha_2$

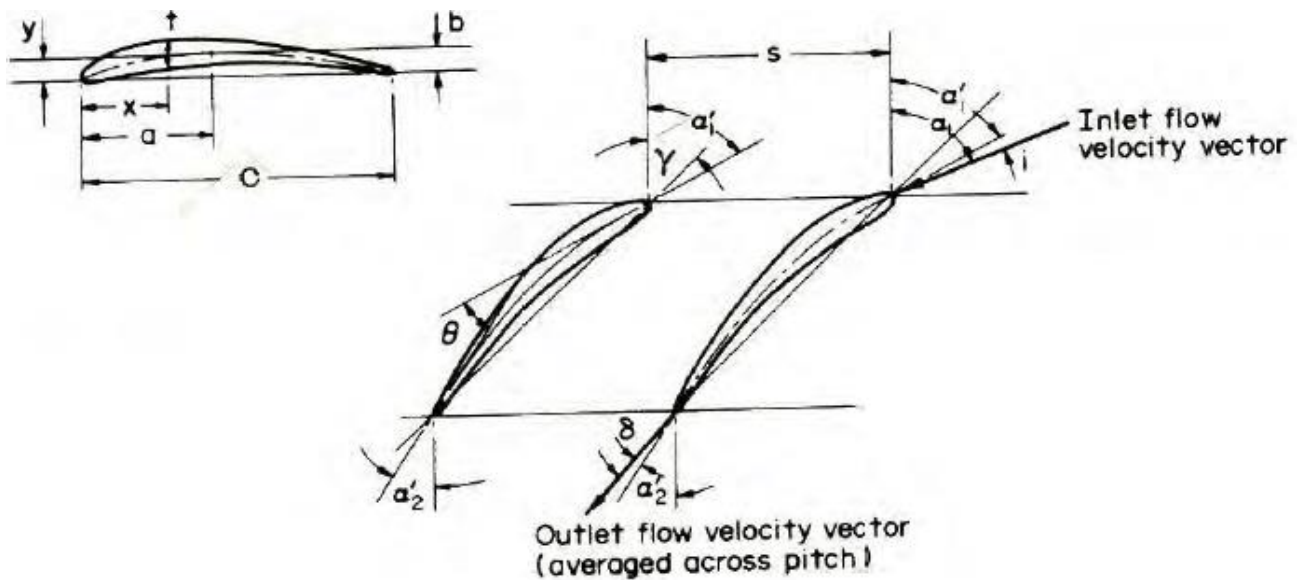
Στα περιστρεφόμενα πτερύγια, έχουμε και τις σχετικές γωνίες (β_1, β_2) που σχηματίζουν τα αντίστοιχα διανύσματα των σχετικών ταχυτήτων (\vec{w}_1, \vec{w}_2) με την κατεύθυνση X.



Σχήμα 4.1



Σχήμα 4.2



Σχήμα 4.3

Οι βαθμίδες αξονικών στρόβιλων/συμπιεστών με τα εξαρτήματά τους:

Ο στρόβιλος και ο συμπιεστής των σύγχρονων αεριοστρόβιλων είναι, ως επί το πλείστον, αξονικής μορφής και τα βασικά τους εξαρτήματα φαίνονται στο σχήμα 4.4. Τόσο ο συμπιεστής όσο και ο στρόβιλος αποτελούνται από έναν αριθμό βαθμίδων (stages). Η κάθε βαθμίδα περιλαμβάνει μια σειρά περιστρεφόμενων πτερυγίων (blades), προσδεδεμένων επάνω στο δίσκο (disc) ή το τύμπανο (drum), και μια σειρά ακίνητων πτερυγίων προσδεδεμένων στο διάφραγμα (diaphragm). Οι δίσκοι ή το τύμπανο συνδέονται με τον άξονα, ο οποίος στηρίζεται σε δυο τουλάχιστον έδρανα (bearings). Ο άξονας (shaft) είναι είτε συμπαγής είτε κοίλος. Συνήθως το τύμπανο έχει μορφή άξονα με μεγάλη διάμετρο που αποτελείται από λεπτό κέλυφος. Μεταξύ των άκρων του διαφράγματος και του τυμπάνου (δίσκων) τοποθετούνται ελαστικές ασφάλειες (παρεμβύσματα - seals), συνήθως τύπου λαβύρινθου (labyrinth). Στη βαθμίδα του (αξονικού) συμπιεστή η σειρά είναι ρότορας (rotor)-στάτορας (stator). Επειδή δε, η πρώτη σειρά πτερυγίων είναι ακίνητη (συνήθως) αυτή αποτελεί ειδική κατηγορία πτερυγίων, τα οδηγία πτερύγια (Inlet Guide Vanes - I.G.V.).

Στη βαθμίδα του (αξονικού) στρόβιλου η σειρά είναι στάτορας (stator-S) - ρότορας (rotor-R). Σε μερικούς στρόβιλους, μετά το τελευταίο στροφείο υπάρχει σειρά ακίνητων πτερυγίων, τα πτερύγια ευθυγράμμισης ροής (flow straightening blades). Στο συμπιεστή, κυρίως στο τμήμα υψηλής πίεσης, υπάρχει ειδικό σύστημα αναρρόφησης αέρα με βαλβίδα ελέγχου της παροχής (bleed valve).

Το μεγαλύτερο ποσοστό του αέρα αυτού χρησιμοποιείται για τη ψύξη των πτερυγίων, δίσκων και τοιχωμάτων του στρόβιλου.

Ανάλυση μέσης γραμμής

Η πιο απλή μέθοδος ανάλυσης μιας βαθμίδας στρόβιλου/συμπιεστή είναι αυτή της μέσης γραμμής. Εδώ γίνεται η βασική υπόθεση ότι οι συνθήκες ροής που υπάρχουν στο μέσο ύψος, $r_{m,των}$ πτερυγίων είναι όμοιες με αυτές σε όλο το μήκος της ακτίνας. Η υπόθεση αυτή προσεγγίζει βέβαια την πραγματικότητα για μικρές τιμές του λόγου (h_B/r) , όπου h_B είναι το ύψος των πτερυγίων και r_m η ακτίνα στο μέσο ύψος των πτερυγίων. Η αρχική αυτή ανάλυση διερευνά τη μορφή των διαφόρων γωνιών, των μεγεθών των διαφόρων ταχυτήτων και το βαθμό αντίδρασης της βαθμίδας.

Η πιο σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει τη βαθμίδα είναι ο βαθμός ή λόγος ή συντελεστής αντίδρασης (degree of reaction ή reaction ratio ή reaction coefficient) R .

Για την ονοματολογία του στρόβιλου, ο βαθμός αντίδρασης ορίζεται ως εξής :

$$R = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3}$$

δηλαδή είναι ο λόγος της πτώσης της στατικής ενθαλπίας στα πτερύγια του στροφείου σε σχέση με την ολική πτώση της στατικής ενθαλπίας στη βαθμίδα.

Η επίδραση του βαθμού αντίδρασης στα πτερύγια συμπιεστή και στρόβιλου, για $R = 0, 0.5$ και 1 φαίνεται στο σχήμα 4.5.

Όταν $R = 0$ η βαθμίδα αποκαλείται και βαθμίδα ώσης (Impulse stage). Εδώ, όλη η πτώση σε στατική ενθαλπία εμφανίζεται στα ακίνητα πτερύγια. Στα πτερύγια του στροφείου τότε, η ολική ταχύτητα παραμένει σταθερή και απλώς μεταβάλλεται η διεύθυνσή της. Η συσχέτιση των διανυσμάτων των ταχυτήτων και η αντίστοιχη μορφή του σχετικού διαγράμματος Mollier (H-S) φαίνονται στο σχήμα 4.6. Εδώ, έχει υποτεθεί ότι $\beta_2 = \beta_3$. Τα αντίστοιχα διαγράμματα για βαθμίδα στρόβιλου με $R = 0.5$ και $R = 1.0$ φαίνονται στο σχήμα 4.7. Η τάση των μεταβολών στα τρίγωνα ταχυτήτων σε βαθμίδα συμπιεστή γύρω από την τιμή $R = 0.5$ φαίνεται στο σχήμα 4.7.

Από πλευράς εφαρμογών, η εκλογή του κατάλληλου βαθμού αντίδρασης, συνήθως μας δίνει τις παρακάτω λύσεις:

1. Για Συμπιεστές Σε πτερυγώσεις με υποηχητική ροή η πιο συνήθης τιμή είναι $0.5 \leq R \leq 0.6$ στην ακτίνα του μέσου ύψους. Σε πτερυγώσεις με διηχητική ή υπερηχητική ροή ο βαθμός αντίδρασης έχει κάπως μεγαλύτερη τιμή.
2. Για Στρόβιλους Η πιο συνήθης λύση είναι $R \approx 0.5$ στην ακτίνα του μέσου ύψους.

Απόδοση εκτός σημείου σχεδιασμού

Η συμπεριφορά της βαθμίδας, σε συνθήκες λειτουργίας μακριά από το σημείο σχεδιασμού (design point), είναι μεγάλης σπουδαιότητας, ιδίως για τους αεροπορικούς κινητήρες που εργάζονται σε μεγάλο εύρος συνθηκών.

Η πιο απλή εκτίμηση της απόδοσης εκτός σημείου σχεδιασμού (off-design performance) έχει δοθεί από τον Horlock (1973). Η βάση της μεθόδου αυτής έγκειται στο γεγονός ότι τα πειραματικά στοιχεία των πτερυγώσεων μας λένε ότι οι γωνίες εξόδου αυτών δεν επηρεάζονται δραστικά (τουλάχιστον για μια ευρεία περιοχή) από τις μεταβολές της γωνίας πρόσπτωσης. Στην ονοματολογία του συμπεσιτή αυτό σημαίνει ότι $\tan \alpha + \tan \beta \approx \tan \tau = \text{σταθερά}$.

Για βαθμίδες, λοιπόν, με μεγάλη φόρτιση ($\psi d \rightarrow 1$) η φόρτιση ψ μεταβάλλεται έντονα με τις μεταβολές του ϕ . Το αντίθετο συμβαίνει για ελαφρά φορτισμένες βαθμίδες. Τυπικές τιμές του ψ είναι γύρω στο $0.3 \leq \psi d \leq 0.4$. Η μέθοδος αυτή έχει επεκταθεί από τον Horlock (1973) με βάση τις ιδέες του Mellor. Στην επέκταση αυτή θεωρούμε τον συμπεσιτή ότι απαρτίζεται από ένα άθροισμα μικρών επιμέρους συμπεσιτών που επιφέρουν ένα μικρό ποσοστό αύξησης στην πίεση και στη θερμοκρασία του εργαζόμενου ρευστού.

Συμβατικές τιμές των κυρίων παραμέτρων

Η συνήθης διαδικασία σχεδιασμού μιας βαθμίδας συμπεσιτή ή στροβίλου περιλαμβάνει διάφορα στάδια. Τα πιο χαρακτηριστικά από αυτά είναι:

1. Ανάλυση θερμοδυναμικού κύκλου, για τον προσδιορισμό των τιμών ολικής πίεσης, θερμοκρασίας, μαζικής παροχής κλπ.
2. Ανάλυση "μέσης γραμμής", για τον υπολογισμό των ταχυτήτων στο μέσο ύψος των πτερυγίων
3. Ανάλυση ροικών γραμμών (streamline analysis), για τον υπολογισμό των πεδίων ροής στο μεσημβρινό επίπεδο και στις διάφορες πτερυγώσεις
4. Λεπτομερής ανάλυση για τριδιάστατα φαινόμενα ροής, αντοχή σε κόπωση, κραδασμούς, ποιότητα μηχανουργικής επεξεργασίας υλικών κλπ.

Σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις, ο σχεδιαστής, αφενός, πρέπει να ικανοποιήσει τις εξισώσεις της μηχανικής και της θερμοδυναμικής, αφετέρου όμως, είναι ελεύθερος να κάνει ανεξάρτητα την εκλογή των τιμών μερικών παραμέτρων που επηρεάζουν άμεσα τη λειτουργική απόδοση και συμπεριφορά του συστήματος. Οι πιο συνήθεις παράμετροι ελεύθερης εκλογής, και οι περιοχές των τιμών που χρησιμοποιούν σήμερα οι κατασκευαστές κινητήρων, για συμπεσιτές και στροβίλους, έχουν ως εξής :

(i) Συμπιεστής

Οι συνήθεις ελεύθερες μεταβλητές είναι:

(α) Τα χαρακτηριστικά των αεροτομών

Ο λόγος (μέγιστου πάχους)/(μήκους χορδής) είναι $0.1 \leq t/c \leq 0.15$ και αναφέρεται περίπου στο 30% του μήκους της χορδής (από το χείλος προσβολής). Για υπερηχητικές αεροτομές χρησιμοποιούνται δυο κυκλικά τόξα για την κυρτή και την κοίλη πλευρά. Η θέση μέγιστης απόκλισης της μέσης γραμμής καμπυλότητας από τη γραμμή της χορδής λαμβάνεται μεταξύ 40% και 60% του μήκους της χορδής (από το χείλος προσβολής). Η τιμή αυτή του λόγου (a/c) επηρεάζει άμεσα τις απώλειες λόγω πάχους οριακού στρώματος.

Για $a/c \approx 0.4$ τα πτερύγια υφίστανται μικρότερη επιρροή από τις μεταβολές στη γωνία πρόσπτωσης και έχουν μεγαλύτερο διάκενο στο "λαιμό" και, επομένως, επιτρέπουν να περάσει μεγαλύτερη μαζική παροχή, κάτι που ωφελεί τη ροή στις επόμενες βαθμίδες. Για $a/c \approx 0.6$ έχουμε υψηλότερο ψ και αριθμό Mach εισαγωγής, κάτι που ωφελεί τις πρώτες βαθμίδες.

(β) Ο βαθμός αντίδρασης

Είναι συνήθως γύρω στο 0.5, τουλάχιστον στη μέση γραμμή.

(γ) Ο λόγος εκπετάσματος (h_B/c)

Για να έχουμε μεγάλο λόγο άντωσης προς οπισθέλκουσα στο πτερύγιο θα πρέπει να έχουμε $h_B/c > 3$. Επειδή όμως μια μεγάλη τιμή του λόγου αυτού δημιουργεί προβλήματα με τη συστροφή των πτερυγίων κατά το ύψος (ιδίως για κατανομές ελεύθερης δίνης) και επίσης εμφανίζει τάσεις για πτερυγισμό (flutter), στους σύγχρονους αξονικούς συμπιεστές συνήθεις τιμές του λόγου αυτού είναι $1.0 < h_B/c < 2.5$. Μόνο στα πτερύγια του ανεμιστήρα ο λόγος φτάνει το 4.0.

(δ) Ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα (r_h/r_t)

Συνήθως λαμβάνεται μεταξύ 0.4 και 0.6. Μικρές τιμές επιτρέπουν κάπως μικρότερη εξωτερική διάμετρο για δοθείσα μαζική παροχή, αλλά μας οδηγούν σε πτερύγια μεγάλου ύψους. Για πολυβάθμιους συμπιεστές, στην πρώτη βαθμίδα ο λόγος είναι περίπου 0.5 αν και σε βαθμίδες ανεμιστήρων μπορεί να μειωθεί και στο 0.3. Προς την έξοδο του συμπιεστή ο λόγος φθάνει το πολύ το 0.92 αν και 0.85 είναι πιο πρόσφορη λύση.

(ε) Ο αγωγός του συμπιεστή

Λόγω ανάπτυξης οριακών στρωμάτων και συνεχούς παραμόρφωσης του προφίλ της αξονικής ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού του συμπιεστή δεν μπορούμε να πάρουμε περισσότερο έργο μέσω αύξησης της ροής-αξονικής ταχύτητας

(στ) Αριθμός Mach

Ο μέγιστος αριθμός Mach συνήθως εμφανίζεται στο άκρο (tip) του πτερύγιου. Ο αξονικός αριθμός Mach είναι γύρω στο 0.4 στους περισσότερους συμπιεστές αν και μπορεί να ανέβει στο 0.6 για turbofan με διηχητικές αεροτομές όπου η μέγιστη τιμή του σχετικού αριθμού Mach (δηλαδή ως προς τη σχετική ταχύτητα στο στροφέιο) φθάνει και το μέγιστο επιτρεπόμενο 1.8. Για τυπικές (υψηλές) τιμές: $C=200\text{m/s}$, $U_{p\tau}=450\text{m/s} \Rightarrow M_{rel,tip}=1.5$.

(ζ) Αριθμός Βαθμίδων

Υποθέτοντας τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης όπως παραπάνω λαμβάνουμε την επιδιωκόμενη συνολική θερμοκρασιακή αύξηση, $\Delta T_{0,c}$, στο συμπιεστή. Ένας λογικός και συνήθης επιμερισμός αυτής είναι 10-30°C σε κάθε βαθμίδα.

(ii) Στρόβιλος

Οι συνήθεις ελεύθερες μεταβλητές εδώ είναι:

(α) Ο αριθμος των βαθμίδων

Ο αριθμός αυτός εξαρτάται από τον ολικό βαθμό εκτόνωσης. Σε στροβιλοκινητήρες, η τιμή του r_t είναι αισθητά μικρότερη από την αντίστοιχη του r_c , γιατί σημαντικό ποσοστό εκτόνωσης λαμβάνεται στο ακροφύσιο που παράγει την ώση. Επίσης, στην περίπτωση που η μηχανή έχει δυο ή τρεις άξονες ο αριθμός των βαθμίδων ρυθμίζεται ανάλογα. Πάντως, για $r_t > 3$ συνήθως χρησιμοποιούνται πάνω από δυο βαθμίδες. Μερικές φορές στην πρώτη βαθμίδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και $r_t = 4.0$ λόγω του υψηλού κόστους των πτερυγίων με εσωτερικούς αγωγούς ψύξης.

(β) Κατανομή έργου ανά βαθμίδα

Οι συνήθεις κατανομές σε στρόβιλους 2, 3 ή 4 βαθμίδων είναι:

για 2 : 48% η πρώτη, 52% η δεύτερη

για 3 : 30 / 36 / 34%

για 4 : 21 / 26 / 28 / 25%.

(γ) Αγωγός στρόβιλου

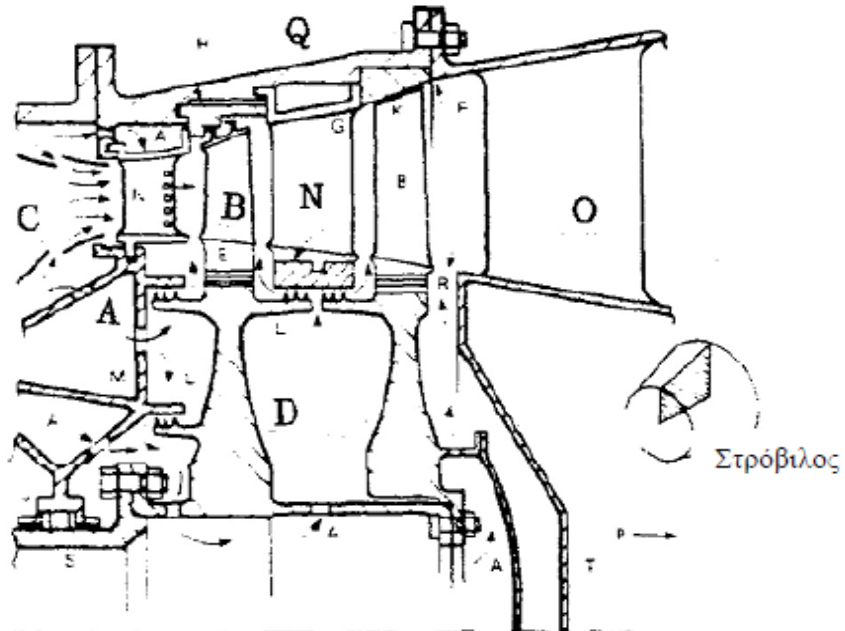
Ισχύουν τα αντίθετα με τους αγωγούς του συμπιεστή. Όσο αυξάνει το εκπέτασμα (δηλαδή το h_b) τόσο μειώνεται η αξονική ταχύτητα και ο αξονικός αριθμός Mach. Για ορισμένο έργο (ΔW_1) όμως αυξάνει η γωνία εκτροπής (ϵ). Συνήθως οι αγωγοί σχεδιάζονται έτσι ώστε η γωνία ϵ να μην υπερβεί τις 105° τουλάχιστον στη μέση γραμμή.

(δ) Βαθμός αντίδρασης

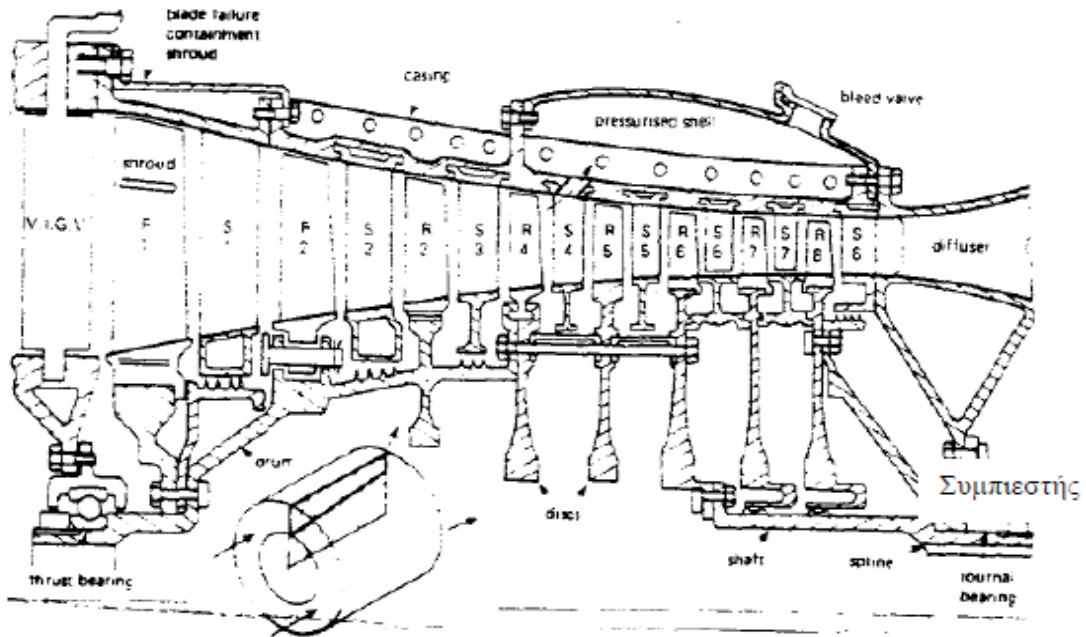
Συνήθως λαμβάνεται γύρω στο 0.5.

(ε) Μήκος χορδής

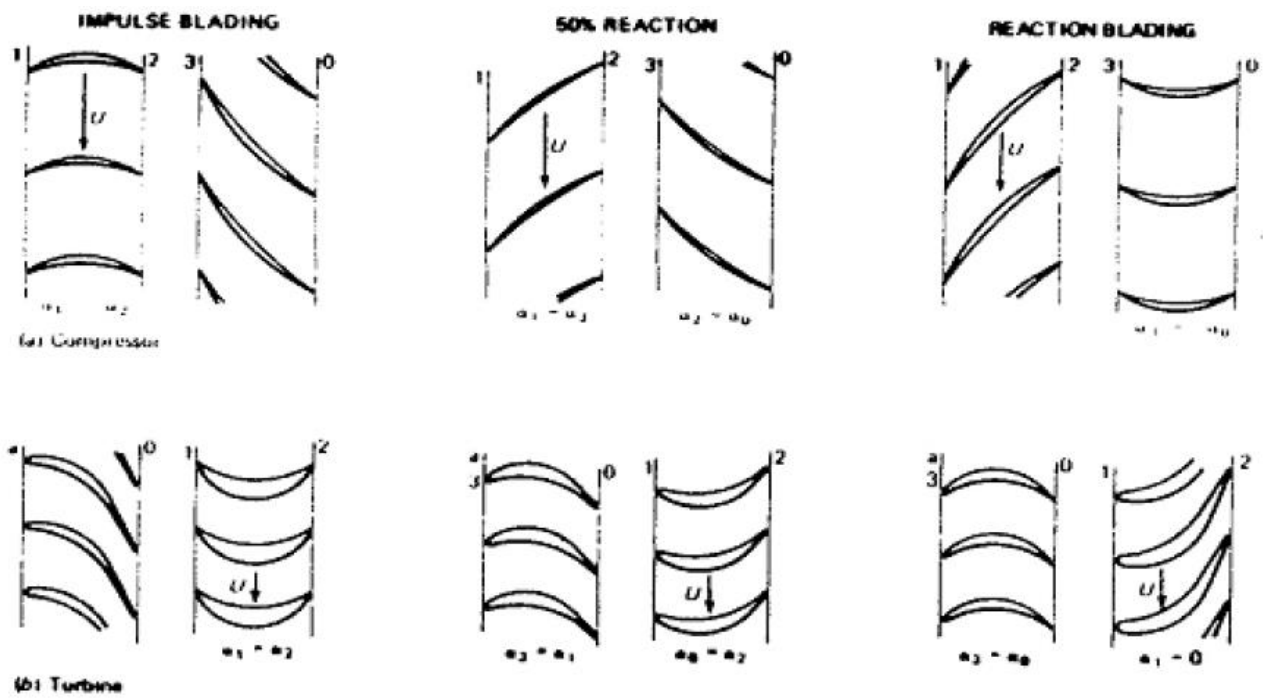
Όχι κάτω από 1cm τουλάχιστον η αξονική χορδή (b). Συνήθως είναι μεταξύ 2-5cm. Ελάχιστο πάχος χείλους εκφυγής είναι 0.5mm, για μη ψυχόμενα περύγια, και 1.8mm, για ψυχόμενα.



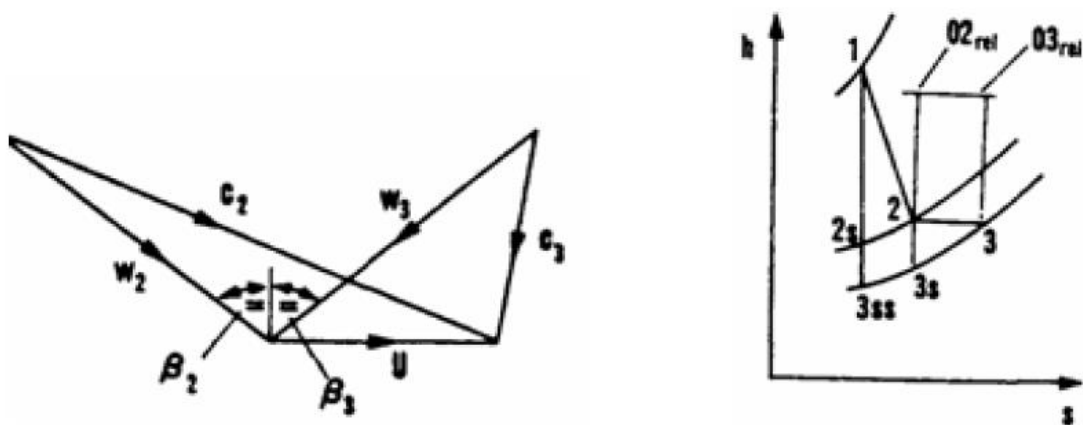
A section through a two-stage turbine, showing: A cooling air flows; B turbine blades; C combustion outlet; D turbine discs; E extended blade root; F annulus flare; G blade shrouding; H seal segment; I NGV inner shroud; J journal bearing; K tip clearance; L labyrinth seal; M nozzle diaphragm; N nozzle guide vane; O outlet straighteners; P power turbine (downstream); Q turbine casing; R fir-tree root; S shaft; T tail cone (front piece)



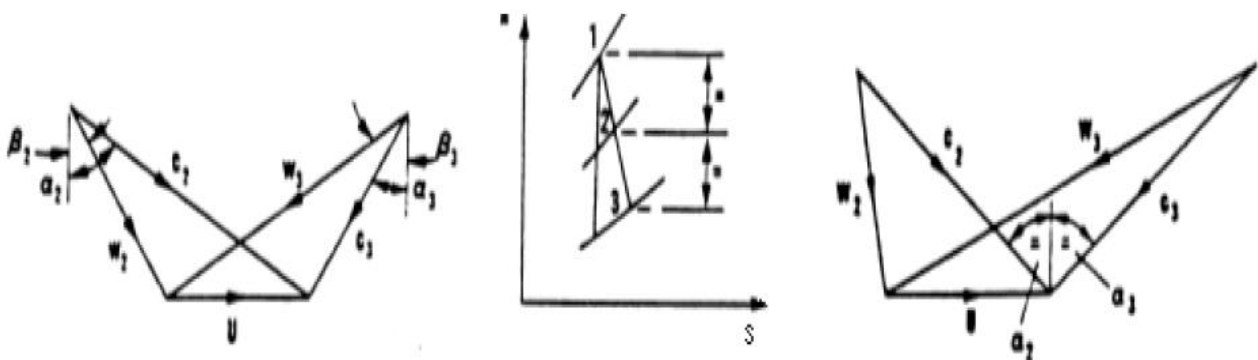
Σχήμα 4.4



Σχήμα 4.5 Η επίδραση του βαθμού αντίδρασης στα πτερύγια συμπιεστή/τροβίλου



Σχήμα 4.6 Βαθμίδα τροβίλου για $R=0$



Σχήμα 4.7 Βαθμίδες τροβίλου με $R=0.5$ και $R=1.0$

Κεφάλαιο 5 - Συστήματα θαλάμων καύσης αεροστροβίλων και Χαρακτηριστικές καμπύλες και διαγράμματα λειτουργίας επι μέρους συνιστώσεων

Εισαγωγή

Εάν αναφερθούμε στο τυπικό P-V διάγραμμα για ένα κύκλο turbo-jet, βλέπουμε ότι μεταξύ της συμπίεσης και της εκτόνωσης υπάρχει ένα στάδιο όπου το εργαζόμενο ρευστό (αέρας) εκτονώνεται υπό $P \approx ct$. Αυτή η εκτόνωση επιτυγχάνεται στην πράξη διά της θέρμανσης του αέρα μέσω έγχυσης και καύσης ενός καυσίμου. Μεγάλος βάθος εκτόνωσης σημαίνει μεγάλο χρήσιμο έργο. Επειδή όμως το αέριο εκτονώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας του, ένα πρακτικό όριο στο βαθμό εκτόνωσης που μπορεί να επιτευχθεί τίθεται από τη μέγιστη θερμική αντοχή των υλικών της μηχανής και ιδιαίτερα του στροβίλου.

Γενικά χαρακτηριστικά λειτουργίας θαλάμων καύσης

Απαιτήσεις απόδοσης λειτουργίας θαλάμου καύσης αεροστροβίλου

- (i) Υψηλή απόδοση καύσης, για την πλήρη καύση και απόδοση της θερμογόνου ενέργειας του καυσίμου.
- (ii) Ευστάθεια καύσης σε μεγάλο εύρος λόγων αέρα/καυσίμου.
- (iii) Διευκόλυνση έναυσης επί του εδάφους και εν πτήσει.
- (iv) Χαμηλή απώλεια ολικής πίεσης - η διακεκομμένη γραμμή στο διάγραμμα P-V συνιστά ελάττωση του ωφέλιμου έργου.
- (v) Χαμηλή εκπομπή ρύπων.
- (vi) Αποδεκτή θερμοκρασιακή κατανομή στην έξοδο του θαλάμου καύσης ώστε να μεγιστοποιείται η διάρκεια ζωής των πτερυγίων του στροβίλου.

Βασικά χαρακτηριστικά εξέλιξης και σχεδιασμού θαλάμων καύσης

Στο σχήμα 5.1 απεικονίζεται η βασική διάταξη θαλάμου καύσης : Καύσιμο ψεκάζεται στο κέντρο ενός αγωγού. Η ταχύτητα του αέρα, υπό την οποία γίνεται η καύση είναι ίση με την ταχύτητα εκροής από τον συμπιεστή - της τάξης των 150-200 m/s. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι υπάρχει μια πολύ μεγάλη θεμελιώδης πτώση πίεσης (απώλεια εν θερμώ) που εμφανίζεται όταν θερμότητα προστίθεται σε ένα αέριο υψηλής ταχύτητας.

Στο σχήμα 5.1b ένας διαχύτης (diffuser) χρησιμοποιείται για να ελαττώσει τη U σε κάποια τιμή που μας δίνει ένα ανεκτό ΔP_{fund} . Ελάττωση της ταχύτητας κατά 20% σημαίνει ότι το ΔP_{fund} ελαττώνεται κατά 4%.

Αλλά ακόμη και με την προσθήκη του διαχύτη η ταχύτητα στην περιοχή καύσης εξακολουθεί να είναι πολύ υψηλή για ευσταθή καύση διότι είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τη θεμελιώδη ταχύτητα φλόγας των περισσότερων καυσίμων.

Έτσι, στο σχήμα 5.1c, ένας σταθεροποιητής έχει προστεθεί πίσω από τον ψεκαστή και λόγω της δημιουργούμενης ροικής ανακυκλοφορίας η φλόγα «αγκιστρώνεται». Παρ' όλα αυτά όμως το σύστημα του σχήματος 5.1c εξακολουθεί να μην είναι αποδεκτό για πρακτικές εφαρμογές θαλάμων καύσης αεριοστροβίλων. Για να προσδοθεί η επιθυμητή θερμοκρασιακή αύξηση στην αεριοροή διαμέσου του θαλάμου, ο θάλαμος πρέπει να εργάζεται με λόγο αέρα/καυσίμου (Air Fuel Ratio- AFR) περίπου 60, ενώ γνωρίζουμε από τη χημεία ότι μίγματα αέρα-υδρογονάνθρακα καίγονται μόνο όταν το AFR είναι μεταξύ 8- 30. Είναι αναγκαίο, λοιπόν, να εισάγουμε μέρος μόνο του αέρα στην πρωτεύουσα ζώνη καύσης (primary zone) κοντά στο ψεκαστήρα έτσι ώστε το τοπικό AFR να είναι βέλτιστο και κοντά στο στοιχειομετρικό AFR (≈ 15 για τα περισσότερα καύσιμα αεριοστροβίλων). Έτσι στο σχήμα 5.1d παρατίθεται ένας φλογοσωλήνας (flame tube) προσαρμοσμένος στο σταθεροποιητή με οπές εισαγωγής πρωτεύοντα και δευτερεύοντα αέρα (primary and dilution holes-jets). Το κύριο μέρος του αέρα εισάγεται στη ζώνη αραιώσης (dilution zone) και χρησιμοποιείται για την ελάττωση της θερμοκρασίας των θερμών καυσαερίων σε θερμοκρασίες αποδεκτές για τα περύγια του στροβίλου. Στη ζώνη αραιώσης δε γίνεται καύση κάτω από κανονικές συνθήκες αλλά μόνο τυρβώδης ανάμιξη μεταξύ θερμών καυσαερίων και αέρα αραιώσης (dillution air). Στην πράξη και σε σύγχρονα συστήματα θαλάμων καύσης (σχήμα 5.2α) εισάγεται και μια ενδιάμεση (intermediate) ζώνη. Ένα μικρό κλάσμα του αέρα αραιώσης εισάγεται εδώ ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και χρησιμεύει για την αποπεράτωση της καύσης που ξεκίνησε στην πρωτεύουσα ζώνη. Έτσι ελαττώνεται η θερμοκρασία των καυσαερίων για να επιτραπεί στα προϊόντα που παρήχθησαν κατά τις δευτερεύουσες χημικές διάσπασεις (dissociation) όπως: NO_x , SO_x , CO να επανασυντεθούν και να απελευθερωθεί η περίσσεια ενέργειας. Το σχήμα 5.2β δείχνει ροϊκά πεδία αέρα-καυσαερίων σε σύγχρονους σωληνοειδείς θαλάμους καύσης.

Κατηγορίες θαλάμων καύσης και τα σχετικά πλεονεκτήματά τους

Γενικά οι θάλαμοι καύσης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες :

1. Σε αυτούς που είναι σχετικά απομακρυσμένοι από τον συμπιεστή και το στρόβιλο και αποτελούν ξεχωριστή μονάδα (κυρίως για βιομηχανικές χρήσεις και κάπως παλαιών σχεδιαστικών τάσεων).
2. Σε αυτούς που μαζί με το στρόβιλο και το συμπιεστή αποτελούν ενιαία κατασκευή και οι οποίοι συναντώνται σχεδόν σε όλες τις σύγχρονες κατασκευές και οπωσδήποτε στις εφαρμογές πρόωσης.

Οι ενιαίου τύπου κατασκευές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- (i) Σε αυτές που αποτελούνται από πολλαπλούς ξεχωριστούς θαλάμους σωληνοειδούς μορφής και ονομάζονται σωληνοειδείς (tubular).

Προτερήματα αυτού του τύπου:

1. Ευκολία στην ανάπτυξη και το σχεδιασμό.
2. Το ψεκαζόμενο καύσιμο «ταιριάζει» στον ατομικό στροβιλιστή (swirler) και στα πρωτεύοντα jets.
3. Έχει μικρή διάμετρο (ο καθένας) και η απαιτούμενη δομική αντοχή επιτυγχάνεται εύκολα - μικρό βάρος.
4. Ευκολότερη συντήρηση - η εξαρμοση του ενός θαλάμου δεν προϋποθέτει αποσύνδεση των υπολοίπων.

Μειονεκτήματα :

1. Πολύπλοκες και βαριές σωληνώσεις χρειάζονται για να διοχετευθεί ο αέρας από το συμπιεστή στο θάλαμο και από εκεί στο στρόβιλο με ομοιόμορφο εγκάρσιο προφίλ ταχυτήτων και θερμοκρασίας και χαμηλές απώλειες πίεσης.
2. Συγκρινόμενο με θάλαμο της δεύτερης κατηγορίας, για την ίδια παροχή αέρα, το σωληνοειδές σύστημα είναι βαρύτερο και οδηγεί σε μηχανή με μεγαλύτερη διάμετρο εξωτερικού κελύφους.

- (ii) **Θάλαμος μορφής περιφερειακού δακτυλίου (annular).**

Προτερήματα :

1. «Καθαρή» αεροδυναμική κατασκευή και συνεπώς μικρότερη πτώση πίεσης. Οι σωληνώσεις από το συμπιεστή προς το στρόβιλο είναι απλές.
2. Προσφέρει ελάχιστο μήκος, βάρος και διάμετρο.
3. Προβλήματα ανομοιόμορφης περιφερειακής έναυσης αποφεύγονται.

Μειονεκτήματα:

1. Δυσκολία ερευνητικής ανάπτυξης λόγω απαίτησης υψηλών παροχών αέρα
2. Προβλήματα μηχανικής αντοχής λόγω λυγισμού σε υψηλές θερμοκρασίες (μέγιστο μήκος $\approx 1\text{m}$).
3. Δύσκολο να «ταιριάξουν» τα χαρακτηριστικά του ψεκαζόμενου καυσίμου (spray) με τα πρωτεύοντα jets.
4. Δύσκολο να επιτευχθεί σταθερά ομοιόμορφη θερμοκρασία εξόδου.

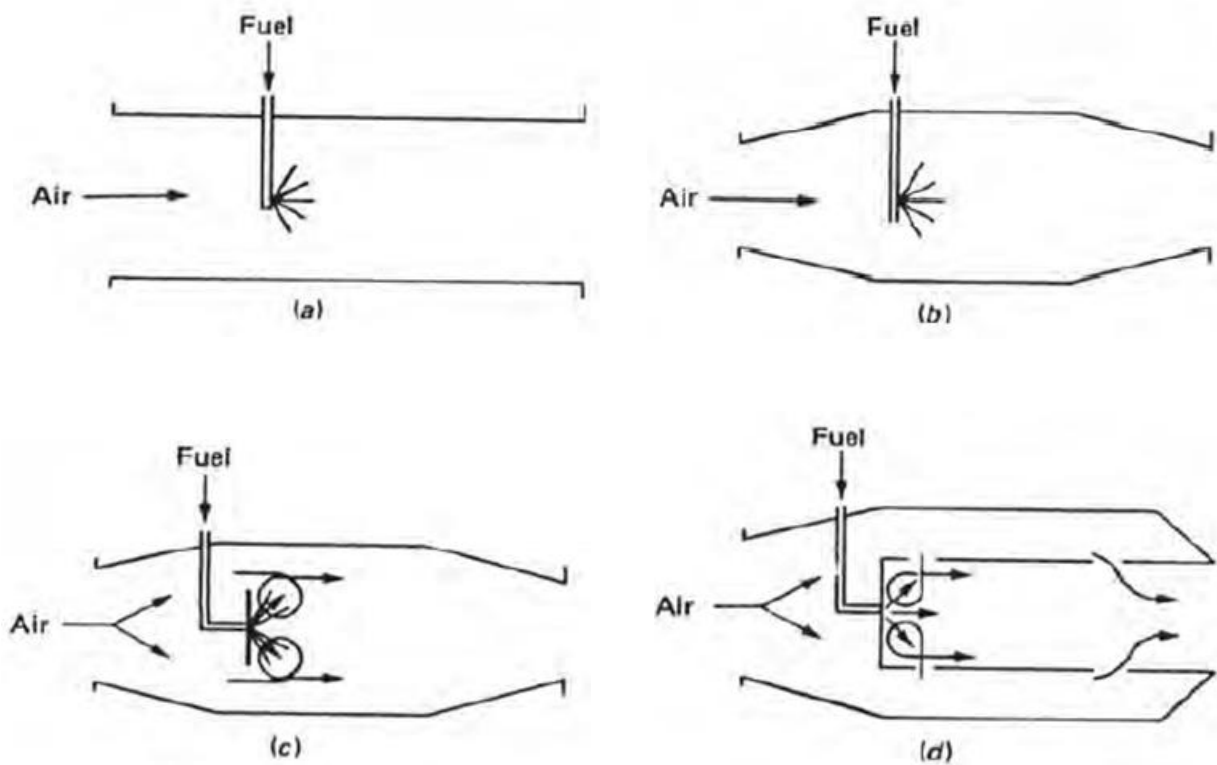
(iii) Θάλαμος καύσης συνδυασμού των ανωτέρω σωληνο-δακτυλιοειδής (tubo-annular)

Προτερήματα :

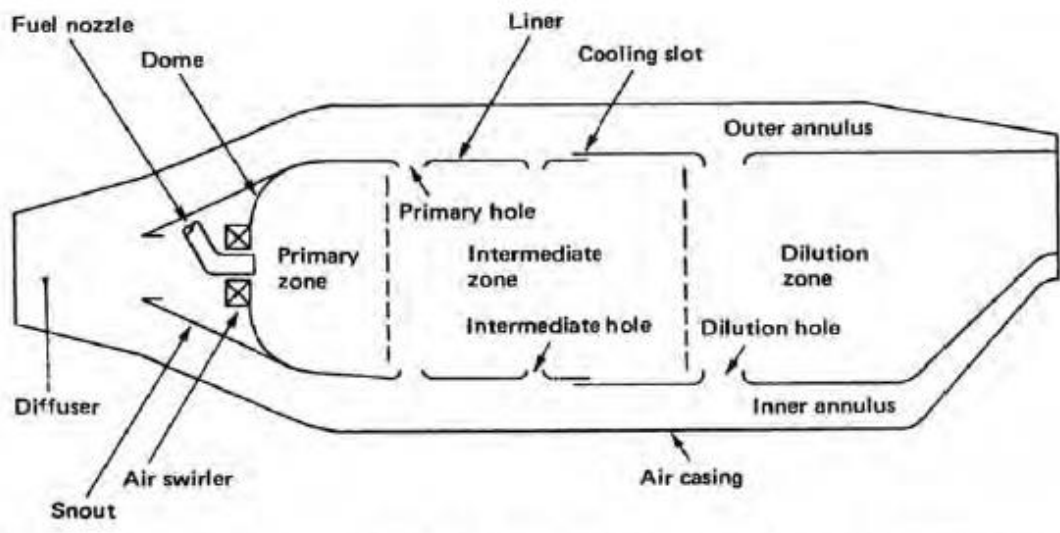
1. Εύκολη ανάπτυξη και πειραματικός έλεγχος.
2. Καλή συμπεριφορά στο ροϊκό συνδυασμο ψεκασμου και jets.

Μειονεκτήματα :

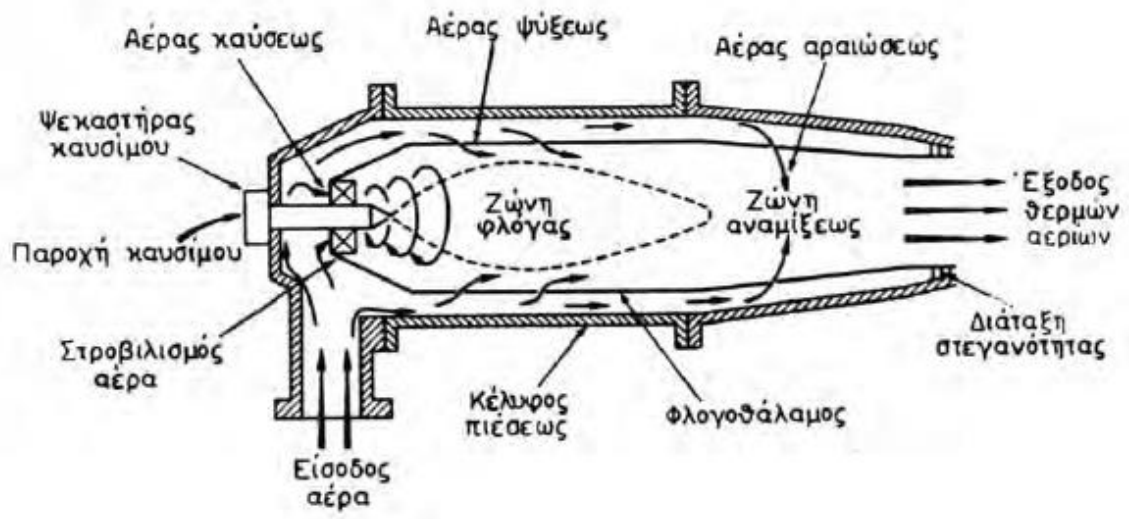
1. Κακή αεροδυναμική συμπεριφορά.
2. Προβληματική ομοιόμορφη περιφερειακή έναυση.



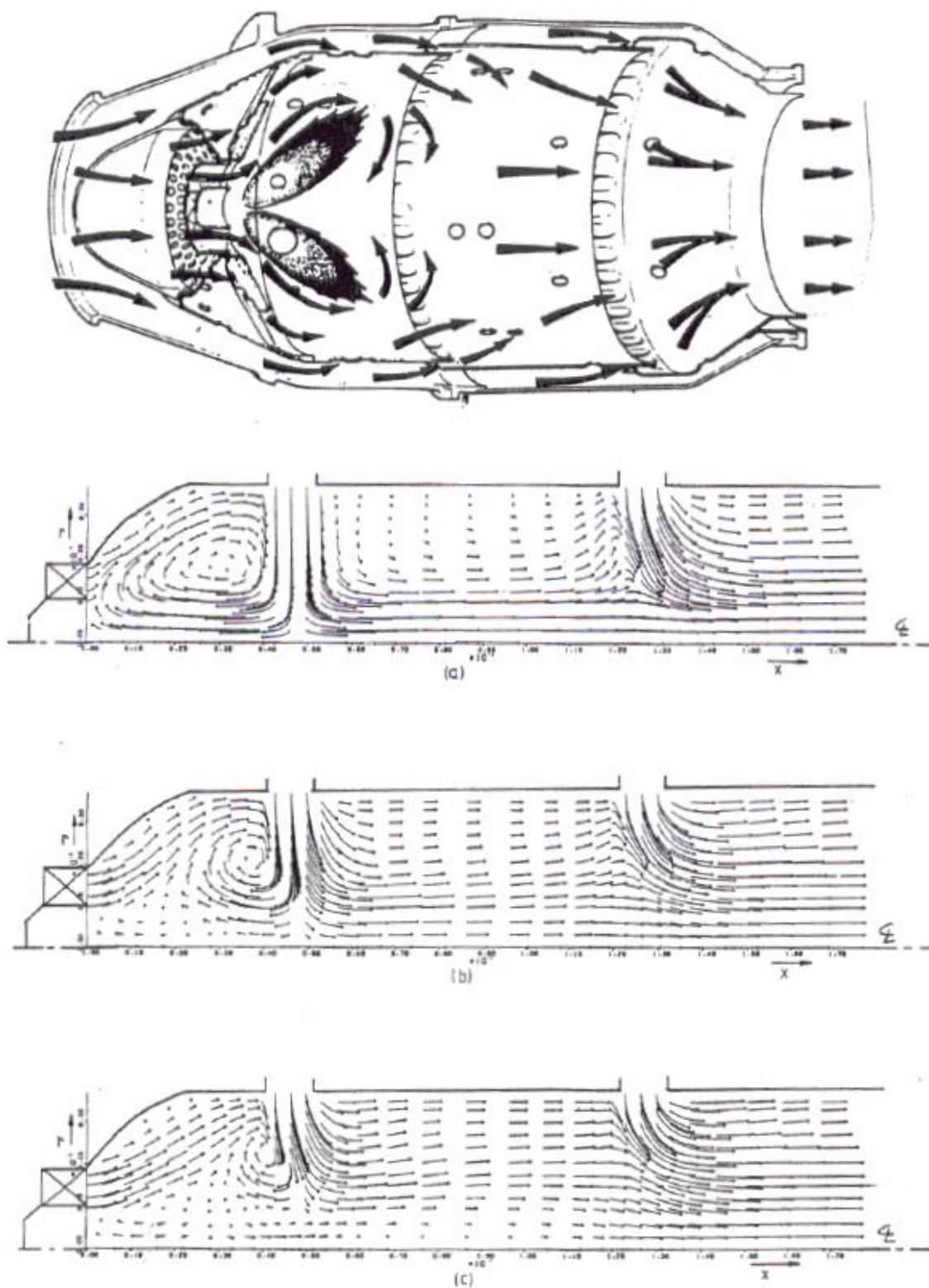
Σχήμα 5.1 Στάδια στην εξέλιξη των θαλάμων καύσης αεριοστροβίλων.



Diffuser=Διαχυτής, Snout=Προφύσιο, Swirler=Στροβιλιστής, Dome=θολός, Primary zone=Πρωτεύουσα ζώνη, Primary holes=Πρωτεύουσες οπές, Intermediate zone =Ενδιάμεση ζώνη, Dilution zone=Ζώνη αραιώσεως, Annulus=Δακτυλιοειδές διακενό, Fuel nozzle=Ακροφύσιο εγχύσεως καυσίμου



Σχήμα 5.2α Κόρια τμήματα και λειτουργία τυπικών θαλάμων καύσεως αεριοστρόβιλου



Σχήμα 5.2β Ροή αέρα και καυσαερίων στο θάλαμο καύσης

Χαρακτηριστικές καμπύλες και διαγράμματα λειτουργίας επι μέρους συνιστώσεων:

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. Έτσι οι πλήρεις χαρακτηριστικές καμπύλες της λειτουργικής απόδοσης ενός συμπιεστή μπορούν να καθοριστούν επί τη βάσει δυο μόνο ομάδων καμπυλών, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.3α, β 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 η_c , σχεδιάζονται στο διάγραμμα συναρτήσει της «αδιάστατης» παροχής, («αδιάστατη» μάζα $m\sqrt{T_{01}} / P_{01}$), για διαφορετικές σταθερές τιμές του «αδιάστατου» αριθμού στροφών, ($N/\sqrt{T_{01}}$). Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.3α 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 5.3α. 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 και των αδιάστατων στροφών είναι η ισοδύναμη παροχή ($m\sqrt{\theta} / \delta$) και οι ισοδύναμες στροφές ($N / \sqrt{\theta}$) όπου $\theta = T_{01} / T_{ref}$ και $\delta = P_{01} / P_{ref}$ και η κατάσταση αναφοράς αντιστοιχεί κατά ISA σε επίπεδο θαλάσσης δηλαδή 288 K και 1.013 bar.

Στο σχήμα 5.3β 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. Σε συμπιεστές υψηλών αποδόσεων στην περιοχή λειτουργίας που οι καμπύλες σταθερών στροφών λόγω του στραγγαλισμού της ροής εισόδου γίνονται κατακόρυφες, σχήμα 5.3γ 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, η_t , και την "αδιάστατη" μάζα ($m\sqrt{T_{03}} / P_{03}$), συναρτήσει του λόγου πιέσεων P_{03}/P_{04} για διάφορες τιμές του λόγου ($N / \sqrt{T_{03}}$). Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα χαρακτηριστικών στροβίλου δίδονται στο σχήμα 5.4α, και 5.4β, (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 πτερύγωση 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 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 συνιστώσων. Στα κατωτέρω θα αναφερθούμε στις χαρακτηριστικές της πλήρους μονάδας. Από τις μεθόδους υπολογισμού των κύκλων είναι δυνατό να εκτιμηθεί ο λόγος πιέσεων που για δεδομένη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου θα δώσει τη 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 πιέσεων 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.

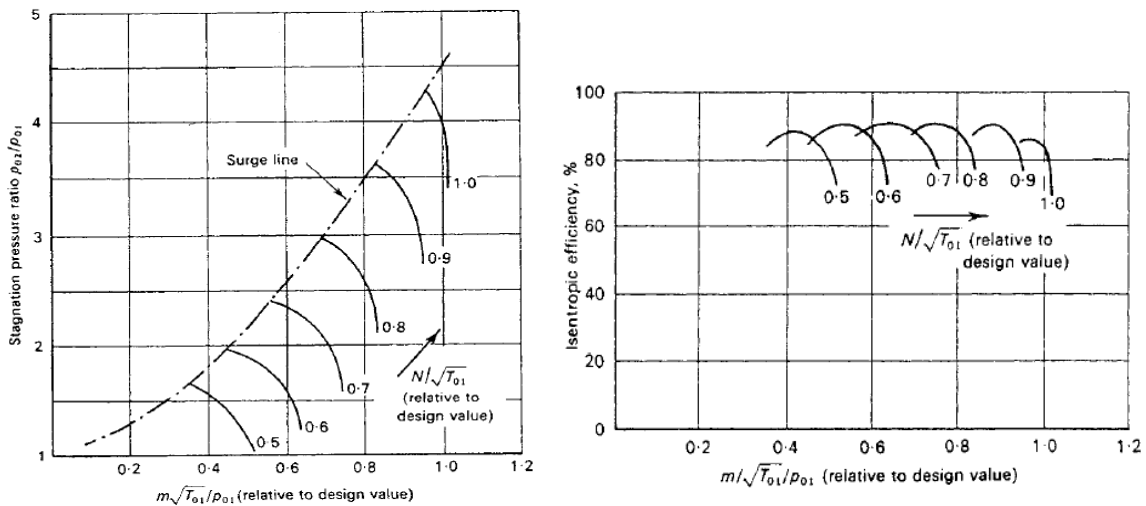
Τα σημεία λειτουργίας ισορροπίας για μια σειρά διαφορετικών στροφών μπορούν να σχεδιαστούν επί του διαγράμματος χαρακτηριστικών του συμπιεστή και να ενωθούν για να σχηματίσουν την γραμμή λειτουργίας ισορροπίας (equilibrium running line) το δε πλήρες διάγραμμα που προκύπτει καλείται διάγραμμα λειτουργίας 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 αεριοστρόβιλος 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°C στην Ανταρκτική μέχρι και 40°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 5.5.

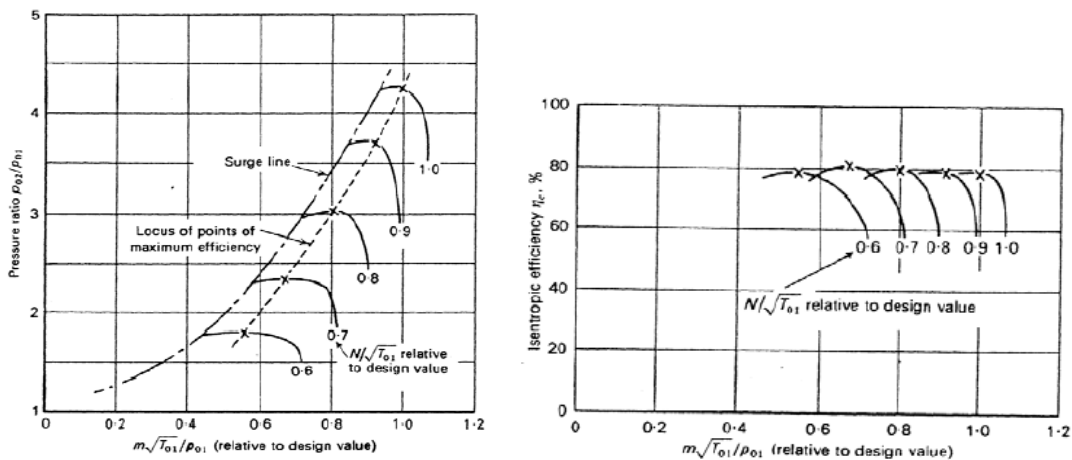
Αυτές είναι:

1. Της μονοαξονικής μονάδας ισχύς,
2. Της διάταξης του σχήματος 5.5β όπου το κύριο τμήμα του αεριοστροβίλου (που λέγεται και αεριογεννήτρια- gas generator) είναι (αεροδυναμικά) συζευγμένο με ελεύθερο στρόβιλο ισχύος και
3. Της απλής μηχανής turbojet όπου εδώ τώρα η χρήσιμη ισχύς εμπεριέχεται στο υψηλής ταχύτητας jet που παράγεται στο ακροφύσιο.

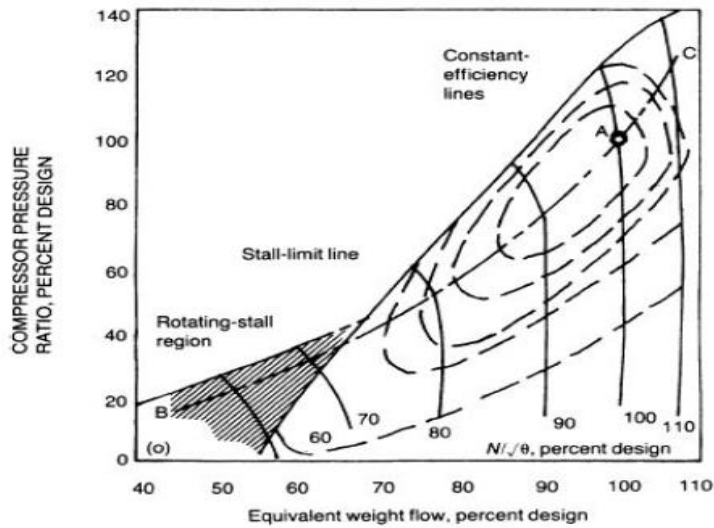
Τα χαρακτηριστικά του κύκλου και της ροής του ελεύθερου στροβίλου ισχύος και του προωστικού ακροφυσίου είναι όμοια, επιβάλλουν όμοιους περιορισμούς στην κύρια αερογεννήτρια, ώστε ο ελεύθερος στρόβιλος ισχύος και το προωστικό ακροφύσιο να είναι θερμοδυναμικά όμοια. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εδώ βασίζονται 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.



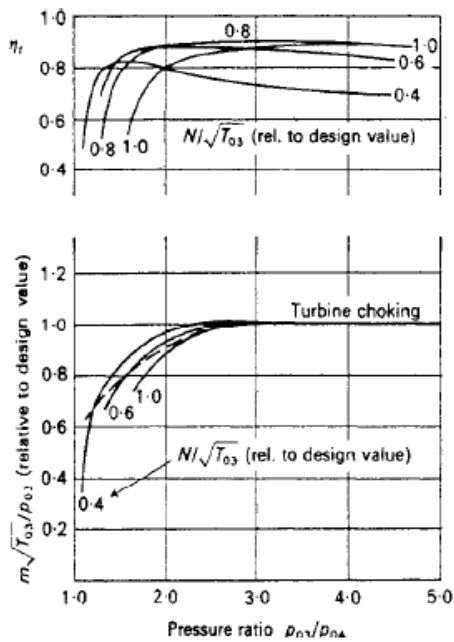
Σχήμα 5.3α Χαρακτηριστικές καμπύλες και διαγράμματα λειτουργίας αξονικού συμπιεστή



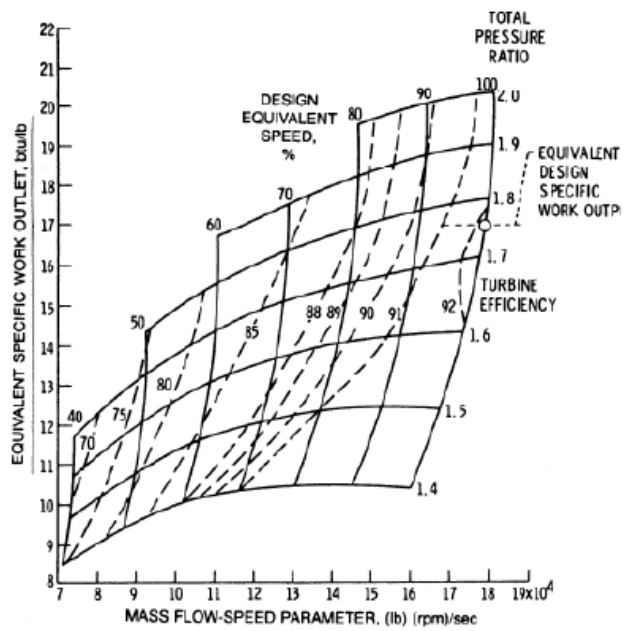
Σχήμα 5.3β Χαρακτηριστικές καμπύλες και διαγράμματα λειτουργίας φυγοκεντρικού συμπιεστή



Σχήμα 5.3γ Χαρακτηριστικές καμπύλες και διαγράμματα λειτουργίας γενικής μορφής συμπιεστή

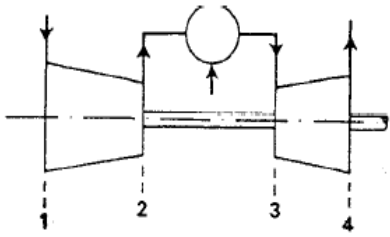


Σχήμα 5.4α

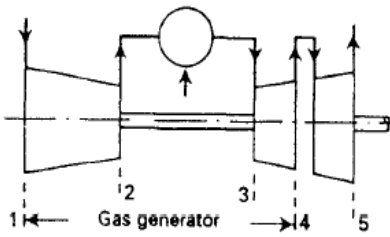


Σχήμα 5.4β

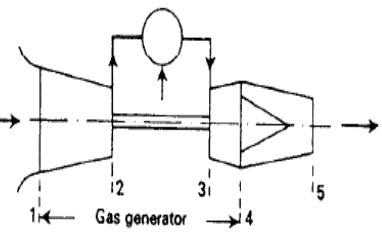
Χαρακτηριστικές καμπύλες και διαγράμματα λειτουργίας του στροβίλου



Σχήμα 5.5α



Σχήμα 5.5β



Σχήμα 5.5γ

Απλές μονάδες αεριοστροβίλων

Λειτουργία μονοαξονικού αεριοστροβίλου

Σύμφωνα με τα λεγόμενα του προηγούμενου υποκεφαλαίου, για το μονοαξονικό αεριοστροβίλο του σχήματος 5.5α ο λόγος πιέσεων στον στροβίλο υπολογίζεται από τον λόγο πιέσεων στο συμπιεστή και τις απώλειες πίεσης στον θάλαμο καύσης. Η ροή μάζας στο στροβίλο 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:

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

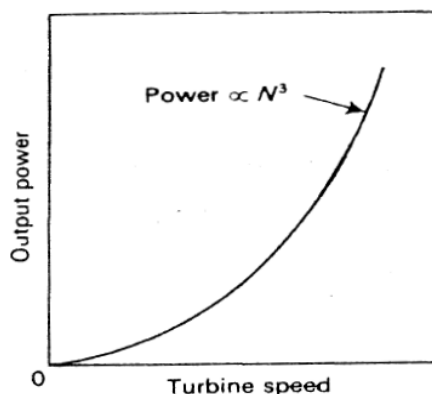
$$\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}, \frac{P_{02}}{P_{01}}, \eta_c, \frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$$

2. Τα αντίστοιχα σημεία επί της χαρακτηριστικής του στροβίλου λαμβάνονται εκ της συμβατότητας στροφών και παροχής.
3. 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.

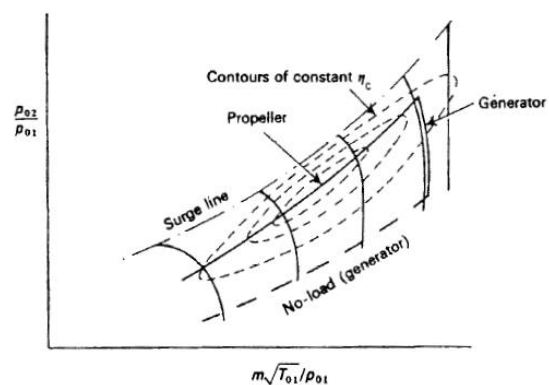
Τέλος είναι αναγκαίο να ελέγξουμε την πιστότητα της λύσης μέσω της χρήσης των καμπύλων του φορτίου για την δεδομένη εφαρμογή. Για παράδειγμα αν η μηχανή εργαζόταν σε μια εγκατάσταση μέτρησης (test bed) συζευγμένη με ένα δυναμόμετρο, το φορτίο θα μπορούσε να επιλεγεί ανεξαρτήτως των στροφών και η μηχανή 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.

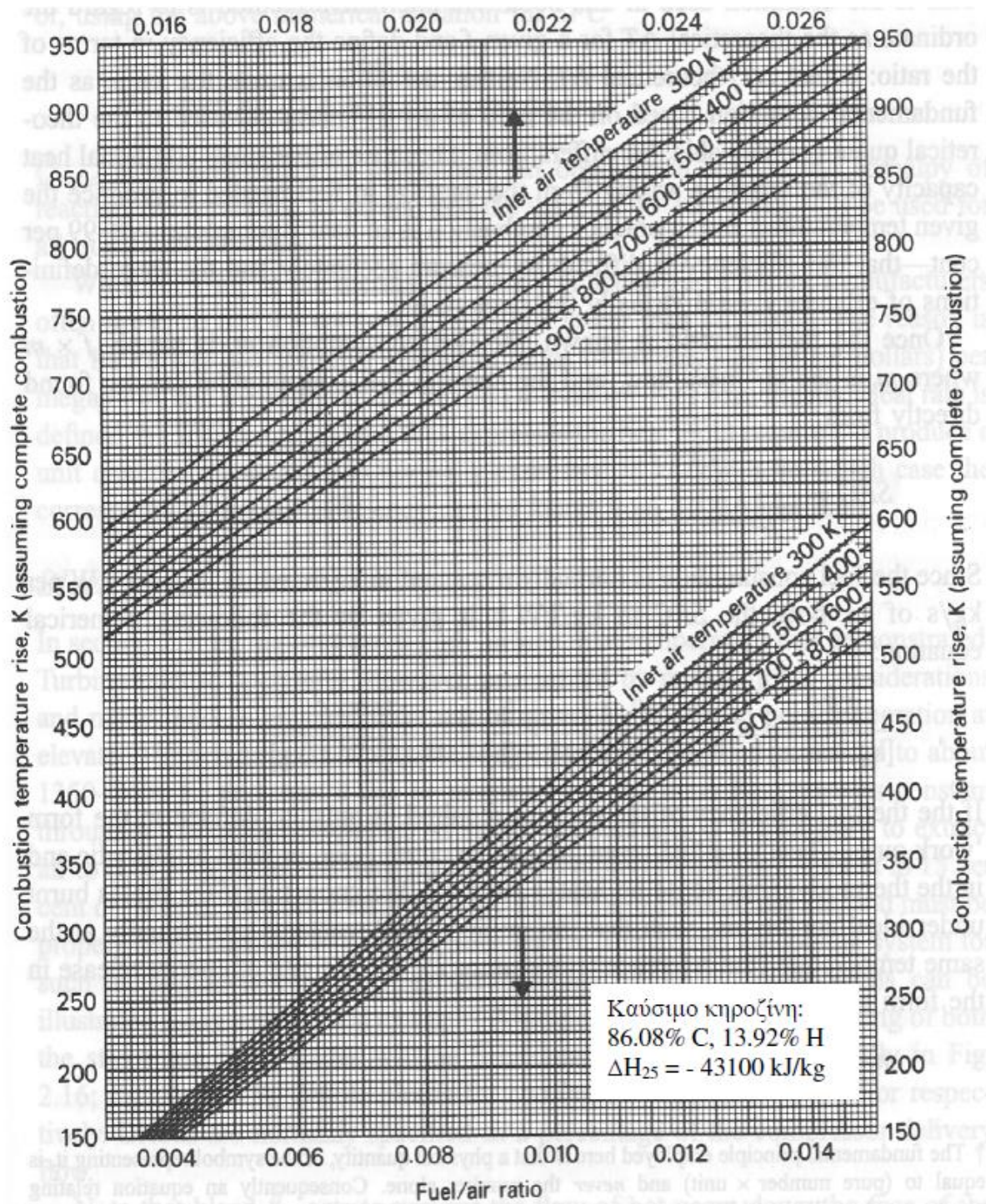
Όταν δε, είναι γνωστά η μηχανική απόδοση και ο λόγος του κιβωτίου υπάρχει δεδομένη (και δεσμευτική) χαρακτηριστική καμπύλη του φορτίου συναρτήσει της ισχύος και των στροφών όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. Το πρόβλημα είναι τότε να ευρεθεί το μόνο σημείο επάνω σε κάθε γραμμή σταθερών στροφών στο διάγραμμα 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 5.7. 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 5.7 και κάθε σημείο της γραμμής παριστά διαφορετικές θερμοκρασίες εισόδου του στροβίλου και ισχύς 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 5.7. Οι υπολογισμοί που περιγράφησαν προηγουμένως βοηθούν στην εκτίμηση όλων των παραμέτρων που απαιτούνται για ενά 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 5.8 υποθέτοντας μια τιμή της απόδοσης καύσης η_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.



Σχήμα 5.6 χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου



Σχήμα 5.7 Γραμμές λειτουργίας ισορροπίας



Σχήμα 5.8 Αύξηση της θερμοκρασίας στο θάλαμο καύσης συναρτήσει του λόγου καυσίμου/αέρα

Κεφαλαίο 6 – Υπολογισμός θερμοδυναμικών παραμέτρων αεριοστροβίλου (Μεθοδολογία και ανάλυση)

Έστω ότι αεριοστροβίλος χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 50 MW. Στην είσοδο του συμπιεστή ο αέρας έχει πίεση 100 KN/m² και θερμοκρασία 25 °C. Η μέγιστη θερμοκρασία και πίεση του κύκλου είναι 1400 °C και 1800 KN/m² αντίστοιχα. Ο αεριοστροβίλος χρησιμοποιεί καύσιμο με θερμαντική ικανότητα 48.600 KJ/Kg. Ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή είναι 88% και του στροβίλου 90%. Ζητείται να προσδιοριστούν:

- a. Ο βαθμός απόδοσης του αεριοστροβίλου
- b. Η παροχή του αέρα σε Kg/s
- c. Η ισχύς του στροβίλου και η θερμική του ισχύς
- d. Η κατανάλωση καυσίμου σε tn/24hrs

Δίνονται:

$$\dot{W} = 50 \text{ MW} = 50.000 \text{ KW} = 50.000 \text{ KJ/s},$$

$$P_1=P_4 = 100 \text{ KN/m}^2, P_2=P_3 = 1800 \text{ KN/m}^2$$

$$T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298\text{K}, T_3 = 1400 \text{ }^\circ\text{C} = 1673\text{K},$$

$$\eta_t = 90\% \text{ και } \eta_c = 88\%$$

Λύση:

1. Ο λόγος πιέσεων βρίσκεται από τη σχέση: $r_p = P_2/P_1 = 1800/100 \Rightarrow \boxed{r_p = 18}$
2. Υπολογίζουμε την θερμοκρασία T_2 από τη σχέση: $T_2 = T_1 \cdot r_p^{(k-1)/k} \Rightarrow \boxed{T_2 = 689\text{K}}$
3. Υπολογίζουμε τη θερμοκρασία T_4 από τη σχέση: $T_4 = T_3 \cdot (1/r_p)^{(k-1)/k} \Rightarrow \boxed{T_4 = 723,5\text{K}}$
4. Από τη σχέση: $\eta_c = (T_2 - T_1)/(T_2' - T_1) = (689 - 298) / (T_2' - 298) = 391 / (T_2' - 298) = 0.88 \Rightarrow T_2' - 298 = 444.32 \Rightarrow \boxed{T_2' = 742.32 \text{ K}}$
5. Από τη σχέση: $\eta_t = (T_3 - T_4') / (T_3 - T_4) = (1673 - T_4') / (1673 - 723.5) = 0.9 \Rightarrow \boxed{T_4' = 818.45 \text{ K}}$
6. Το έργο που παράγει ο στροβίλος είναι:
 $W_t = C_p \cdot (T_3 - T_4') = 1.0047 \cdot (1673 - 818.5) = \boxed{858.52 \text{ KJ/Kg}}$

7. Το έργο που απορροφά ο συμπιεστής είναι:

$$W_c = C_p \cdot (T_2' - T_1) = 1,0047 \cdot (742.3 - 298) = \boxed{446.39 \text{ KJ/Kg}}$$

8. Το ωφέλιμο έργο είναι:

$$W = W_t - W_c = 258.5 - 446.4 \Rightarrow \boxed{W = 412.1 \text{ KJ/Kg}}$$

9. Η προσδιδόμενη θερμότητα είναι:

$$Q = C_p \cdot (T_3 - T_2') = 1.0047 \cdot (1673 - 742.3) \Rightarrow \boxed{Q = 935,1 \text{ KJ/Kg}}$$

10. Η παροχή αέρα είναι:

$$\dot{m} = \dot{W} / W = 50000 / 412,1 \Rightarrow \boxed{\dot{m} = 121,3 \text{ Kg/s}}$$

11. Ο βαθμός απόδοσης της μονάδας είναι:

$$\eta_o = W / Q = 412,1 / 935,1 = 0,4407 \Rightarrow \boxed{\eta_o = 44,1\%}$$

12. Η ισχύς του στροβίλου είναι:

$$\dot{W}_t = \dot{m} \cdot W_t = 121,3 \cdot 858,5 = 104.136,05 \text{ KW} \Rightarrow \boxed{\dot{W}_t = 104,1 \text{ MW}}$$

13. Η ισχύς του συμπιεστή είναι:

$$\dot{W}_c = \dot{m} \cdot W_c = 121,3 \cdot 446,4 = 54.148,32 \text{ KW} \Rightarrow \boxed{\dot{W}_c = 54,1 \text{ MW}}$$

14. Η προσφερόμενη θερμική ισχύς είναι:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot Q = 121,3 \cdot 935,1 = 113.427,63 \text{ KW} \Rightarrow \boxed{\dot{Q} = 113,4 \text{ MW}}$$

15. Η κατανάλωση του καυσίμου είναι:

$$\dot{m}_f = \dot{Q} / q_f = 113.427,63 / 48.600 = 2,3339 \text{ Kg/s} = 8.402 \text{ Kg/hr} = 201.648 \text{ kg/24hrs} \Rightarrow \boxed{\dot{m}_f = 202 \text{ tn/24hrs}}$$

16. Η ωφέλιμη ισχύς είναι:

$$\dot{W} = \dot{W}_t - \dot{W}_c = 104.136,05 - 54.148,32 = 49.987,73 \text{ KW} \Rightarrow \boxed{\dot{W} = 50 \text{ MW}}$$

Ανάλυση βημάτων

1. Αρχικά γίνεται υπολογισμός του λόγου πιέσεων ή λόγου συμπίεσης του αεριοστροβίλου (r_p). Ο λόγος αυτός είναι μία χαρακτηριστική παράμετρος του αεριοστροβίλου. Το μέγεθος

αυτό αποτελεί το λόγο της πίεσης εξαγωγής των καυσαερίων από το στρόβιλο προς την πίεση του εισερχόμενου αέρα στον κινητήρα

2. Σαν δεύτερο βήμα υπολογίζετε η θερμοκρασία του αέρα μετά τη συμπίεση του (διεργασία 1 – 2) $[T_2]$. Ορίζεται ως το γινόμενο της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα στο συμπιεστή επί το λόγο πιέσεων υψωμένο στο ηλικό $[(\kappa-1)/\kappa]$, όπου κ = σταθερά του αερίου.
3. Στη συνέχεια υπολογίζετε η θερμοκρασία των καυσαερίων μετά την εκτόνωση τους (διεργασία 3-4) $[T_4]$. Ορίζεται ως το γινόμενο της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου επί του αντιστρόφου του λόγου πιέσεων $[1 / r_p]$ υψωμένο στο ηλικό $[(\kappa-1)/\kappa]$, όπου κ = σταθερά του αερίου.
4. Μετά, υπολογίζεται η θερμοκρασία του συμπιεστή κατά τη συμπίεση $[T_2']$ μέσω του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή $[\eta_c]$. Ως βαθμό απόδοσης του συμπιεστή ορίζουμε το ηλικό των διαφορών T_2-T_1 προς $T_2'-T_1$. (*1)
5. Στο επόμενο βήμα, υπολογίζεται η θερμοκρασία του στροβίλου κατά την εκτόνωση των καυσαερίων $[T_4']$ μέσω του βαθμού απόδοσης του στροβίλου $[\eta_t]$. Ως βαθμό απόδοσης του στροβίλου ορίζουμε το ηλικό των διαφορών T_3-T_4' και T_3-T_4 . (*1)
6. Ύστερα, υπολογίζεται το έργο που παράγει ο στρόβιλος κατά την εκτόνωση των καυσαερίων $[W_t]$. Το έργο που παράγει ο στρόβιλος ορίζεται ως το γινόμενο της ειδικής θερμότητας του αερίου $[C_p]$ επί τη διαφορά T_3-T_4' .
7. Έπειτα, υπολογίζεται το έργο που απορροφά ο συμπιεστής από τον στρόβιλο $[W_c]$. Το έργο που απορροφά ο συμπιεστής ορίζεται ως το γινόμενο της ειδικής θερμότητας του αερίου $[C_p]$ επί τη διαφορά $T_2'-T_1$.
8. Στο όγδοο βήμα, υπολογίζεται το ωφέλιμο έργο του συστήματος $[W]$. Ως ωφέλιμο έργο ορίζεται η διαφορά $W_t - W_c$.
9. Ακολούθως, υπολογίζεται η προσδιδόμενη θερμότητα κατά τη διεργασία σταθερού όγκου (2- 3), η οποία ορίζεται από το γινόμενο της ειδικής θερμότητας του αερίου $[C_p]$ επί τη διαφορά $T_3 - T_2'$.

**1 Η πραγματική συμπίεση (1-2) και εκτόνωση (3-4) είναι πολυτροπικές μεταβολές, γιατί έχουμε εσωτερικές απώλειες και οι μεταβολές αυτές χαρακτηρίζονται από τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή η_c και του στροβίλου η_t αντίστοιχα.*

10. Στη συνέχεια υπολογίζεται η παροχή αέρα στο συμπιεστή $[\dot{m}]$ από τον τύπο \dot{W}/W (παραγόμενη ισχύς / ωφέλιμο έργο).
11. Μετά, υπολογίζεται ο συνολικός βαθμός απόδοσης του αεριοστροβίλου $[\eta_o]$ από τη σχέση W/Q (ωφέλιμο έργο / προσδιδόμενη θερμότητα). (*²)
12. Στο επόμενο βήμα, υπολογίζεται η ισχύς του στροβίλου $[\dot{W}_t]$, η οποία ορίζεται από το γινόμενο της παροχής αέρα $[\dot{m}]$ επί το έργο του στροβίλου $[W_t]$.
13. Ύστερα, υπολογίζεται η ισχύς του συμπιεστή $[\dot{W}_c]$, η οποία ορίζεται ως το γινόμενο της παροχής αέρα $[\dot{m}]$ επί το έργο του συμπιεστή $[W_c]$.
14. Έπειτα, υπολογίζεται η προσφερόμενη θερμική ισχύς από το καύσιμο προς τα καυσαέρια κατά τη καύση $[\dot{Q}]$. Αυτή ορίζεται από τη σχέση $\dot{m} \cdot Q$ (παροχή αέρα · προσδιδόμενη θερμότητα).
15. Εν συνεχεία, υπολογίζεται η κατανάλωση καυσίμου $[\dot{m}_f]$ από τη σχέση \dot{Q}/q_f , όπου \dot{Q} η προσφερόμενη θερμική ισχύς και q_f η θερμοαντική ικανότητα του καυσίμου.
16. Τέλος, υπολογίζεται η ωφέλιμη ισχύς του αεριοστροβίλου $[\dot{W}_f]$. Η ωφέλιμη ισχύς της εγκατάστασης ισούται με την ισχύ που παράγει ο στρόβιλος μείον την απαιτούμενη για την περιστροφή του συμπιεστή και τη λειτουργία των υπόλοιπων βοηθητικών εξαρτημάτων ισχύος $[\dot{W}_t - \dot{W}_c]$

*² Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από την τελική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης T_3 και εισόδου αυτών στον στρόβιλο. Όσο αυξάνει αυτή η θερμοκρασία, αυξάνει και ο βαθμός απόδοσης.

Ακολουθούν:

Πίνακας Υπολογισμού Παραμέτρων Αεριοστροβίλου (Πίνακας 6.1.1) σελ.51

Πίνακας στοιχείων υπολογισμού θερμοδυναμικών παραμέτρων (Πίνακας 6.1.2) σελ.52

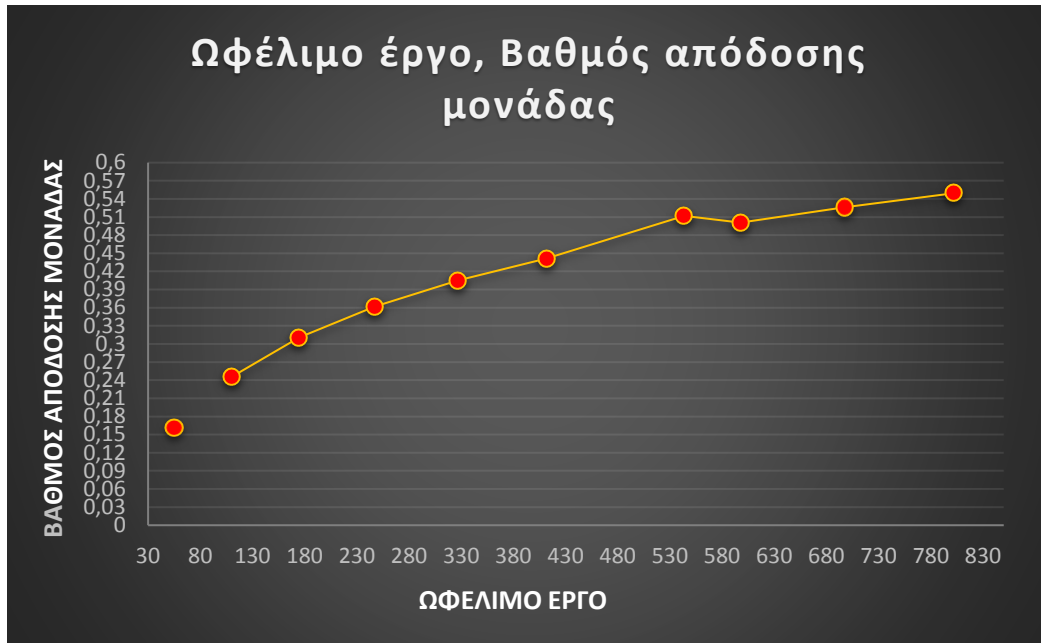
Περιγραφή	Συμβολισμός	Τύπος	Απ. 1	Απ. 2	Απ. 3	Απ. 4	Απ. 5	Απ. 6	Απ. 7	Απ. 8	Απ. 9	Απ. 10	Απ. 11	Απ. 12	Απ. 13
Λόγος Πίεσεων	π_p	$\pi_p = P_2/P_1$	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	20	19	18
Θερμοκρασία του αέρα μετά τη συμπίεση του	T_2	$T_2 = T_1 \cdot \pi_p^{(\kappa-1)/\kappa}$	518,068	558,658	595,254	629,005	660,627	690,597	719,251	746,833	773,529	799,480	712,082	701,540	690,597
Θερμοκρασία των κρουσμάτων μετά την εκτόνωση τους	T_4	$T_4 = T_3 \cdot (\pi_p)^{(\kappa-1)/\kappa}$	504,198	549,313	593,775	637,381	680,089	721,918	762,909	803,114	842,582	881,560	753,284	747,612	733,568821
Θερμοκρασία του αέρα κατά τη συμπίεση	T_2'	$T_2' = (T_2 \cdot T_1) / \pi_p \cdot T_1$	584,370	626,823	662,480	693,196	720,147	744,133	765,723	785,340	803,307	819,875	768,547621	756,5681435	744,1327626
Θερμοκρασία του αέρα κατά τη συμπίεση	T_4'	$T_4' = T_3 \cdot \pi_p \cdot (T_3 \cdot T_4)$	567,018	622,629	675,574	725,655	772,809	817,026	858,318	896,705	932,211	964,858	857,956	848,851	830,212
Έργο που απορροφά ο συμπιεστής	W_c	$W_c = C_p \cdot x \cdot (T_2' - T_1)$	302,786	342,425	375,236	403,082	427,146	448,230	466,907	483,602	498,640	512,272	472,759	460,723	448,230
Έργο που παράγει ο στρόβιλος	W_t	$W_t = C_p \cdot x \cdot (T_3 - T_4')$	357,655	452,488	549,999	650,387	753,717	859,997	1010,702	1081,354	1190,386	1314,290	946,472	915,451	873,876
Ωφέλιμο έργο	W	$W = W_t - W_c$	54,869	110,063	174,763	247,305	326,571	411,768	543,795	597,751	697,746	802,018	473,713	454,708	425,647
Προσθόδομη θερμότητα	Q	$Q = C_p \cdot (T_3 - T_2')$	340,222	448,274	563,154	682,999	806,626	932,233	1062,246	1193,242	1325,895	1459,954	1036,300	1008,148	960,560
Παροχή αέρα	\dot{m}	$\dot{m} = W/W$	455,633	272,570	200,272	161,744	137,795	121,428	101,141	100,376	93,157	87,280	105,549	109,961	117,468
Βαθμός απόδοσης μονάδας	$\eta\theta$	$\eta\theta = W/Q$	0,16	0,25	0,31	0,36	0,40	0,44	0,51	0,50	0,53	0,55	0,457	0,451	0,443
Έργο στρόβιλου	W_t	$W_t = \dot{m} \cdot W_t$	162959,319	123334,842	110149,060	105195,962	103858,716	104427,488	102223,444	108542,173	111451,826	114711,001	99899,359	100661,482	102652,752
Έργο συμπίεσης	W_c	$W_c = \dot{m} \cdot W_c$	137959,319	93334,842	75149,060	65195,962	58858,716	54427,488	47223,444	48542,173	46451,826	44711,001	49899,359	50661,482	52652,752
Προσθόδομη θερμική ισχύς	\dot{Q}	$\dot{Q} = \dot{m} \cdot Q$	155016,272	122186,339	112783,711	110470,674	111149,365	113320,326	107456,672	119773,089	123516,571	127424,552	109380,666	110856,686	112811,801
Κατανάλωση καυσίμου σε kg/h	\dot{m}_{fuel}	$\dot{m}_{\text{fuel}} = \dot{Q}/\eta_f$	307,188	236,702	213,695	204,821	201,750	201,458	187,148	204,514	206,818	209,306	201,503	205,890	211,890
Ωφέλιμη ισχύς	W	$W = \dot{W}_t - \dot{W}_c$	25000,000	30000,000	35000,000	40000,000	45000,000	50000,000	55000,000	60000,000	65000,000	70000,000	50000,000	50000,000	50000,000

Πίνακας 6.1.1

Στοιχεία	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4	Περίπτωση 5	Περίπτωση 6	Περίπτωση 7	Περίπτωση 8	Περίπτωση 9	Περίπτωση 10	Περίπτωση 11	Περίπτωση 12	Περίπτωση 13
P1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
P2	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	1900	1800
T1	283	286	289	292	295	298	301	304	307	310	298	298	298
T3	923	1073	1223	1373	1523	1673	1823	1973	2123	2273	1800	1760	1700
t ₁	0,78	0,80	0,82	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,88	0,88	0,88
t ₂	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,9	0,9	0,9
C _p	1,0047	1,0047	1,0047	1,0047	1,0047	1,0047	1,0047	1,0047	1,0047	1,0047	1,0047	1,0047	1,0047
κ	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41
W	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000	65000	70000	50000	50000	50000
q _f	43600	44600	45600	46600	47600	48600	49600	50600	51600	52600	46900	46520	46000
				H.F.O.							Βαζάλην	Κηρύσινη	LPG

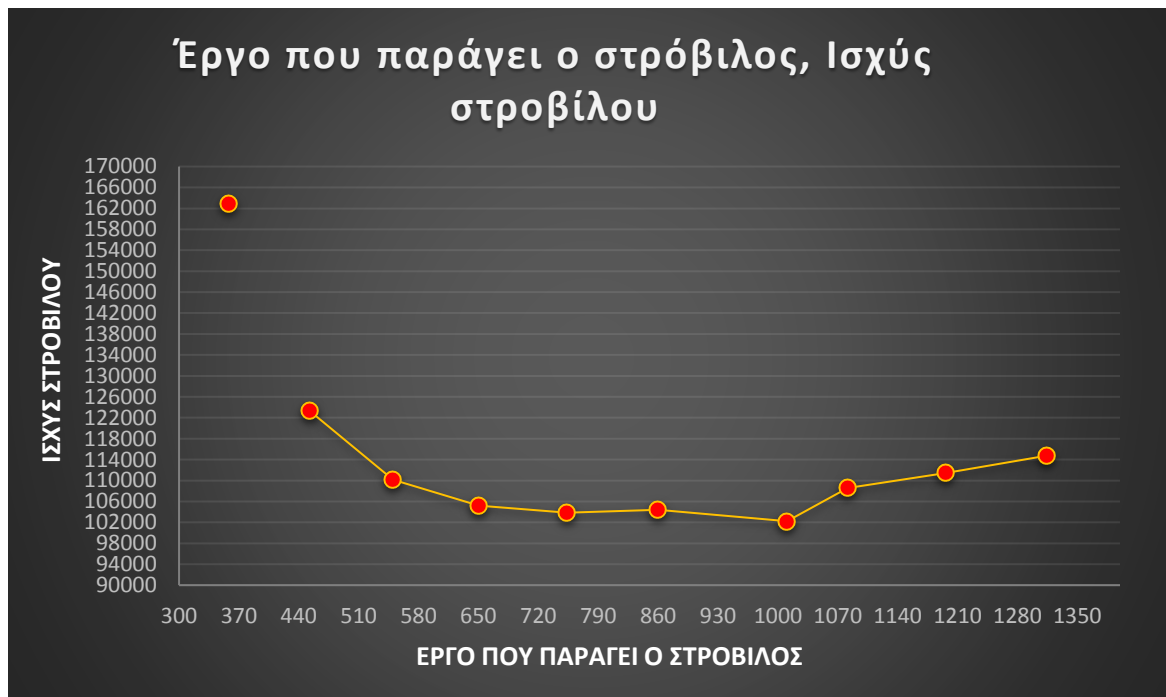
Πίνακας 6.1.2

Διαγράμματα



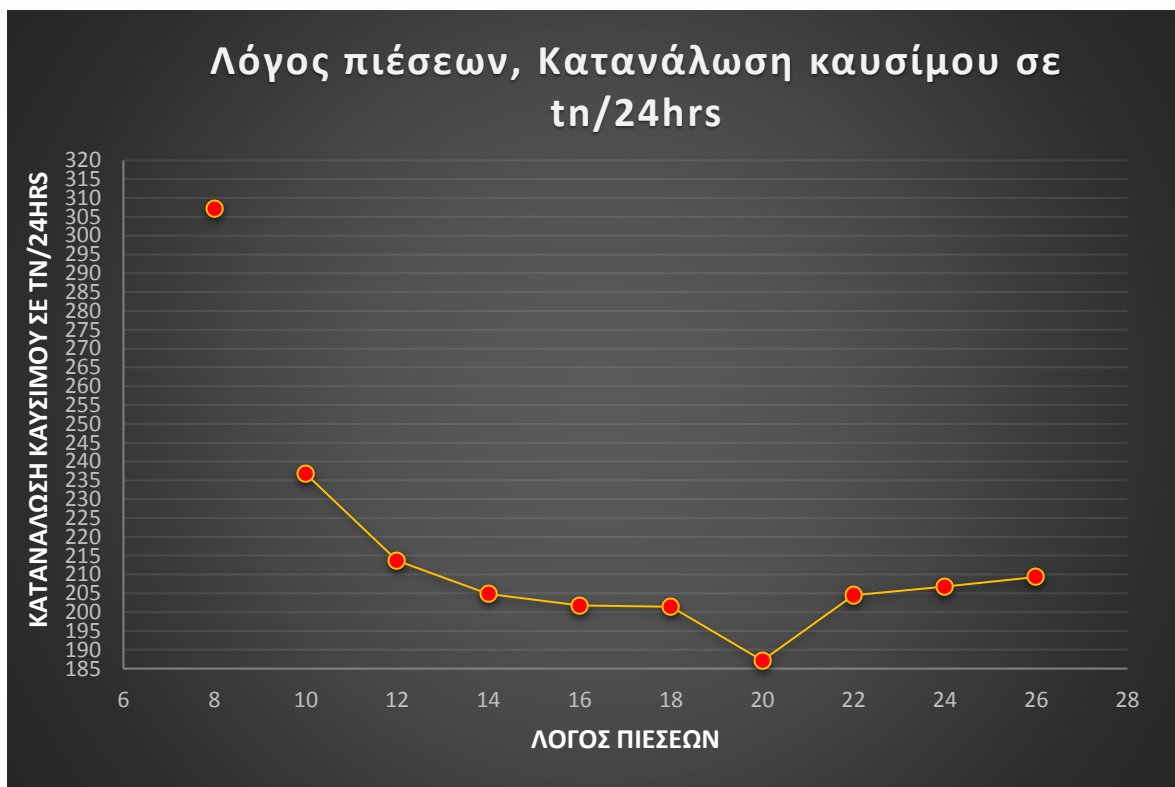
Διάγραμμα 6.1 βαση των αποτελεσμάτων του πίνακα 6.1.1

Διάγραμμα 6.1: Παρατηρείται ότι από τις περιπτώσεις 1-7, όσο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης, τόσο αυξάνεται και το ωφέλιμο έργο. Στην περίπτωση 8 βλέπουμε ότι υπάρχει μια πτώση του βαθμού απόδοσης παρόλο που το ωφέλιμο έργο αυξάνεται ενώ στη συνέχεια (περιπτώσεις 9,10) παρατηρείται αύξηση του βαθμού απόδοσης σε βαθμό μεγαλύτερο της περίπτωσης 7.



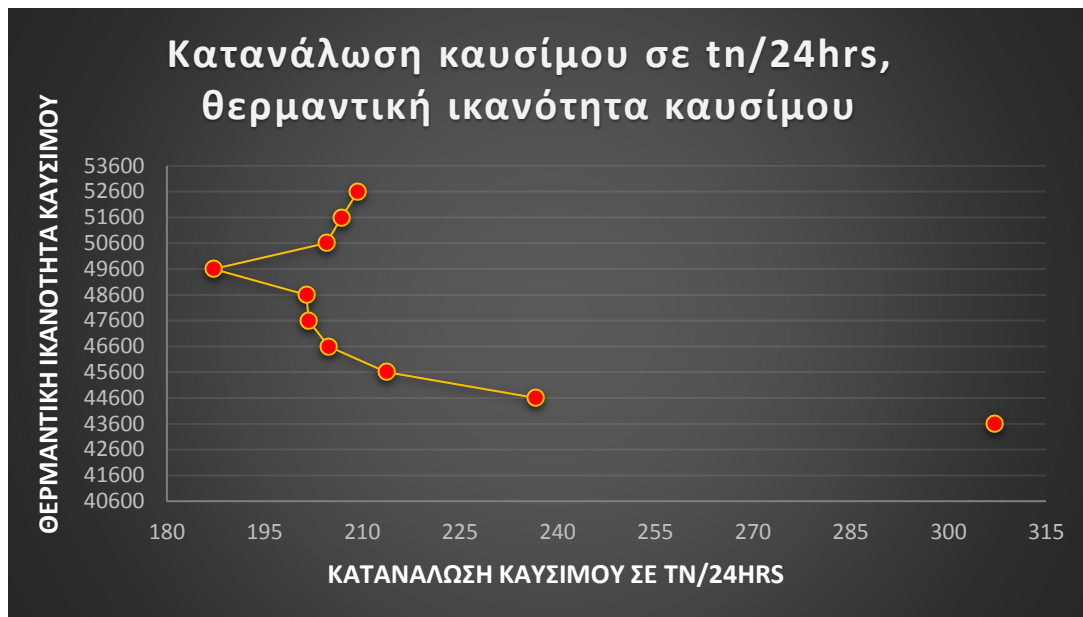
Διάγραμμα 6.2 βαση των αποτελεσμάτων του πίνακα 6.1.1

Διάγραμμα 6.2: Στις περιπτώσεις 1,2 παρατηρείται μεγάλη πτώση της ισχύς του στροβίλου με αύξηση του παραγόμενου έργου. Στις 2,3 έχουμε και πάλι μία σημαντική πτώση στην ισχύ ενώ το παραγόμενο έργο συνεχίζει και αυξάνεται. Από την 3 έως την 6, παρατηρείται σταθεροποίηση της ισχύος με συνεχόμενη αύξηση του παραγόμενου έργου. Στην περίπτωση 7 βλέπουμε σημαντική αύξηση του παραγόμενου έργου με ελάχιστη πτώση της ισχύος του, ενώ στις περιπτώσεις 8,9,10 παρατηρείται, παράλληλα με την αύξηση του παραγόμενου έργου, αύξηση και στην ισχύ του στροβίλου.



Διάγραμμα 6.3 βάση των αποτελεσμάτων του πίνακα 6.1.1

Διάγραμμα 6.3: Στις περιπτώσεις 1-2 παρατηρείται μεγάλη πτώση στην κατανάλωση του καυσίμου με την αύξηση του λόγου πιέσεων. Η πτώση, σε σταδιακά μικρότερες τιμές, συνεχίζει και σταθεροποιείται μέχρι και την 6 περίπτωση. Στην περίπτωση 7, παρατηρείται ότι, έχουμε τον βέλτιστο λόγο πιέσεων, αφού η κατανάλωση είναι η ελάχιστη ανάμεσα στις περιπτώσεις, ενώ από την περίπτωση 8 μέχρι και 10 η κατανάλωση επανέρχεται στην τιμή της 6^{ης} περίπτωσης και αυξάνεται ελαφρώς.



Διάγραμμα 6.4 βαση των αποτελεσμάτων του πίνακα 6.1.1

Διάγραμμα 6.4: Στο παρόν διάγραμμα παρατηρούμε, ότι όσο αυξάνεται η θερμαντική ικανότητα του καυσίμου, τόσο πέφτει και η κατανάλωση (περιπτώσεις 1-7), με την ιδανική κατανάλωση να βρίσκεται στην 7^η περίπτωση. Στην 8^η, η κατανάλωση επανέρχεται στα επίπεδα της 6^{ης} περίπτωσης και συνεχίζει να αυξάνεται ελαφρά, παράλληλα με την αύξηση της θερμαντικής ικανότητας του καυσίμου.



Διάγραμμα 6.5 βαση των αποτελεσμάτων του πίνακα 6.1.1

Διάγραμμα 6.5: Εδώ, παρατηρείται σταθερή αύξηση του έργου που απορροφά ο συμπιεστής, όσο υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα μετά τη συμπίεση του.



Διάγραμμα 6.6 βαση των αποτελεσμάτων του πίνακα 6.1.1

Διάγραμμα 6.6: Σε αυτό το διάγραμμα, συμπεραίνουμε ότι, όσο αυξάνεται ο λόγος πιέσεων τόσο πέφτει και η παροχή αέρα. Στην 7^η και την 8^η περίπτωση, η τιμή της παροχής σταθεροποιείται και από εκεί και έπειτα η πτώσεις της τιμής της παροχής (μέχρι και την περίπτωση 10) είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις προηγούμενες (περιπτώσεις 1-6).



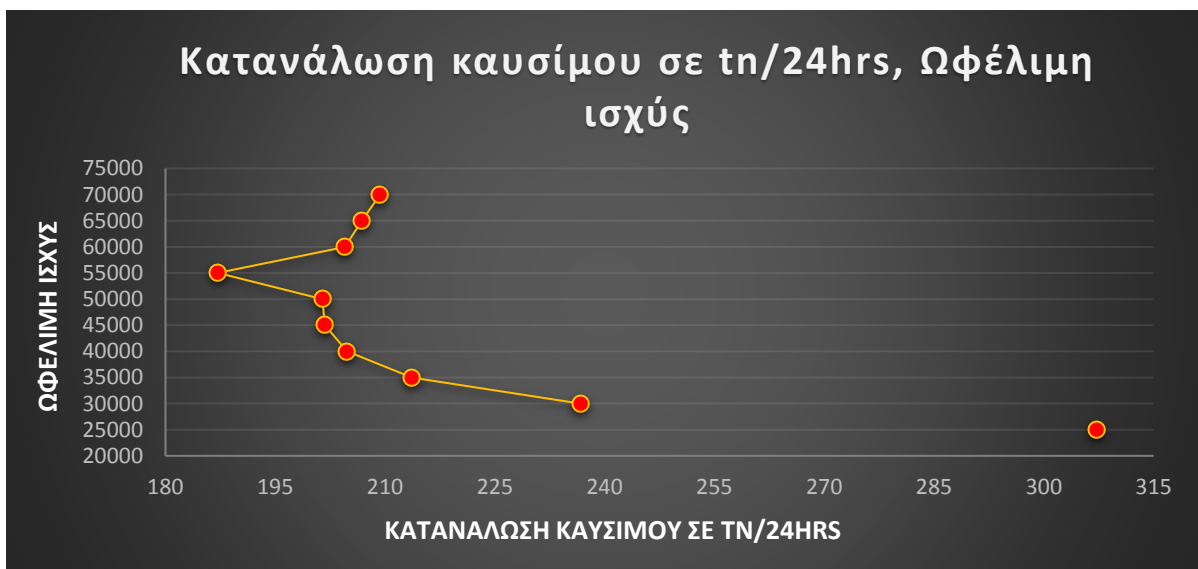
Διάγραμμα 6.7 βαση των αποτελεσμάτων του πίνακα 6.1.1

Διάγραμμα 6.7: Εδώ παρατηρούμε μία σταθερή αύξηση της ωφέλιμης ισχύος με την αύξηση του βαθμού απόδοσης. Στην 7^η περίπτωση, παρατηρείται η μεγαλύτερη αύξηση του βαθμού απόδοσης, ενώ από την περίπτωση 8 και έπειτα ο βαθμός απόδοσης μειώνεται ελαφρώς και ξανααυξάνεται σταδιακά μέχρι και την περίπτωση 10.



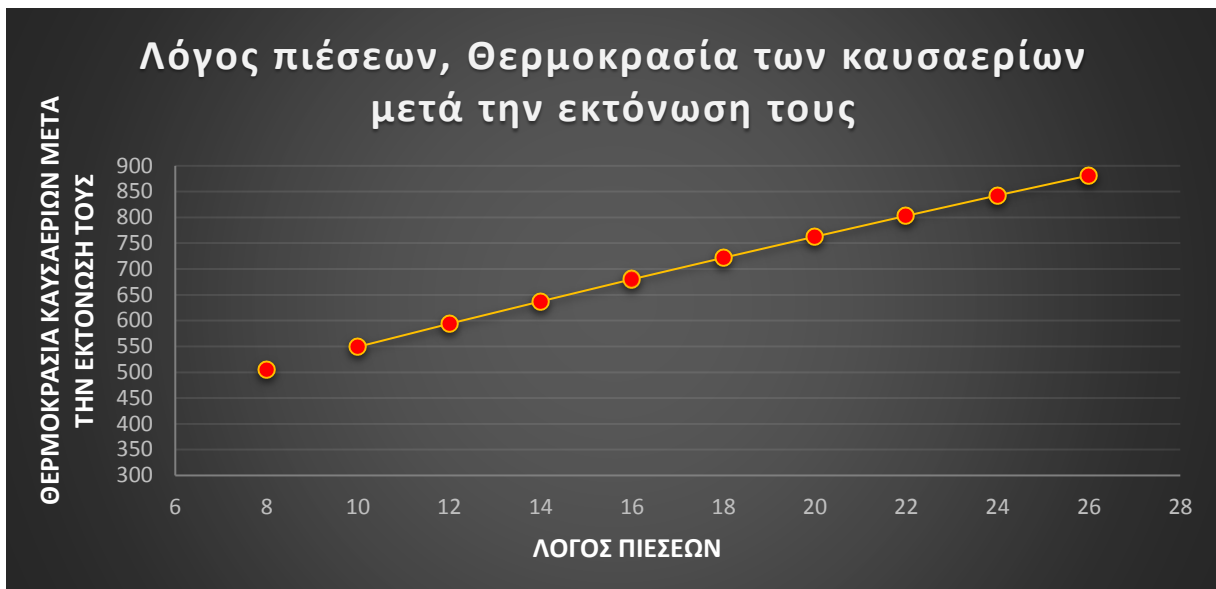
Διάγραμμα 6.8 βαση των αποτελεσμάτων του πίνακα 6.1.1

Διάγραμμα 6.8: Εδώ παρατηρούμε μία σταδιακά μικρότερη σε τιμές πτώση της ισχύς του συμπιεστή ενώ παράλληλα υπάρχει αύξηση του έργου που απορροφά. Απο την περίπτωση 7 και μετά η ισχύς σταθεροποιείται, με μικρές αυξομειώσεις της τιμής της ενώ παράλληλα το έργο που απορροφάται αυξάνεται συνεχώς.



Διάγραμμα 6.9 βαση των αποτελεσμάτων του πίνακα 6.1.1

Διάγραμμα 6.9: Στο παρών διάγραμμα παρατηρούμε, οτι όσο αυξάνεται η ωφέλιμη ισχύς, τόσο πέφτει και η κατανάλωση (περιπτώσεις 1-7), με την ιδανική κατανάλωση να βρίσκεται στην 7^η περίπτωση. Στην 8^η, η κατανάλωση επανέρχεται στα επίπεδα της 6^{ης} περίπτωσης και συνεχίζει να αυξάνεται ελαφρά, παράλληλα με την αύξηση της ισχύος.



Διάγραμμα 6.10 βάση των αποτελεσμάτων του πίνακα 6.1.1

Διάγραμμα 6.10: Σε αυτό το διάγραμμα παρατηρείται σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων μετά την εκτόνωση αυτών, όσο αυξάνεται και ο λόγος πιέσεων.

Περιπτώσεις 11, 12, 13

Στις τρεις αυτές περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν τιμές κοντά σε πραγματικές συνθήκες για να ελεγχθεί μια θεωρητική απόδοση του αεριοστροβίλου με καύσιμα τη βενζίνη, τη κηροζίνη και το LPG. Στην περίπτωση του LPG παρατηρούμε ότι έχουμε τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενώ στη βενζίνη τη μικρότερη. Επίσης παρατηρούμε ότι ο αεριοστροβίλος που έχει το μεγαλύτερο έργο είναι αυτός της βενζίνης με αυτόν της κηροζίνης να ακολουθεί και τελευταίο αυτόν του LPG. Η ίδια κατάταξη παρατηρείται και στη προσδιδόμενη θερμότητα και στο συνολικό βαθμό απόδοσης. Ακόμη παρατηρούμε ότι όσο χαμηλότερη θερμαντική ικανότητα έχει ένα καύσιμο τόσο πρέπει να αυξηθεί η παροχή αέρα έτσι ώστε να παράγουμε την ίδια οφέλιμη ισχύ. Σαν τελικό συμπέρασμα βλέπουμε ότι η θερμαντική ικανότητα ενός καυσίμου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την παραγωγή της απαιτούμενης ισχύος και έργου αφού όσο υψηλότερη είναι, τόσο πέφτει η κατανάλωση αλλά παράλληλα αυξάνεται ο συνολικός βαθμός απόδοσης και το οφέλιμο έργο.

Επίλογος – Συμπεράσματα

Συναρτήσει των αποτελεσμάτων του παραπάνω υπολογισμού παραμέτρων συμπεραίνουμε ότι:

- Κατά τη μεταβολή του λόγου πιέσεων, έχουμε άμεση μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα μετά τη συμπίεση του και κατά την εκτόνωση των καυσαερίων.
- Ακολούθως μεταβάλλονται οι βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και στροβίλου καθώς και οι θερμοκρασίες του συμπιεστή κατά τη συμπίεση και του στροβίλου κατά την εκτόνωση των καυσαερίων.
- Οι παράπανω μεταβολές έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του έργου που παράγει ο στρόβιλος και του έργου που παράγει ο συμπιεστής άρα και του ωφέλιμου έργου. Επίσης παρατηρείται μεταβολή και στη προσδιδόμενη θερμότητα.
- Λόγω των μεταβολών που παρατηρούνται στα προαναφερθέντα W , W_c , W_t και Q , έχουμε σημαντικές μεταβολές και στη παροχή αέρα, στο συνολικό βαθμό απόδοσης, την ισχύ του στροβίλου και του συμπιεστή, την προσφερόμενη θερμική ισχύ, την κατανάλωση καυσίμου και εν τέλη την ωφέλιμη ισχύ.

Βιβλιογραφία

1. Κωνσταντίνου Ζ. Παγωνάρη (2006) - Εφαρμοσμένη θερμοδυναμική Ίδρυμα Ευγενίδου
2. Π. Κούτμος (2008) - Εισαγωγή στις βασικές αρχές της θεωρίας των αεροστροβίλων
Πανεπιστήμιο Πατρών Πολυτεχνική σχολή τμήμα μηχανολόγων & αεροναυπηγών μηχανικών
ενεργειακός τομέας εργαστήριο τεχνικής θερμοδυναμικής
3. www.wikipedia.com

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	5
Κεφάλαιο 2: Ανάλυση Κύκλων και Εξισώσεις Ροής.....	7
Κεφάλαιο 3: Συμπιεστή ροή και Τα περιστρεφόμενα μέρη	19
Κεφάλαιο 4: Θεωρία πτερυγώσεων και Οι βαθμίδες αξονικών στροβίλων/συμπιεστών.....	24
Κεφάλαιο 5: Συστήματα θαλάμων καύσης αεριοστροβίλων και Χαρακτηριστικές καμπύλες και διαγράμματα λειτουργίας επι μέρους συνιστώσεων	33
Κεφάλαιο 6: Υπολογισμός θεμοδυναμικών παραμέτρων αεριοστροβίλου (Μεθοδολογία και ανάλυση) – Διαγράμματα	47
Επίλογος - Συμπεράσματα	59
Βιβλιογραφία.....	61