

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Προσομοίωση αεριοστρόβιλων σε λειτουργία εκτός του
σημείου σχεδιασμού των»**

ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΛΑΓΩΝΙΚΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΦΡΑΓΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κο Χρίστο Φραγκόπουλο που ανέλαβε να επιβλέπει τα στάδια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και η καθοδήγησή του ήταν πολύτιμη.

Επίσης σημαντική ήταν η συνεχής υποστήριξη των γονιών μου, Σταυρούλας Ξαρχάκου και Μιχάλη Λαγωνίκα καθώς και της αδελφής μου, Ιωάννας και του συζύγου μου, Γρηγόρη Κυριακόπουλου.

Τους ευχαριστώ θερμά όλους.

ΣΥΝΟΨΗ

Ο βαθμός απόδοσης και επομένως η κατανάλωση καυσίμου ενός αεριοστρόβιλου επηρεάζεται έντονα από τη λειτουργία σε μερικό φορτίο καθώς και από τις συνθήκες περιβάλλοντος, καθώς αυτές αλλάζουν τοπικά και χρονικά. Επιπλέον οι συνθήκες περιβάλλοντος επηρεάζουν και τη μέγιστη δυνατή ισχύ του αεριοστρόβιλου. Είναι λοιπόν ενδιαφέρον και χρήσιμο να μπορούμε να προβλέψουμε την επίδοση και απόδοση ενός αεριοστρόβιλου σε συνθήκες λειτουργίας εκτός του σημείου σχεδιασμού.

Προς το σκοπό αυτόν προσομοιώθηκε η λειτουργία αεριοστρόβιλου στο σημείο σχεδιασμού, καθώς και σε συνθήκες εκτός του σημείου αυτού από πλευράς θερμοκρασίας περιβάλλοντος και απαιτούμενης ισχύος. Με βάση την προσομοίωση αυτή, αναπτύχθηκε πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή, στο περιβάλλον Matlab, με χρήση του οποίου προκύπτουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως, παραδείγματος χάριν, ο βαθμός απόδοσης, η κατανάλωση καυσίμου, πιέσεις και θερμοκρασίες στα διάφορα σημεία του κύκλου, όταν είναι γνωστά τα ονομαστικά χαρακτηριστικά και δεδομένες οι συνθήκες εκτός του σημείου σχεδιασμού, δηλ. ο συντελεστής φόρτισης και/ή η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

ABSTRACT

The efficiency and thus the fuel consumption of a gas turbine is strongly influenced by operation at part load, as well as by environmental conditions, which change with place and time. Furthermore the environmental conditions affect the maximum power of the gas turbine. Therefore, it is interesting and useful to be able to predict the power output and efficiency of a gas turbine when operating at off design conditions.

For this purpose, the simple-cycle gas turbine was simulated at the design point as well as at off design points, with respect to ambient temperature and power demand. Based on this simulation, a computer program was developed using Matlab. By application of this program, the functional characteristics of the gas turbine are calculated. For example for a gas turbine with specified properties at the design point, characteristics such as efficiency, fuel consumption, pressures and temperatures are calculated at various points of the cycle at off design, i.e. at load and temperature different from the design values.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΣΥΝΟΨΗ	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1 Συνοπτική Παρουσίαση των Αεριοστροβίλων	6
1.2 Τα Βασικά Στοιχεία των Αεριοστροβίλων	7
1.3 Είδη Αεριοστροβίλων και Βασικά Χαρακτηριστικά τους	9
1.4 Διατάξεις Αεριοστροβίλων Ανοικτού Κυκλώματος.....	11
2. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (ΑΠΛΟΥ) ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	12
2.1 Κατάσταση ανακοπής.....	12
2.2 Ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και στροβίλου.....	13
2.3 Πολυτροπικοί βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και στροβίλου.....	14
2.4 Ανάλυση απλού κύκλου	17
3. ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΕΚΤΟΣ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ.....	20
3.1 Επίδραση συνθηκών περιβάλλοντος	20
3.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες και υπολογισμός λειτουργικής συμπεριφοράς επί μέρους στοιχείων	21
3.3 Λειτουργία μονοαξονικού αεριοστροβίλου εκτός σημείου σχεδιασμού.....	29
3.4 Λειτουργία ισορροπίας αεριογόνου	32
3.5 Λειτουργία αεριογόνου συζευγμένης με στρόβιλο ισχύος	35
3.5.1 Σύζευξη της αεριογόνου με τον στρόβιλο ισχύος.....	35
3.5.2 Σύζευξη δύο στροβίλων	37
3.5.3 Μεταβολή της ισχύος, της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της ροπής συναρτήσει των στροφών του στροβίλου ισχύος.....	38
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	43
4.1 Εισαγωγικά	43
4.2 Ανάλυση του κύκλου στο σημείο σχεδιασμού του.....	44
4.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης του κύκλου στο σημείο σχεδιασμού του.....	49
4.4 Ανάλυση του κύκλου σε σημείο εκτός του σημείου σχεδιασμού του, σε διαφορετική θερμοκρασία περιβάλλοντος	52
4.5 Αποτελέσματα ανάλυσης του κύκλου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος διαφορετική της θερμοκρασίας σχεδιασμού	55
4.6 Ανάλυση του κύκλου σε ισχύ διαφορετική της ονομαστικής.....	60
4.6.1 Συνεργασία του αεριοστροβίλου με γεννήτρια ή έλικα μεταβλητού βήματος	62

4.6.2 Συνεργασία του αεριστροβίλου με έλικα σταθερού βήματος	66
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	72

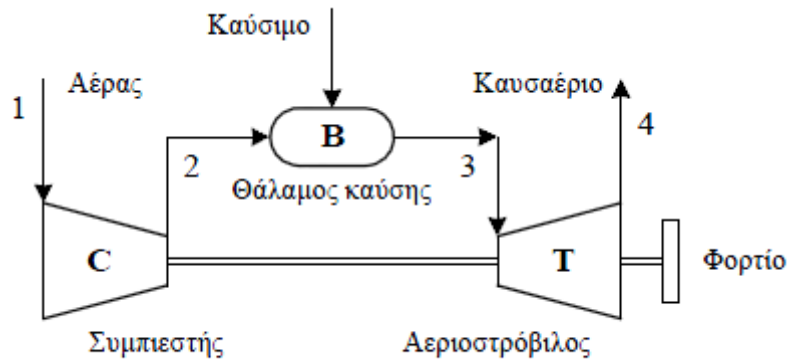
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Συνοπτική Παρουσίαση των Αεριοστροβίλων

Ο στρόβιλος γενικά, σε σχέση με τις άλλες διατάξεις παραγωγής μηχανικού έργου, παρουσιάζει αρκετά ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης. Δεν υπάρχουν πολλά τριβόμενα τμήματα, όπως στις εμβολοφόρες μηχανές, η κατανάλωση λιπαντικού είναι μικρή και έχουν ελάχιστα προβλήματα ζυγοσταθμίσεως. Γενικά οι αεριοστροβίλοι παρουσιάζουν υψηλή αξιοπιστία.

Τα πλεονεκτήματα του στροβίλου φάνηκαν όταν χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα άρχισε η χρησιμοποίηση των ατμοστροβίλων για την κίνηση των πλοίων και των τρένων, καθώς και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα λειτουργούν εργοστάσια με ισχύ πάνω από 500 MW και απόδοση περίπου 40%. Οι ατμοστροβίλοι, αν και έχουν βελτιωθεί αρκετά, εμφανίζουν ένα μειονέκτημα. Αυτό σχετίζεται με την εγκατάσταση παραγωγής ατμού υψηλής πίεσεως και υψηλής θερμοκρασίας. Οι εγκαταστάσεις αυτές είναι δαπανηρές και μπορεί να είναι από ένα συμβατικό λέβητα μέχρι ένα πυρηνικό αντιδραστήρα. Το βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι τα παραγόμενα θερμά αέρια, από τον λέβητα ή τον αντιδραστήρα, δε χρησιμοποιούνται κατευθείαν στον στρόβιλο, αλλά για την παραγωγή ενός ενδιάμεσου ρευστού, του ατμού. Τα προβλήματα αυτά οδήγησαν στην κατασκευή και ανάπτυξη των αεριοστροβίλων, με αποτέλεσμα τη χρησιμοποίησή τους σε ένα μεγάλο πεδίο εφαρμογών (εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας, πλοία, αεροπλάνα).

Για τη λειτουργία του αεριοστροβίλου χρειάζεται αέριο υψηλής πίεσεως το οποίο εκτονούμενο μέσα στο στρόβιλο τον κινεί. Ο απαιτούμενος υψηλός λόγος πίεσεως πραγματοποιείται με τη χρησιμοποίηση του συμπιεστή. Εάν δεν υπήρχαν απώλειες, στο σύστημα συμπιεστής – στρόβιλος, τότε το αποδιδόμενο έργο από τον στρόβιλο θα ήταν ίσο προς το καταναλισκόμενο από τον συμπιεστή. Αλλά και σ' αυτή την ιδανική κατάσταση δε θα μπορούσε να παραχθεί χρήσιμο έργο και το αποτέλεσμα θα ήταν απλώς η λειτουργία του συστήματος συμπιεστής-στροβίλος. Το έργο που παράγει ο στρόβιλος αυξάνεται με την πρόσθεση ενέργειας στο εκτονούμενο αέριο που αυξάνει τη θερμοκρασία του. Όταν το αέριο είναι ο αέρας, η πρόσθεση ενέργειας πραγματοποιείται με την καύση ενός καύσιμου με τον αέρα που έχει προηγουμένα συμπιεστεί. Τα καυσαέρια εκτονούμενα παράγουν στο στρόβιλο μεγαλύτερο έργο, μέρος του οποίου κινεί τον συμπιεστή, ενώ ταυτόχρονα παράγεται και χρήσιμο έργο. Η διαδικασία αυτή παραγωγής χρήσιμου έργου είναι η αρχή λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου (Σχ. 1.1).



Σχήμα 1.1: Απλή μονάδα αεριοστρόβιλου ανοιχτού κυκλώματος [2]

Επειδή υπάρχουν απώλειες, το έργο που λαμβάνεται τελικά στην έξοδο του στρόβιλου είναι μικρότερο. Το χρήσιμο έργο αυξάνεται με την προσθήκη επιπλέον καυσίμου, αν και υπάρχει ένα όριο του λόγου καυσίμου/αέρα, για δεδομένη παροχή αέρα, που περιορίζει το ποσό του χρήσιμου έργου. Η μέγιστη τιμή του λόγου καυσίμου/αέρα καθορίζεται από τη θερμοκρασία λειτουργίας των πτερυγίων του στρόβιλου, η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή. Αυτή καθορίζεται από την αντοχή σε ερπυσμό των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή και από την επιθυμητή διάρκεια ζωής του αεριοστρόβιλου. Συνεπώς οι δύο βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων είναι:

- η απόδοση κάθε τμήματος (στρόβιλος, συμπιεστής, καυστήρας, εναλλάκτης κλπ.)
- η θερμοκρασία λειτουργίας (που εξαρτάται από τα χρησιμοποιούμενα υλικά)

Η ολική απόδοση του κύκλου ενός αεριοστρόβιλου εξαρτάται και από τον λόγο συμπίεσης του συμπιεστή. Αρχικά υπήρχαν δυσκολίες στην πραγματοποίηση υψηλού λόγου συμπίεσης, όμως σήμερα, ιδιαίτερα σε τελειοποιημένους κινητήρες, επιτυγχάνονται λόγοι συμπίεσης πάνω από 30:1, με απόδοση συμπιεστή 85-90% και με θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο πάνω από 1200-1500 K.

1.2 Τα Βασικά Στοιχεία των Αεριοστρόβιλων

Η βασική μονάδα αεριοστρόβιλου αποτελείται από τρία κύρια στοιχεία: τον συμπιεστή, τον θάλαμο καύσης και τον στρόβιλο. Αυστηρά, η λέξη αεριοστρόβιλος αντιστοιχεί στο τρίτο στοιχείο. Όμως, στην πράξη, η λέξη αυτή συχνά αναφέρεται σε ολόκληρη τη μονάδα. Από πλευράς θερμοδυναμικής, ο αεριοστρόβιλος λειτουργεί με βάση τον κύκλο Joule (στην αγγλική βιβλιογραφία ονομάζεται επίσης και κύκλος Brayton).

Τα βασικά στοιχεία του συστήματος είναι:

- Το τμήμα εισαγωγής (intake)
- Ο συμπιεστής (compressor)

- Ο θάλαμος καύσης (combustion chamber)
- Ο στρόβιλος (turbine)
- Το τμήμα εξαγωγής (nozzle)

Τμήμα εισαγωγής

Προσαρμόζει τον αέρα που εισέρχεται στη μηχανή στις απαιτήσεις του συμπιεστή σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Οι πιο βασικές απαιτήσεις είναι καθαρός (από σωματίδια) αέρας, ομοιόμορφης κατανομής σε ταχύτητα και πίεση και στον κατάλληλο αριθμό Mach για αεροπορικές εφαρμογές. Μερικές φορές περιλαμβάνει και φίλτρο κατακράτησης σωματιδίων ή απορρόφησης ηχητικών κυμάτων.

Ο συμπιεστής

Συμπιέζει τον αέρα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του θερμοδυναμικού κύκλου. Μπορεί να είναι είτε αξονικός, είτε φυγοκεντρικός, είτε παλινδρομικός. Συνήθως προτιμούνται οι δύο πρώτοι τύποι, γιατί εμφανίζουν μεγαλύτερη απόδοση, είναι πιο συμπαγείς και πιο φθηνοί. Επιτρέπουν την αναρρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ατμοσφαιρικού αέρα ($\approx 150 \text{ kg/s/m}^2$ διατομής του αγωγού εισόδου σε αριθμό Mach ≈ 0.4). Τυπικές τιμές του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης είναι $0.7 \leq \eta_c \leq 0.9$.

Ο θάλαμος καύσης

Είναι συνεχούς λειτουργίας. Η όλη διεργασία καύσης είναι σχεδόν ισοβαρής. Επειδή ο λόγος καυσίμου/αέρα είναι μικρότερος από τη στοιχειομετρική αναλογία (περίσσεια αέρα της τάξης του 250%), μόνο μέρος του αέρα καίγεται άμεσα με το καύσιμο, στην πρωτεύουσα (primary) ζώνη, σε υψηλή θερμοκρασία. Ο υπόλοιπος αέρας εισάγεται στο θάλαμο σε δεύτερο στάδιο, ψύχοντας έτσι τα καυσαέρια στη θερμοκρασία που επιτρέπει ο στρόβιλος. Λόγω της μεγάλης πίεσης, της μεγάλης περίσσειας αέρος και του μικρού μήκους του θαλάμου (ο όγκος του θαλάμου μπορεί να είναι 10 με 20 φορές μικρότερος από τον αντίστοιχο όγκο εστίας λέβητα), απαιτείται πολύ προσεκτικός έλεγχος της ευστάθειας της καύσης. Επίσης επιβάλλεται η μικρή εκπομπή ρύπων (CO , NO_x , υδρογονανθράκων) και καπνού. Σε μερικές εφαρμογές η καύση γίνεται έξω από την κύρια μηχανή και η θερμότητα μεταφέρεται στον αέρα μέσω κάποιου εναλλάκτη θερμότητας.

Ο στρόβιλος

Είναι το εξάρτημα όπου παράγεται μηχανική ισχύς λόγω της εκτόνωσης των καυσαερίων μέχρι την ατμοσφαιρική πίεση. Είναι είτε φυγοκεντρικός (σπανίως) είτε αξονικός

(συνήθως). Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης είναι της τάξης $0.75 \leq \eta_T \leq 0.93$ για αξονικές βαθμίδες. Συνήθως συνδέεται με το συμπιεστή με κοινό άξονα.

Το τμήμα εξόδου

Το τμήμα αυτό σχεδιάζεται ανάλογα με τη χρήση της μηχανής. Στους αεροπορικούς κινητήρες έχει τη μορφή συγκλίνοντος η συγκλίνοντος – αποκλίνοντος ακροφυσίου, έτσι ώστε τα καυσαέρια να αποκτήσουν μεγάλη ταχύτητα, στους ηλεκτροπαραγωγούς κινητήρες έχει τη μορφή διαχύτη έτσι, ώστε η δυναμική πίεση στην έξοδο να είναι πολύ μικρή (της τάξης των 20 – 50 mbar). Αυτό επιτρέπει τη μέγιστη δυνατή εκτόνωση στο στρόβιλο και επομένως, τη μεγαλύτερη θερμική απόδοση. Σε μερικούς κινητήρες περιλαμβάνει και τον μετακαυστήρα (afterburner) για την αύξηση της ενέργειας των καυσαερίων.

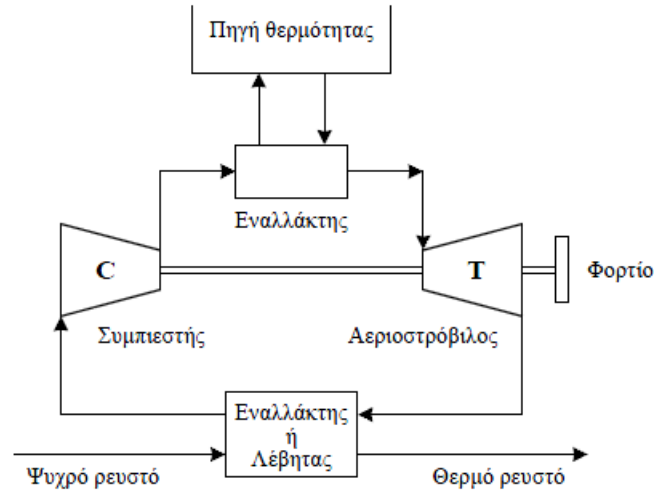
1.3 Είδη Αεριοστροβίλων και Βασικά Χαρακτηριστικά τους

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

Με κριτήριο τη ροή του ρευστού (εργαζόμενου μέσου), διακρίνονται δύο τύποι:

- Ανοικτού κυκλώματος (open cycle): Ο συμπιεστής αναρροφά αέρα από την ατμόσφαιρα και τα καυσαέρια αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα (Σχ. 1.1). Είναι μηχανές εσωτερικής καύσης με ιδιαίτερες απαιτήσεις ως προς την ποιότητα του καυσίμου.
- Κλειστού κυκλώματος (closed cycle): Το εργαζόμενο ρευστό είναι αέρας ή άλλο αέριο (συνήθως ήλιο), το οποίο δεν συμμετέχει στην καύση. Θερμαίνεται σε εναλλάκτη θερμότητας, πριν από την είσοδό του στον στρόβιλο και ψύχεται μετά την έξοδό του από αυτόν (Σχ. 1.2). Είναι μηχανές εξωτερικής καύσης. Καθώς το εργαζόμενο ρευστό δεν συμμετέχει στην καύση, διατηρείται καθαρό και έτσι αποφεύγεται η μηχανική και χημική διάβρωση του στροβίλου από τα προϊόντα της καύσης. Επιπλέον, η εξωτερική καύση επιτρέπει τη χρήση οποιουδήποτε καυσίμου., όπου το ρευστό παραμένει πάντα μέσα στη μηχανή. Τα ποσά θερμότητας εισέρχονται και εξέρχονται από τη μηχανή μέσω εναλλακτών θερμότητας.

Σε ναυτικές εφαρμογές αεριοστροβίλων, χρησιμοποιούνται συνήθως εκείνοι του ανοικτού κυκλώματος.



Σχήμα 1.2: Απλή μονάδα αεριοστρόβιλου κλειστού κυκλώματος [2]

Με κριτήριο τον αριθμό αξόνων:

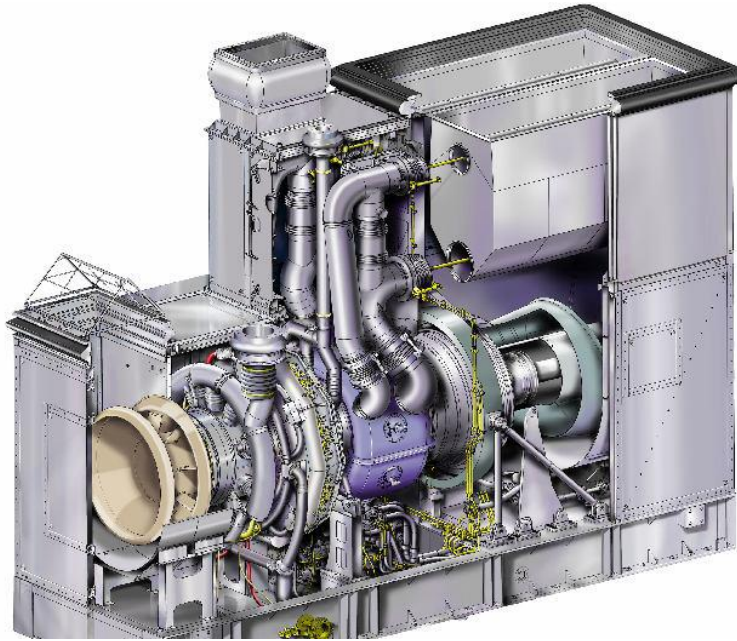
- Μονο-αξονικοί (Single shaft)
- Δι-αξονικοί (Two shaft)
- Τρι-αξονικοί (Triple shaft)
- Με χωριστό στρόβιλο ισχύος. Εδώ η εκτόνωση γίνεται εν μέρει στον στρόβιλο που κινεί τον συμπιεστή και η υπόλοιπη στον στρόβιλο ισχύος (που κινεί το φορτίο π.χ. την ηλεκτρογεννήτρια).

Με κριτήριο την εφαρμογή τους:

- Αεροπορικοί, που υποδιαιρούνται σε αεριοστρόβιλους, στροβιλο-αντιδραστήρες (turbojet), στροβιλο-ανεμιστήρες (turbofan) ή στροβιλο-ελικοφόροι (turboprop)
- Ηλεκτροπαραγωγικοί
- Βιομηχανικοί (Industrial)
- Ναυτικοί (Σχ. 1.3).

Άλλα κύρια χαρακτηριστικά του κινητήρα, πέρα από τα προαναφερθέντα, είναι:

- Η διαδικασία εκκίνησης, με εξωτερική βοήθεια μέσω ηλεκτροκινητήρα, μηχανής diesel ή μικρής μονάδας αεριοστρόβιλου APU (Auxiliary Power Unit). Εδώ επίσης προσδιορίζεται ο ρυθμός επιτάχυνσης (κυρίως για την αποφυγή έντονων θερμικών τάσεων) και το ελάχιστο φορτίο αυτοδύναμης λειτουργίας.
- Η διαδικασία σταματήματος, με διακοπή καυσίμου και έλεγχο του ρυθμού ψύξης των εξαρτημάτων.
- Επιτρεπόμενη ταχύτητα περιστροφής του άξονα για σταθερή λειτουργία και αντίστοιχοι ρυθμοί επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης.



Σχήμα 1.3: Ναυτικός αεριοστροβίλος [8]

1.4 Διατάξεις Αεριοστροβίλων Ανοικτού Κυκλώματος

Η ισχύς, η συγκέντρωση ισχύος και ο βαθμός απόδοσης είναι τα κυριότερα χαρακτηριστικά (κριτήρια) συμπεριφοράς μιας μονάδας αεριοστροβίλου. Όπως θα φανεί σε επόμενη ενότητα, αυτά επηρεάζονται από τον λόγο πίεσης (P_2/P_1 , στο Σχ. 1.1), τη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου (T_3 , στο Σχ. 1.1) και τους βαθμούς απόδοσης των επιμέρους στοιχείων (συμπιεστή, θαλάμου καύσης, στροβίλου, κ.λπ.) Η προσπάθεια βελτίωσης των χαρακτηριστικών συμπεριφοράς με βελτίωση των παραμέτρων που τα επηρεάζουν είναι συνεχής και έχει θεαματικά αποτελέσματα. Όμως, είναι δυνατή η σημαντική βελτίωση των χαρακτηριστικών με πρόσθετο εξοπλισμό που δημιουργεί παραλλαγές του απλού κύκλου. Έτσι, η διάταξη μπορεί να περιλαμβάνει:

- ενδιάμεση ψύξη του αέρα,
- αναθέρμανση του καυσαερίου,
- αναγεννητική προθέρμανση του αέρα (με θερμότητα από τα καυσαέρια),
- συνδυασμούς των προηγούμενων.

Η ενδιάμεση ψύξη και η αναθέρμανση έχουν κύριο σκοπό την αύξηση της συγκέντρωσης ισχύος, ενώ η αναγεννητική προθέρμανση έχει κύριο σκοπό τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης.

Οι προσθήκες αυτές σε συνδυασμό με πτερυγώσεις μεταβλητής γεωμετρίας (δηλ. πτερύγια που μεταβάλλουν την κλίση) στον συμπιεστή και στον στρόβιλο, έχουν ως αποτέλεσμα τον βελτιωμένο βαθμό απόδοσης του συστήματος, όχι μόνο στην ονομαστική ισχύ, αλλά και σε μερικό φορτίο. Όμως, το σύστημα είναι πιο περίπλοκο και η απόκρισή του σε απότομη μεταβολή φορτίου μπορεί να είναι βραδύτερη.

2. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (ΑΠΛΟΥ) ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

2.1 Κατάσταση ανακοπής

Οι ταχύτητες που αναπτύσσει το ρευστό στις στροβιλομηχανές και, επομένως, η κινητική του ενέργεια δεν είναι αμελητέες. Η ανάλυση διευκολύνεται με την εισαγωγή της έννοιας “κατάσταση ανακοπής”. Είναι η κατάσταση του ρευστού, όταν από την αρχική του κατάσταση μη μηδενικής ταχύτητας C έρθει με αδιαβατική μεταβολή και χωρίς συναλλαγή έργου σε ηρεμία ($C=0$). Ο ισολογισμός ενέργειας μεταξύ των δύο καταστάσεων γράφεται:

$$(h_0 - h) + \frac{1}{2}(0 - C^2) = 0 \Rightarrow h_0 = h + \frac{1}{2}C^2 \quad (2.1)$$

όπου h_0 είναι η ενθαλπία ανακοπής (ή ολική ενθαλπία). Όταν το ρευστό θεωρείται τέλει αέριο, ισχύει:

$$h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

Οπότε από την εξίσωση (2.1) προκύπτει:

$$T_0 = T + \frac{C^2}{2 c_p} \quad (2.2)$$

όπου T_0 είναι η θερμοκρασία ανακοπής (ή ολική θερμοκρασία). Ο όρος $\frac{C^2}{2 c_p}$ ονομάζεται δυναμική θερμοκρασία, ενώ η T στατική θερμοκρασία.

Μια ιδέα της τάξης μεγέθους της διαφοράς μεταξύ T_0 και T δίνει το ακόλουθο παράδειγμα: για τον αέρα σε πίεση περιβάλλοντος είναι $c_p = 1,005 \text{ kJ/kg K}$. Εάν ο αέρας ρέει με ταχύτητα 100 m/s, τότε είναι:

$$T_0 - T = \frac{\left(100 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}} = 5 \text{ K}$$

Από τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής προκύπτει, ότι εάν δεν υπάρχει συναλλαγή έργου ή θερμότητας, η T_0 παραμένει σταθερή. Εάν για παράδειγμα η διατομή του αγωγού μεταβάλλεται κατά μήκος της ροής, ή εάν η τριβή μετατρέπει κινητική ενέργεια σε θερμική, η στατική θερμοκρασία T θα μεταβληθεί, όχι όμως η T_0 .

Η εξίσωση ισολογισμού ενέργειας με την παραδοχή σταθερού c_p δίνει για την αδιαβατική συμπίεση (μεταβολή 1→2, στο σχ. 1.1):

$$\dot{W}_C = \dot{m}_a \left[c_p (T_2 - T_1) + \frac{1}{2} (C_2^2 - C_1^2) \right] = \dot{m}_a c_{pa} (T_{02} - T_{01}) \quad (2.3)$$

Όστε αν χρησιμοποιηθούν θερμοκρασίες (ή ενθαλπίες) ανακοπής, οι ταχύτητες δεν εμφανίζονται στις σχετικές εξισώσεις και η ανάλυση διευκολύνεται σημαντικά.

Όταν το αέριο επιβραδύνεται χωρίς συναλλαγή έργου ή θερμότητας, η θερμοκρασία και η πίεση αυξάνονται. Η πίεση ανακοπής (ή ολική πίεση) ορίζεται όπως και η T_0 αλλά με την πρόσθετη προϋπόθεση ότι η μεταβολή είναι όχι μόνο αδιαβατική αλλά και αντιστρεπτή, επομένως ισεντροπική. Έτσι, η πίεση ανακοπής προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\frac{p_0}{p} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.4)$$

Ενώ η θερμοκρασία ανακοπής παραμένει σταθερή κατά τη ροή του ρευστού όταν δεν υπάρχει συναλλαγή έργου ή θερμότητας, για να παραμείνει σταθερή η πίεση ανακοπής πρέπει, εκτός των προηγούμενων, να μην υπάρχουν τριβές.

Εφαρμόζοντας την Εξ. (2.4) για μια ισεντροπική μεταβολή κατάστασης 1→2, προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \left(\frac{T_{02}}{T_{01}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \left(\frac{T_{02}}{T_{01}}\right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{ή} \quad \frac{T_{02}}{T_{01}} = \left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^k \quad (2.5)$$

Και ισχύει:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^k$$

Οι παραπάνω δυο εξισώσεις δείχνουν, ότι για ισεντροπικές μεταβολές οι ιδιότητες ανακοπής p_0 και T_0 μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως και οι στατικές ιδιότητες p και T .

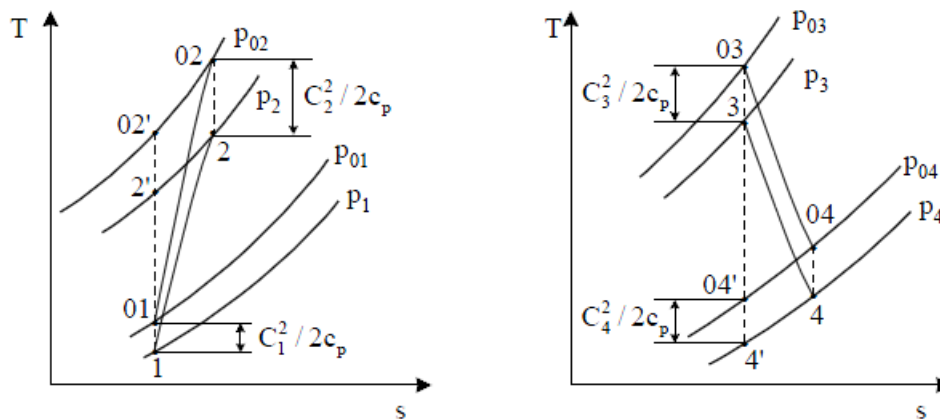
2.2 Ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης συμπίεστή και στροβίλου

Ο βαθμός απόδοσης μιας μηχανής που αποδίδει ή απορροφά έργο, ορίζεται ως το πηλίκο του πραγματικού προς το ιδανικό έργο. Επειδή οι στροβιλομηχανές είναι με πολύ καλή προσέγγιση αδιαβατικές, η ιδανική μεταβολή είναι η ισεντροπική, κάτι που δικαιολογεί την ονομασία *ισεντροπικός βαθμός απόδοσης*.

Με αναφορά στα Σχ. (1.1) και (2.1) και χρήση ιδιοτήτων ανακοπής ορίζονται οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης του συμπίεστή και του στροβίλου:

$$\eta_C = \frac{w_C}{w_C} = \frac{h'_{02} - h_{01}}{h_{02} - h_{01}} \quad (2.6\alpha)$$

$$\eta_T = \frac{w_T}{w_T} = \frac{h_{03} - h_{04}}{h_{03} - h'_{04}} \quad (2.7\alpha)$$



Σχήμα 2.1: Μεταβολή καταστάσεων κατά τη συμπίεση (1→2) και αποτόνωση (3→4) [2]

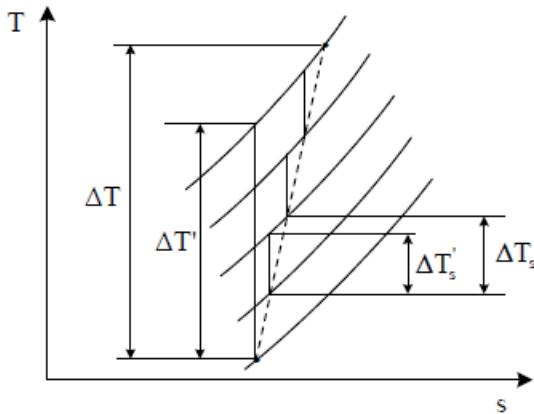
Η παραδοχή σταθερού c_p σε μια μέση τιμή κρίνεται συνήθως ικανοποιητική. Επιπλέον, επειδή η πραγματική μεταβολή θερμοκρασίας δεν διαφέρει πολύ από την ιδανική (ισεντροπική), αυτή η τιμή του c_p μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ίδια για τις δυο μεταβολές. Τότε οι Εξ. (2.6α) και (2.7α) γράφονται:

$$\eta_C = \frac{T'_{02} - T_{01}}{T_{02} - T_{01}} \quad (2.6\beta)$$

$$\eta_T = \frac{T_{03} - T_{04}}{T_{03} - T'_{04}} \quad (2.7\beta)$$

2.3 Πολυτροπικοί βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και στρόβιλου

Οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης, όπως ορίζονται με τις Εξ. (2.6) και (2.7), αναφέρονται σε ολόκληρη τη μηχανή (συμπιεστή ή στρόβιλο), από την είσοδο μέχρι την έξοδο. Κατά τη μελέτη του θερμοδυναμικού κύκλου σε μια περιοχή τιμών του λόγου πίεσης (p_2/p_1) με σκοπό π.χ. τον προσδιορισμό του βέλτιστου λόγου πίεσης για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, ανακύπτει το ερώτημα κατά πόσο είναι λογικό να θεωρηθούν σταθεροί οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης η_C και η_T . Στην πραγματικότητα παρατηρείται, ότι ο η_C μειώνεται ενώ ο η_T αυξάνεται με αύξηση του λόγου πίεσης του συμπιεστή και του στρόβιλου. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται με τον ακόλουθο τρόπο, στηριγμένο στο Σχ. 2.2. Για διευκόλυνση, χρησιμοποιούνται τα p και T αντί των p_0 και T_0 .



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα T-s για πολυβάθμιο αξονικό συμπιεστή [2]

Ας θεωρηθεί αξονικός συμπιεστής αποτελούμενος από έναν αριθμό διαδοχικών βαθμίδων. Εάν οι βαθμίδες είναι όμοιες μεταξύ τους, είναι λογικό να θεωρηθεί ότι έχουν όλες τον ίδιο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης, η_s (ισεντροπικός βαθμός απόδοσης βαθμίδας). Τότε, η ολική αύξηση θερμοκρασίας δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta T = \sum \frac{\Delta T'_s}{\eta_s} = \frac{1}{\eta_s} \sum \Delta T'_s \quad (\alpha)$$

Από τον ορισμό του η_c , προκύπτει $\Delta T = \Delta T' / \eta_c$ και επομένως:

$$\frac{\eta_s}{\eta_c} = \frac{\sum \Delta T'_s}{\Delta T'} \quad (\beta)$$

Επειδή οι ισόθλιπτες στο διάγραμμα T-s αποκλίνουν προς τα δεξιά (κατεύθυνση αύξησης της εντροπίας), είναι φανερό από το Σχ. 2.2 ότι $\sum \Delta T'_s > \Delta T'$. Επομένως θα είναι $\eta_c < \eta_s$ και η διαφορά μεταξύ των η_s και η_c μεγαλώνει με αύξηση του αριθμού των βαθμίδων, δηλ. με αύξηση του λόγου πίεσης. Μια φυσική εξήγηση είναι, ότι η αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας τριβών στη μία βαθμίδα έχει ως συνέπεια την ανάγκη δαπάνης περισσότερου έργου στην επόμενη βαθμίδα συμπίεσης, κάτι που μπορεί επίσης να χαρακτηριστεί ως η επίδραση της “προθέρμανσης”.

Με όμοιο τρόπο αποδεικνύεται, ότι σε έναν στρόβιλο είναι $\eta_T > \eta_s$. Στην περίπτωση αυτή, η “αναθέρμανση” λόγω τριβών στη μία βαθμίδα ανακτάται κατά ένα μέρος ως έργο στην επόμενη βαθμίδα.

Οι προηγούμενες παρατηρήσεις οδήγησαν στην εισαγωγή του *πολυτροπικού βαθμού απόδοσης* (ή *βαθμού απόδοσης μικρής βαθμίδας*) η_∞ που ορίζεται ως ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στοιχειώδους βαθμίδας, ο οποίος παραμένει σταθερός σε όλη τη διεργασία (συμπίεσης ή αποτόνωσης). Θεωρείται, δηλ., ότι η διεργασία συντελείται με άπειρο πλήθος τέτοιων βαθμίδων, κάτι που δηλώνει και ο δείκτης ‘ ∞ ’. Για συμπίεση με την παραδοχή σταθερού c_p , θα είναι:

$$\eta_{\infty C} = \frac{dT'}{dT} = \text{σταθ.} \quad (2.8)$$

Όμως, για ισεντροπική ροή ισχύει η σχέση:

$$\frac{T}{p^k} = \text{σταθ.} \quad (\gamma)$$

η οποία σε διαφορετική μορφή γράφεται

$$\frac{dT'}{T} = k \frac{dp}{p} \quad (\delta)$$

Με αντικατάσταση του dT' από την Εξ. (2.8) και την Εξ. (δ), προκύπτει

$$\eta_{\infty C} \frac{dT}{T} = k \frac{dp}{p} \quad (\epsilon)$$

Ολοκλήρωση από την κατάσταση 1 (εισαγωγή) μέχρι την κατάσταση 2 (εξαγωγή του συμπιεστή) με σταθερό $\eta_{\infty C}$, δίνει

$$\eta_{\infty C} = \frac{\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^k}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} \quad (2.9)$$

Η σχέση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή από μετρήσεις τιμών της (ολικής) πίεσης και θερμοκρασίας στην είσοδο και την έξοδο του συμπιεστή. Η Εξ. (2.9) γράφεται, επίσης, με τη μορφή

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k}{\eta_{\infty C}}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma \eta_{\infty C}}} \quad (2.10)$$

Είναι γνωστό από τη θερμοδυναμική ότι για πολυτροπική μεταβολή κατάστασης ισχύει

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (2.11)$$

όπου n ο εκθέτης πολυτροπικής μεταβολής. Η ομοιότητα των Εξ. (2.10) και (2.11) δείχνει ότι η μεταβολή 1→2 είναι πολυτροπική, κάτι που δικαιολογεί την ονομασία “πολυτροπικός βαθμός απόδοσης” για τον $\eta_{\infty C}$. Επίσης από τις Εξ. (2.10) και (2.11), προκύπτει η σχέση:

$$\frac{\gamma-1}{\gamma \eta_{\infty C}} = \frac{n-1}{n} \quad (2.12)$$

Τέλος, αποδεικνύεται εύκολα ότι μεταξύ ισεντροπικού και πολυτροπικού βαθμού απόδοσης συμπιεστή ισχύει η σχέση

$$\eta_C = \frac{r_C^k - 1}{r_C^{k/\eta_{\infty C}} - 1} \quad (2.13)$$

Με όμοιο τρόπο εισάγεται ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης της αποτόνωσης σε στρόβιλο

$$\eta_{\infty T} = \frac{dT'}{dT} = \text{σταθ.} \quad (2.14)$$

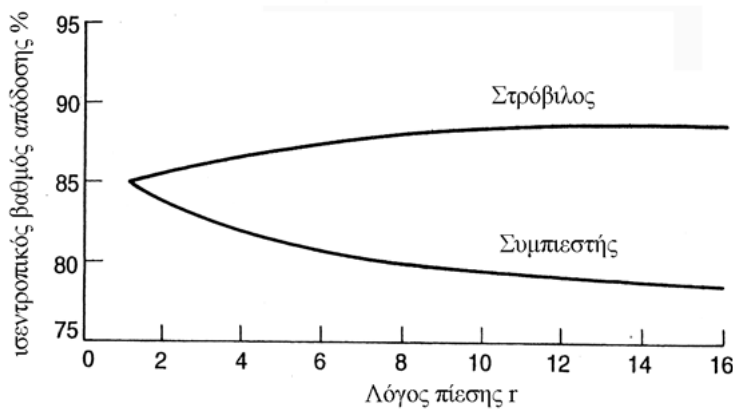
και αποδεικνύονται οι σχέσεις (οι δείκτες καταστάσεων αναφέρονται στο Σχ. 2)

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{k\eta_{\infty T}} = r_T^{k\eta_{\infty T}} \Rightarrow \eta_{\infty T} = \frac{\ln\left(\frac{T_3}{T_4}\right)}{\ln\left(\frac{p_3}{p_4}\right)^k} \quad (2.15)$$

και

$$\eta_T = \frac{1-r_T^{-k\eta_{\infty T}}}{1-r_T^{-k}} \quad (2.16)$$

Μια εικόνα της επίδρασης του λόγου πίεσης στην τιμή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπίεστη και στρόβιλου δίνει το Σχ. 2.3 που χαράχθηκε με εφαρμογή των Εξ. (2.13) και (2.16).



Σχήμα 2.3: Μεταβολή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπίεστη και στρόβιλου με μεταβολή του λόγου πίεσης, για $\eta_{\infty} = 0,85$ και $\gamma = 1,4$ [2]

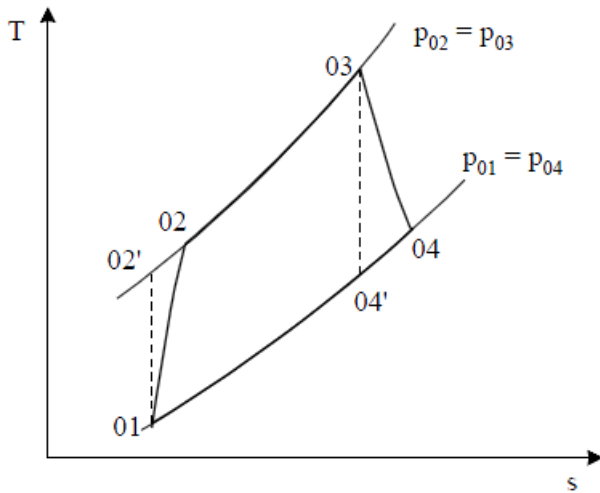
Οι δύο βαθμοί απόδοσης (ισεντροπικός και πολυτροπικός) προσφέρουν την ίδια πληροφορία με διαφορετική μορφή. Όταν π.χ. κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος μελετάται η συμπεριφορά του σε μια περιοχή τιμών του λόγου πίεσης, είναι λογικό οι υπολογισμοί να γίνονται με σταθερό πολυτροπικό βαθμό απόδοσης, οπότε ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης μεταβάλλεται με τον λόγο πίεσης. Μπορεί να θεωρηθεί, ότι ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης δείχνει τη στάθμη της τεχνολογικής εξέλιξης σε δεδομένη χρονική στιγμή. Από την άλλη πλευρά, όταν μελετάται η συμπεριφορά συγκεκριμένης μηχανής ή συστήματος, είναι καταλληλότερη η χρήση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης. Υπενθυμίζεται, ότι στην ανάλυση που προηγήθηκε χρησιμοποιήθηκαν στατικές ιδιότητες αντί των ολικών. Στην πράξη, τόσο οι ισεντροπικοί όσο και οι πολυτροπικοί βαθμοί απόδοσης υπολογίζονται με τα ολικά μεγέθη.

2.4 Ανάλυση απλού κύκλου

Εάν η πτώση πίεσης στην εισαγωγή του αέρα, στον θάλαμο καύσης και στην εξαγωγή των καυσαερίων θεωρηθεί αμελητέα, η μεταβολή της κατάστασης του ρευστού

στο σύστημα του Σχ. 1.1 παριστάνεται με τη γραμμή 1-2-3-4 στο διάγραμμα T-s του Σχ. 2.4. Η ανάλυση θα στηριχθεί σε ολικές ιδιότητες (ιδιότητες ανακοπής), επομένως οι λόγοι πίεσης ορίζονται από τις σχέσεις:

$$r_C = \frac{p_{02}}{p_{01}} \quad r_T = \frac{p_{03}}{p_{04}} \quad (2.17)$$



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα T-s απλού αεριοστροβίλου[2]

Για ισεντροπική συμπίεση και αποτόνωση, ισχύουν οι σχέσεις:

$$\frac{T_{02}}{T_{01}} = r_C^{k_a} \quad \frac{T_{03}}{T_{04}} = r_T^{k_g} \quad (2.18)$$

όπου k_a και k_g οι σταθερές ισεντροπικής μεταβολής του αέρα και του καυσαερίου, αντίστοιχα. Συνδυάζοντας τις Εξ. (2.6β), (2.7β) και (2.18), προκύπτουν οι εξισώσεις προσδιορισμού των θερμοκρασιών T_{02} και T_{04} :

$$T_{02} = T_{01} \left[1 + \frac{r_C^{k_a} - 1}{\eta_c} \right] \quad (2.19)$$

$$T_{04} = T_{03} \left[1 - \eta_T \left(1 - r_T^{-k_g} \right) \right] \quad (2.20)$$

Η απαιτούμενη ισχύς στον άξονα του συμπιεστή υπολογίζεται με τη σχέση:

$$\dot{W}_C = \frac{\dot{m}_a c_{pa}}{\eta_{mc}} (T_{02} - T_{01}) \quad (2.21)$$

Η ισχύς που αποδίδεται από τον στρόβιλο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{W}_T = \dot{m}_g c_{pg} (T_{03} - T_{04}) \eta_{mT} = (1 + f) \dot{m}_a c_{pg} (T_{03} - T_{04}) \eta_{mT} \quad (2.22)$$

Η καθαρή ισχύς της αεριοστροβλικής μονάδας είναι:

$$\dot{W}_{GT} = \dot{W}_T - \dot{W}_C \quad (2.23)$$

Εάν χρησιμοποιηθεί μηχανικός βαθμός απόδοσης η_m για όλη τη μονάδα, τότε:

$$\dot{W}_{GT} = \eta_m [\dot{m}_g c_{pg}(T_{03} - T_{04}) - \dot{m}_a c_{pa}(T_{02} - T_{01})] \quad (2.24)$$

Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ορίζεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{m}_f H_u} \quad (2.25)$$

Ως κριτήριο συγκέντρωσης ισχύος χρησιμοποιείται συνήθως η ειδική ισχύς, δηλαδή η ισχύς ανά μονάδα παροχής μάζας αέρα:

$$w_i = \frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{m}_a} \quad (2.26)$$

Η ειδική ισχύς είναι ένας καλός δείκτης του βάρους και του όγκου της μηχανής και των αγωγών προσαγωγής του αέρα και απαγωγής των καυσαερίων. Βέβαια, το βάρος και ο όγκος της μηχανής προσαυξάνονται με το βάρος και τον όγκο του ηχομονωτικού περιβλήματος. Ως ποσοστό, η προσαύξηση αυτή είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μικρότερη είναι η μηχανή.

Ο ισολογισμός ενέργειας στον θάλαμο καύσης για αδιαβατική καύση, γράφεται:

$$\dot{m}_f H_u \eta_B = \dot{m}_a [(1 + f)c_{pg}(T_{03} - T_0) - c_{pa}(T_{02} - T_0)] \quad (2.27)$$

όπου T_0 θερμοκρασία αναφοράς. Η Εξ. (2.27) λύνεται ως προς τον λόγο καυσίμου /αέρα:

$$f = \frac{c_{pg}(T_{03} - T_0) - c_{pa}(T_{02} - T_0)}{H_u \eta_B - c_{pg}(T_{03} - T_0)} \quad (2.28)$$

Τέλος, η ειδική κατανάλωση καυσίμου δίνεται από την σχέση:

$$b_e = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}_{GT}} \quad (2.29)$$

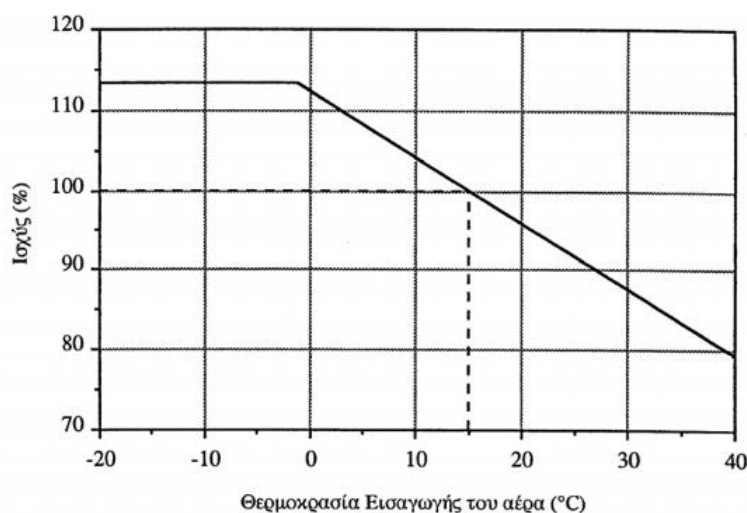
3. ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΕΚΤΟΣ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ

3.1 Επίδραση συνθηκών περιβάλλοντος

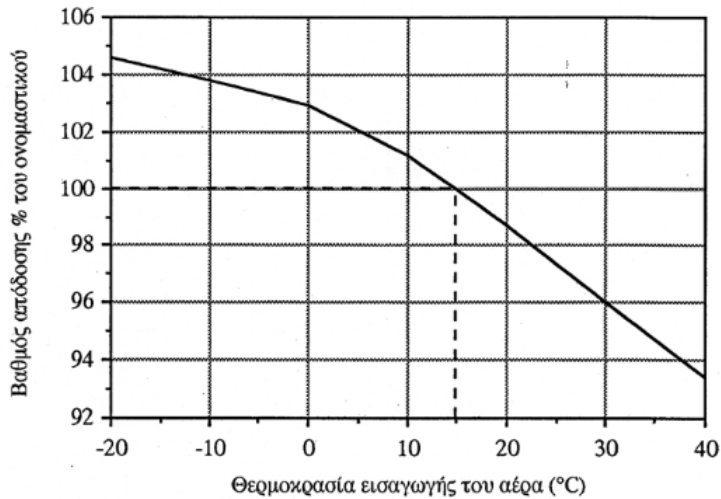
Οι συνθήκες (πίεση, θερμοκρασία, υγρασία) εισόδου του αέρα στον συμπιεστή μιας μονάδας αεριοστροβίλου (συνήθως είναι οι συνθήκες του περιβάλλοντος) έχουν αισθητή επίδραση στην ισχύ αλλά και στον βαθμό απόδοσης της μονάδας. Ιδιαίτερα η θερμοκρασία, έχει έντονη επίδραση. Για τον λόγο αυτόν, είναι αναγκαίο να αναγράφεται στις τεχνικές προδιαγραφές τουλάχιστον η θερμοκρασία αναφοράς των μεγεθών αυτών (τείνει να γενικευθεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος 15°C ως θερμοκρασία αναφοράς). Ενδεικτικές καμπύλες μεταβολής δίνονται στα Σχ. 3.1 και 3.2, στα οποία η ταχύτητα περιστροφής θεωρείται ίση με την ονομαστική.

Η επίδραση αυτή εξηγείται ως εξής: Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλή, η πυκνότητα του αέρα είναι χαμηλή (για σταθερή πίεση) και, επομένως η παροχή μάζας είναι χαμηλή. Με υψηλή αρχική θερμοκρασία και χαμηλή παροχή μάζας αέρα, η παροχή καυσίμου πρέπει να μειωθεί, ώστε η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου να μην ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή. Αποτέλεσμα είναι η σημαντική μείωση της ισχύος.

Η μείωση της πίεσης του περιβάλλοντος έχει παρόμοια επίδραση με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς και αυτή συντελεί σε μείωση της πυκνότητας του αέρα. Βέβαια, στην επιφάνεια της θάλασσας η πίεση δεν μεταβάλλεται σημαντικά από τόπο σε τόπο, για αυτό και δεν θεωρείται κρίσιμος παράγοντας για τις ναυτικές εφαρμογές, σε αντίθεση με τη θερμοκρασία που έχει εύρος διακύμανσης δεκάδων βαθμών (από τον Ισημερινό στους πόλους και από χειμώνα σε καλοκαίρι).



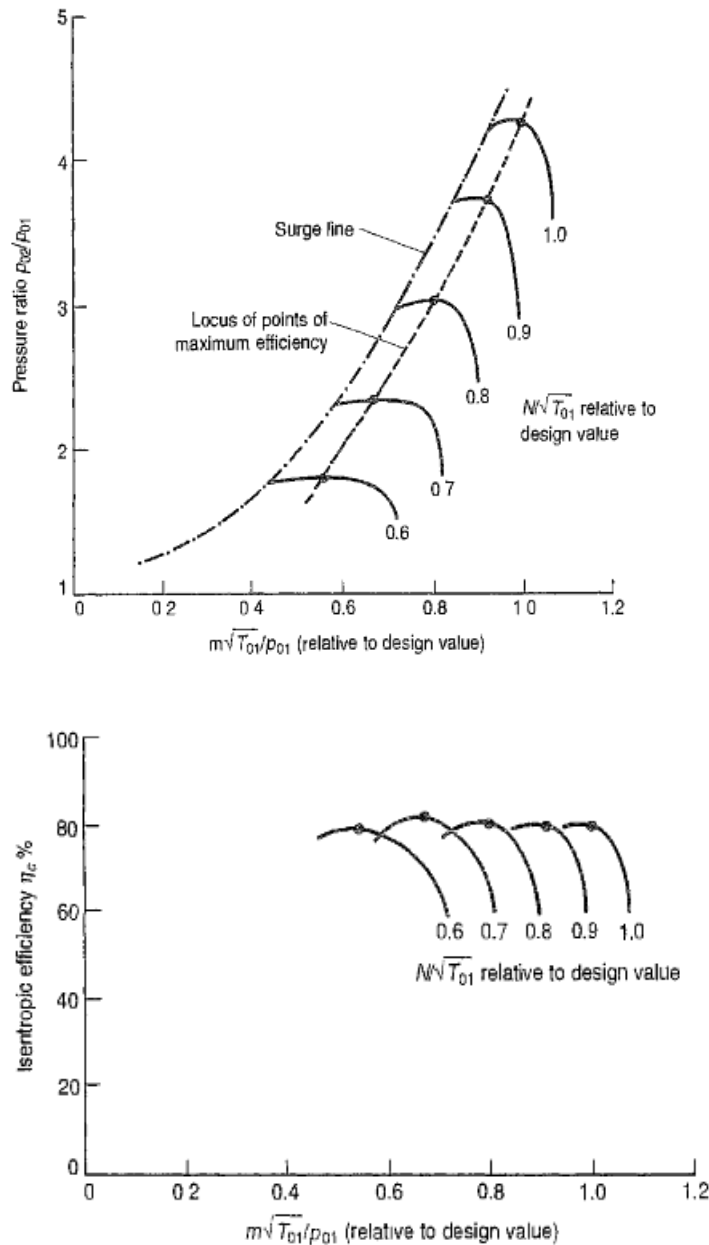
Σχήμα 3.1: Επίδραση της θερμοκρασίας εισαγωγής του αέρα στην ισχύ μονάδας αεριοστροβίλου [2]



Σχήμα 3.2: Επίδραση της θερμοκρασίας εισαγωγής του αέρα στον βαθμό απόδοσης μονάδας αεριοστροβίλου [2]

3.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες και υπολογισμός λειτουργικής συμπεριφοράς επί μέρους στοιχείων

Η λειτουργική απόδοση ενός συμπιεστή μπορεί να καθοριστεί μέσω των καμπυλών της πίεσης και της θερμοκρασίας στην έξοδο του, συναρτήσει της παροχής για διαφορετικές τιμές της ταχύτητας περιστροφής (rpm). Αυτές οι χαρακτηριστικές καμπύλες, καμπύλες λειτουργικής απόδοσης όπως ονομάζονται, εξαρτώνται από μια σειρά λειτουργικών παραμέτρων όπως π.χ. πίεση και θερμοκρασία εισόδου, φυσικές ιδιότητες του εργαζόμενου 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 βάση δυο μόνον ομάδων καμπυλών, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.3 που είναι αντιπροσωπευτικές της περιγραφής της λειτουργίας των συμπιεστών.



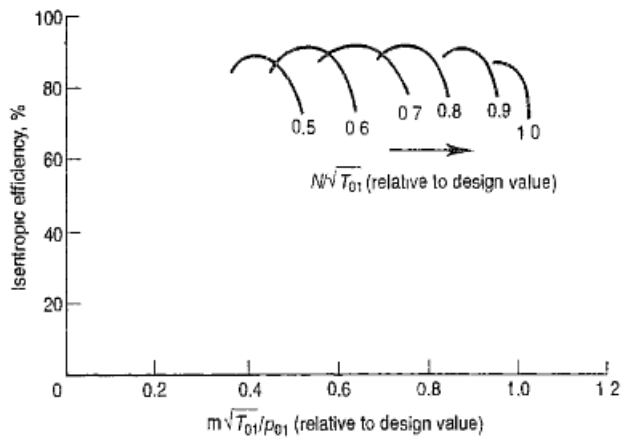
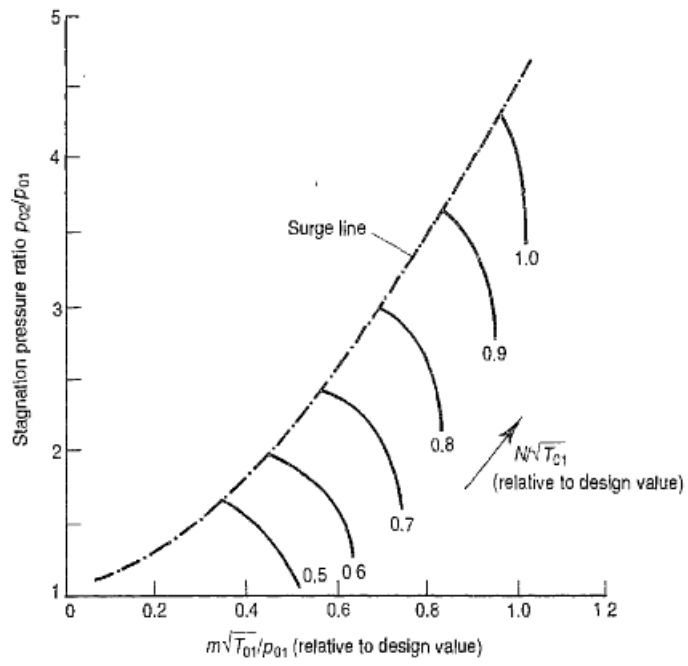
Σχήμα 3.3^α και 3.3^β: Τυπικές χαρακτηριστικές φυγοκεντρικού συμπιεστή [1]

Τα διαγράμματα παρουσιάζονται σε αδιάστατη μορφή δηλαδή ο λόγος πιέσεων $\frac{P_{02}}{P_{01}}$ και ο ισηντροπικός βαθμός απόδοσης σχεδιάζονται στο διάγραμμα συναρτήσει της «αδιάστατης» παροχής, $\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}$, για διαφορετικές σταθερές τιμές του «αδιάστατου» ¹ αριθμού στροφών, $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.3^α, η μέγιστη απόδοση παραμένει ίδια για όλες τις καμπύλες, τα δε σημεία μέγιστης απόδοσης δημιουργούν ένα τόπο σημείων που σημειώνεται από την διακεκομμένη γραμμή. Ιδανικά η μηχανή θα έπρεπε να σχεδιάζεται έτσι ώστε ο συμπιεστής να εργάζεται πάντα σε αυτήν την γραμμή. Δυο άλλες αδιάστατες παράμετροι που συχνά χρησιμοποιούνται αντί της αδιάστατης μάζας και της

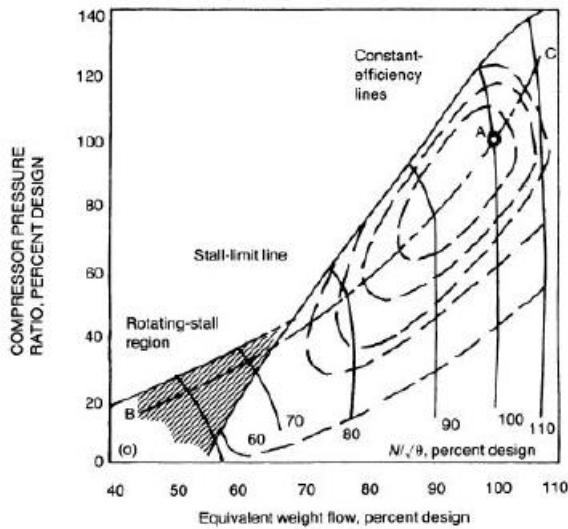
¹ Αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως αδιάστατοι αριθμοί, αν και δεν είναι αδιάστατοι.

αδιάστατης ταχύτητας περιστροφής είναι η ισοδύναμη παροχή $\frac{m\sqrt{\theta}}{\delta}$ και η ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής $\frac{N}{\sqrt{\theta}}$ όπου $\theta = \frac{T_{01}}{T_{ref}}$ και $\delta = \frac{P_{01}}{P_{ref}}$ και η κατάσταση αναφοράς αντιστοιχεί κατά ISA (International Standard Atmosphere) σε επίπεδο θαλάσσης, δηλαδή 288 K και 1.013 bar.

Στο Σχ. 3.4 φαίνονται τυπικές χαρακτηριστικές αξονικού συμπιεστή. Είναι εμφανές, σε σύγκριση με το διάγραμμα χαρακτηριστικών του φυγοκεντρικού συμπιεστή, ότι εδώ οι χαρακτηριστικές καμπύλες για συγκεκριμένες τιμές του «αδιάστατου» αριθμού στροφών καλύπτουν ένα 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 στραγγαλισμού της ροής εισόδου γίνονται κατακόρυφες, χρειάζεται να σχεδιαστεί και η απόδοση συναρτήσει του λόγου πιέσεων (Σχ. 3.5). Επιπλέον παρατηρούμε ότι, για τους αξονικούς συμπιεστές, τα σημεία μέγιστης απόδοσης βρίσκονται κοντά στη γραμμή πάλμωσης και το εύρος ευσταθούς λειτουργίας είναι μικρό και συνεπώς χρειάζεται μεγάλη προσοχή στη σύζευξη του συμπιεστή με τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος.

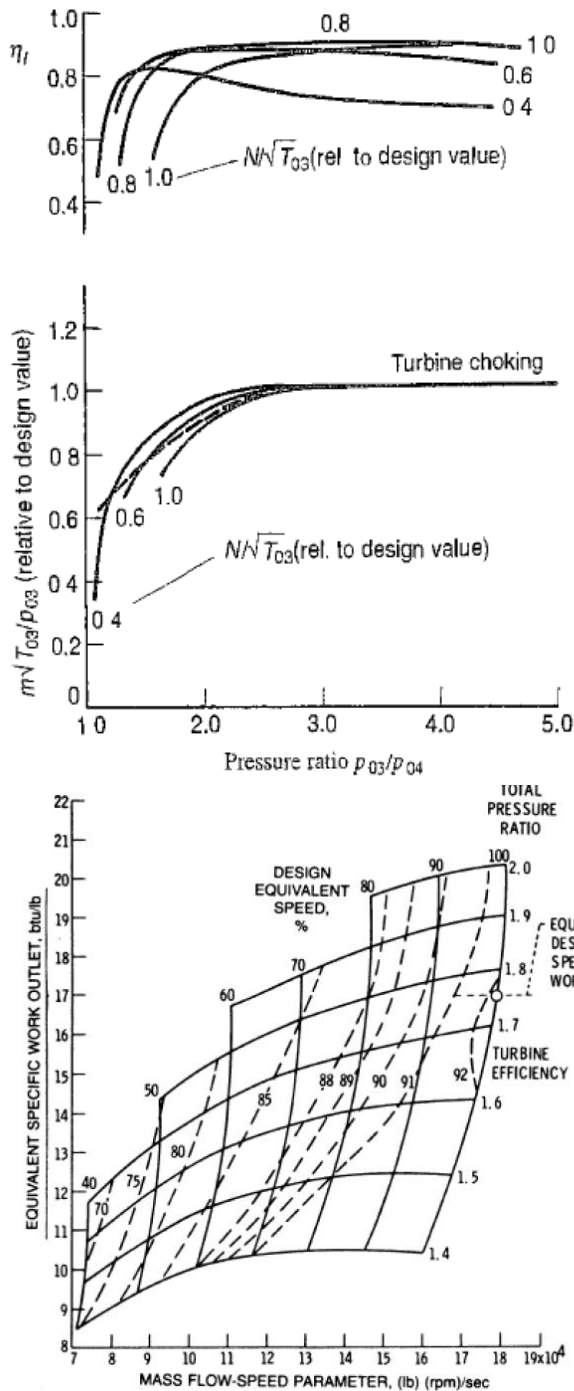


Σχήμα 3.4: Τυπικές χαρακτηριστικές αξονικού συμπιεστή [1]



Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες αξονικού συμπιεστή, γενική μορφή [1]

Παρόμοια με τους συμπιεστές, η λειτουργία των στροβίλων περιγράφεται μέσω ανάλογων χαρακτηριστικών λειτουργικής απόδοσης. Και εδώ τα διαγράμματα παρουσιάζονται σε αδιάστατη μορφή, σχεδιάζοντας τώρα την απόδοση η_t και την αδιάστατη μάζα, $\frac{m \sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$, συναρτήσει του λόγου πιέσεων $\frac{P_{03}}{P_{04}}$ για διάφορες τιμές του λόγου $\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$. Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα χαρακτηριστικών στροβίλου δίνονται στο Σχ. 3.6. 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 σάτη (ή ακροφύσιο) οι χαρακτηριστικές για διάφορες στροφές σχεδόν συμπίπτουν και αυτό το εκμεταλλευόμαστε στον υπολογισμό της απόδοσης για λειτουργία εκτός του σημείου σχεδιασμού χρησιμοποιώντας μία μόνο καμπύλη.



Σχήμα 3.6: Χαρακτηριστικές καμπύλες και διαγράμματα λειτουργίας στροβίλου [1]

Ως εδώ αναφερθήκαμε στις χαρακτηριστικές καμπύλες των επιμέρους στοιχείων. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στις χαρακτηριστικές της πλήρους μονάδας.

Από τις μεθόδους υπολογισμού των κύκλων του προηγούμενου κεφαλαίου είναι δυνατόν 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 τη δεδομένη εφαρμογή.

Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να σχεδιαστεί κάθε ένα από τα επιμέρους στοιχεία του αεριοστρόβιλου 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 αεριοστρόβιλος εργάζεται σε συγκεκριμένες στροφές, λόγο πιέσεων και παροχή, για τις οποίες τα επιμέρους στοιχεία έχουν σχεδιασθεί. Το πρόβλημα που απομένει είναι να ευρεθεί η μεταβολή των χαρακτηριστικών λειτουργικής απόδοσης του αεριοστρόβιλου 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 κάθε ενός από τα στοιχεία μπορούν να εκτιμηθούν είτε με βάση προηγούμενη εμπειρία ή να υπολογιστούν από πραγματικές μετρήσεις. Όταν βέβαια τα επιμέρους στοιχεία είναι συζευγμένα μεταξύ τους στην πλήρη μονάδα, το εύρος των δυνατών λειτουργικών συνθηκών για κάθε μια περιορίζεται σημαντικά. Το πρόβλημα είναι τότε να βρεθούν τα αντίστοιχα (κοινά) σημεία λειτουργίας επί των χαρακτηριστικών (καμπυλών απόδοσης) κάθε στοιχείου όταν η μηχανή εργάζεται υπό σταθερές στροφές, ή όπως συχνά αναφέρεται, υπό ισορροπία (equilibrium) ή αλλιώς υπό ευσταθή λειτουργία.

Τα σημεία λειτουργικής ισορροπίας για μια σειρά στροφών μπορούν να σχεδιαστούν επί του διαγράμματος χαρακτηριστικών του συμπιεστή και να ενωθούν για να σχηματίσουν τη γραμμή λειτουργικής ισορροπίας (equilibrium running line) το δε πλήρες διάγραμμα που προκύπτει καλείται διάγραμμα λειτουργικής 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.

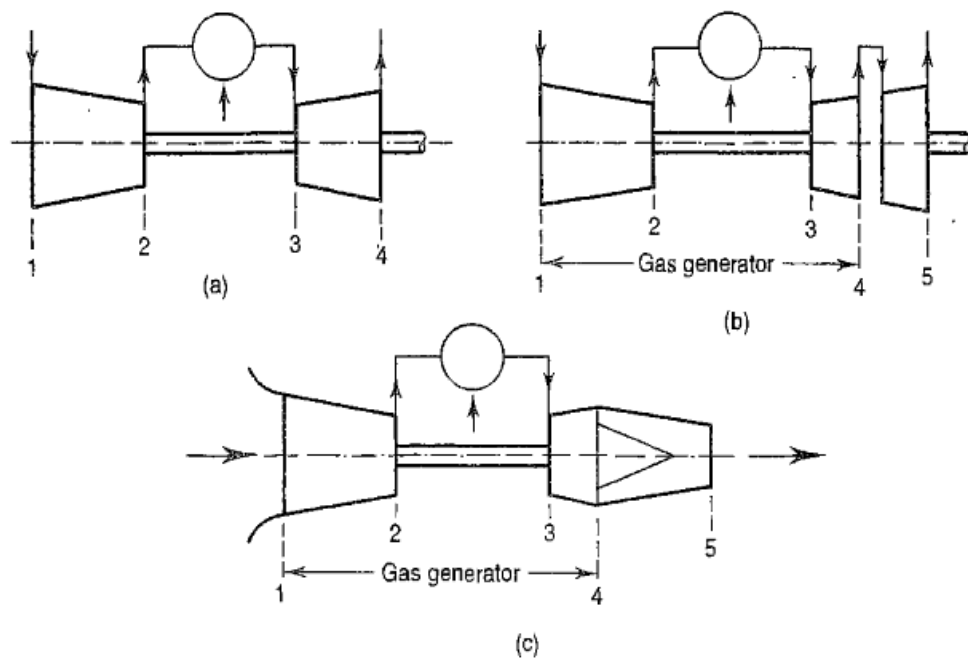
Το διάγραμμα ισορροπίας υποδεικνύει επίσης την εγγύτητα της γραμμής λειτουργίας (ή ζώνη λειτουργίας) προς τη γραμμή παλμωσης. Εάν η γραμμή λειτουργίας τέμνει τη γραμμή πάλμωσης, τότε ο αεριοστρόβιλος δεν θα μπορεί να εργαστεί υπο μέγιστες στροφές και κάποια διορθωτική μεταβολή πρέπει να γίνει. Τέλος, το διάγραμμα αυτό δείχνει κατά πόσο η μηχανή εργάζεται σε περιοχές επαρκούς απόδοσης του συμπιεστή. Η γραμμή λειτουργίας, όπως προαναφέρθηκε, ιδανικά θα έπρεπε να βρίσκεται πάνω στα σημεία μέγιστης απόδοσης του συμπιεστή.

Σε εφαρμογές όπου η μηχανή εργάζεται για μεγάλη διάρκεια σε χαμηλές τιμές ισχύος, η μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου με ελάττωση της ισχύος, κάτι που συνήθως αναφέρεται ως λειτουργική απόδοση υπό μερικό φορτίο, είναι υψίστης 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 παράγοντας 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 αεριοστρόβιλων πρέπει να μπορούν να εργάζονται από

-60°C στην Ανταρκτική μέχρι και 40 °C στις τροπικές περιοχές και σε υψόμετρα από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι τα 3000 μέτρα ενώ οι αεροπορικοί αεροστρόβιλοι υφίστανται ακόμα μεγαλύτερες διακυμάνσεις στις πιέσεις και τις θερμοκρασίες εισαγωγής.

Στη συνέχεια θα περιγραφούν οι βασικές μέθοδοι υπολογισμού της λειτουργικής απόδοσης υπό συνθήκες ισορροπίας εκτός σημείου σχεδιασμού (equilibrium off-design performance) μερικών απλών διατάξεων όπως φαίνονται στο Σχ. 3.7. Αυτές είναι:

- Της μονοαξονικής μονάδας ισχύος
- Της διάταξης του Σχ. 3.7b, όπου το κύριο τμήμα του αεροστροβίλου είναι συζευγμένο με ελεύθερο στρόβιλο ισχύος
- Της απλής μηχανής turbojet όπου εδώ η χρήσιμη ισχύς εμπεριέχεται στο υψηλής ταχύτητας ρεύμα καυσαερίου που παράγεται στο ακροφύσιο



Σχήμα 3.7: Διατάξεις αεροστροβίλων προς μελέτη [1]

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 στοιχείων. 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, εξόδου και στον θάλαμο καύσης.

3.3 Λειτουργία μονοαξονικού αεριοστροβίλου εκτός σημείου σχεδιασμού

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, για τον μονοαξονικό αεριοστροβίλο του Σχ. 3.7^α ο λόγος πιέσεων στον στρόβιλο υπολογίζεται από τον λόγο πιέσεων στον συμπιεστή και τις απώλειες πίεσης στο θάλαμο καύσης. Η ροή μάζας στον στρόβιλο θα είναι ίση με την παρεχόμενη μάζα από τον συμπιεστή μείον τις διάφορες εκροές συν την μάζα του καυσίμου. Σε γενικές γραμμές η εκρέουσα μάζα μπορεί να θεωρηθεί ίση με τη μάζα του αέρα. Εν γένει η διαδικασία υπολογισμού ενός σημείου λειτουργίας ισορροπίας (equilibrium running point) έχει ως ακολούθως:

- Επί της χαρακτηριστικής του συμπιεστή επιλέγεται μια καμπύλη σταθερών στροφών και ένα οποιοδήποτε σημείο σε αυτήν. Εξ αυτού υπολογίζονται οι τιμές: $\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}, \frac{P_{02}}{P_{01}}, \eta_c, \frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$.
- τα αντίστοιχα σημεία επί της χαρακτηριστικής του στροβίλου λαμβάνονται εκ της συμβατότητας στροφών και παροχής
- έχοντας ταιριάξει 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 κινούμενο φορτίο. Αυτό απαιτεί γνώση της μεταβολής της ισχύος με τις στροφές, πράγμα που εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο απορροφάται η ισχύς.

Ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι συζευγμένοι απευθείας και συνεπώς η συμβατότητα των στροφών τους δίνει:

$$\frac{N}{\sqrt{T_{03}}} = \frac{N}{\sqrt{T_{01}}} \sqrt{\frac{T_{01}}{T_{03}}} \quad (3.1)$$

Λόγω της συμβατότητας των ροών μπορεί να γραφεί:

$$\frac{m_3\sqrt{T_{03}}}{P_{03}} = \frac{m_1\sqrt{T_{01}}}{P_{01}} \frac{P_{01}}{P_{02}} \frac{P_{02}}{P_{03}} \sqrt{\frac{T_{03}}{T_{01}}} \frac{m_3}{m_1}$$

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

$$\frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}} = \frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}} \frac{P_{01}}{P_{02}} \frac{P_{02}}{P_{03}} \sqrt{\frac{T_{03}}{T_{01}}} \quad (3.2)$$

Τα $\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}$ και $\frac{P_{02}}{P_{01}}$ είναι δεδομένα από το επιλεγμένο σημείο λειτουργίας στην χαρακτηριστική του συμπιεστή. Το $\frac{P_{03}}{P_{02}}$ θεωρείται σταθερό και το $\frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$ είναι συνάρτηση του λόγου πιέσεων του στροβίλου $\frac{P_{03}}{P_{04}}$.

Αγνοώντας τις απώλειες πίεσης έχουμε $P_a = P_{01} = P_{04}$ και επομένως $\frac{P_{03}}{P_{04}} = \frac{P_{03}}{P_{02}} \frac{P_{02}}{P_{01}}$.

Συνεπώς όλοι οι όροι στην Εξ. (3.2), με την εξαίρεση του όρου $\sqrt{\frac{T_{03}}{T_{01}}}$, μπορούν να ληφθούν από τις χαρακτηριστικές καμπύλες του συμπιεστή και του στροβίλου. Η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου T_{03} , μπορεί να υπολογιστεί όταν είναι γνωστή η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{01} .

Από την Εξ. (3.1) μπορούμε να υπολογίσουμε την παράμετρο $\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$ και κατόπιν την απόδοση του στροβίλου η_t από την χαρακτηριστική του στροβίλου, με γνωστά τα $\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$ και $\frac{P_{03}}{P_{04}}$. Η θερμοκρασιακή πτώση στον στρόβιλο και στον συμπιεστή υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta T_{034} = \eta_t T_{03} \left[1 - \left(\frac{P_{04}}{P_{03}} \right)^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} \right] \quad (3.3)$$

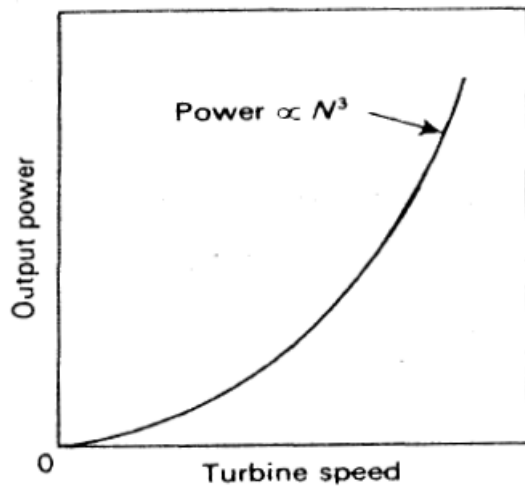
$$\Delta T_{012} = \frac{T_{01}}{\eta_c} \left[\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} - 1 \right] \quad (3.4)$$

Η καθαρή ισχύς που αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας δίνεται από:

$$\dot{W}_{GT} = \eta_m \left[\dot{m} c_{pg} \Delta T_{034} - \dot{m} c_{pa} \Delta T_{012} \right] \quad (3.5)$$

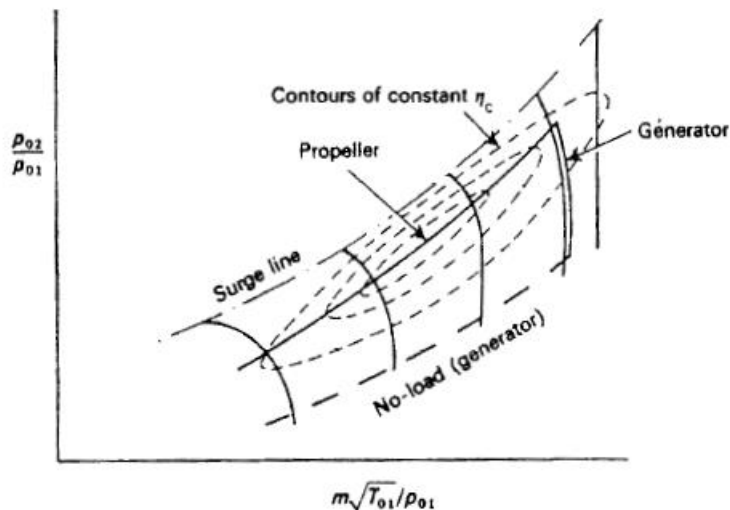
όπου η_m είναι η μηχανική απόδοση της μηχανικής σύζευξης συμπιεστή-στροβίλου και το \dot{m} δίνεται από $\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}} \frac{P_a}{\sqrt{T_a}}$ για δεδομένες συνθήκες περιβάλλοντος.

Τέλος είναι αναγκαίο να ελέγξουμε την πιστότητα της λύσης μέσω της χρήσης των καμπυλών του φορτίου για τη δεδομένη εφαρμογή. Για παράδειγμα αν η μηχανή εργαζόταν σε μια κλίση δοκιμών (test bed) συζευγμένη με ένα δυναμόμετρο, το φορτίο θα μπορούσε να επιλεγεί σε οποιοδήποτε σημείο των χαρακτηριστικών του συμπιεστή, αρκεί να είμαστε μέσα στα όρια θερμοκρασιών ασφάλειας. 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 στροφών του μειωτήρα, υπάρχει δεδομένη (και δεσμευτική) χαρακτηριστική καμπύλη του φορτίου συναρτήσει της ισχύος και των στροφών, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.8. 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 σε αυτές τις στροφές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο με δοκιμές, 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 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 λειτουργικής ισορροπίας όπως στο Σχ. 3.9.



Σχήμα 3.8: Χαρακτηριστική καμπύλη έλικας [1]

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 Σχ. 3.9 και κάθε σημείο της γραμμής παριστά διαφορετική θερμοκρασία εισόδου του στρόβιλου και ισχύ εξόδου. Επιπλέον και εδώ μπορεί να ευρεθεί μέσω δοκιμών το σημείο λειτουργίας του συμπιεστή που αντιστοιχεί σε μηδενική ισχύ εξόδου και η γραμμή λειτουργίας χωρίς φορτίο (no load) φαίνεται στο Σχ. 3.9.



Σχήμα 3.9: Γραμμές λειτουργίας ισορροπίας [1]

Οι υπολογισμοί που περιγράφηκαν παραπάνω βοηθούν στην εκτίμηση όλων των παραμέτρων που απαιτούνται για έναν πλήρη υπολογισμό της λειτουργικής απόδοσης σε

διάφορα σημεία εκτός σχεδιασμού. Με την T_{03} γνωστή και $T_{02} = \Delta T_{012} + T_{01}$ η αύξηση θερμοκρασίας λόγω καύσης είναι γνωστή και ο λόγος καυσίμου /αέρα (f) μπορεί να υπολογιστεί, 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.

3.4 Λειτουργία ισορροπίας αεριογόνου

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, η αεριογόνος προσφέρει την ίδια λειτουργική σκοπιμότητα για ένα ελεύθερο στρόβιλο ισχύος και για ένα προωστικό ακροφύσιο. Διατηρεί μια υψηλή παροχή υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης που εκτονούμενη παράγει είτε έργο άξονα είτε υψηλής ταχύτητας ρεύμα καυσαερίου. Έτσι πριν διερευνηθεί η λειτουργία καθενός από τους παραπάνω συνδυασμούς, είναι απαραίτητο να διερευνηθεί η αεριογόνος ξεχωριστά.

Η συμβατότητα στροφών και παροχής, όπως εκφράστηκε προηγουμένως μέσω των Εξ. (3.1) και (3.2), ισχύει και εδώ. Ταυτόχρονα όμως ο λόγος πιέσεων στον στρόβιλο είναι άγνωστος και πρέπει να υπολογιστεί εξισώνοντας το έργο του στρόβιλου και του συμπιεστή και υπολογίζοντας κατ' αρχάς τη θερμοκρασιακή πτώση στον στρόβιλο. Έτσι αντί για την Εξ. (3.5) έχουμε:

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

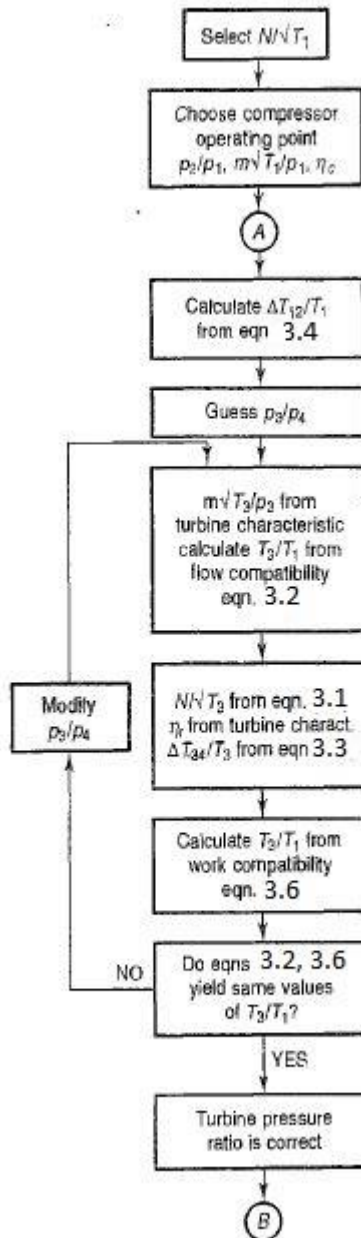
Ή αλλιώς:

$$\frac{\Delta T_{034}}{T_{03}} = \frac{\Delta T_{012}}{T_{01}} \frac{T_{01}}{T_{03}} \frac{c_{pa}}{c_{pg} \eta_m} \quad (3.6)$$

Οι Εξ. (3.1), (3.2) και (3.6) συνδέονται μέσω του λόγου θερμοκρασιών $\frac{T_{03}}{T_{01}}$ και είναι ανάγκη να υπολογισθεί μέσω δοκιμών η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο για τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας στη χαρακτηριστική του συμπιεστή. Η διαδικασία έχει ως ακολούθως:

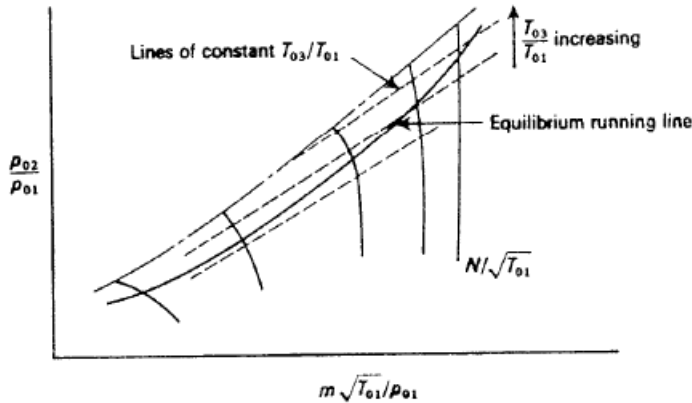
- επιλέγοντας ένα σημείο στη χαρακτηριστική του συμπιεστή προσδιορίζονται οι τιμές των $\frac{N}{T_{01}}, \frac{P_{02}}{P_{01}}, \frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}$ και η_c . Το $\frac{\Delta T_{012}}{T_{01}}$ μπορεί να υπολογισθεί από την Εξ. (3.4).
- Υποθέτοντας μια τιμή $\frac{P_{03}}{P_{04}}$, η τιμή του $\frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$ προσδιορίζεται από την χαρακτηριστική του στρόβιλου και έτσι υπολογίζεται ο λόγος $\frac{T_{03}}{T_{01}}$ από την εξίσωση συμβατότητας της ροής, Εξ. (3.2).
- Από την τιμή του $\frac{T_{03}}{T_{01}}$ υπολογίζεται το $\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$ από την Εξ. (3.1).

- Με γνωστά τα $\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$ και $\frac{P_{03}}{P_{04}}$ προσδιορίζεται η απόδοση του στροβίλου από τις χαρακτηριστικές καμπύλες.
- Η αδιάστατη θερμοκρασιακή πτώση $\frac{\Delta T_{034}}{T_{03}}$ μπορεί να υπολογισθεί από την Εξ. (3.3) και να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την Εξ. (3.6) για τον υπολογισμό μιας άλλης τιμής του λόγου $\frac{T_{03}}{T_{01}}$.
- Η νέα τιμή του λόγου $\frac{T_{03}}{T_{01}}$ δεν θα συμφωνεί, εν γένει, με την προηγούμενη που υπολογίσθηκε από την Εξ. (3.2), υποδηλώνοντας ότι η υποτεθείσα τιμή του λόγου $\frac{P_{03}}{P_{04}}$ δεν είναι σωστή για ένα σημείο ισορροπίας.
- Μια καινούργια τιμή του λόγου $\frac{P_{03}}{P_{04}}$ πρέπει να υποτεθεί και οι παραπάνω υπολογισμοί να επαναληφθούν μέχρι οι τιμές του λόγου $\frac{T_{03}}{T_{01}}$ που υπολογίζονται από τις Εξ. (3.2) και (3.6) συμπέσουν.
- Σύγκλιση των δυο τιμών σημαίνει ότι το σημείο λειτουργίας του στροβίλου είναι συμβατό με το αρχικά επιλεγμένο σημείο λειτουργίας του συμπιεστή όταν η παροχή καυσίμου είναι τέτοια ώστε να παράγει την, κατόπιν επαναλήψεων, υπολογιζόμενη τιμή του λόγου $\frac{T_{03}}{T_{01}}$. Η όλη διαδικασία συνοψίζεται στο Σχ. 3.10.



Σχήμα 3.10: Επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού αεριογόνου [1].

Φυσικά θα ήταν δυνατό να επαναληφθεί η συνολική διαδικασία για ένα μεγάλο αριθμό σημείων επί της χαρακτηριστικής του συμπιεστή και τα αποτελέσματα να εκφραστούν συνδέοντας σημεία με το σταθερό $\frac{T_{03}}{T_{01}}$ επί των χαρακτηριστικών του συμπιεστή όπως φαίνεται στο Σχ. 3.11. Αυτό όμως στην πράξη δεν είναι αναγκαίο διότι η επιπλέον απαίτηση για ροϊκή συμβατότητα με την συνιστώσα κατάντι της αεριογόνου, είτε αυτή είναι ελεύθερος στρόβιλος είτε προωστικό ακροφύσιο, περιορίζει σημαντικά τη ζώνη λειτουργίας επί της χαρακτηριστικής του συμπιεστή. Στα επόμενα θα περιγραφεί ο υπολογισμός της πλήρους μονάδας.



Σχήμα 3.11: Γραμμή λειτουργίας ισορροπίας για στρόβιλο ισχύος [1]

3.5 Λειτουργία αεριογόνου συζευγμένης με στρόβιλο ισχύος

3.5.1 Σύζευξη της αεριογόνου με τον στρόβιλο ισχύος

Η σύζευξη της αεριογόνου με τον στρόβιλο ισχύος προέρχεται από την απαίτηση συμβατότητας των μεταξύ τους παροχών σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ο διαθέσιμος λόγος πιέσεων για τον στρόβιλο ισχύος προσδιορίζεται από τους λόγους πιέσεων του συμπιεστή και του στροβίλου της αεριογόνου. Η χαρακτηριστική του στροβίλου ισχύος (power turbine ή free turbine) θα είναι παρόμοια με αυτή του Σχ. 3.6, αλλά οι παράμετροι θα είναι τώρα οι $\frac{m \sqrt{T_{04}}}{P_{04}}, \frac{P_{04}}{P_a}, \frac{N_p}{\sqrt{T_{04}}}, \eta_{tp}$.

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

$$\frac{m \sqrt{T_{04}}}{P_{04}} = \frac{m \sqrt{T_{03}}}{P_{03}} \frac{P_{03}}{P_{04}} \sqrt{\frac{T_{04}}{T_{03}}} \quad (3.7)$$

όπου:

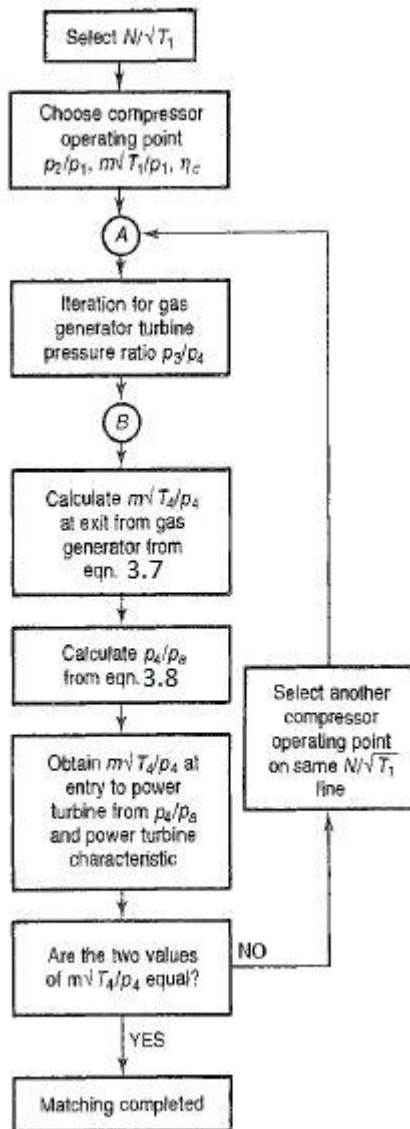
$$\frac{\Delta T_{034}}{T_{03}} = \eta_t \left[1 - \left(\frac{P_{04}}{P_{03}} \right)^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} \right] = 1 - \frac{T_{04}}{T_{03}}$$

Ο αντίστοιχος λόγος πιέσεων στον στρόβιλο ισχύος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{P_{04}}{P_a} = \frac{P_{02}}{P_{01}} \frac{P_{03}}{P_{02}} \frac{P_{04}}{P_{03}} \quad (3.8)$$

Έχοντας υπολογίσει τον λόγο πιέσεων στον στρόβιλο ισχύος η τιμή του $\frac{m \sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$ μπορεί να βρεθεί από τις χαρακτηριστικές καμπύλες του στροβίλου ισχύος και να συγκριθεί με την

τιμή που βρέθηκε από την Εξ. (3.7). Εάν δεν επιτευχθεί συμφωνία των τιμών είναι αναγκαίο να επιλεγεί ένα άλλο σημείο στην ίδια γραμμή σταθερών στροφών της χαρακτηριστικής του συμπιεστή και να επαναληφθεί η όλη διαδικασία μέχρι να ικανοποιηθεί η απαίτηση συμβατότητας παροχών μεταξύ των δυο στροβίλων. Η συνολική διαδικασία για την σύζευξη του ελεύθερου στροβίλου ισχύος δίνεται στο διάγραμμα ροής του Σχ. 3.12.



Σχήμα 3.12: Επαναληπτική διαδικασία αεριογόνου συζευγμένη με στρόβιλο ισχύος [1].

Για κάθε γραμμή σταθερών στροφών $\frac{N}{\sqrt{T_{01}}}$ επί της χαρακτηριστικής του συμπιεστή θα υπάρχει μόνο ένα σημείο που θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις συμβατότητας για το έργο της αεριογόνου και για την παροχή των δυο στροβίλων. Εάν τα σημεία που προκύπτουν σε

διαφορετικές γραμμές σταθερών στροφών συνδεθούν, δημιουργούν την γραμμή ισοζυγιακής λειτουργίας όπως φαίνεται στο Σχ. 3.11.

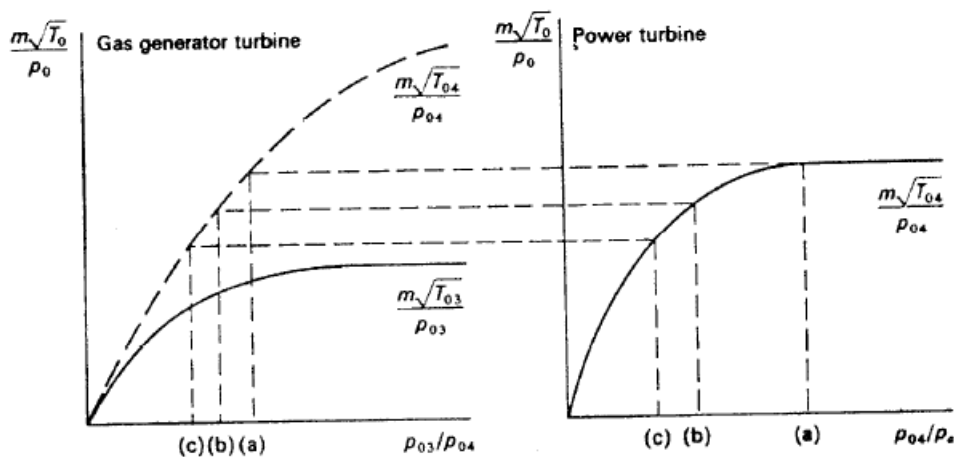
Η γραμμή λειτουργίας του ελεύθερου στροβίλου ισχύος είναι ανεξάρτητη του φορτίου και προσδιορίζεται από την ικανότητα απορρόφησης έργου από τον στρόβιλο ισχύος σε αντίθεση με την μονοαξονική μονάδα (Σχ. 3.9).

3.5.2 Σύζευξη δύο στροβίλων

Η μελέτη της συμπεριφοράς δύο στροβίλων εν σειρά είναι χρήσιμη για τη μελέτη πιο πολύπλοκων διατάξεων και για τη σύζευξη άλλων τμημάτων κατάντι της αεριογόνου.

Είδαμε προηγουμένως μέσω της Εξ. (3.7), ότι η τιμή $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$ στην έξοδο του στροβίλου της αεριογόνου μπορεί να ληφθεί για κάθε σημείο λειτουργίας της και ότι είναι συνάρτηση των $\frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}, \frac{P_{03}}{P_{04}}, \eta_t$. Η τιμή του η_t μπορεί να ληφθεί από τη χαρακτηριστική του πρώτου στροβίλου, αφού έχει υπολογισθεί το $\frac{N}{\sqrt{T_{03}}}$ για το δεδομένο σημείο λειτουργίας στη διαδικασία υπολογισμού της αεριογόνου. Στην πράξη όμως η μεταβολή του η_t με δεδομένο λόγο πιέσεων είναι μικρή (Σχ. 3.6) και ιδιαίτερα στο περιορισμένο εύρος λειτουργίας του στροβίλου της αεριογόνου. Επιπλέον και αυτή η μεταβολή έχει μικρή επίδραση επί του $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$ επειδή η μεταβολή του $\sqrt{\frac{T_{03}}{T_{04}}}$ είναι μικρή.

Πολλές φορές είναι επαρκές να λαμβάνεται μια μέση τιμή για το η_t σε κάθε λόγο πιέσεων έτσι ώστε το $\frac{m\sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$ να γίνεται συνάρτηση μόνο των $\frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}, \frac{P_{03}}{P_{04}}$. Εάν γίνει αυτό, μία μόνο καμπύλη που αναπαριστά τη χαρακτηριστική της «αδιάστατης» παροχής εξόδου του στροβίλου είναι ανάγκη να σχεδιαστεί μέσω της εφαρμογής της Εξ. (3.7) για διάφορα σημεία επί της χαρακτηριστικής καμπύλης της παροχής εισόδου για τον ίδιο στρόβιλο. Το αποτέλεσμα φαίνεται με τη διακεκομμένη γραμμή του Σχ. 3.13.

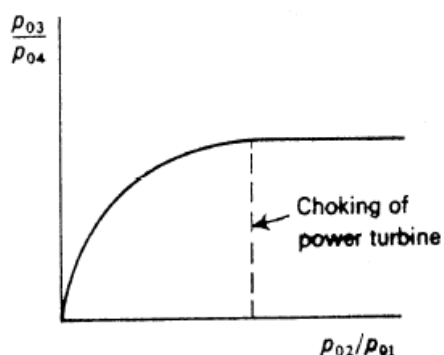


Σχήμα 3.13: Λειτουργία στροβίλων εν σειρά [1]

Το αποτέλεσμα της εν σειρά λειτουργίας δυο στροβίλων φαίνεται στο Σχ. 3.13. Καθώς ο στρόβιλος ισχύος εργάζεται με στραγγαλισμένη ροή (choked), ο στρόβιλος της αεριογόνου εργάζεται σε σταθερό «αδιάστατο» σημείο, δηλαδή στον λόγο πιέσεων που προσδιορίζεται από το σημείο (α) στο Σχ. 3.5. Όταν ο στρόβιλος ισχύος λειτουργεί χωρίς στραγγαλισμό, η αεριογόνος και πάλι περιορίζεται να λειτουργεί υπό καθορισμένο λόγο πιέσεων για κάθε λόγο πιέσεων του στροβίλου ισχύος, σημεία (b) και (c) στο Σχ. 3.13. Μια περαιτέρω συνέπεια του συσχετισμού αυτών των λόγων πιέσεων μεταξύ των στροβίλων είναι ότι μπορούμε να σχεδιάσουμε τον λόγο $\frac{P_{03}}{P_{04}}$ συναρτήσει του λόγου πιέσεων του συμπιεστή $\frac{P_{02}}{P_{01}}$ από τη σχέση:

$$\frac{P_{03}}{P_{04}} = \frac{P_{03}}{P_{02}} \frac{P_{02}}{P_{01}} \frac{P_a}{P_{04}} \quad (3.9)$$

Ο λόγος $\frac{P_{03}}{P_{02}}$ προσδιορίζεται από τις απώλειες πίεσης στο θάλαμο καύσης και το $\frac{P_{04}}{P_a}$ λαμβάνεται από το Σχ. 3.13 για κάθε τιμή του λόγου $\frac{P_{03}}{P_{04}}$. Μια τέτοια καμπύλη φαίνεται στο Σχ. 3.14. Από εδώ για κάθε τιμή του λόγου πιέσεων του συμπιεστή, ο λόγος πιέσεων του στροβίλου της αεριογόνου μπορεί να προσδιοριστεί. Έτσι οι τιμές των $\frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$ και $\frac{\Delta T_{034}}{T_{03}}$ που απαιτούνται για χρήση στις Εξ. (3.2) και (3.6) καθορίζονται απευθείας. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η επαναληπτική διαδικασία για τον καθορισμό του λόγου πιέσεων του στροβίλου της αεριογόνου και για κάθε γραμμή σταθερών στροφών μόνο μία επανάληψη είναι αναγκαία για τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας ισορροπίας.



Σχήμα 3.14: Λειτουργία στροβίλου ισχύος υπό στραγγαλισμό της ροής [1]

3.5.3 Μεταβολή της ισχύος, της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της ροπής συναρτήσει των στροφών του στροβίλου ισχύος

Η ισχύς του στροβίλου ισχύος είναι:

$$W_{GT} = \eta_m m c_p \Delta T_{045} \quad (3.10)$$

όπου:

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

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

$$\frac{\Delta T_{034}}{T_{03}} = \eta_t \left[1 - \left(\frac{P_{04}}{P_{03}} \right)^{\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}} \right] = 1 - \frac{T_{04}}{T_{03}} \quad (3.11)$$

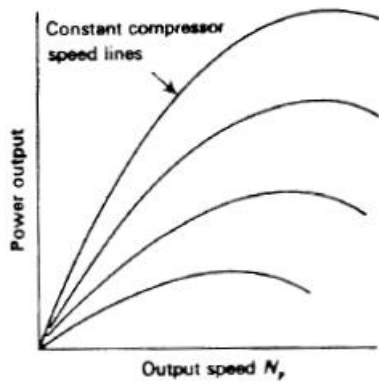
Η παροχή λαμβάνεται από το $\frac{m \sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$ για υποτεθείσες τιμές των P_a και T_a .

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

Υποθέτοντας ότι η μεταβολή του $\frac{m \sqrt{T_{04}}}{P_{04}}$ λόγω μεταβολής του η_t είναι αμελητέα, τότε:

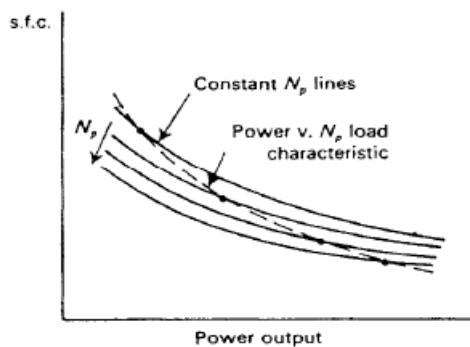
$$\frac{m \sqrt{T_{04}}}{P_{04}} = f \left(\frac{m \sqrt{T_{03}}}{P_{03}}, \frac{P_{03}}{P_{04}} \right)$$

Η κύρια άγνωστη παράμετρος είναι η απόδοση του στροβίλου ισχύος η_{tp} . Μπορεί να υπολογισθεί από τη χαρακτηριστική του στροβίλου ισχύος, αλλά εξαρτάται όχι μόνο από τον λόγο $\frac{P_{04}}{P_a}$ αλλά και από το $\frac{N_p}{\sqrt{T_{04}}}$. Στρόβιλοι ισχύος χρησιμοποιούνται για να κινούν διάφορα φορτία όπως π.χ. αντλίες, έλικες, ηλεκτρογεννήτριες, κάθε ένα με τη δική του χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-στροφών. Για αυτό τον λόγο συνηθίζεται να υπολογίζεται η ισχύς εξόδου για ένα εύρος στροφών του στροβίλου για κάθε σημείο λειτουργίας ισορροπίας (δηλαδή για κάθε αριθμό στροφών του συμπιεστή). Τα αποτελέσματα μπορούν να σχεδιαστούν όπως στο Σχ. 3.15.



Σχήμα 3.15: Διάγραμμα λειτουργίας ελεύθερου στροβίλου: ισχύς συναρτήσει στροφών [1]

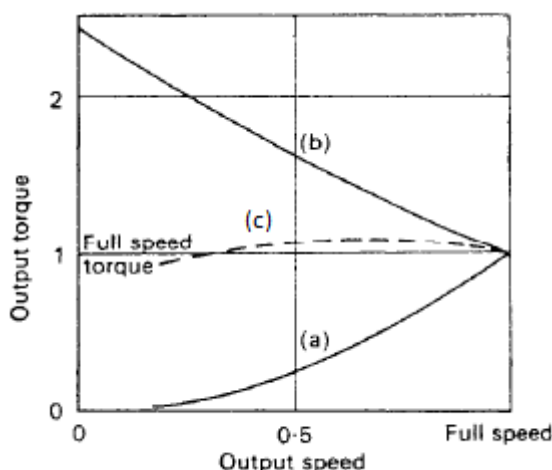
Η κατανάλωση καυσίμου μπορεί επίσης να σχεδιασθεί για κάθε σημείο λειτουργίας ισορροπίας με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε προηγουμένως για τη μονοαξονική μονάδα. Εφόσον εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους της αεριογόνου, θα υπάρχει μία μόνο τιμή για κάθε αριθμό στροφών του συμπιεστή. Όταν όμως η κατανάλωση δίνεται συναρτήσει της ισχύος, τότε είναι φανερό ότι θα είναι συνάρτηση των στροφών και του συμπιεστή και του στροβίλου ισχύος όπως φαίνεται στο Σχ. 3.16.



Σχήμα 3.16: Διάγραμμα λειτουργίας ελεύθερου στροβίλου: κατανάλωση συναρτήσει ισχύος [1]

Στην περίπτωση της μονάδας αεριοστροβίλου απλού άξονα, η σχέση ροπή-στροφές για δεδομένη ισχύ είναι επίσης σημαντική μια και καθορίζει την καταλληλότητα της μονάδας για διαφορετικές εφαρμογές. Πχ. υψηλή ροπή εκκίνησης είναι ιδιαίτερα σημαντική στις εφαρμογές έλξης. Ο συμπιεστής της μονοαξονικής μηχανής λειτουργεί σε στροφές που περιορίζονται σε κάποιο πολλαπλάσιο των στροφών του φορτίου, που καθορίζεται από τη σχέση μετάδοσης του μειωτήρα και συνεπώς ελάττωση των στροφών

του φορτίου σημαίνει ελάττωση των στροφών του συμπιεστή. Αυτό σημαίνει ελάττωση της παροχής και συνεπώς της ροπής εξόδου, όπως φαίνεται από την καμπύλη (α) του Σχ. 3.17. Αυτός ο τύπος αεριοστροβίλου είναι κατάλληλος λοιπόν για εφαρμογές έλξης. Η πιο επίπεδη καμπύλη της ροπής μιας εμβολοφόρου μηχανής εσωτερικής καύσης παρατίθεται επίσης στο Σχ. 3.17 για σύγκριση.



Σχήμα 3.17: Διάγραμμα λειτουργίας αεριοστροβίλου απλού άξονα (α), αεριοστροβίλου ισχύος (b) και εμβολοφόρου μηχανής εσωτερικής καύσης (c): ροπή συναρτήσει στροφών [1]

Αντίθετα, η μονάδα με στρόβιλο ισχύος έχει χαρακτηριστικά ροπής ακόμη καλύτερα και από την εμβολοφόρο μηχανή εσωτερικής καύσης, καμπύλη (b) στο Σχ. 3.17. Αυτό συμβαίνει επειδή η ισχύς εξόδου και η παροχή του συμπιεστή εδώ είναι ανεξάρτητες των στροφών του φορτίου και του στροβίλου ισχύος αντίστοιχα. Βέβαια και ένας άλλος παράγοντας που υπεισέρχεται εδώ είναι και η απόδοση σε χαμηλές στροφές που είναι πράγματι χαμηλή, ενώ η κατανάλωση είναι ψηλή.

Σε αεριοστρόβιλο απλού άξονα, ο συμπιεστής και ο στρόβιλος έχουν την ίδια ταχύτητα που έχει σταθερή σχέση με την ταχύτητα του φορτίου. Εάν η ταχύτητα του φορτίου μειωθεί, θα μειωθεί ανάλογα και η ταχύτητα του συμπιεστή. Συνεπώς, η παροχή μάζας και η ισχύς θα μειωθούν. Η ισχύς και επομένως η ροπή, μειώνεται με ταχύτερο ρυθμό από ότι η ταχύτητα περιστροφής.

Η ταχύτητα ενός χωριστού στροβίλου ισχύος (συνδεδεμένου με το φορτίο) μπορεί να μεταβληθεί ανεξάρτητα από την ταχύτητα της αεριογόνου. Εάν ο συμπιεστής στρέφεται με σταθερή ταχύτητα, η αεριογόνος αναπτύσσει σταθερή ισχύ αερίου. Εάν η ταχύτητα του φορτίου (και επομένως του στροβίλου ισχύος) μειωθεί, δεν επηρεάζεται η ταχύτητα του συμπιεστή, οπότε η ισχύς του αερίου που προσφέρεται από την αεριογόνου είναι σταθερή (εφ' όσον η παροχή καυσίμου είναι σταθερή) και κατά συνέπεια η καθαρή ισχύς της

μονάδας παραμένει πρακτικά σταθερή. Με σταθερή ισχύ, μείωση της ταχύτητας περιστροφής έχει ως συνέπεια την αύξηση της ροπής (Σχ. 3.17).

Η χαρακτηριστική ισχύος-ταχύτητας ενός στροβίλου ισχύος είναι ευνοϊκή για φορτία που δεν έχουν σταθερή ταχύτητα, καθώς η ισχύς μπορεί να διατηρηθεί σταθερή σε μια πλατιά περιοχή ταχυτήτων. Είναι δυνατό να αναπτυχθεί υψηλή ισχύς, ακόμη και για χαμηλές ταχύτητες. Εάν π.χ. ο στρόβιλος ισχύος κινεί έλικα πλοίου, μπορεί να ακολουθεί τη χαρακτηριστική της έλικας και σε οποιοδήποτε σημείο υπάρχει αρκετό περιθώριο ισχύος για επιταχύνσεις. Επίσης, υπάρχει περιθώριο για αύξηση της αντίστασης του σκάφους π.χ. εξαιτίας ρύπανσης, οπότε η χαρακτηριστική της έλικας μετατοπίζεται προς τα πάνω.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

4.1 Εισαγωγικά

Ο βαθμός απόδοσης και επομένως και η κατανάλωση καυσίμου ενός αεροστροβίλου επηρεάζεται έντονα από τη λειτουργία του σε μερικό φορτίο καθώς και από τις συνθήκες περιβάλλοντος καθώς αυτές αλλάζουν τοπικά και χρονικά. Επιπλέον οι συνθήκες περιβάλλοντος επηρεάζουν και τη μέγιστη δυνατή ισχύ του αεροστροβίλου. Είναι λοιπόν ενδιαφέρον κι χρήσιμο να προβλέψουμε την επίδοση και απόδοση ενός αεροστροβίλου σε συνθήκες λειτουργίας εκτός του σημείου σχεδιασμού.

Η ανάλυση ενός κύκλου μελετά τις θερμοδυναμικές μεταβολές του εργαζόμενου μέσου (αέρας και παράγωγα καύσης τις περισσότερες φορές) καθώς αυτό κινείται/ρέει στη μηχανή. Η ανάλυση αυτή μπορεί να χωριστεί σε δυο είδη:

1. Την παραμετρική ανάλυση του κύκλου στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας (σημείο σχεδιασμού, design point, DP)
2. Την ανάλυση συμπεριφοράς σε σημεία εκτός του σημείου σχεδιασμού (off-design, OD)

Επιρροή των συνθηκών περιβάλλοντος

Οι συνθήκες εισόδου του αέρα στον συμπιεστή μιας μονάδας αεροστροβίλου έχουν αισθητή επίδραση στην ισχύ αλλά και στον βαθμό απόδοσης της μονάδας. Ιδιαίτερα η θερμοκρασία, έχει έντονη επίδραση. Η επίδραση της πίεσης του περιβάλλοντος δεν θεωρείται κρίσιμος παράγοντας για ναυτικές εφαρμογές, λόγω του ότι στην επιφάνεια της θάλασσας η πίεση δεν μεταβάλλεται σημαντικά από τόπο σε τόπο, σε αντίθεση με τη θερμοκρασία που έχει εύρος διακύμανσης δεκάδων βαθμών.

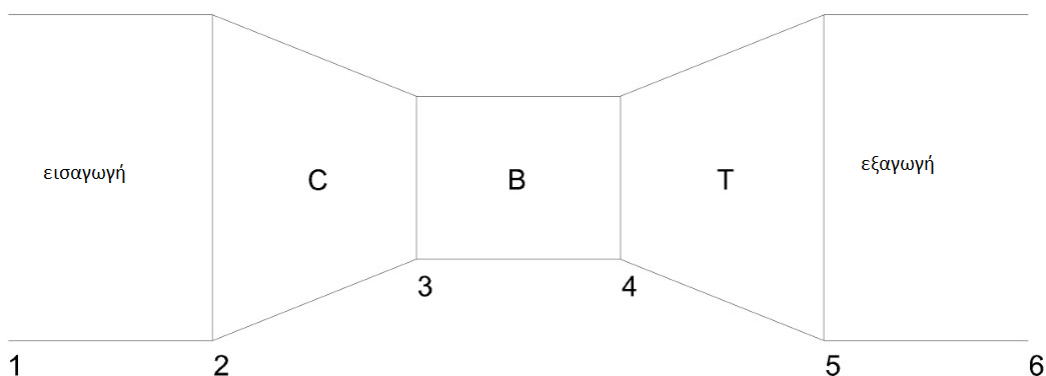
Συμπεριφορά σε φορτία μικρότερα του ονομαστικού

Η καθαρή ισχύς μιας μονάδας αεροστροβίλου μεταβάλλεται με την ταχύτητα περιστροφής. Η απόδοση ενός αεροστροβίλου μεταβάλλεται σε ένα εύρος λειτουργικών συνθηκών, δηλαδή για διαφορετικό αριθμό στροφών, λόγω πίεσης και παροχής. Είναι χρήσιμη η μελέτη των αεροστροβίλων υπό μερικό φορτίο, ιδιαίτερα για ναυτικές εφαρμογές (πρόωση πλοίων), όπου υπάρχουν απαιτήσεις για μικρή ή μεσαία ταχύτητα για το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου κίνησης και για μεγάλη ταχύτητα για σχετικά μικρό ποσοστό του χρόνου.

4.2 Ανάλυση του κύκλου στο σημείο σχεδιασμού του

Ο κύριος σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι ο συσχετισμός της συμπεριφοράς μιας μηχανής με τις σχεδιαστικές επιλογές (πχ. λόγος πίεσης), με τους σχεδιαστικούς περιορισμούς (πχ. μέγιστη θερμοκρασία, βαθμοί απόδοσης του κάθε στοιχείου κλπ) και με τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες (πχ. ατμοσφαιρική θερμοκρασία, πίεση κλπ).

Στην παρούσα ανάλυση μελετήθηκε μονοαξονικός αεριοστροβίλος. Κάθε είσοδος και έξοδος του κάθε στοιχείου, δηλαδή κάθε σημείο του κύκλου χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.1. Εφαρμόζουμε τις θερμοδυναμικές εξισώσεις για κάθε στοιχείο της μονάδας κι έτσι υπολογίζεται η θερμοδυναμική κατάσταση για κάθε σημείο του κύκλου (πίεση, θερμοκρασία, παροχή μάζας). Τέλος, υπολογίζουμε τη συμπεριφορά της μονάδας, δηλαδή το έργο του συμπιεστή, του στροβίλου, το χρήσιμο έργο, την παροχή καυσίμου και την ειδική κατανάλωση του καυσίμου και τον ολικό βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 4.1: Σχηματική απεικόνιση αεριοστροβίλου

Ένας καλός τρόπος να παρουσιαστεί η συμπεριφορά της μονάδας, είναι το διάγραμμα της ειδικής κατανάλωσης με την ειδική ισχύ, για διάφορες τιμές του λόγου πίεσης του συμπιεστή και της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου. Κάθε σημείο αυτών των διαγραμμάτων αντιπροσωπεύει /αναπαριστά ένα διαφορετικό κύκλο της μηχανής/ μια διαφορετική μηχανή. Αυτά τα διαγράμματα είναι πολύ χρήσιμα διότι:

- Παρέχουν μια ένδειξη του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων του κύκλου για δεδομένο τύπο μηχανής
- Συγκρίνουν την συμπεριφορά /απόδοση διαφορετικών μηχανών.

Για να προχωρήσουμε στους υπολογισμούς στο σημείο σχεδιασμού της μηχανής, οι παρακάτω παράμετροι πρέπει να είναι γνωστές ή να καθοριστούν.

- Ατμοσφαιρικές συνθήκες (T_a , P_a)
- Παροχή μάζας αέρα (\dot{m}_a)
- Βαθμοί απόδοσης των επιμέρους στοιχείων

- Απώλειες πίεσης (ΔP_{loss})
- Ειδικές θερμοχωρητικότητες
- Θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου
- Μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου
- Πίεση εξαγωγής.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ

Ατμοσφαιρικές Συνθήκες

$$P_a = 101.3 \text{ kPa}$$

$$T_a = 288 \text{ K}$$

Δεδομένα Εργαζόμενου Ρευστού

Ιδιότητες του αέρα

$$c_{pa} = 1,005 \text{ KJ/Kg K}, \gamma_a = 1,40$$

Ιδιότητες του καυσαερίου

$$c_{pg} = 1,150 \text{ KJ/Kg K}, \gamma_g = 1,33$$

Δεδομένα Εισόδου

Για να μελετηθεί η συμπεριφορά του αεριστροβίλου ανεξάρτητα από το μέγεθος του, θεωρούμε: $\dot{m} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Θεωρούμε τις απώλειες θερμοκρασίας αμελητέες.

Για τις απώλειες πίεσης, θεωρούμε 1% πτώση πίεσης στον αγωγό εισαγωγής, $DP_{\text{inloss}} = 0,01$

Δεδομένα Συμπιεστή

Ο λόγος πίεσης ενός συμπιεστή κυμαίνεται μεταξύ 5 και 30. Εδώ μελετήθηκαν συμπιεστές με λόγο πίεσης 10, 15 και 20.

Για τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή θεωρούμε ότι κυμαίνεται μεταξύ 0,77 και 0,91. Στην παρούσα ανάλυση επιλέγουμε: $\eta_c = 0,85$.

Η τιμή του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης ενός συμπιεστή μειώνεται όταν ο λόγος πίεσης του συμπιεστή (r_c) αυξάνεται, όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση [4]:

$$\eta_{\infty c} = 0,91 - \frac{(r_c - 1)}{300}$$

Μεταξύ πολυτροπικού και ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή ισχύει:

$$\eta_C = \frac{r_C^k - 1}{r_C^{k/\eta_{\infty C}} - 1}$$

Οπότε τελικά προκύπτει ότι ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή εξαρτάται από τον λόγο πίεσης του συμπιεστή όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta_C = \frac{r_C^k - 1}{r_C^{\frac{300k}{274 - r_C} - 1}} \quad (4.1)$$

Δεδομένα θαλάμου καύσης

Ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στην περιοχή $\eta_B = 0,985 \div 0,995$. Στην παρούσα ανάλυση επιλέγουμε $\eta_B = 0,99$.

Οι απώλειες πίεσης του θαλάμου καύσης κυμαίνονται από 3 έως 5 τοις εκατό, $DP_{\text{closs}} = 3 \div 5\%$. Επιλέγεται η τιμή $DP_{\text{closs}} = 0,05$.

Για καύσιμο επιλέγουμε Ρώσικο φυσικό αέριο (*Russian natural gas*) με θερμογόνο ικανότητα $H_u = 48,6$ MJ/kg.

Δεδομένα στροβίλου

Η θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου, δηλαδή η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου κυμαίνεται μεταξύ 800K και 1700K.

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου θεωρούμε ότι κυμαίνεται μεταξύ 0,83 και 0,93. Στην παρούσα ανάλυση επιλέγουμε: $\eta_t = 0,9$.

Η τιμή του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης ενός στροβίλου μειώνεται όταν ο λόγος πίεσης του στροβίλου (r_t) αυξάνεται, σύμφωνα με την σχέση:

$$\eta_{\infty t} = 0,90 - \frac{(r_T - 1)}{250}$$

Μεταξύ πολυτροπικού και ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του στροβίλου ισχύει:

$$\eta_t = \frac{1 - r_T^{-k\eta_{\infty t}}}{1 - r_T^{-k}}$$

Οπότε τελικά προκύπτει ότι ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου εξαρτάται από τον λόγο πίεσης του στροβίλου όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta_t = \frac{1 - r_T^{-k \left[0,90 - \frac{(r_T - 1)}{250} \right]}}{1 - r_T^{-k}} \quad (4.2)$$

Δεδομένα εξαγωγής

Θεωρούμε αμελητέες τις απώλειες θερμοκρασίας, $DT_{exloss}=0$.

Για τις απώλειες πίεσης θεωρούμε $DP_{ex}=2\div 3\%$ ή $P_{0ex}=1,003Pa$.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Οι αριθμητικοί δείκτες αντιστοιχούν στα σημεία του Σχ. 4.1.

1-2 Αγωγός εισαγωγής αέρα

$$P_{01} = P_a$$

$$P_{02} = P_{01} (1 - DP_{inloss})$$

$$T_{01} = T_a$$

$$T_{02} = T_{01}$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

2-3 Συμπιεστής

Ο λόγος πίεσης του συμπιεστή δίνεται από την σχέση:

$$r_c = \frac{P_{03}}{P_{02}}$$

Και για την θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή:

$$T_{03} = T_{02} \left[1 + \frac{r_c^{k_a} - 1}{\eta_c} \right]$$

όπου k_a η σταθερά ισεντροπικής μεταβολής του αέρα.

Επίσης για την παροχή ισχύει: $\dot{m}_3 = \dot{m}$

3-4 Θάλαμος καύσης

$$P_{04} = P_{03} (1 - DP_{cclloss})$$

$$T_{04} = TET$$

Ο λόγος καυσίμου αέρα δίνεται από τη σχέση:

$$f = \frac{c_{pg}(T_{04} - T_0) - c_{pa}(T_{03} - T_0)}{H_u \eta_B - c_{pg}(T_{04} - T_0)}$$

και

$$\dot{m}_f = f \dot{m}$$

Η παροχή μάζας στην έξοδο του θαλάμου καύσης είναι: $\dot{m}_4 = \dot{m}_3 + \dot{m}_f$

4-5 Στροβίλος

Ο λόγος πίεσης του στροβίλου δίνεται από την σχέση:

$$r_T = \frac{P_{04}}{P_{05}}$$

Και για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας στην έξοδο του στροβίλου:

$$T_{05} = T_{04} [1 - \eta_t (1 - r_T^{-k_g})]$$

όπου k_g η σταθερά ισεντροπικής μεταβολής του καυσαερίου.

Επίσης για την παροχή ισχύει: $\dot{m}_5 = \dot{m}_4$

5-6 Αγωγός εξαγωγής καυσαερίου

$$P_{06} = 1,003 P_a$$

$$T_{06} = T_{05} (1 - DT_{exhloss})$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_5$$

Με βάση τα παραπάνω και χρήση των Εξ. (2.21)-(2.29) προκύπτουν τα αποτελέσματα για την ανάλυση του κύκλου στο σημείο σχεδιασμού.

4.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης του κύκλου στο σημείο σχεδιασμού του

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το σημείο σχεδιασμού

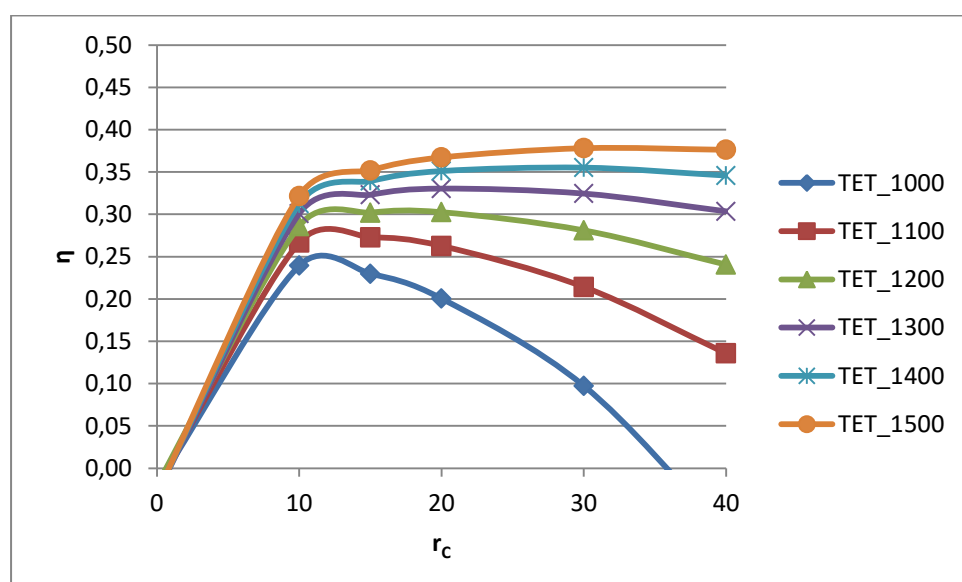
TET (K)	r_c	w_i (MJ/kg)	b_e (kg/MJ)	η
1000	10	0,1314	0,0860	0,2393
	15	0,1314	0,0895	0,2298
	20	0,0809	0,1026	0,2005
	30	0,0296	0,2113	0,0974
	40	-0,0171	-0,2729	-0,0754
1100	10	0,1774	0,0772	0,2666
	15	0,1593	0,0754	0,2728
	20	0,1365	0,0784	0,2626
	30	0,0901	0,0960	0,2142
	40	0,0465	0,1516	0,1357
1200	10	0,2236	0,0719	0,2861
	15	0,2113	0,0681	0,3019
	20	0,1924	0,0680	0,3025
	30	0,1508	0,0732	0,2810
	40	0,1103	0,0855	0,2405
1300	10	0,2700	0,0684	0,3008
	15	0,2636	0,0637	0,3231
	20	0,2485	0,0623	0,3304
	30	0,2118	0,0634	0,3244
	40	0,1745	0,0678	0,3035
1400	10	0,3166	0,0659	0,3123
	15	0,3162	0,0607	0,3392
	20	0,3049	0,0586	0,3511
	30	0,2731	0,0579	0,3551
	40	0,2389	0,0595	0,3458
1500	10	0,3635	0,0640	0,3217
	15	0,3690	0,0585	0,3519
	20	0,3615	0,0560	0,3672
	30	0,3346	0,0544	0,3781
	40	0,3037	0,0547	0,3762

Για κάθε μέγιστη θερμοκρασία (TET), ο βαθμός απόδοσης έχει μια μέγιστη τιμή σε ένα συγκεκριμένο λόγο πίεσης. Καθώς ο λόγος πίεσης του συμπιεστή αυξάνεται, υπάρχει μια μείωση στην παροχή καυσίμου ώστε να παραμένει σταθερή η μέγιστη θερμοκρασία, αυτό έχει ως αποτέλεσμα αρχικά την αύξηση του βαθμού απόδοσης. Όμως υπάρχει μια

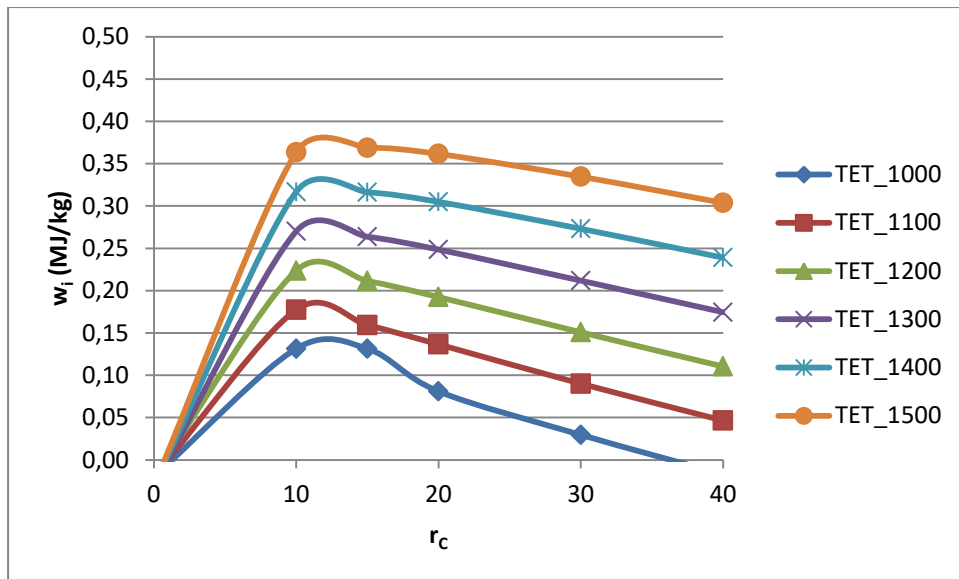
μείωση της απόδοσης σε υψηλούς λόγους πίεσης λόγω των αυξημένων απωλειών του συμπιεστή.

Όπως είναι γνωστό και φαίνεται στο Διάγραμμα 4.1, ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται όταν αυξάνεται η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου. Παρατηρούμε ότι σε υψηλές μέγιστες θερμοκρασίες το "κέρδος" του βαθμού απόδοσης δεν είναι τόσο μεγάλο.

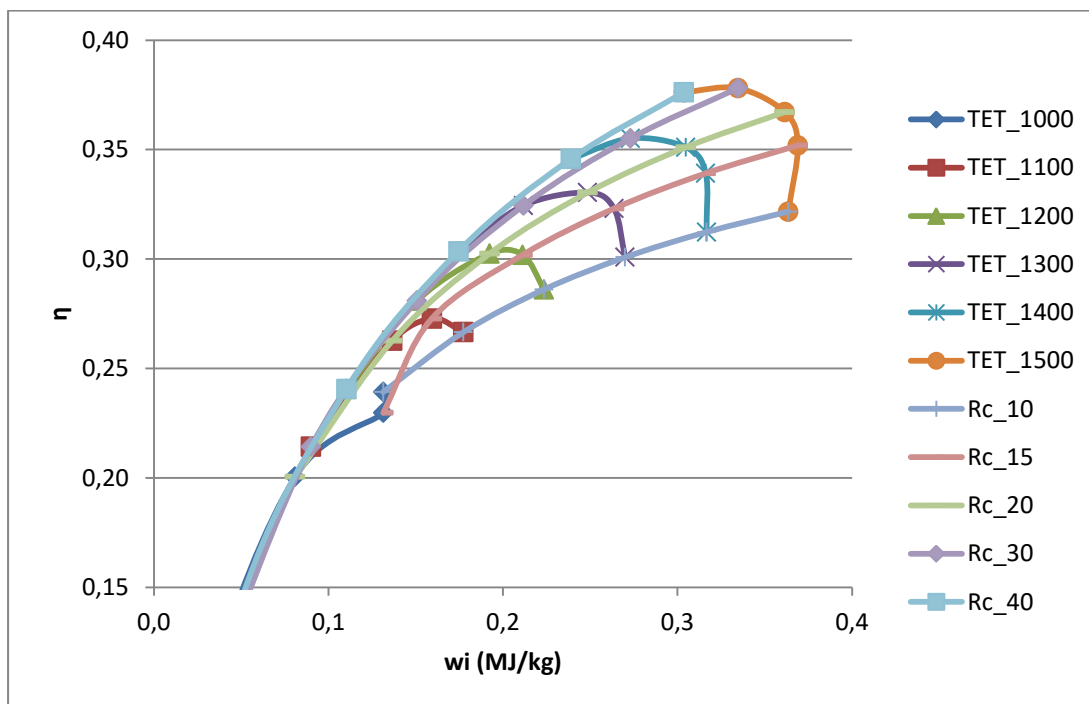
Η επίδραση του λόγου πίεσης και της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου (TET) στον βαθμό απόδοσης και στην ειδική ισχύ απεικονίζεται στα αποτελέσματα και διαγράμματα, όπου φαίνεται και η ύπαρξη βέλτιστης τιμής του λόγου πίεσης, δηλαδή τιμής που μεγιστοποιεί τον βαθμό απόδοσης ή την ειδική ισχύ. Όπως δείχνουν τα Διαγράμματα 4.1 και 4.2 ο μέγιστος βαθμός απόδοσης παρουσιάζεται σε λόγο πίεσης μεγαλύτερο από ότι η μέγιστη ειδική ισχύς (για ίδια τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας, TET).



Διάγραμμα 4.1: Επίδραση του λόγου πίεσης και της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου στον βαθμό απόδοσης απλού κύκλου αεριοστροβίλου.



Διάγραμμα 4.2: Επίδραση του λόγου πίεσης και της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου στην ειδική ισχύ απλού κύκλου αεριοστροβίλου.



Διάγραμμα 4.3: Συνδυασμένη απεικόνιση της επίδρασης του λόγου πίεσης και της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου στον βαθμό απόδοσης και στην ειδική ισχύ απλού κύκλου αεριοστροβίλου.

Μια ποιοτική εξήγηση των Διαγραμμάτων 4.1, 4.2 και 4.3 είναι η ακόλουθη. Για σταθερή μέγιστη θερμοκρασία (TET), η ειδική ισχύς αυξάνεται με αύξηση του λόγου πίεσης

r , αλλά φθάνει σε κάποιο μέγιστο (αύξηση του r προκαλεί αύξηση της T_{03} , οπότε περιορίζεται το ποσό θερμότητας που μπορεί να προσδοθεί στον θάλαμο καύσης). Αύξηση του r πέρα από το σημείο αυτό, προκαλεί μείωση της ειδικής ισχύος. Για σταθερό r , αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας (TET) προκαλεί σημαντική αύξηση της ειδικής ισχύος, ιδιαίτερα σε μεγάλες τιμές του r .

Ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται με αύξηση του r για σταθερή μέγιστη θερμοκρασία (TET). Όμως, σε πολύ μεγάλες τιμές του r , οι εσωτερικές απώλειες του συστήματος αυξάνονται σημαντικά με συνέπεια τη δραστηκή μείωση (μέχρι μηδενισμού) του βαθμού απόδοσης. Για σταθερό r , αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας (TET) αυξάνει το έργο χωρίς ανάλογη αύξηση των εσωτερικών απωλειών, οπότε αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης.

Ένας παραστατικός τρόπος ταυτόχρονης παρουσίασης της επίδρασης που έχουν η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου και ο λόγος πίεσης στον βαθμό απόδοσης και την ειδική ισχύ του κύκλου, απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4.3. Κάθε καμπύλη χαράσσεται για σταθερή μέγιστη θερμοκρασία (TET), ενώ το κάθε σημείο της καμπύλης αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή του λόγου πίεσης. Για κάθε τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας (TET), προσδιορίζονται από το διάγραμμα τα δύο βέλτιστα: το σημείο επαφής της οριζόντιας εφαπτομένης με την καμπύλη είναι το σημείο μέγιστου βαθμού απόδοσης, ενώ το σημείο επαφής της κατακόρυφης εφαπτομένης με την καμπύλη είναι το σημείο μέγιστης ειδικής ισχύος. Το σύστημα σχεδιάζεται σε ένα σημείο συμβιβασμού μεταξύ των δύο βέλτιστων σημείων.

4.4 Ανάλυση του κύκλου σε σημείο εκτός του σημείου σχεδιασμού του, σε διαφορετική θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η μελέτη της συμπεριφοράς ενός αεριοστροβίλου σε σημείο εκτός του σημείου σχεδιασμού του είναι σίγουρα πιο περίπλοκη. Οι θερμοδυναμικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται είναι παρόμοιες, αλλά η μελέτη εκτός του σημείου σχεδιασμού απαιτεί επιπλέον θεωρήσεις και υπολογισμούς. Χρειάζεται να λάβει κανείς υπόψη του επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του κάθε στοιχείου της μονάδας.

Στην ανάλυση που ακολουθεί θεωρούμε μια μονάδα που έχει σχεδιαστεί με συγκεκριμένο λόγο πίεσης συμπιεστή και μέγιστη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα επιλέγουμε:

- μέγιστη θερμοκρασία: $TET=1300K$
- λόγο πίεσης συμπιεστή: $r_c=15$

Ατμοσφαιρικές συνθήκες: Η πίεση παραμένει ίδια $P_a=101.3 \text{ kPa}$. Η θερμοκρασία μεταβάλλεται και μελετάμε τη συμπεριφορά του αεριοστροβίλου σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Τα υπόλοιπα δεδομένα θεωρούνται ίδια με αυτά της ανάλυσης στο σημείο σχεδιασμού της μονάδας.

Τα ακόλουθα μεγέθη υπολογίζονται στη συνέχεια:

- Η παροχή μάζας αέρα (\dot{m}^{od})
- Ο λόγος πίεσης και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή (r_c^{od}, η_c^{od})
- Η παροχή καυσίμου (\dot{m}_f^{od})
- Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου (η_t^{od})

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Για τον αγωγό εισαγωγής αέρα (1→2), ισχύουν τα ακόλουθα:

$$P_{01}^{od} = P_a^{od}$$

$$P_{02}^{od} = P_{01}^{od} (1 - DP_{inloss})$$

$$T_{01}^{od} = T_a^{od}$$

$$T_{02}^{od} = T_{01}^{od}$$

$$\dot{m}_1^{od} = \dot{m}_2^{od} = \dot{m}^{od}$$

Από την καταστατική εξίσωση και θεωρώντας ότι ο όγκος είναι σταθερός, δηλαδή:

$$\left(\frac{\dot{m} R T}{P}\right)_{\text{design}} = \left(\frac{\dot{m} R T}{P}\right)_{\text{off-design}}$$

προκύπτει για την παροχή αέρα:

$$\dot{m}^{od} = \dot{m} \frac{T_{02}}{P_{02}} \frac{P_{02}^{od}}{T_{02}^{od}}$$

Ο λόγος πίεσης του συμπιεστή δίνεται από την σχέση: $r_c^{od} = \frac{P_{03}^{od}}{P_{02}^{od}}$

όπου

$$P_{03}^{od} = \frac{P_{04}^{od}}{1 - DP_{ccloss}}$$

και η πίεση στην είσοδο του στροβίλου δίνεται από την σχέση [5]:

$$P_{04}^{od} = \frac{\dot{m}^{od} P_{04}}{\dot{m}} \sqrt{\frac{T_{04}^{od}}{T_{04}}}$$

Όπου $T_{04}^{od} = TET^{od}$, δηλαδή η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου.

Θεωρούμαι για τον βαθμό απόδοσης του θαλάμου καύσης ότι παραμένει ίδιος, $\eta_B^{od} = \eta_B$.

Ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή, υπολογίζεται από την σχέση [5]:

$$\eta_c^{od} = \eta_c \sqrt{\frac{T_{04}^{od} T_{02}}{T_{02}^{od} T_{04}}}$$

Και για τη θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή:

$$T_{03}^{od} = T_{02}^{od} \left[1 + \frac{(r_c^{od})^{k_a} - 1}{\eta_c^{od}} \right]$$

Επίσης για την παροχή ισχύει: $\dot{m}_3^{od} = \dot{m}^{od}$

Ο λόγος καυσίμου / αέρα δίνεται από τη σχέση:

$$f^{od} = \frac{c_{pg}(T_{04}^{od} - T_0) - c_{pa}(T_{03}^{od} - T_0)}{H_u \eta_B^{od} - c_{pg}(T_{04}^{od} - T_0)}$$

και

$$\dot{m}_f^{od} = f^{od} \dot{m}^{od}$$

Η παροχή μάζας στην έξοδο του θαλάμου καύσης είναι: $\dot{m}_4^{od} = \dot{m}_3^{od} + \dot{m}_f^{od}$

Για τον αγωγό εξαγωγής καυσαερίου (5→6) ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$P_{05}^{od} = P_{06}^{od} = 1,003 P_a^{od}$$

$$T_{06}^{od} = T_{05}^{od}$$

$$\dot{m}_6^{od} = \dot{m}_5^{od}$$

Ο λόγος πίεσης του στροβίλου δίνεται από τη σχέση:

$$r_T^{od} = \frac{P_{04}^{od}}{P_{05}^{od}}$$

Ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου, υπολογίζεται από τη σχέση [5]:

$$\eta_t^{od} = \eta_t \sqrt{\frac{T_{04}^{od} T_{02}}{T_{02}^{od} T_{04}}}$$

Επίσης για την παροχή ισχύει: $\dot{m}_5^{od} = \dot{m}_4^{od}$

Τέλος, για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας στην έξοδο του στροβίλου:

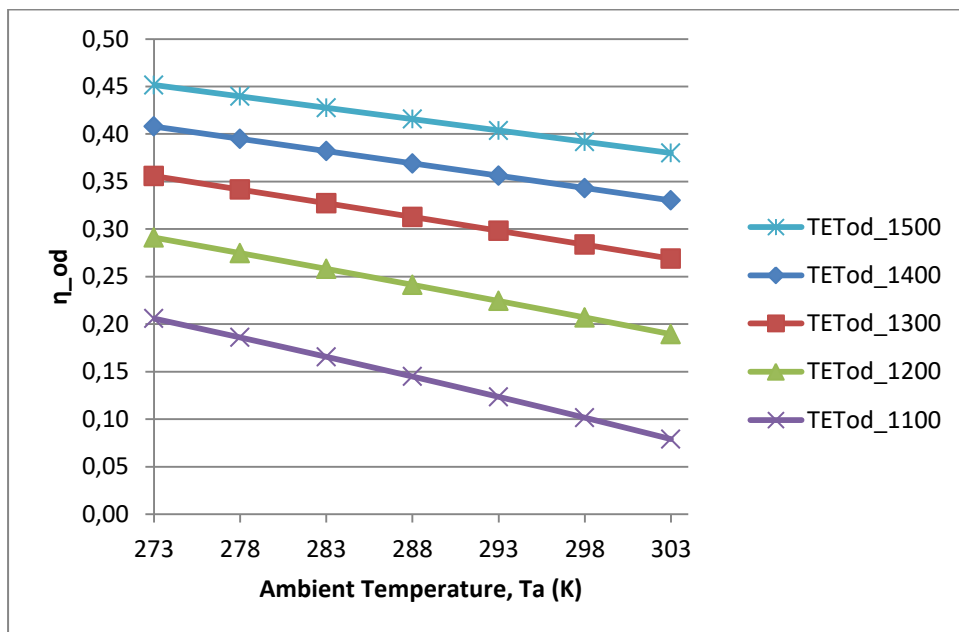
$$T_{05}^{od} = T_{04}^{od} \left[1 - \eta_t^{od} (1 - (r_T^{od})^{-k_g}) \right]$$

Με βάση τα παραπάνω και χρήση των Εξ. (2.21)-(2.29) προκύπτουν τα αποτελέσματα για την ανάλυση του κύκλου σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

4.5 Αποτελέσματα ανάλυσης του κύκλου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος διαφορετική της θερμοκρασίας σχεδιασμού

Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το off-design

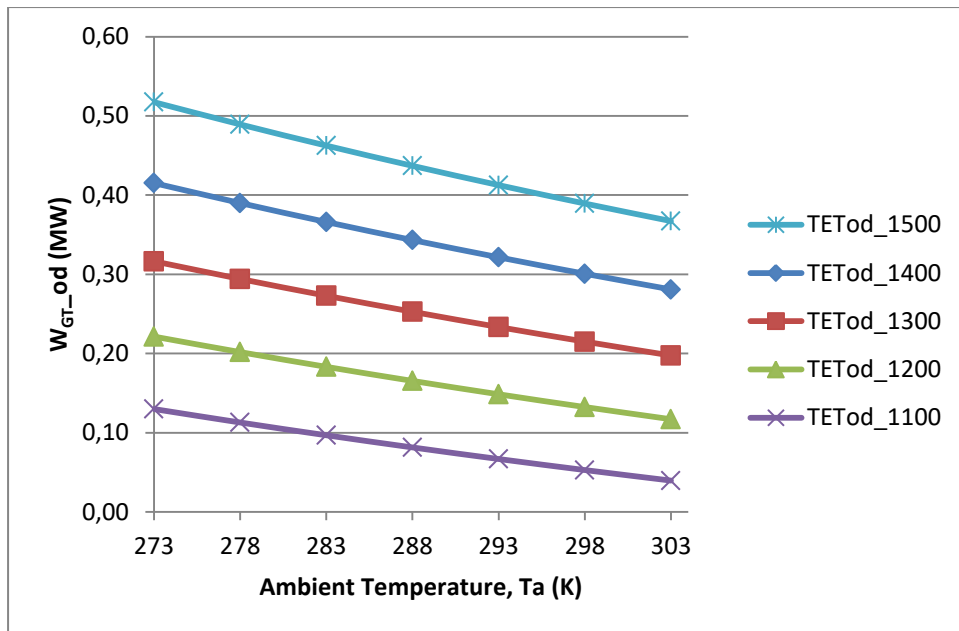
TET _{od} (K)	Ta (K)	η_{od}	W _{GT,od} (MW)	m _{f,od} (kg/s)	b _{e,od} (kg/MJ)	r _{c,od}	$\eta_{c,od}$	$\eta_{t,od}$
1100	273	0,2059	0,1299	0,0138	0,1000	14,5560	0,8031	0,8503
	278	0,1860	0,1129	0,0133	0,1106	14,2940	0,7958	0,8426
	283	0,1657	0,0968	0,0128	0,1242	14,0420	0,7888	0,8352
	288	0,1448	0,0814	0,0123	0,1421	13,7980	0,7819	0,8279
	293	0,1235	0,0668	0,0118	0,1666	13,5630	0,7752	0,8208
	298	0,1016	0,0529	0,0114	0,2026	13,3350	0,7687	0,8139
	303	0,0790	0,0396	0,0110	0,2604	13,1150	0,7623	0,8071
1200	273	0,2911	0,2214	0,0166	0,0707	15,2030	0,8388	0,8881
	278	0,2747	0,2018	0,0161	0,0749	14,9300	0,8312	0,8801
	283	0,2582	0,1832	0,0155	0,0797	14,6660	0,8238	0,8723
	288	0,2414	0,1654	0,0150	0,0852	14,4120	0,8167	0,8647
	293	0,2243	0,1485	0,0145	0,0917	14,1660	0,8097	0,8573
	298	0,2070	0,1324	0,0140	0,0994	13,9280	0,8028	0,8501
	303	0,1894	0,1170	0,0135	0,1086	13,6980	0,7962	0,8430
1300	273	0,3558	0,3165	0,0195	0,0578	15,8240	0,8730	0,9244
	278	0,3415	0,2942	0,0188	0,0602	15,5400	0,8652	0,9160
	283	0,3272	0,2729	0,0182	0,0629	15,2650	0,8575	0,9079
	288	0,3128	0,2527	0,0177	0,0658	15,0000	0,8500	0,9000
	293	0,2983	0,2334	0,0171	0,0690	14,7440	0,8427	0,8923
	298	0,2836	0,2150	0,0166	0,0725	14,4970	0,8356	0,8848
	303	0,2688	0,1975	0,0161	0,0765	14,2570	0,8287	0,8774
1400	273	0,4079	0,4152	0,0223	0,0504	16,4220	0,9060	0,9593
	278	0,3950	0,3900	0,0216	0,0521	16,1260	0,8978	0,9506
	283	0,3821	0,3661	0,0210	0,0539	15,8410	0,8898	0,9422
	288	0,3692	0,3432	0,0203	0,0557	15,5660	0,8821	0,9340
	293	0,3562	0,3215	0,0197	0,0578	15,3010	0,8745	0,9260
	298	0,3432	0,3007	0,0192	0,0600	15,0440	0,8672	0,9182
	303	0,3302	0,2809	0,0186	0,0623	14,7960	0,8600	0,9106
1500	273	0,4516	0,5174	0,0251	0,0456	16,9980	0,9378	0,9930
	278	0,4396	0,4893	0,0243	0,0468	16,6920	0,9293	0,9840
	283	0,4276	0,4625	0,0237	0,0481	16,3970	0,9211	0,9753
	288	0,4157	0,4370	0,0230	0,0495	16,1130	0,9131	0,9668
	293	0,4038	0,4126	0,0224	0,0510	15,8380	0,9052	0,9585
	298	0,3919	0,3894	0,0217	0,0525	15,5720	0,8976	0,9504
	303	0,3800	0,3672	0,0211	0,0541	15,3150	0,8902	0,9425



Διάγραμμα 4.7: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

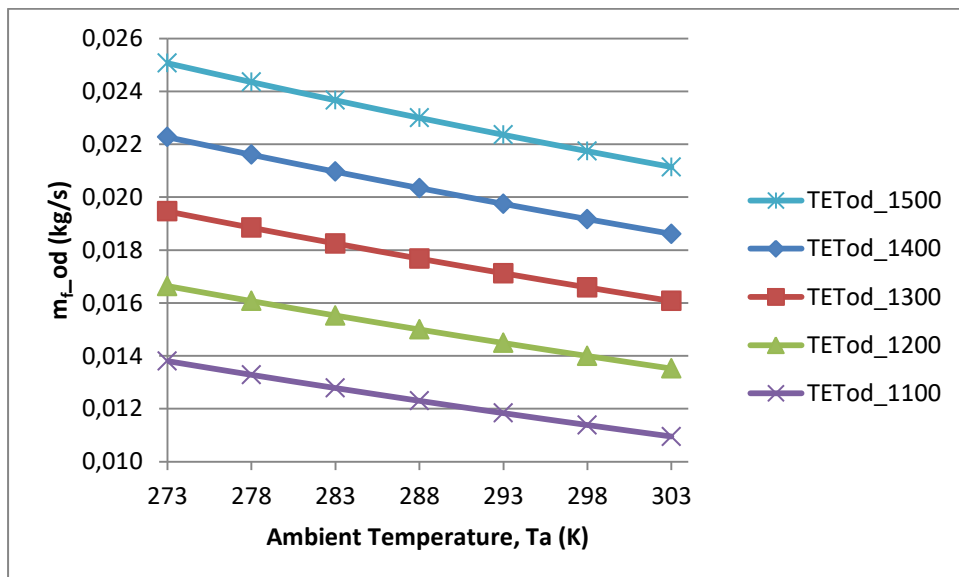
Καθώς ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από τον λόγο θερμοκρασιών (T_{04}/T_{02}), όταν μια μονάδα λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα περιστροφής σε υψηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος από αυτήν που έχει σχεδιαστεί, ο λόγος $N/\sqrt{T_{02}}$ θα είναι μικρότερος, το ίδιο και οι λόγοι πίεσης και θερμοκρασίας του συμπιεστή. Οπότε τελικά και το χρήσιμο έργο και ο βαθμός απόδοσης θα μειωθούν.

Η επίδραση αυτή εξηγείται καθώς όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλή, η πυκνότητα του αέρα είναι χαμηλή (για σταθερή πίεση) και επομένως η παροχή μάζας είναι χαμηλή. Με υψηλή αρχική θερμοκρασία και χαμηλή παροχή μάζας αέρα, η παροχή καυσίμου πρέπει να μειωθεί ώστε η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου να μην υπερβεί την μέγιστη επιτρεπτή τιμή. Αποτέλεσμα αυτού είναι η σημαντική μείωση της ισχύος, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.8.



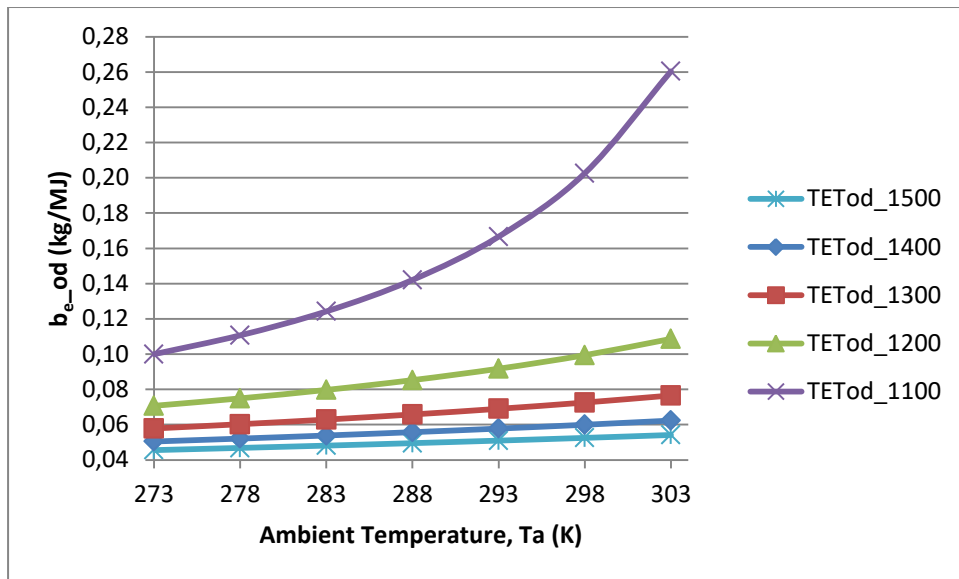
Διάγραμμα 4.8: Καθαρή ισχύς συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, για διάφορες μέγιστες θερμοκρασίες του κύκλου

Παρατηρούμε ότι καθώς η θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξάνεται το έργο συμπίεσης αυξάνει αλλά το έργο της αποτόνωσης παραμένει σταθερό. Επομένως το χρήσιμο έργο, που είναι η διαφορά αυτών των δύο, μειώνεται, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.8.



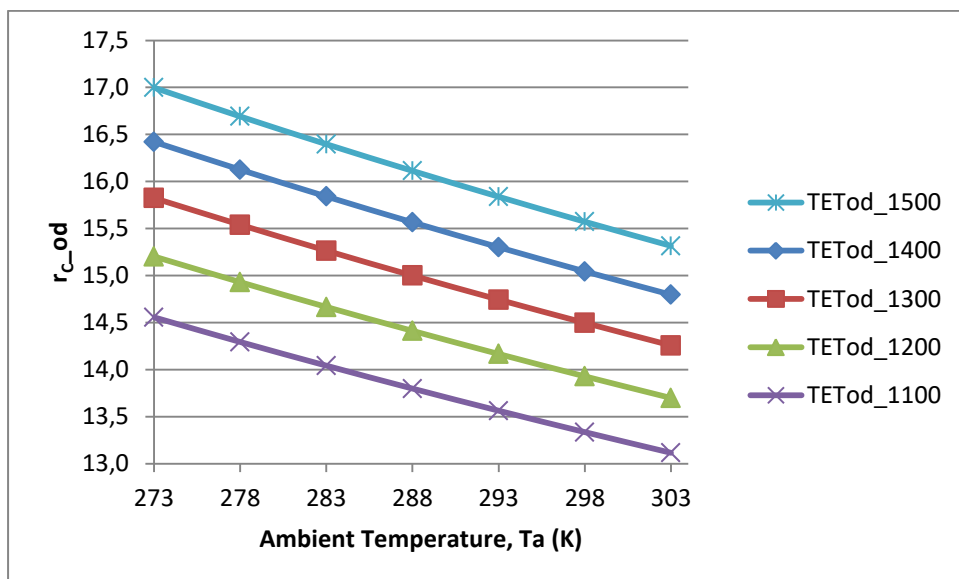
Διάγραμμα 4.9: Παροχή καυσίμου συναρτήσει συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, για διάφορες μέγιστες θερμοκρασίες του κύκλου.

Για σταθερή μέγιστη θερμοκρασία (TET), η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή πτώση της παροχής καυσίμου.

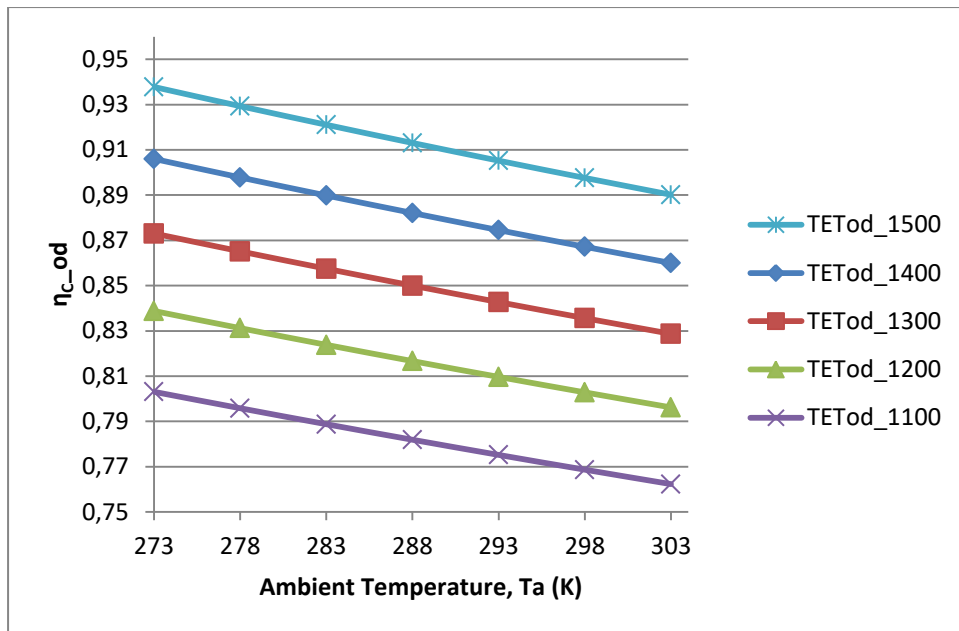


Διάγραμμα 4.10: Ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, για διάφορες μέγιστες θερμοκρασίες του κύκλου.

Η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (διάγραμμα 4.10).

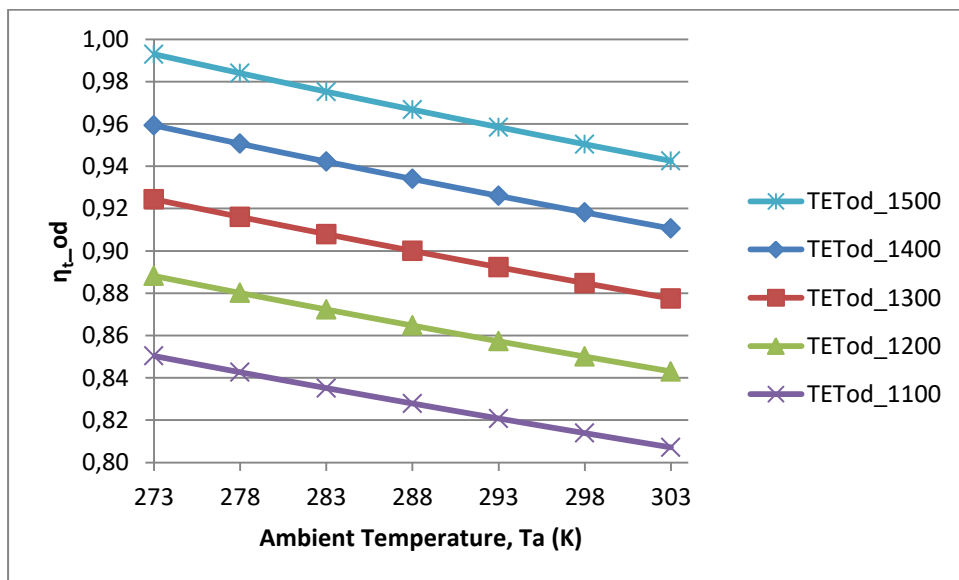


Διάγραμμα 4.11: Λόγος πιέσεων του συμπιεστή συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, για διάφορες μέγιστες θερμοκρασίες του κύκλου.



Διάγραμμα 4.12: Βαθμός απόδοσης του συμπιεστή συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, για διάφορες μέγιστες θερμοκρασίες του κύκλου.

Ο λόγος πίεσης και ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή μειώνονται με αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όπως παρουσιάζεται στα διαγράμματα (4.11) και (4.12).



Διάγραμμα 4.13: Βαθμός απόδοσης του στροβίλου συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, για διάφορες μέγιστες θερμοκρασίες του κύκλου.

Ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.13.

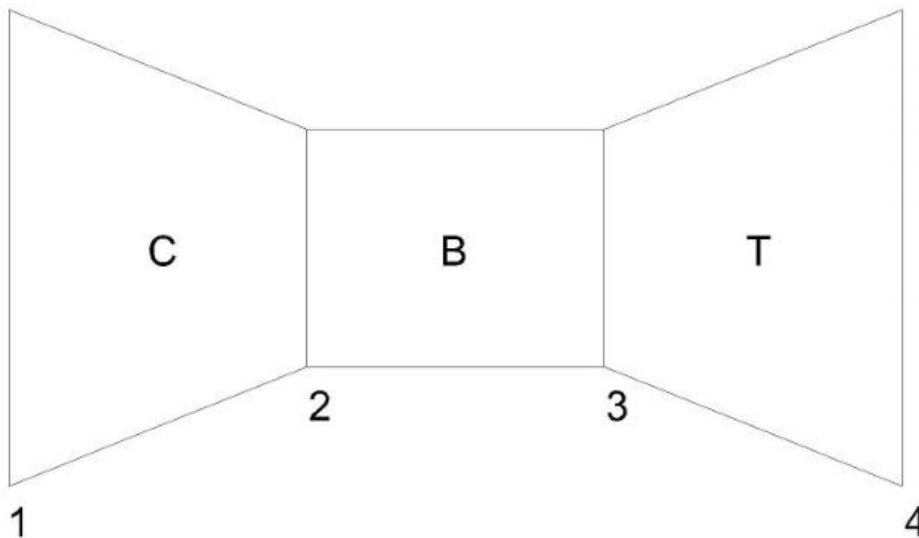
4.6 Ανάλυση του κύκλου σε ισχύ διαφορετική της ονομαστικής

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εκτός από τον υπολογισμό της απόδοσης του αεριοστροβίλου στο σημείο σχεδίασης (κανονική λειτουργία), ενδιαφέρει και ο τρόπος μεταβολής της απόδοσης του αεριοστροβίλου στο πλήρες φάσμα ταχυτήτων περιστροφής και ισχύος. Η ανάλυση θα περιορισθεί στην απλή εγκατάσταση αεριοστροβίλου με έναν άξονα.

Κατά την ανάλυση απαιτείται η ικανοποίηση των ουσιαστών συνθηκών συμβατότητας ροής μάζας, ενέργειας και ταχύτητας περιστροφής μεταξύ των διαφόρων τμημάτων. Για την απλοποίηση της μελέτης θα αμεληθούν οι πτώσεις πίεσης στους αγωγούς εισόδου, εξόδου και ενδιάμεσους, που είναι σε κάθε περίπτωση πολύ μικρές, ενώ λαμβάνεται η πτώση πίεσης στο θάλαμο καύσης σαν σταθερό ποσοστό της πίεσης κατάθλιψης του συμπιεστή, δηλαδή $\Delta P_B/P_{02} = \text{const}$. Η παροχή μάζας απομάστευσης από τον συμπιεστή, για την ψύξη του στροβίλου, θεωρείται προσεγγιστικά ίση με την παροχή μάζας του καιόμενου καυσίμου, οπότε οι παροχές μάζας στον συμπιεστή και στον στρόβιλο θεωρούνται ίσες, δηλαδή $\dot{m}_a = \dot{m}_g = \dot{m}$ [1]. Επίσης αμελούνται οι μηχανικές απώλειες της ατράκτου και θεωρείται ως εργαζόμενο μέσο τέλει αέριο με ιδιότητες $\gamma_a = 1,4$ και $\gamma_g = 1,33$.

Θεωρούμε ατμοσφαιρικές συνθήκες $P_{01} = 1.013 \text{ bar}$ και $T_{01} = 288 \text{ K}$ και μηχανικό βαθμό απόδοσης $\eta_m = 0,98$. Για τον βαθμό απόδοσης του θαλάμου καύσης επιλέγεται η τιμή $\eta_B = 0,99$ και για την θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου $H_u = 42000 \text{ kJ/kg}$.

Κάθε είσοδος και έξοδος του κάθε στοιχείου, δηλαδή κάθε σημείο του κύκλου χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.2.



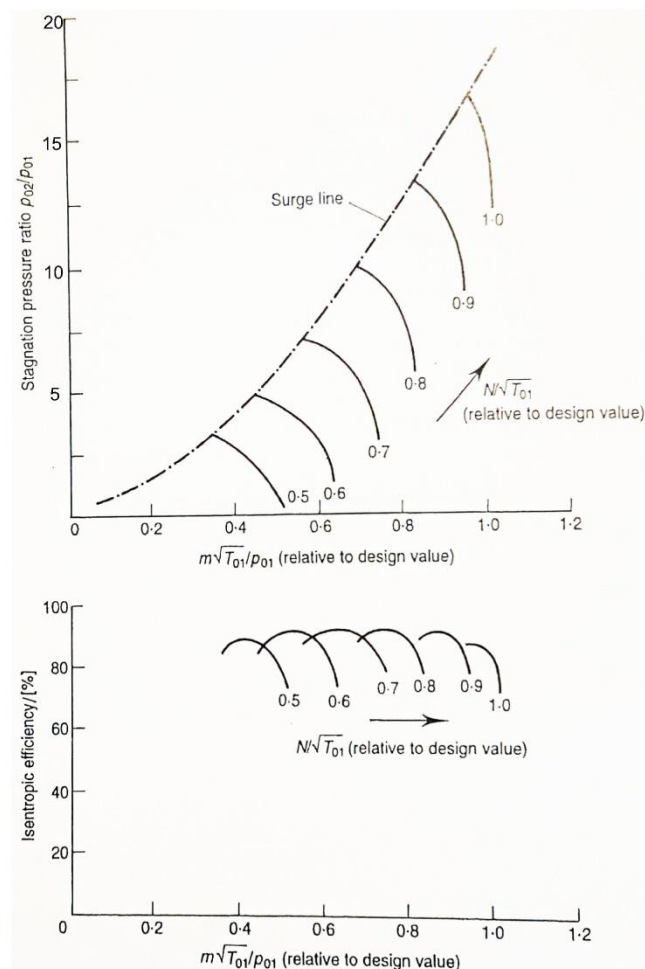
Σχήμα 4.2: Σχηματική απεικόνιση αεριοστροβίλου

Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του αεριοστροβίλου δίνονται στον Πίνακα 4.3. Οι χάρτες του συμπιεστή και του στροβίλου απεικονίζονται στα Σχ. 4.3 και 4.4, τα οποία

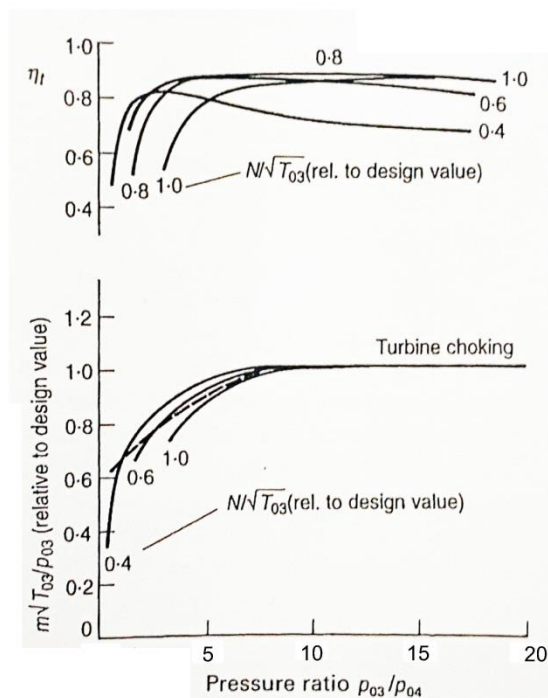
προέρχονται από το βιβλίο των Saravanamutto, Rogers and Cohen [1] με προσαρμογή ως προς τον λόγο πίεσης.

Πίνακας 4.3: Δεδομένα αεροστροβίλου στο σημείο σχεδιασμού

W_{GT} (kW)	N (RPM)	T_{01} (K)	T_{03} (K)	P_{01} (bar)	r_c	r_t
20000	3000	288	1573	1,013	15	15



Σχήμα 4.3: Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας συμπιεστή [1]



Σχήμα 4.4: Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας στροβίλου [1]

4.6.1 Συνεργασία του αεροστροβίλου με γεννήτρια ή έλικα μεταβλητού βήματος

Αρχικά μελετάται η περίπτωση συνεργασίας του αεροστροβίλου με γεννήτρια ή έλικα μεταβλητού βήματος, δηλαδή μεταβολή φορτίου με σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Με χρήση των διαγραμμάτων των Σχ. 4.3 και 4.4 και των Εξ. (2.19), (2.20), (2.22) και (2.28) υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά στο σημείο σχεδιασμού, όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Λειτουργικά χαρακτηριστικά αεροστροβίλου στο σημείο σχεδιασμού επιπλέον εκείνων του Πίνακα 4.3

η_c	η_T	$m\sqrt{T_{01}}/P_{01}$	$m\sqrt{T_{03}}/P_{03}$	T_{02} (K)	T_{04} (K)	f	m_a (kg/s)	η	b_e (kg/kJ)
0,84	0,87	919,8719	143,32	688,39	903,43	0,0268	54,9085	0,3234	0,000074

Στη συνέχεια και με χρήση των χαρακτηριστικών του συμπιεστή και του στροβίλου (Σχ. 4.3 και 4.4), προσδιορίζονται οι τιμές των παραμέτρων: $\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}, \frac{P_{02}}{P_{01}}, \eta_c, \eta_t, \frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$, επιλέγοντας τυχαία σημεία επί της καμπύλης σταθερών στροφών του συμπιεστή. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά του συμπιεστή και του στροβίλου

r_c	$m \sqrt{T_{01}} / P_{01}$	η_c
15	919,87	0,84
14,2	925,67	0,82
13,5	931,46	0,78
12,7	936,98	0,76
12,1	942,87	0,74

$m \sqrt{T_{03}} / P_{03}$	η_t
143,32	0,87

Σύμφωνα με το Σχ. 4.4, οι τιμές των $m \sqrt{T_{03}} / P_{03}$ και η_t παραμένουν πρακτικά σταθερές στο διάστημα $r_c=8 - 15$.

Αρχικά θα υπολογίσουμε την απαιτούμενη θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου, δηλαδή τη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, για το σημείο επί της χαρακτηριστικής του συμπιεστή όπου $r_c=14,2$. Χρησιμοποιώντας την Εξ. (3.2), έχουμε:

$$\sqrt{\frac{T_{03}}{T_{01}}} = \frac{(m \sqrt{T_{03}} / P_{03})(P_{03}/P_{01})}{m \sqrt{T_{01}} / P_{01}}$$

Από την εξίσωση αυτή, αμελώντας τις απώλειες πίεσης, είναι $P_{03}=P_{02}$, οπότε προκύπτει η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου:

$$T_{03}=1392,1 \text{ K.}$$

Από την Εξ. (2.19) υπολογίζουμε τη θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή:

$$T_{02}=686,33 \text{ K}$$

Από την Εξ. (2.20) υπολογίζουμε τη θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου:

$$T_{04}=799,52 \text{ K}$$

Γνωρίζοντας ότι $m \sqrt{T_{01}} / P_{01} = 925,67$, η παροχή μάζας αέρα υπολογίζεται ίση με

$$m_a=55,2547 \text{ kg/s.}$$

Από την Εξ. (2.24) υπολογίζουμε την καθαρή ισχύ, $W_{GT}=15123 \text{ kW}$.

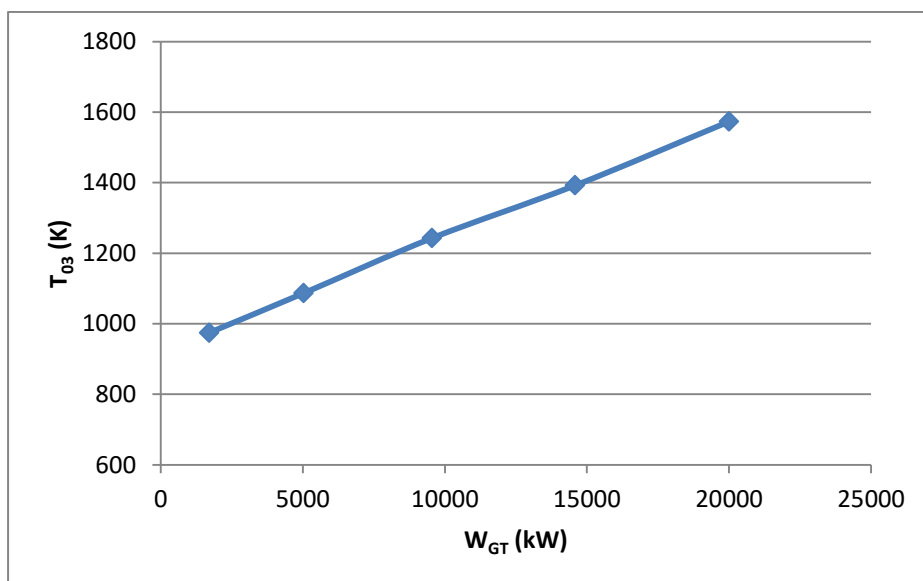
Η παροχή του καυσίμου είναι $\dot{m}_a \cdot f$ και έτσι μπορεί να υπολογισθεί η μεταβολή του βαθμού απόδοσης (η) και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου μέσω των Εξ. (2.25) και (2.29).

Επαναλαμβάνοντας τους παραπάνω υπολογισμούς για τα διάφορα σημεία του συμπιεστή επί της καμπύλης σταθερών στροφών, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.6.

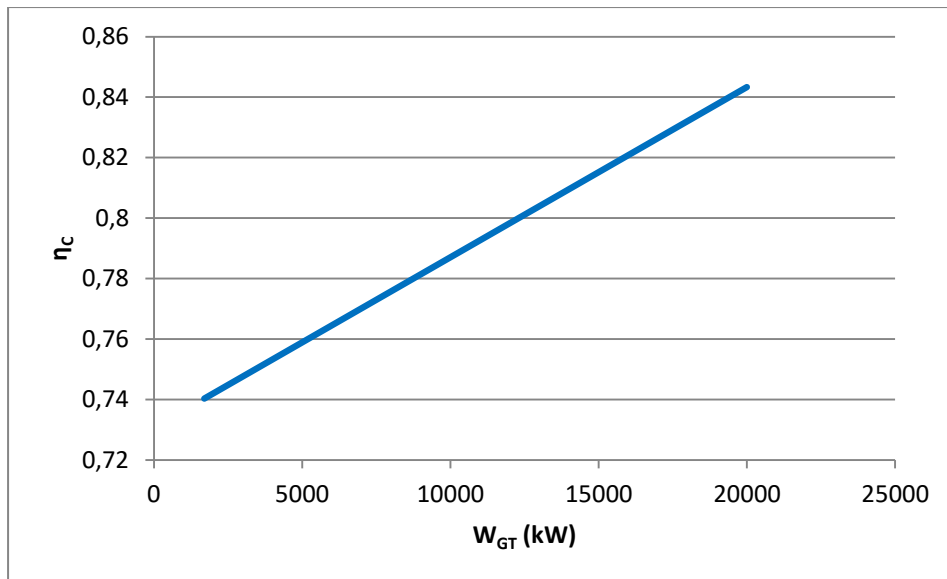
Πίνακας 4.6: Λειτουργικά χαρακτηριστικά του αεριοστροβίλου στην ονομαστική ισχύ σε μερικό φορτίο για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

r_c	$m \sqrt{T_{01}} / P_{01}$	η_c	T_{01} (K)	T_{02} (K)	T_{03} (K)	T_{04} (K)	f	m_a (kg/s)	W_{GT} (kW)	η	b_e (kg/kJ)
15	919,87	0,84	288	688,39	1573,00	903,43	0,0268	54,9085	20000	0,32	0,000074
14,2	925,67	0,82	288	686,33	1392,10	807,99	0,0216	55,2547	14586	0,29	0,000082
13,5	931,46	0,78	288	695,46	1242,60	713,68	0,017	55,6003	9543,6	0,24	0,000099
12,7	936,98	0,76	288	692,39	1086,80	624,18	0,0126	55,9298	5033,4	0,17	0,000140
12,1	942,87	0,74	288	692,27	974,24	559,54	0,0094	56,2814	1700,6	0,08	0,000311

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, T_{03} , συναρτήσει της καθαρής ισχύος εξόδου. Παρατηρούμε ότι η ισχύς της μονάδας αυξάνεται με την αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου.

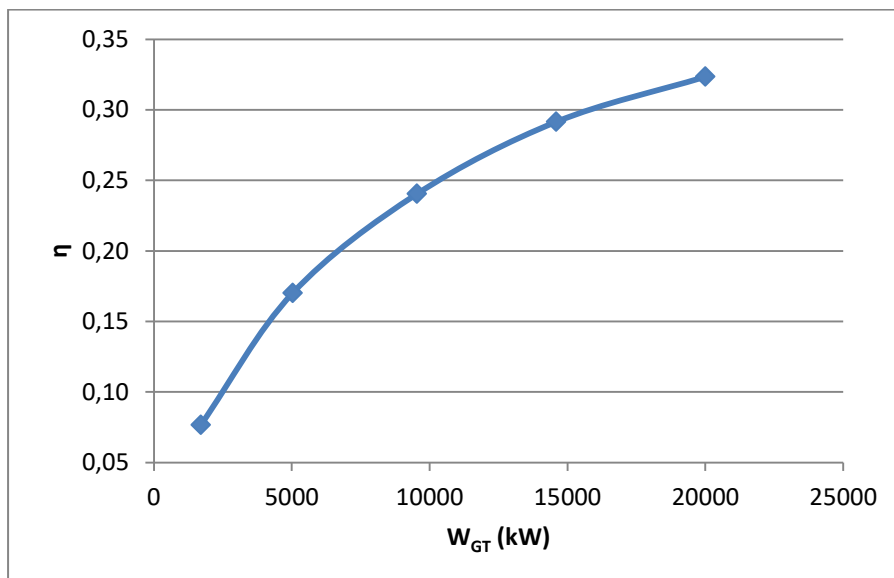


Διάγραμμα 4.14: Μέγιστη θερμοκρασία (T_{03}) συναρτήσει της καθαρής ισχύος εξόδου.

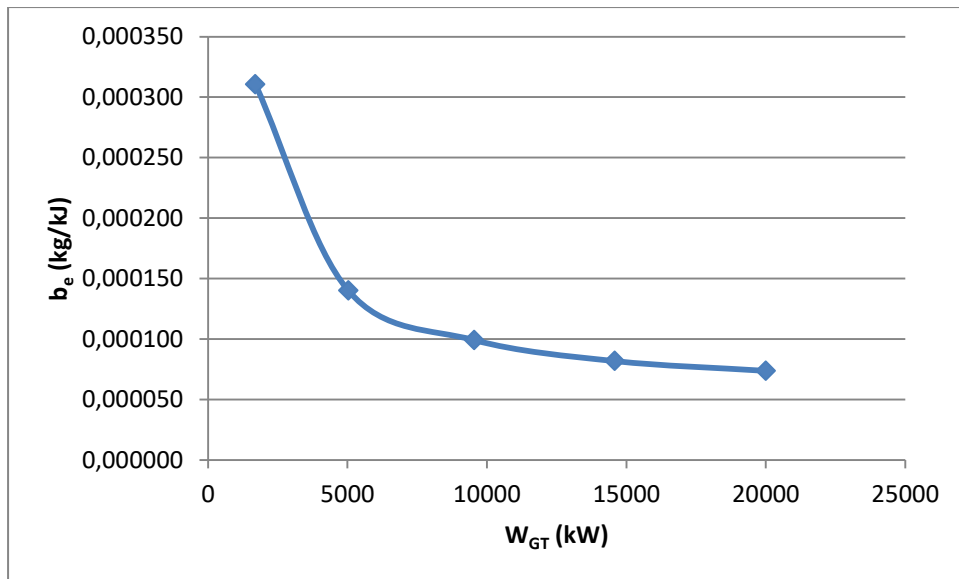


Διάγραμμα 4.15: Βαθμός απόδοσης του συμπιεστή (η_c) συναρτήσει της καθαρής ισχύος εξόδου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα του βαθμού απόδοσης καθώς και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της ισχύος.



Διάγραμμα 4.16: Βαθμός απόδοσης (η) συναρτήσει της καθαρής ισχύος εξόδου.



Διάγραμμα 4.17: Ειδική κατανάλωση καυσίμου (b_e) συναρτήσει της καθαρής ισχύος εξόδου.

Ο βαθμός απόδοσης καθώς και η ειδική κατανάλωση καυσίμου επηρεάζονται αρνητικά από τη λειτουργία του αεριοστροβίλου σε μερικό φορτίο. Αυτό οφείλεται στη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου και του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή (Διαγράμματα 4.14 και 4.15).

4.6.2 Συνεργασία του αεριοστροβίλου με έλικα σταθερού βήματος

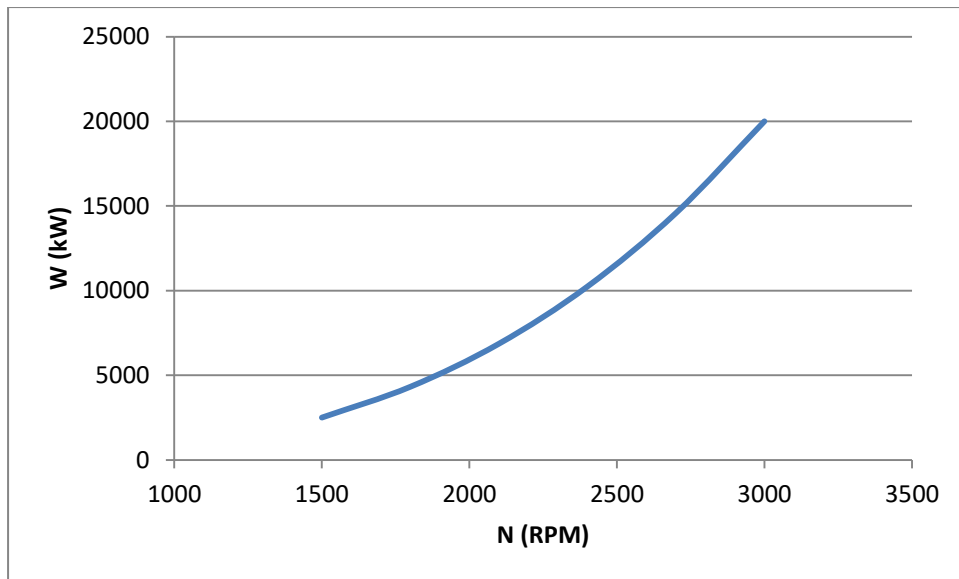
Στη συνέχεια εξετάζουμε την περίπτωση έλικας σταθερού βήματος. Θεωρούμε ότι ισχύει ο νόμος της κυβικής παραβολής ή αλλιώς νόμος της έλικας, που διατυπώνεται ως εξής: "η αναγκαία ισχύς που απορροφάται από την έλικα είναι ανάλογη με την τρίτη δύναμη της ταχύτητας περιστροφής της":

$$W_{GT} = A N_p^3 \quad (4.1)$$

Εδώ, θεωρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης πρόωσης περιλαμβάνεται στη σταθερά A .

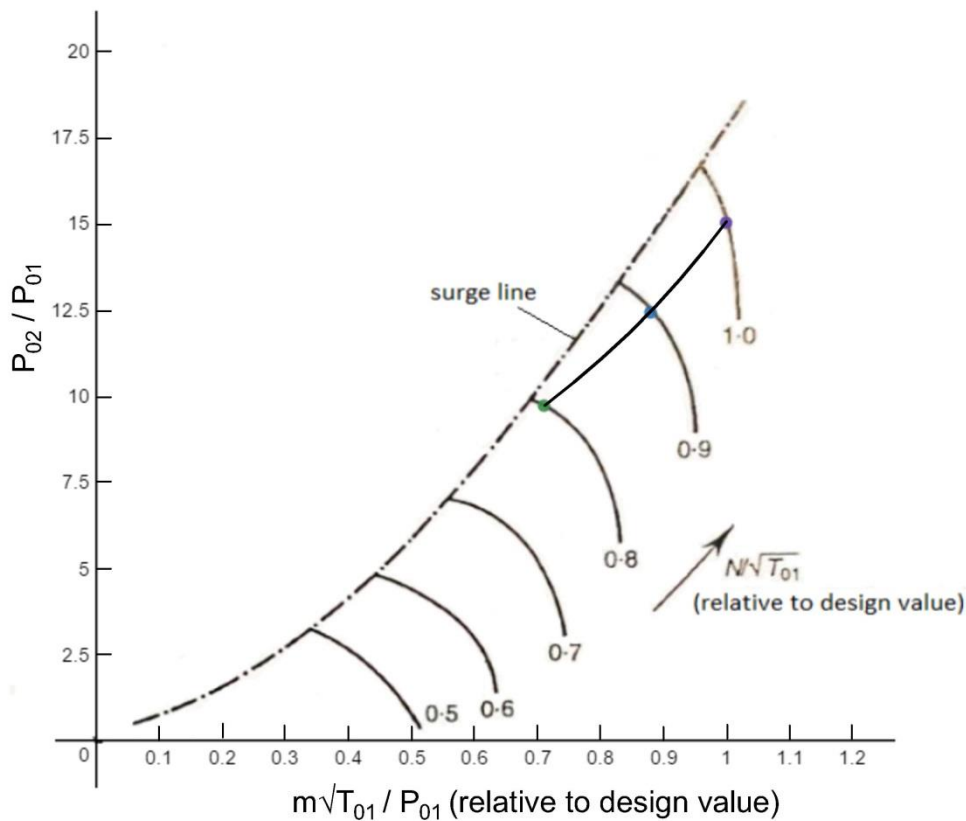
Λύνοντας ως προς A , στο σημείο σχεδιασμού, προκύπτει $A = 7,4074 \cdot 10^{-7}$, τιμή η οποία παραμένει σταθερή και στα σημεία εκτός του σχεδιασμού.

Η χαρακτηριστική καμπύλη της έλικας απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4.18.



Διάγραμμα 4.18: Χαρακτηριστική καμπύλη έλικας.

Με χρήση των χαρακτηριστικών του συμπιεστή και του στροβίλου (Σχ. 4.3 και 4.4), και μέσω δοκιμών και υπολογισμών προσδιορίζονται οι τιμές των παραμέτρων: $\frac{m\sqrt{T_{01}}}{P_{01}}$, $\frac{P_{02}}{P_{01}}$, $\eta_c, \eta_t, \frac{m\sqrt{T_{03}}}{P_{03}}$. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να ευρεθεί το μόνο σημείο επάνω σε κάθε γραμμή σταθερών στροφών στο διάγραμμα χαρακτηριστικών του συμπιεστή που θα δώσει την απαιτούμενη ισχύ σε αυτές τις στροφές. Αυτό έγινε με δοκιμές, δοκιμάζοντας διάφορα σημεία επάνω στις χαρακτηριστικές του συμπιεστή και υπολογίζοντας την ισχύ εξόδου που τους αντιστοιχεί. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για κάθε γραμμή σταθερών στροφών προκύπτει μια σειρά από σημεία λειτουργίας που, όταν ενωθούν, σχηματίζουν την γραμμή λειτουργικής ισορροπίας της έλικας, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.5.



Σχήμα 4.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας συμπιεστή και η γραμμή λειτουργικής ισορροπίας της έλικας σταθερού βήματος.

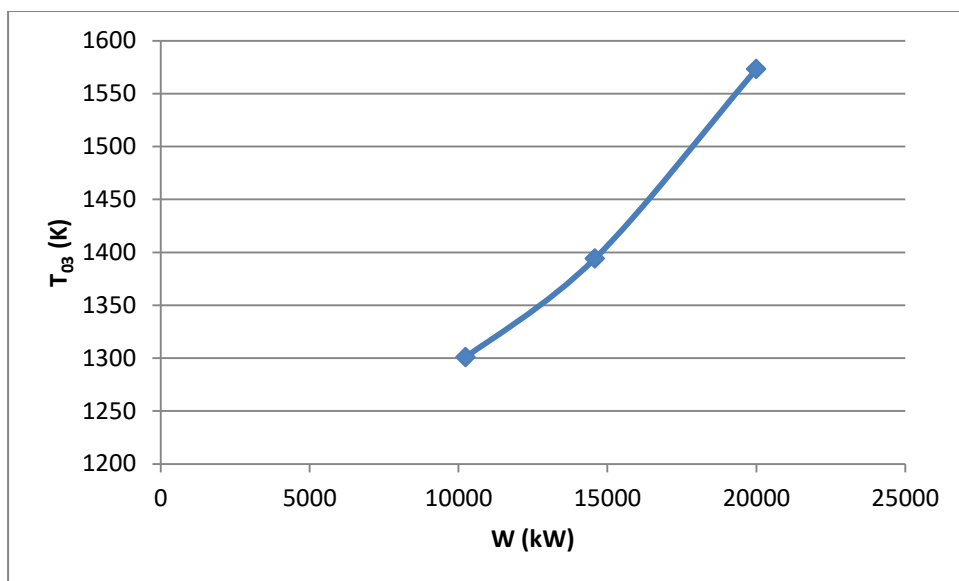
Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7: Λειτουργικά χαρακτηριστικά του αεροστροβίλου στην ονομαστική ισχύ σε μερικό φορτίο για μεταβαλλόμενη ταχύτητα περιστροφής.

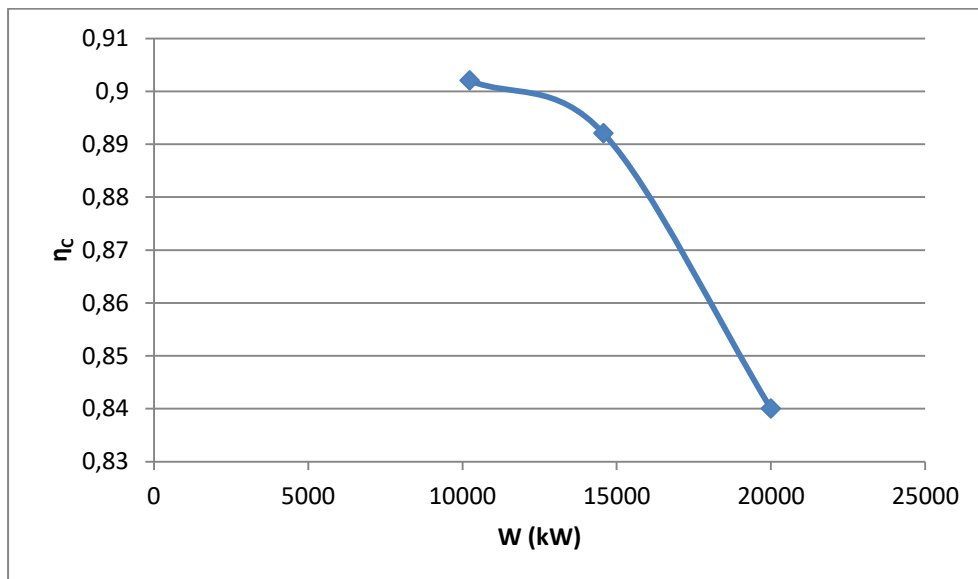
N (RPM)	W (kW)	r_c	$m \sqrt{T_{01}} / P_{01}$	η_c	T_{01} (K)	T_{02} (K)	T_{03} (K)	T_{04} (K)	f	m_s (kg/s)	η	b_e (kg/kJ)
3000	20000	15	919,8719	0,84	288	688,39	1573	903,43	0,0268	54,9085	0,32	0,0000736
2700	14580	12,4	807,739515	0,89	288	625,84	1394,1	830,65	0,0231	48,2153	0,31	0,0000763
2400	10240	9,7	654,120908	0,90	288	579,82	1300,9	813,15	0,0216	39,0455	0,29	0,0000822

Οι τιμές των στροφών 2700 και 2400 RPM ορίσθηκαν έτσι ώστε να κινούμαστε πάνω στις γραμμές 0.9 και 0.8 του Σχ. 4.5. Για τιμές μικρότερες του 0.8, το σημείο λειτουργίας βρίσκεται μέσα στην περιοχή πάλμωσης του συμπιεστή, κάτι το οποίο δεν είναι αποδεκτό.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, T_{03} , συναρτήσει της καθαρής ισχύος εξόδου.

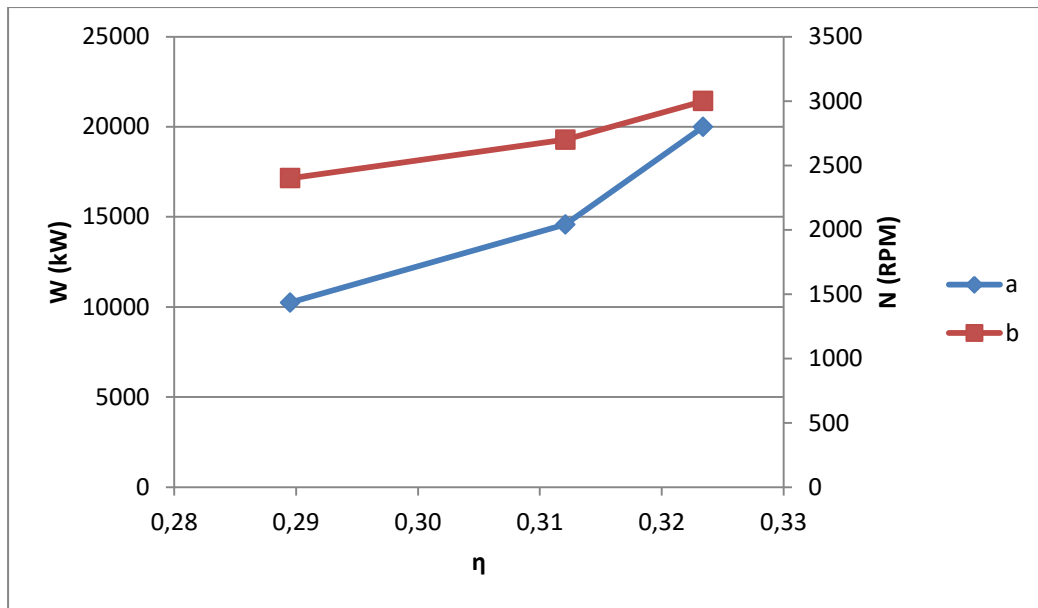


Διάγραμμα 4.18: Μέγιστη θερμοκρασία (T_{03}) συναρτήσει της ισχύος.

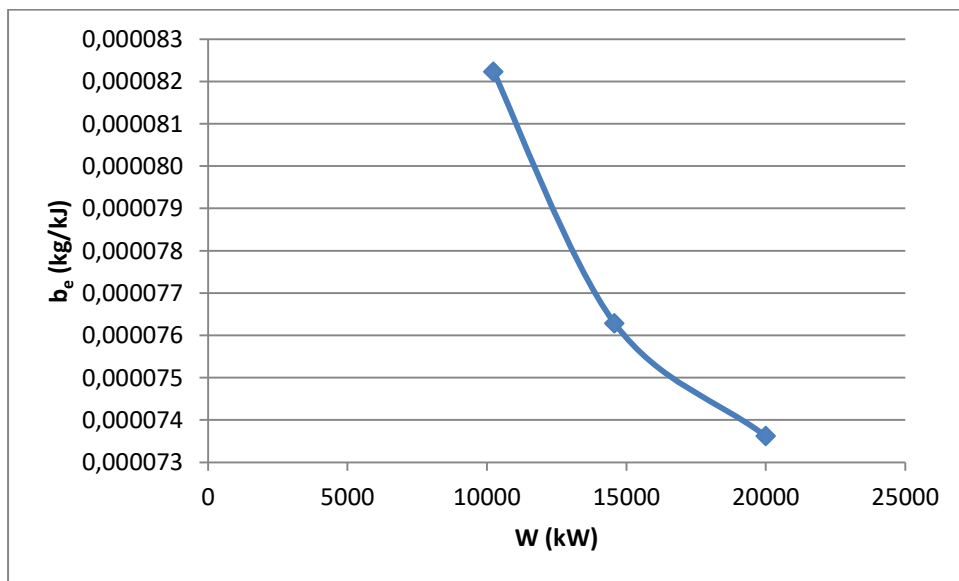


Διάγραμμα 4.19: Βαθμός απόδοσης του συμπιεστή (η_c) συναρτήσει της ισχύος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα του βαθμού απόδοσης καθώς και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της ισχύος.



Διάγραμμα 4.20: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της ισχύος (a) και της ταχύτητας περιστροφής (b).



Διάγραμμα 4.21: Ειδική κατανάλωση καυσίμου (b_e) συναρτήσει της ισχύος.

Όπως στην περίπτωση αεριοστροβίλου συζευγμένου με έλικα μεταβλητού βήματος, έτσι και στην περίπτωση με έλικα σταθερού βήματος ο βαθμός απόδοσης μειώνεται σε μερικό φορτίο, ενώ η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται, όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 4.20 και 4.21.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από την ανάλυση που προηγήθηκε φαίνεται ότι οι αεριοστροβίλοι παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε ό,τι αφορά τα θερμοδυναμικά τους χαρακτηριστικά σε σημεία λειτουργίας εντός και εκτός του σημείου σχεδιασμού τους.

Από τα διαγράμματα της Ενότητας 4.3 βγαίνουν χρήσιμα συμπεράσματα για το πώς επηρεάζεται ο βαθμός απόδοσης καθώς και η ειδική ισχύς από τον λόγο πίεσης και την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου. Φάνηκε η ύπαρξη βέλτιστης τιμής του λόγου πίεσης, δηλαδή τιμής που μεγιστοποιεί τον βαθμό απόδοσης ή την ειδική ισχύ. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης παρουσιάζεται σε λόγο πίεσης μεγαλύτερο από ό,τι η μέγιστη ειδική ισχύς (για ίδια τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας). Για κάθε τιμή μέγιστης θερμοκρασίας, μπορούν να προσδιοριστούν τα δύο βέλτιστα: το σημείο μέγιστου βαθμού απόδοσης και το σημείο μέγιστης ειδικής ισχύος. Είναι λοιπόν χρήσιμο ανάλογα με την εφαρμογή να επιλέγεται το βέλτιστο σημείο.

Από τα διαγράμματα της Ενότητας 4.5 παρατηρείται ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία ενός αεριοστροβίλου. Συγκεκριμένα για αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος παρατηρείται μείωση της ισχύος εξόδου των αεριοστροβίλων. Σε αυξημένη θερμοκρασία περιβάλλοντος μειώνεται ο βαθμός απόδοσης και αυξάνεται η κατανάλωση καυσίμου. Ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή καθώς και του στροβίλου μειώνονται με αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Στην Ενότητα 4.6, φαίνεται ότι η λειτουργία του αεριοστροβίλου υπό μερικό φορτίο επηρεάζει αρνητικά τον βαθμό απόδοσης και την ειδική κατανάλωση καυσίμου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε μειωμένο φορτίο μειώνεται ο βαθμός απόδοσης του συμπιεστή και του στροβίλου καθώς και η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου. Μια καλή πρακτική για τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης σε τέτοιες περιπτώσεις είναι η εγκατάσταση πολλών αεριοστροβίλων. Έτσι, διακόπτοντας τη λειτουργία του ενός αεριοστροβίλου το φορτίο μοιράζεται σε λιγότερες μηχανές, οι οποίες με τον τρόπο αυτό λειτουργούν σε φορτίο πιο κοντά στο ονομαστικό και επομένως με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης.

Η μελέτη θα μπορούσε να επεκταθεί και σε πιο περίπλοκες διατάξεις, όπως μονάδα με χωριστό στροβίλο ισχύος, ή συστήματα με μία ή περισσότερες βελτιωτικές διεργασίες, όπως αναθέρμανση, ενδιάμεση ψύξη, αναγεννητική προθέρμανση. Εφόσον, η λειτουργία υπό μερικό φορτίο έχει αρνητικές συνέπειες για τον βαθμό απόδοσης, θα φαινόταν καλύτερα το πλεονέκτημα των σύνθετων διατάξεων που παρουσιάζουν μικρότερη μεταβολή του βαθμού απόδοσης κατά τη λειτουργία υπό μερικό φορτίο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Saravanamuttoo H.I.H., Rogers G.F.C. and Cohen H. (2001) "Gas Turbine Theory", 5th ed., Pearson Education (Prentice Hall), Harlow, England.
2. Φραγκόπουλος, Χ. Α. (2002) "Προηγμένα Ναυτικά και Θαλάσσια Ενεργειακά Συστήματα", Δ.Π.Μ.Σ «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη» Ε.Μ.Π.
3. Zhou P.L. and Jefferson M. (1998), "The Performance of Marine Propulsion Gas Turbines under Variable Atmospheric Conditions", 22nd CIMAC.
4. Korakianitis T. (1992), "Marine gas turbines: cycle-parameter choices and shaft arrangement effects on performance", Transactions of the Institute of Marine Engineers.
5. Polyzakis A.L., "Technoeconomic Evaluation Of Trigeneration Plant: Gas Turbine Performance, Absorption Cooling And District Heating", Phd Thesis.
6. Π. Κούτμος (2008), "Εισαγωγή στις Βασικές αρχές της θεωρίας των αεριοστροβίλων", Πανεπιστήμιο Πατρών.
7. Ρακόπουλος Κ. Δ. (1994), "Αρχές Βιομηχανικών Αεριοστροβίλων", Εκδόσεις Γρ. Φούντα, Αθήνα.
8. Woud H. K. and Stapersma D. (2002), "Design of propulsion and Power Generation Systems", The Institute of Marine Engineering, Science and Technology, London, UK.
9. <http://www.marinetalk.com/articles-marine-companies/art/New-Team-Behind-WR-21-Engine--ROL00562834TU.html>