

Θερμικές Μηχανές (Κινητήρες)

Μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ)

- κινητήρες *Otto*
- *Diesel*
- αεριοστρόβιλοι (κινητήρες *Brayton*)

Μηχανές εξωτερικής καύσης

- διατάξεις με ατμοστρόβιλο (*Rankine*)
- κινητήρες *Stirling*
- *Ericsson*

Μη Συνεχούς ροής

1ος θερμοδυναμικός νόμος
για κλειστά συστήματα

- κινητήρες *Otto*
- *Diesel*
- *Stirling*

Συνεχούς ροής

1ος θερμοδυναμικός νόμος
για ανοικτά συστήματα

- αεριοστρόβιλοι (κινητήρες *Brayton*)
- διατάξεις με ατμοστρόβιλο (*Rankine*)
- κινητήρες *Ericsson*

Αεριοστρόβιλος (Gas Turbine, GT)

Εφαρμογές όπου απαιτείται :

- παραγωγή μεγάλης ισχύος με μικρό βάρος
- υψηλή αξιοπιστία/διαθεσιμότητα
- ικανοποιητική θερμική απόδοση

Δηλαδή: προώθηση αεροπλάνων, ελικοπτέρων (αεροπορικές)

πρόωση πλοίων, (ναυτικές)

παραγωγή ισχύος σε αντλίες αγωγών πετρελαίου/φυσικού αερίου

παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος

Πλεονεκτήματα (ΜΕΚ συνεχόμενης ροής):

- μεγάλη παραγωγή ισχύος σε σχέση με το μέγεθος ή το βάρος
- απουσία παλινδρομικών κινήσεων (ελαχιστοποίηση τριβόμενων τμημάτων)
- βαθμός θερμικής απόδοσης $\eta_{th} = 32-45\%$ αλλά μπορεί να γίνει πολύ μεγαλύτερος
- καύσιμα: **υγρά** (προϊόντα διύλισης του πετρελαίου όπως αεροπορικά καύσιμα, *biodiesel*)
αέρια φυσικό αέριο (NG), αεριοποιημένος άνθρακας (*syngas*) βιοαέριο
- Καυσαέρια: μειωμένα σε σχέση με την ισχύ

Αεριοστρόβιλος (Gas Turbine, GT)

Μειονεκτήματα:

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

Μηχανές Diesel/Otto

- Λειτουργία: στηρίζεται σε παλινδρομική κίνηση εμβόλων
- Υψηλές τιμές ισχύος οδηγούν σε δύο επιλογές:
 - αύξηση του όγκου-κυβισμού του κυλίνδρου ή και τον αριθμό των κυλίνδρων
 - χρήση τεχνολογίας υπερπλήρωσης (*turbocharger, compressor* ή *συνδυασμό αυτών*)
- Βαθμοί απόδοσης για τους Otto $\eta_{th} \approx 43\%$
Diesel $\eta_{th} \approx 47\%$
- Αντέχουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες όπως $T_{stoich} \approx 2,500K$
- Καύσιμα κυρίως υγρά καύσιμα:
 - βενζίνη (*diesel*),
 - πετρέλαιο (*petrol*),
 - βαρέα αποστάγματα του πετρελαίου (*mazut, crude oil*),
 - βιοκαύσιμα (*biodiesel*),
 - υγραέριο (*Liquefied Pressurized Gas, LPG*)
- Όγκος αρκετά μεγαλύτερος από τον όγκο αντίστοιχης ισχύος αεριοστρόβιλου, όταν πρόκειται για εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος

Μηχανές Diesel/Otto

Καυσαέρια

- Diesel, πρόβλημα η εκπομπή σχετικά μεγάλης ποσότητας άκαυστου άνθρακα (soot) όταν αυτοί δεν είναι καλά συντηρημένοι και SO_x όταν τα καύσιμα είναι κακής ποιότητας
- Otto το κύριο πρόβλημα CO όταν η καύση είναι ατελής και οξειδίων του αζώτου (NO_x) λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών καύσης
- Μοιάζουν τόσο σε σύσταση όσο και σε ποσότητα με αυτά των αντίστοιχης ισχύος αεριοστρόβιλων

Ατμοστρόβιλοι (Steam Turbines, STs)

- Χρήση σε: ατμοηλεκτρικά ή θερμοηλεκτρικά εργοστάσια, (thermal Power Plants, PPs)
- Βαθμός απόδοσης: $\eta_{th} = 40-49\%$

Αιτία:

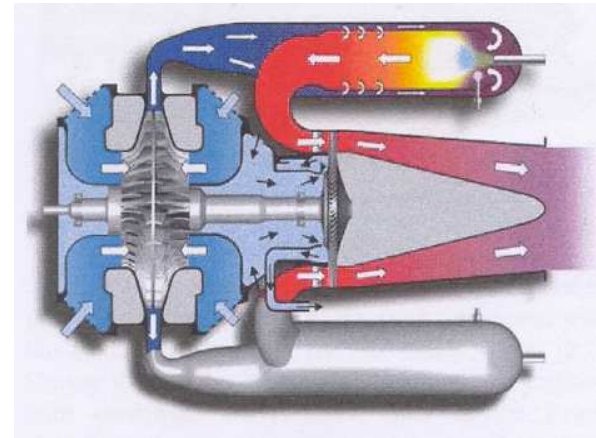
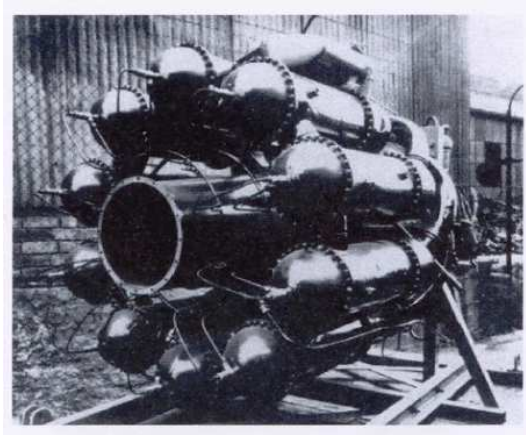
Η υψηλότερη τιμή της απόδοσης σε σχέση με την αντίστοιχη των αεριοστρόβιλων, οφείλεται στην μικρή κατανάλωση έργου συμπίεσης (από την αντλία τροφοδοσίας), εξαιτίας του γεγονότος ότι το εργαζόμενο μέσο όταν συμπιέζεται βρίσκεται σε υγρή φάση (νερό), ενώ η εκτόνωση πραγματοποιείται -όπως και στους αεριοστρόβιλους- από το εργαζόμενο μέσο όταν αυτό βρίσκεται σε αέρια φάση (ατμός).

Μειονεκτήματα ατμοηλεκτρικών εργοστασίων, ΑΗΣ

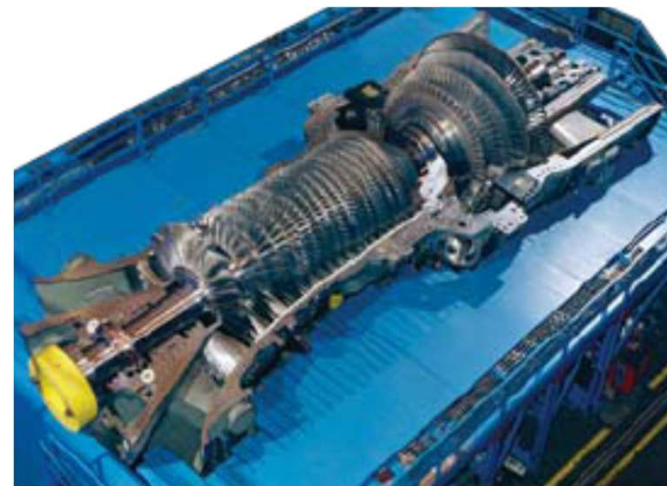
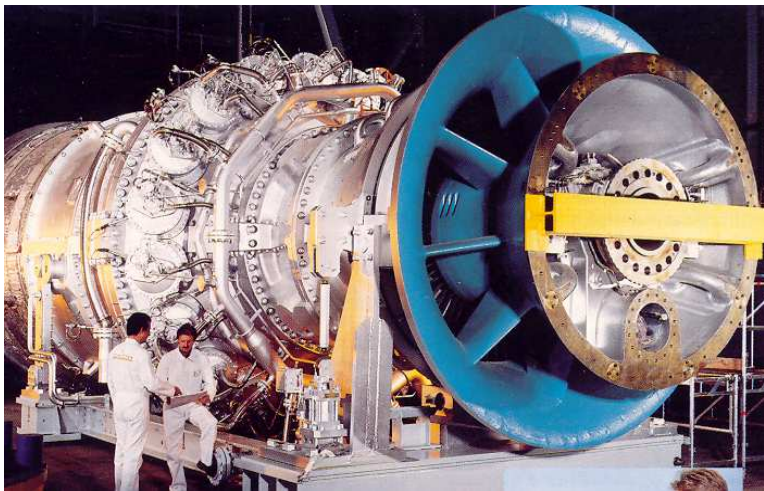
- Εγκαταστάσεις ογκώδης και πολύπλοκες, υψηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης
- Μεγάλος χρόνος κατασκευής, (2-4 χρόνια)
- Η θερμότητα προέρχεται από την καύση συμβατικών ορυκτών καυσίμων όπως ο λιθάνθρακας, το πετρέλαιο ή βιοκαυσίμου, είτε πυρηνικών καυσίμων (με χρήση πυρηνικού αντιδραστήρα, nuclear reactor)
- Εκπομπή αέριων ρύπων SO_2 , CO_2 , αιωρούμενα σωματίδια και τέφρα
- Εξορυκτική διαδικασία του καυσίμου, ειδικά όταν γίνεται επιφανειακά, επιβαρύνει σημαντικά το περιβάλλον
- Κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων νερού στους πύργους ψύξεως (cooling towers)
- Οι πυρηνικές εγκαταστάσεις επιβαρύνουν το περιβάλλον με πυρηνικά απόβλητα, ενώ φυσικά πάντα ελλοχεύει ο κίνδυνος διαρροής ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα μετά από κάποιο σοβαρό ατύχημα ή σεισμό.

Ιστορική αναδρομή

Άγγλος μηχανικός *Frank Whittle* (1937), λειτούργησε τον πρώτο αεριοστρόβιλο (**W1**):



Ηλεκτροπαραγωγή

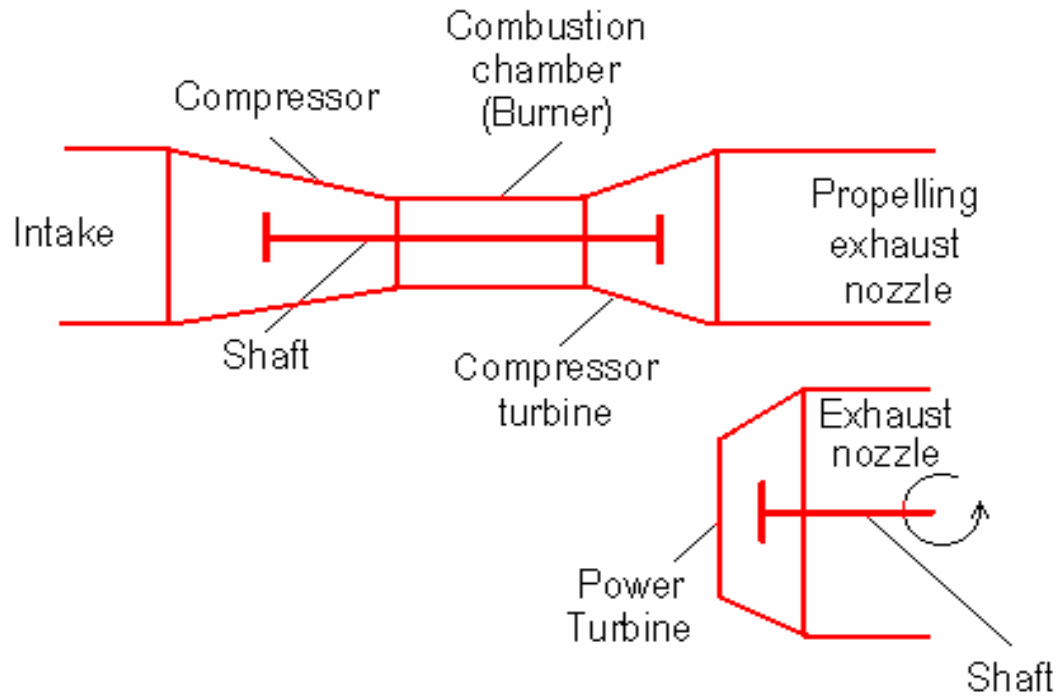


Εφαρμογές στην παραγωγή ισχύος

Εργοστάσια συνδυασμένου κύκλου (Combined Cycle Power Plant, CCPP): αεριοστρόβιλος + ατμοστρόβιλος

- Παραγωγή ισχύος αρχικά από αεριοστρόβιλο, τα καυσαέρια του οποίου χρησιμοποιούνται για να θερμάνουν νερό, μετατρέποντάς το σε ατμό, που με την σειρά του δίνει κίνηση σε έναν ατμοστρόβιλο
- Συνολική θερμική απόδοση της τάξης του 52-65%.
- Αν εγκατασταθούν συστήματα τηλεθέρμανσης (**Συμπααραγωγή**, *Combined Heat and Power*, CHP) ή και τηλεψύξης (**Τρι-παραγωγή**, *Combined Heat Cooling and Power*, CHCP ή *Tri-generation*), τα οποία εκμεταλλεύονται την απορριπτόμενη στο περιβάλλον θερμότητα το χειμώνα και το καλοκαίρι αντίστοιχα, τότε
- Θερμική απόδοση στο 75 ή και στο 95%, αντίστοιχα.

Αρχή Λειτουργίας



Θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στον στρόβιλο
(Turbine Entry Temperature, TET ή Turbine Inlet Temperature, TIT)

Θερμοκρασία ακριβώς μετά την πρώτη σειρά σταθερών πτερυγίων του στρόβιλου (Stator Outlet Temperature, SOT)

Αρχή Λειτουργίας

Βασικές Επιδόσεις: ολική απόδοση η_{th} και ωφέλιμο έργο UW

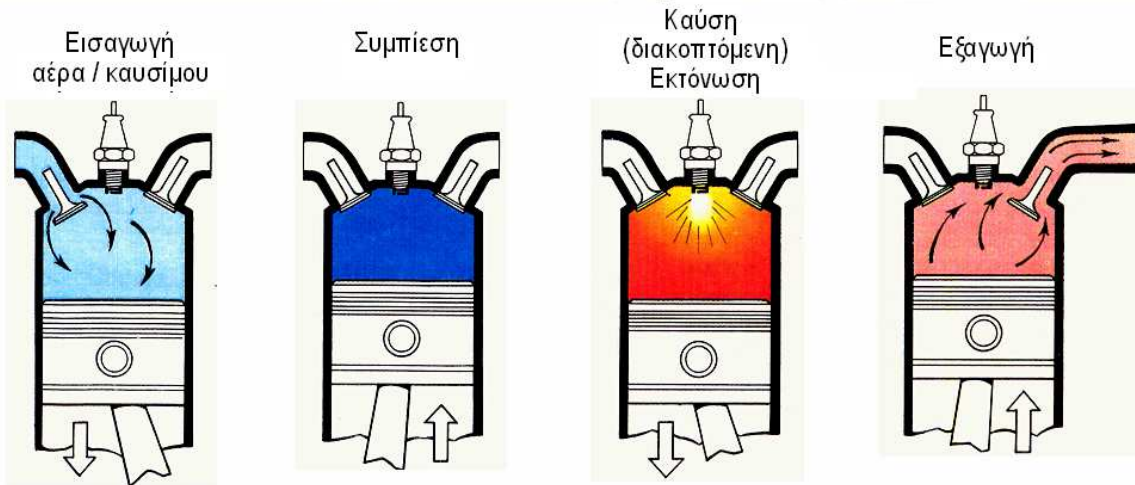
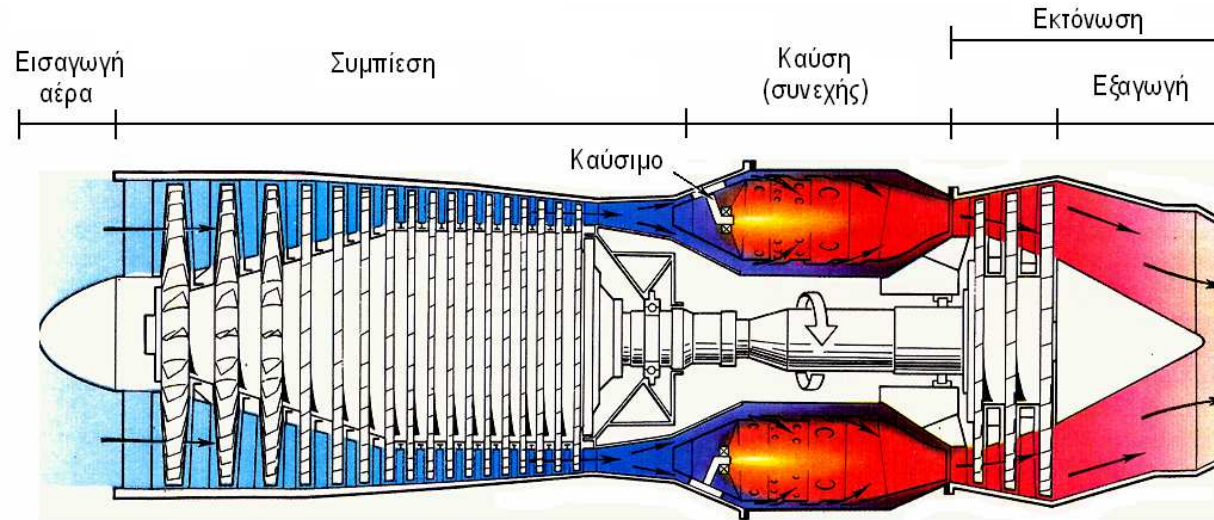
Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων και καθορίζουν τις επιδόσεις τους :

- Η θερμοκρασία λειτουργίας TET, (εξαρτάται από την παροχή καυσίμου και τις συνθήκες καύσης)
- Ο λόγος πίεσης του συμπιεστή R_c (εξαρτάται από την παροχή καυσίμου \dot{m}_f).
- Η παροχή αέρα (*mass flow* \dot{m})
- Η διάμετρος της εισαγωγής και επηρεάζει την παροχή αέρα
- Η απόδοση (η) κάθε τμήματος, (εισαγωγή, συμπιεστής, στρόβιλος, θάλαμος καύσης, εναλλάκτης, εξαγωγή κ.λπ.)
- Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, (θερμοκρασία T_{amb} , πίεση P_{amb} , υγρασία H)

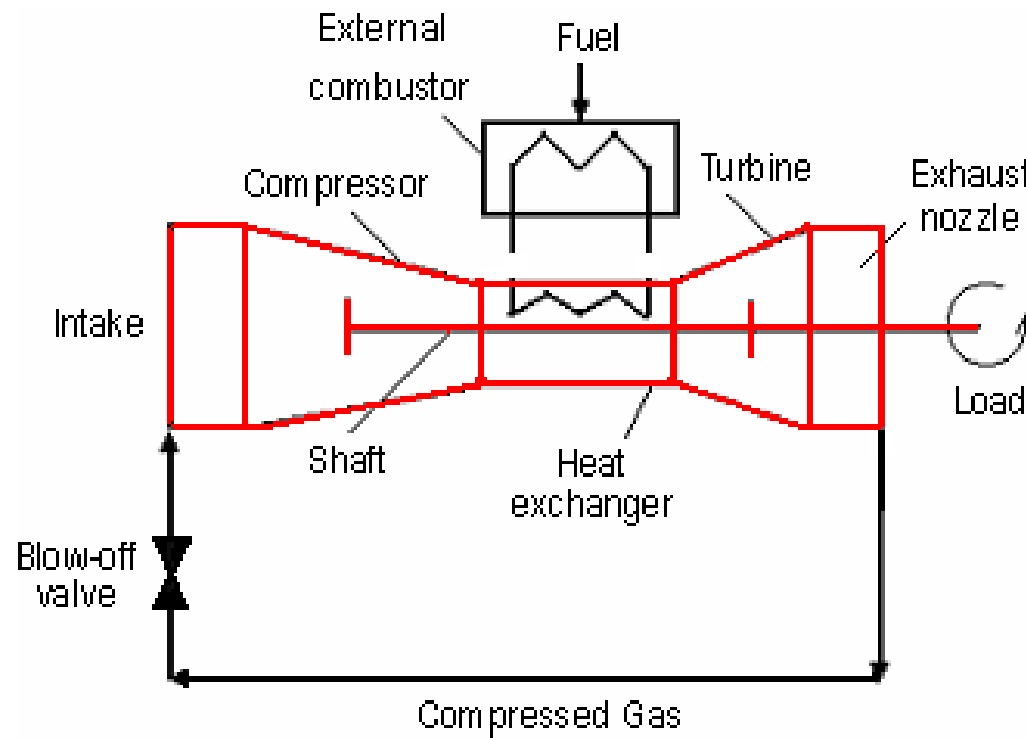
Σήμερα (state of the art):

- λόγοι πίεσης πάνω από **45:1** (μεγάλοι πολιτικοί turbofan),
- απόδοση συμπιεστή 90-95%,
- θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο **TET = 1,800 με 2,100K**.

Ανοικτού κύκλου (open cycle)



Κλειστού κύκλου (closed cycle)



Κλειστού κύκλου (closed cycle)

Πλεονεκτήματα (closed cycle):

- Δυνατότητα χρήσης αερίου υπό πολύ υψηλή πίεση μέσα στο κλειστό κύκλωμα,
- Το μέγεθος του κινητήρα να είναι σχετικά μικρό για δεδομένη ισχύ
- Δυνατότητα αυξομείωσης της ισχύος εξόδου με την αλλαγή της πίεσης του αερίου και όχι μόνο με την ρύθμιση της παροχής καυσίμου, δηλαδή την μεταβολή της TET
- Μερικό φορτίο: μπορεί να μειωθεί η ισχύς μειώνοντας την πίεση του κλειστού κυκλώματος, ενώ η TET διατηρείται σταθερή. Έτσι, επιτυγχάνεται αποδοτική λειτουργία του κινητήρα ακόμα και σε μερικό φορτίο όπου αναγκαστικά η TET και ο λόγος πίεσης R_C θα έπρεπε να μειωθούν, με αρνητικές συνέπειες στην απόδοση του κινητήρα
- Αύξηση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη θερμότητας με την αύξηση της πίεσης του κλειστού κυκλώματος, λόγω της υψηλής πυκνότητας του αερίου

Κλειστού κύκλου (closed cycle)

Πλεονεκτήματα (closed cycle):

- Οι απώλειες πίεσης λόγω τριβής είναι πολύ μικρότερες με το ήλιο, ενώ οι βέλτιστοι λόγοι πίεσης του κύκλου είναι χαμηλότεροι και η μεταφορά θερμότητας καλύτερη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μέγεθος του εναλλάκτη να ελαττώνεται έως και 50% σε σχέση με εκείνο που θα είχε στην περίπτωση του αέρα
- Αποφυγή προβλημάτων διαβρώσεως και φθοράς των πτερυγίων του στροβίλου που οφείλονται στα προϊόντα της καύσης στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες
- Δεν χρειάζεται φιλτράρισμα του εισερχόμενου αέρα στον αεριοστρόβιλο, ανάγκη που εμφανίζεται σε αεριοστρόβιλους που λειτουργούν με ανοικτό κύκλο, ειδικά σε εφαρμογές όπου ο περιβάλλον αέρας μπορεί να περιέχει ξένα σώματα π.χ. περιβάλλον ερήμου

Κλειστού κύκλου (closed cycle)

Μειονεκτήματα (closed cycle):

- Ανάγκη ύπαρξης ενός εξωτερικού συστήματος θέρμανσης, (εναλλάκτης θερμότητας αερίου-αερίου).
- Η ανώτατη επιτρεπτή θερμοκρασία λειτουργίας των επιφανειών του θερμαντήρα περιορίζει την ΤΕΤ.
- Προβλήματα με διαρροές στο κλειστό κύκλωμα υψηλής πίεσης.

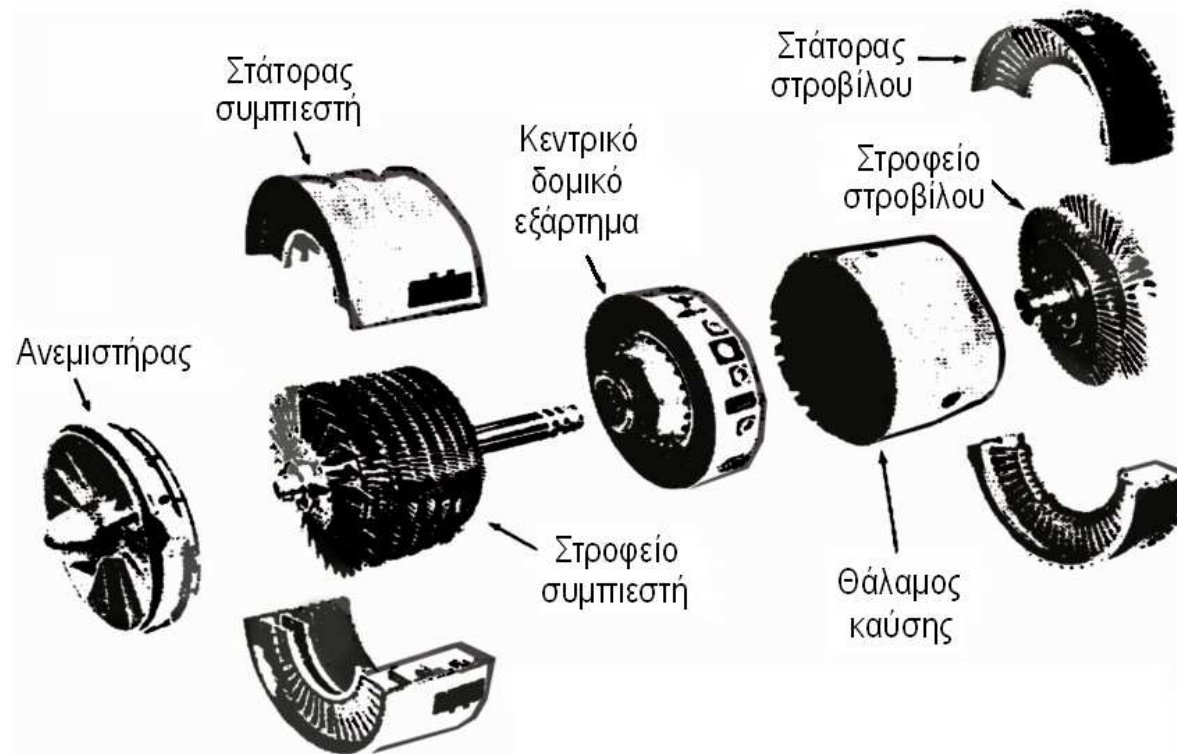
Εφαρμογές (closed cycle):

Με αέριο ήλιο είναι δυνατή η χρησιμοποίηση αυτού του τύπου των αεριοστρόβιλων σε συνδυασμό με πυρηνικούς αντιδραστήρες για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος πάνω από 250MW, (μονάδες στη Ν. Αφρική, με $\eta_{th}=40-42\%$).

Ανοικτού κύκλου (open cycle):

Ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται από την εισαγωγή, οδηγείται στον συμπιεστή όπου συμπιέζεται ενώ ενέργεια προστίθεται με την καύση κάποιου καυσίμου και του αέρα στο θάλαμο καύσης. Στη συνέχεια τα καυσαέρια που δημιουργούνται εκτονώνονται στον ή στους στροβίλους ή/και στο προωθητικό ακροφύσιο και τελικά εξέρχονται στην ατμόσφαιρα. Η λειτουργία συνεχίζεται με την εισαγωγή νέας, «φρέσκιας» μάζας αέρα.

Κύρια Εξαρτήματα των Αεριοστρόβιλων



Αεριοπαραγωγός (Gas Generator, GG)

Θερμικοί εναλλάκτες (Heat Exchanger HX, Intercooler IC).

Συμπιεστής

Αποτελείται: βαθμίδες (stages)

Βαθμίδα αποτελείται: από μια σειρά περιστρεφόμενων πτερυγίων (blades) + από μια αντίστοιχη σειρά ακίνητων πτερυγίων (vanes).

Πριν από τη πρώτη κινητή σειρά πτερυγίων της πρώτης βαθμίδας υπάρχει μία σειρά σταθερών πτερυγίων που αποκαλούνται οδηγά (Inlet Guide Vanes, IGVs), ενώ μπορεί οι σειρές σταθερών πτερυγίων των πρώτων βαθμίδων να έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφουν γύρω από τον διαμήκη άξονά τους τα σταθερά πτερύγιά τους (Variable (geometry) Guide Vanes, VGVs).

Τα ακίνητα πτερύγια προσδένονται περιφερειακά στην εσωτερική επιφάνεια του περιβλήματος (casing) και αποτελούν τον ονομαζόμενο στάτορα (stator) του συμπιεστή, ενώ τα περιστρεφόμενα προσδένονται στους δίσκους και μαζί συνθέτουν το στροφείο ή ρότορα (rotor).

Μερικοί συμπιεστές στις τελευταίες βαθμίδες, διαθέτουν βαλβίδες εκτόνωσης ή αλλιώς απομάστευσης (blow off ή bleed valves), που χρησιμεύουν και αυτές -όπως και τα πτερύγια μεταβλητής γεωμετρίας- στην εξασφάλιση ομαλής λειτουργίας του συμπιεστή εκτός του σημείου σχεδιασμού, αλλά και για την ψύξη του κινητήρα,

Συμπιεστής

Βαθμίδα: ↑ την πίεση του αέρα περίπου κατά **30%**, και την θερμοκρασία κατά περίπου **30°C**, λόγω πρόσδοσης ενέργειας από τις blades της βαθμίδας

Οι vanes χρησιμεύουν μόνο στην αλλαγή της κατεύθυνσης ροής του αέρα έτσι ώστε να οδηγηθεί με κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης στην επόμενη βαθμίδα.

Οι αξονικές ταχύτητες του αέρα στο συμπιεστή: **150-200m/s**, ενώ η παροχή φθάνει τα **500kg/s**.

Λειτουργία του συμπιεστή ↔ ολική λειτουργία και απόδοση του κινητήρα

Ρόλοι του συμπιεστή:

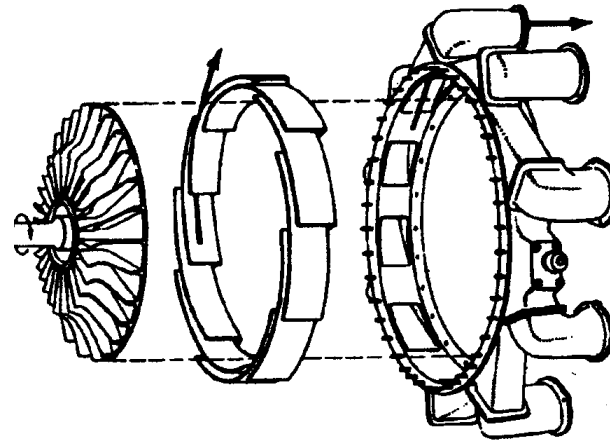
- συμπιέζει τον εισερχόμενο αέρα, \Rightarrow στην έξοδο πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα. Έτσι, η παραγόμενη ώση θα είναι μεγάλη αφού ο κινητήρας θα μπορεί να χειρίζεται πάρα πολύ μεγάλες ποσότητες αέρα σε σύγκριση με το μικρό του όγκο
- παροχή αέρα για την ψύξη του τμήματος του στροβίλου
- παροχή αέρα για τη λειτουργία του συστήματος αντιπάγωσης (anti-icing)
- παροχή αέρα για τις ανάγκες της καμπίνας πληρώματος ή/και επιβατών (αεροπορικές εφαρμογές)
- παροχή αέρα για τη λειτουργία βοηθητικών εξαρτημάτων που λειτουργούν «πνευματικά»

Συμπιεστής

Η ποσότητα του αέρα που συμπιέζεται καθώς και η αύξηση της πίεσης εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής (*rotational speed, N*) του κινητήρα.

Όσο αυτή αυξάνεται, επιτυγχάνεται και μεγαλύτερη συμπίεση. Η αύξηση της πίεσης εξαρτάται και από τη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής. Όταν αυτή λαμβάνει χαμηλές τιμές, τότε η συμπίεση είναι ευκολότερη και μεγαλύτερη.

Φυγοκεντρικός συμπιεστής:



Χαρακτηριστικά:

- αποτελείται από 1 ή 2 βαθμίδες το πολύ,
- αποδίδει σε φάσμα περιστροφών 20,000-90,000rpm, είναι απλός, ελαφρύς, συμπαγής και άρα ανθεκτικός σε περίπτωση αναρρόφησης ξένων σωμάτων, φθηνός στη κτήση του και εύκολος στην εκκίνησή του

Συμπιεστής

- Η βαθμίδα του φυγοκεντρικού παρουσιάζει υψηλότερο βαθμό-λόγο πίεσης (**3.5:1** ή **4:1**) σε σύγκριση με την αντίστοιχη βαθμίδα του αξονικού συμπιεστή.
- Όμως, η προσθήκη περισσότερων των δύο βαθμίδων κρίνεται ασύμφορη λόγω των εκθετικά αυξανόμενων απωλειών ενέργειας ροής, εξαιτίας της μεγάλης μεταβολής της κατεύθυνσης ροής του αέρα.
- Έτσι, επιτυγχάνεται τελικά σχετικά μικρός ολικός λόγος πίεσης, εξαιτίας του περιορισμένου αριθμού βαθμίδων συμπίεσης (ολικός λόγος πίεσης της τάξης του 15:1).
- Πλεονέκτημα: είναι η συμπαγής και στιβαρή κατασκευή του. Από την άλλη μεριά, παρουσιάζει σχετικά μεγάλη μετωπική επιφάνεια, ενώ κρίνεται ακατάλληλος για υψηλές συμπίεσεις μεγάλων παροχών αέρα.

Χρησιμοποιείται από κινητήρες μικρής ή μέτριας σχετικά ισχύος, (π.χ. ελικόπτερα).

Συμπιεστής

Αξονικός συμπιεστής:

- αποτελείται από πολλές βαθμίδες (8-20)
- εκμεταλλεύεται την ορμή του εισερχόμενου αέρα
- μπορεί να δώσει πολύ υψηλούς ολικούς λόγους
- Ο συμπιεστής μπορεί να χωρίζεται σε περισσότερα από ένα τμήματα, (δηλαδή ομάδες βαθμίδων μηχανικά συνδεδεμένες μεταξύ τους που περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα) που ονομάζονται τύμπανα (spools) και συνδέονται μεταξύ τους αεροδυναμικά.
- Αποδίδει σε φάσμα περιστροφών 10,000-30,000rpm.
- Αναρρόφηση ατμοσφαιρικού αέρα με παροχή μέχρι $\dot{m} \approx 150\text{kg/s}$ και ταχύτητα $\approx 0.4\text{M}$.
- Αδιαβατικός (ισεντροπικός) βαθμός απόδοσης **0.80-0.93**
- Λόγος πίεσης **1.30-1.45** ανά βαθμίδα, 10-12 ανά τύμπανο, 25-35 ανά συμπιεστή και 40-45 ολικό λόγο πίεσης

Συμπιεστής

Υλικά κατασκευής του συμπιεστή πρέπει να παρουσιάζουν αντοχή σε:

- υψηλές πιέσεις
- σχετικά μέσες θερμοκρασίες
- μεγάλες φυγοκεντρικές δυνάμεις
- σε αναρρόφηση ξένου σώματος

Για τα κινητά και τα σταθερά πτερύγια χρησιμοποιούνται κράματα αλουμινίου, χάλυβας, νικέλιο ή τιτάνιο, ανάλογα με τη θέση και τις συνθήκες λειτουργίας τους. Σε κάποιες εφαρμογές, σε χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, χρησιμοποιούνται πτερύγια από συνθετικό υλικό, οπότε επιτυγχάνεται εξοικονόμηση βάρους.

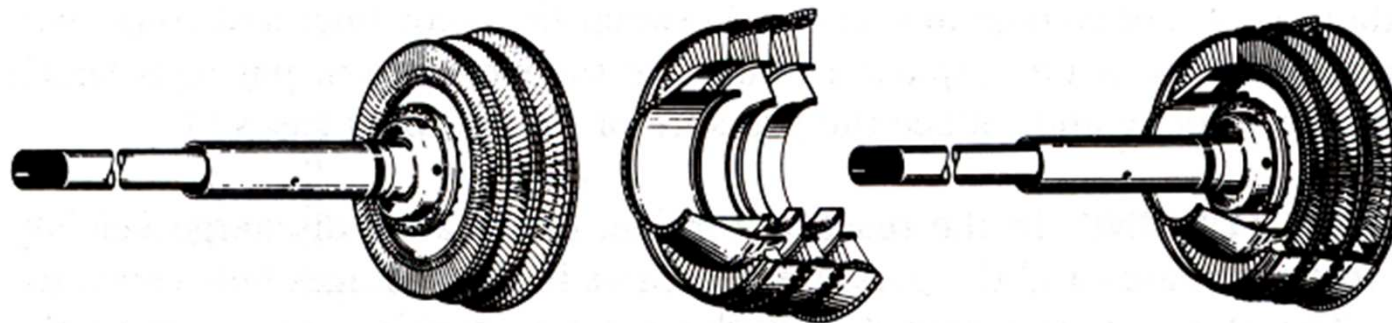
Το περίβλημα του συμπιεστή κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου ή μαγνησίου στο μπροστινό τμήμα του, ενώ για το οπίσθιο χρησιμοποιείται συνήθως χάλυβας.

Συμπιεστής

Στρόβιλος του συμπιεστή (Compressor Turbine, CT);

παρέχει ισχύ κυρίως για την κίνηση του συμπιεστή, αλλά και των διαφόρων παρελκόμενων συστημάτων του κινητήρα που χρειάζονται μηχανική ενέργεια

Στρόβιλος ισχύος (Power Turbine, PT), συναντάται κυρίως στους βιομηχανικούς αεριοστρόβιλους, ως δεύτερος μετά τον στρόβιλο του συμπιεστή. Οι δύο στρόβιλοι είναι «αεροδυναμικά» συνδεδεμένοι και όχι «μηχανικά». Ο στρόβιλος ισχύος παραλαμβάνει το υπόλοιπο μέρος της δύναμης εκτόνωσης των καυσαερίων, δίνοντας κίνηση στο ρότορα ενός καθοδηγούμενου μηχανήματος (π.χ. γεννήτριας, αντλίας, κ.λπ.) μέσω ενός δεύτερου άξονα.



Στρόβιλος

- Ο στρόβιλος αποτελείται από λιγότερες σε αριθμό βαθμίδες σαν το συμπιεστή
- Κάθε βαθμίδα στροβίλου προηγείται η σταθερή σειρά πτερυγίων (συνήθως αποκαλούνται Nozzle Guide Vanes, NGVs) και ακολουθεί η κινητή
- Τα πτερύγια του στροβίλου παρουσιάζουν μεγαλύτερη κυρτότητα και πάχος από αυτά του συμπιεστή, ενώ γενικά έχουν πολύ μικρότερο μήκος

Ο αριθμός των βαθμίδων του στροβίλου αλλά και ο αριθμός των στροβίλων (κατ' αντιστοιχία με τον συμπιεστή) εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

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

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου είναι **0.87-0.97**, ο λόγος εκτόνωσης ανά βαθμίδα στροβίλου είναι **2.0-2.4** και είναι αισθητά μεγαλύτερος από το λόγο της αντίστοιχης βαθμίδας του συμπιεστή.

Θάλαμος καύσης

Λειτουργεί σε συνθήκες πολύ φτωχού μίγματος, (σημαντική περίσσεια αέρα)

Για να συμβεί ανάφλεξη και να διατηρηθεί η καύση πρέπει τοπικά ο **λόγος παροχής μάζας αέρα/καύσιμου** (*Air/Fuel Ratio, AFR*), να κυμαίνεται από 8:1 έως 30:1.

Για κηροζίνη, η στοιχειομετρική αναλογία (που δίνει και τη μεγαλύτερη θερμοκρασία) απαιτεί λόγο αέρα/καύσιμου 15:1. Η αναλογία αυτή είναι επιθυμητό να παρουσιάζεται τοπικά στην κύρια ζώνη καύσης του θαλάμου καύσης.

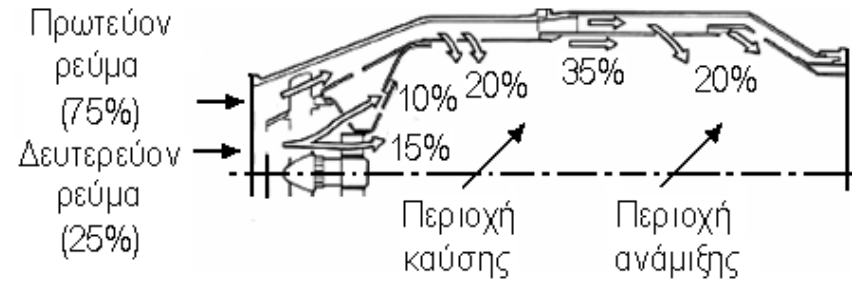
Όταν αναφερόμαστε συνολικά στο θάλαμο καύσης, τότε αυτός λειτουργεί με λόγο AFR που κυμαίνεται από 50:1 έως 70:1 ή και μεγαλύτερο,

Η ταχύτητα εισόδου του αέρα στο θάλαμο καύσης είναι αυτή με την οποία εξέρχεται από το συμπιεστή (150-200m/s). Απαγορευτική, λόγω μεγάλης απώλειας πίεσης

Επομένως, πρέπει η είσοδος του θαλάμου καύσης να έχει την μορφή διαχύτη έτσι ώστε η ταχύτητα του ρεύματος αέρα να είναι της τάξης των 25m/s, τιμή επίσης μεγάλη για καλή καύση.

Η περαιτέρω μείωσή της σε τιμές της τάξης των **5m/s** επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός διάτρητου δίσκου ο οποίος αποτελεί εξάρτημα του θαλάμου καύσης και βρίσκεται περιφερειακά από τον εγχυτήρα καυσίμου.

Θάλαμος καύσης



Ο θάλαμος καύσης είναι συνεχούς λειτουργίας, δηλαδή ο ή οι **σπινθηριστές (μπουζί, spark)** χρησιμοποιούνται για έναυση μόνο στην αρχή και μετά αποσύρονται, ενώ η καύση διατηρείται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στην πρωτεύουσα ζώνη και της συνεχούς ροής αέρα και καυσίμου.

Ο σπινθηριστής έχει ικανότητα παραγωγής έως και 100 σπινθήρων ανά λεπτό.

Η διεργασία της καύσης είναι σχεδόν ισοβαρής (σταθερής πίεσης).

Εξαιτίας της μεγάλης πίεσης, της μεγάλης περίσσειας αέρα και του μικρού μήκους του θαλάμου (ο όγκος του θαλάμου μπορεί να είναι 10 με 20 φορές μικρότερος από τον αντίστοιχο όγκο του λέβητα), ενώ απαιτείται πολύ προσεκτικός έλεγχος της ευστάθειας της καύσης.

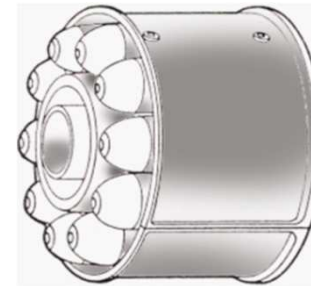
Θάλαμος καύσης



**Πολλαπλός
σωληνωτός (Can
type ή tubular):**



**Δακτυλιοειδής
(Annular type)**



**Σωληνο-
δακτυλιοειδής
(Can-annular ή
tubo-annular type)**

Πολλαπλός σωληνωτός:

- εύκολη κατασκευή λόγω της μικρής διαμέτρου των θαλάμων καύσης
- η προσομοίωση του συστήματος καύσης μπορεί να γίνει μόνο για τον ένα φλογοσωλήνα και τ' αποτελέσματα να αναχθούν στο σύνολο των φλογοσωλήνων
- Η επιθεώρηση και η συντήρηση είναι ευκολότερη, λόγω της σπονδυλωτής του κατασκευής

Θάλαμος καύσης

- Ύπαρξη διακριτών αγωγών, δηλαδή πολύπλοκων και βαρειών αγωγών για να οδηγούν τον αέρα από το συμπιεστή στο θάλαμο καύσης
- Συγκριτικά με το δακτυλιοειδή για την ίδια παροχή αέρα, προκειμένου να επιτευχθεί «σωστή» καύση, είναι μεγαλύτεροι -είτε σε μήκος ή και σε διάμετρο- και βαρύτεροι, με αντίστοιχες συνέπειες στον κινητήρα
- Τυχόν κακή λειτουργία ενός φλογοσωλήνα οδηγεί σε τοπική υπερθέρμανση και ανομοιόμορφη ροή καυσαερίων προς τον στρόβιλο

Χρησιμοποιείται στους αεροπορικούς αεριοστρόβιλους με φυγοκεντρικό συμπιεστή και στους παλαιότερους με αξονικό. Επίσης, αποτελεί την κυρίαρχη επιλογή των περισσότερων βιομηχανικών αεριοστρόβιλων

Θάλαμος καύσης

Δακτυλιοειδής

Πλεονεκτήματα:

- «Καθαρό» αεροδυναμικό σχήμα και επομένως μικρότερη πτώση πίεσης
- Οι αγωγοί σύνδεσης με τον συμπιεστή και στρόβιλο είναι απλοί και ελαφρύς
- Μικρότερο μήκος, διάμετρος και βάρος έως και 25%
- Καλύτερη κατανομή της πίεσης περιφερειακά και καλύτερη/ταχύτερη μετάδοση της φλόγας (πλήρης και εύκολη καύση)

Μειονεκτήματα:

- Δυσκολότερη και πιο δαπανηρή ανάπτυξη. Η εξομοίωση της ροής είναι δυσκολότερη και πιο δαπανηρή, ενώ απαιτεί μελέτη της πλήρους ροής αέρα του κινητήρα
- Μηχανικά προβλήματα κυρίως στο εξωτερικό περίβλημα
- Δυσκολίες στη σωστή διαχείριση του «νέφους» ψεκασμού του καυσίμου
- Δυσκολότερη διατήρηση σταθερού θερμοκρασιακού προφίλ στην έξοδο του θαλάμου καύσης
Χρησιμοποιείται στους περισσότερους σύγχρονους αεροπορικούς κινητήρες

Σύστημα Εισαγωγής

Σύστημα Εισαγωγής: αγωγό εισαγωγής (intake duct) που προηγείται και τη εισαγωγή (intake)

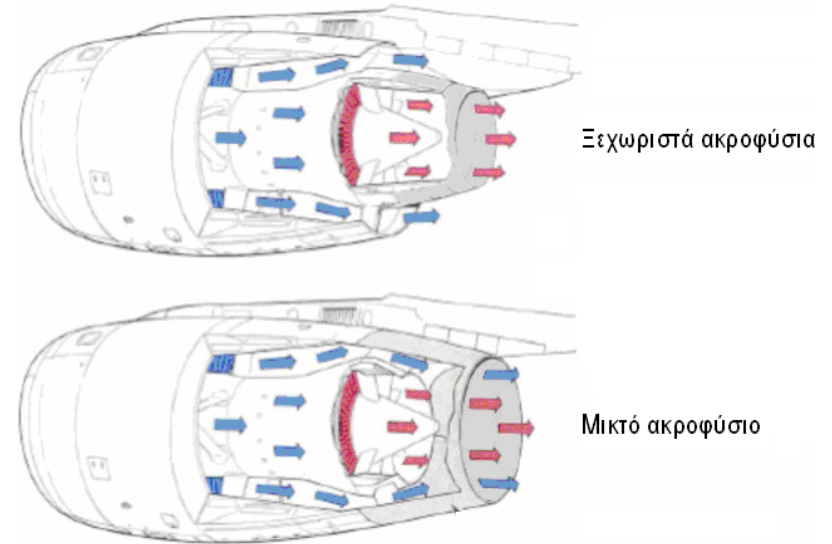
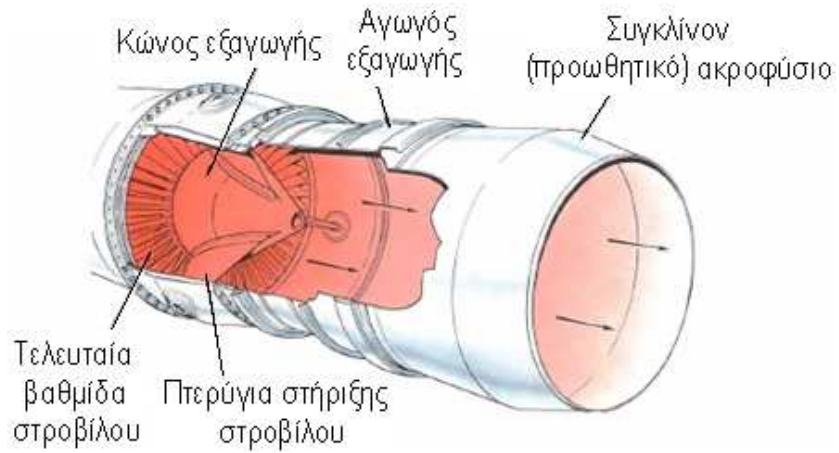
Ρόλοι:

- Στο τελευταίο τμήμα του, ακριβώς μπροστά από το συμπιεστή, η ροή επιβραδύνεται και έτσι η κινητική ενέργεια του εισαγόμενου αέρα μετατρέπεται σε ενέργεια πίεσης (ανάκτηση στατικής πίεσης, *ram recovery*)
- Σε ορισμένες εφαρμογές (βλέπε υπερηχητικά αεροσκάφη), επιβραδύνει τον εισερχόμενο αέρα από υπερηχητικές ταχύτητες σε υποηχητικές (0.4-0.7M)
- Ελαχιστοποιεί τις απώλειες (λόγω στροβιλισμών-τριβών)
- Φροντίζει για την ομαλοποίηση της ροής του εισερχόμενου αέρα
- Η εισαγωγή είναι σχεδιασμένη να αποδίδει τα μέγιστα για ορισμένες συνθήκες λειτουργίας. Όμως, είναι υποχρεωμένη να λειτουργεί σωστά και σε συνθήκες πολύ διαφορετικές από τις ιδανικές κυρίως όταν πρόκειται για αεροπορικό κινητήρα. Σε ορισμένες λοιπόν περιπτώσεις όπως κατά την απογείωση, έχει την δυνατότητα να οδηγεί επιπλέον αέρα στον συμπιεστή, ενώ σε άλλες να μειώνει την παροχή αέρα. Έτσι, μερικοί κινητήρες ειδικά σε υπερηχητικά αεροσκάφη διαθέτουν εισαγωγή μεταβλητής γεωμετρίας.

Σύστημα Εισαγωγής

- Μειώνει τα ηχητικά κύματα (θόρυβο, *noise*), που προέρχονται από το συμπιεστή, καθώς αυτός περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα. Συγκεκριμένα, η εσωτερική της επιφάνεια έχει πολλές μικρές κυψέλες με ειδικό ηχοαπορροφητικό υλικό
- Αποφυγή αναρρόφησης ξένων σωμάτων από τον κινητήρα, οπότε χρησιμοποιούνται φίλτρα στην είσοδο του αεραγωγού εισαγωγής. Η χρήση τους αφορά κατά κύριο λόγο κινητήρες ελικοπτέρων. Τα φίλτρα αυτά ονομάζονται διαχωριστές αδράνειας (*inertia separators*) τα οποία αρχικά επιταχύνουν ακτινικά τον αέρα εισαγωγής και μετά όντας «καθαρός» πλέον τον οδηγούν στην είσοδο του συμπιεστή

Σύστημα Εξαγωγής



- Καυσαέρια του πυρήνα (υψηλής θερμοκρασίας)
- Αέρας που παρακάμπτει τον πυρήνα (χαμηλής θερμοκρασίας)



F100

Θερμικοί Εναλλάκτες (heat exchangers)

Έχουν διαφορετική μορφή ανάλογα με τη θέση τους στο θερμοδυναμικό κύκλο: κλασσικός (*recuperator*), αναγεννητικός (*regenerative*), ενδιάμεσος ψύκτης (*intercooler*) και ο αντικαταστάτης του θαλάμου καύσης στους GTs κλειστού κύκλου.

Είναι του τύπου αέριο-αέριο ή αέριο-υγρό, και διαφόρων τεχνολογιών, όπως σταυρωτοί, αντιρροής κ.λπ. Ανάλογα τον τύπο η απόδοσή τους κυμαίνεται από **0.75-0.90**.

Συστήματα Ελέγχου

Ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης και ελέγχου του κινητήρα (*Full Authority Digital Engine Control, FADEC*), **Συστήματα ελέγχου των εκπομπών καυσαερίων**, (*Dry Low Emissions gas turbines, DLE*), διατηρούν ανά πάσα στιγμή, την λειτουργία του κινητήρα εντός των προβλεπόμενων κατασκευαστικών ορίων, ενώ ταυτόχρονα να διατηρούνται στο βέλτιστο δυνατό επίπεδο οι επιδόσεις του βοηθητικά συστήματα όπως το σύστημα παροχής καυσίμου, λίπανσης, υδραυλικών συστημάτων καθοδήγησης, γεννήτριας, πυρόσβεσης, αποπυροποίησης και κλιματισμού του αεροσκάφους.

Συστήματα Ελέγχου

- **Ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης και ελέγχου του κινητήρα, (*Full Authority Digital Engine Control, FADEC*)**
- **Συστήματα ελέγχου των εκπομπών καυσαερίων, (*Dry Low Emissions gas turbines, DLE*)**

διατηρούν ανά πάσα στιγμή, την λειτουργία του κινητήρα εντός των προβλεπόμενων κατασκευαστικών ορίων, ενώ ταυτόχρονα να διατηρούνται στο βέλτιστο δυνατό επίπεδο οι επιδόσεις του

Βοηθητικά συστήματα:

- σύστημα παροχής καυσίμου
- λίπανσης
- υδραυλικών συστημάτων καθοδήγησης
- εννήτριας
- πυρόσβεσης
- αποπαγοποίησης
- κλιματισμού του αεροσκάφους

Τεχνολογική πρόκληση

Θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο (TET) και μπορεί να φθάσει τους 2,100K

Προβλήματα:

- Οξείδωση/διάβρωση από αλληλεπίδραση με τα συστατικά του καυσαερίου
- Ερπυσμός, σαν αποτέλεσμα της υποβολής των πτερυγίων σε υψηλές τάσεις συνδυασμένες με ψηλές θερμοκρασίες
- Κόπωση, σαν αποτέλεσμα κυκλικών φορτίσεων.

Είδη των τάσεων:

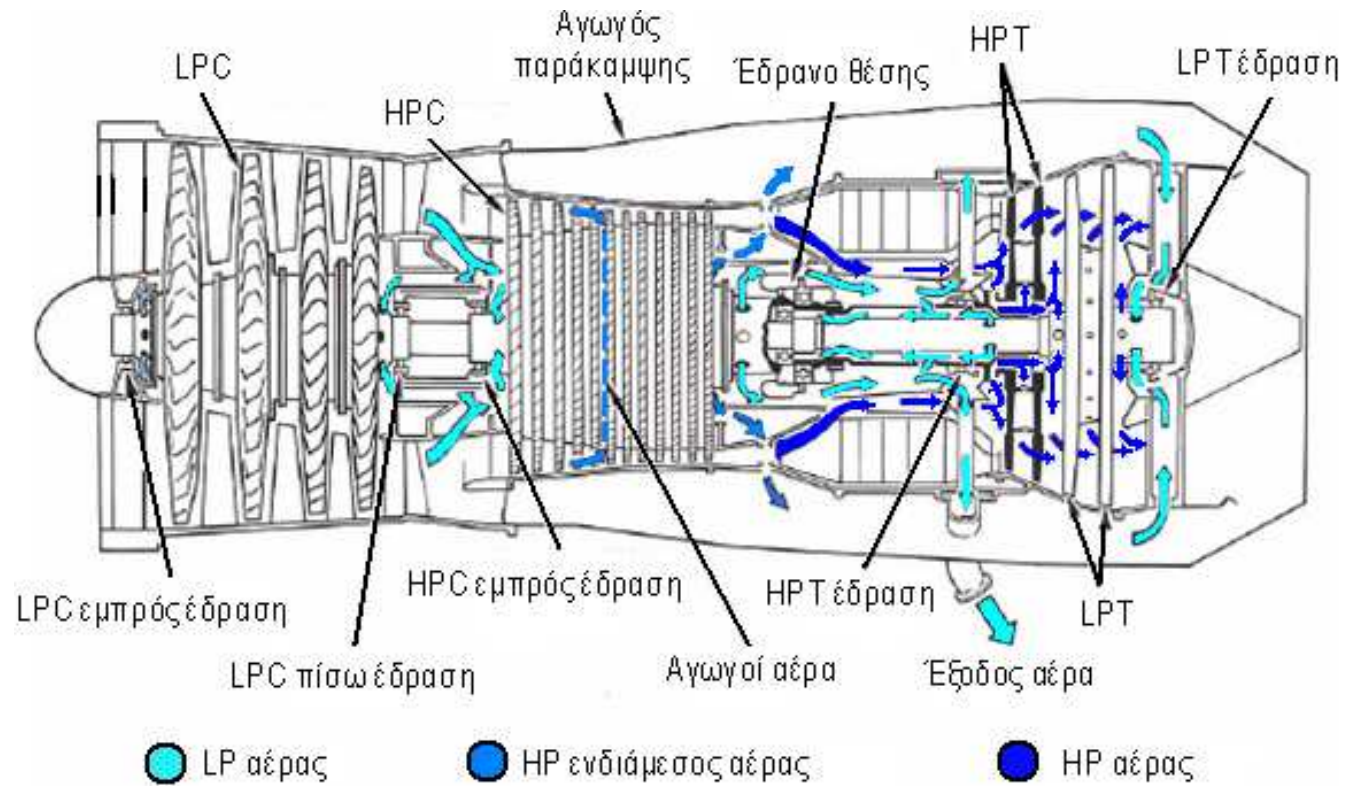
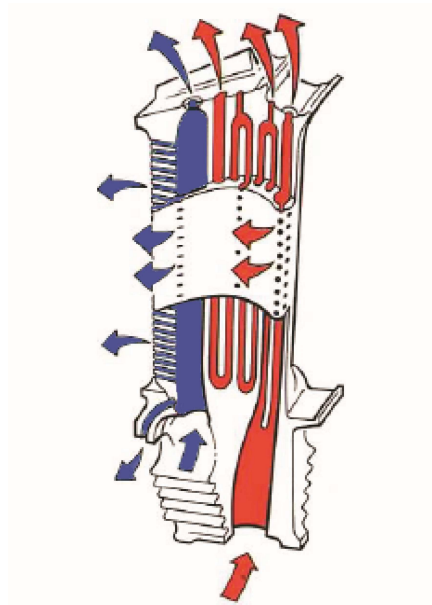
- Καμπτικές -αναπτύσσονται τόσο σε κινητά όσο και σε ακίνητα πτερύγια- από τις αεροδυναμικές δυνάμεις στις αεροτομές.
- Φυγοκεντρικές -αφορούν μόνο κινητά πτερύγια- που οφείλονται στην περιστροφή των πτερυγίων.
- Θερμικές -αφορούν τα κινητά και ακίνητα πτερύγια στροβίλων- λόγω ανομοιόμορφης κατανομής θερμοκρασίας του πτερύγιου.

Τεχνολογική πρόκληση

Τεχνικές για την αντιμετώπιση του προβλήματος:

- Χρήση υψηλής τεχνολογίας υλικών που διατηρούν τις μηχανικές ιδιότητές τους σε περιβάλλον πολύ υψηλών θερμοκρασιών, (= υψηλό κόστος ανάπτυξης και κατασκευής) (για να επιτευχθεί βελτίωση της αντοχής των υλικών σε θερμοκρασίες υψηλότερες κατά περίπου 100°C, χρειάζεται να περάσουν περίπου δέκα χρόνια έρευνας και ανάπτυξης της τεχνολογίας των υλικών).
- Εφαρμογή προηγμένων μεθόδων κατασκευής των πτερυγίων του στροβίλου, όπως για παράδειγμα η ανάπτυξη μονοκρυσταλλικής πτέρυγας, (υψηλό κόστος).
- Εφαρμογή πυρίμαχων κεραμικών επιστρώσεων (*ceramic coatings*) στις πτέρυγες. Όμως προβλήματα ρωγμών και τελικά καταστροφής της επίστρωσης, λόγω της πρόσπτωσης ξένων σωματιδίων (άκαυστου άνθρακα ή άλλων προσμίξεων) με μεγάλες ταχύτητες πάνω στα πτερύγια, αλλά και λόγω του διαφορετικού θερμικού συντελεστή της κεραμικής επίστρωσης και του υλικού του σώματος των πτερυγίων.
- Απομάστευση μέρους του ρεύματος αέρα από τις τελευταίες βαθμίδες του συμπιεστή το οποίο παρακάμπτει το θάλαμο καύσης και οδηγείται στο στρόβιλο ($\approx 15\%$ του συμπιεσμένου αέρα θερμοκρασίας $\approx 600\text{oC}$, επιτυγχάνει ψύξη του στροβίλου κατά $\approx 100\text{oC}$). όμως τότε μικρή πτώση στην ισχύ και την απόδοση του κινητήρα). Η ψύξη εφαρμόζεται τόσο σε σταθερά πτερύγια όσο και σε περιστρεφόμενα

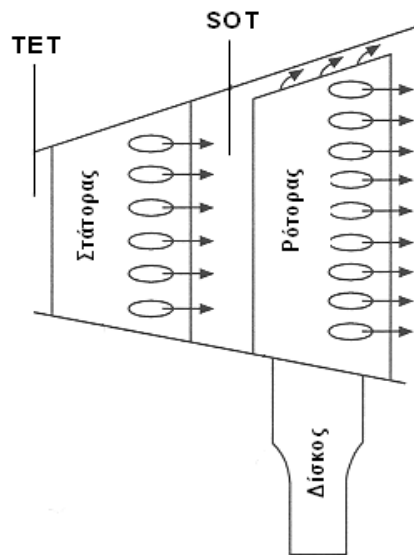
Τεχνολογική πρόκληση



Τεχνολογική πρόκληση

Τεχνολογίες ψύξης πτερυγίων:

- Εσωτερική ψύξη: η θερμότητα απάγεται με συναγωγή από τον αέρα που ρέει στο εσωτερικό του πτερυγίου.
- Εξωτερική ψύξη: έχουμε και πάλι απαγωγή θερμότητας με συναγωγή από τον αέρα που προέρχεται από το εσωτερικό του πτερυγίου και εξερχόμενος από σειρές οπών πάνω στην επιφάνεια του πτερυγίου, δημιουργεί προστατευτικό στρώμα «κρύου» αέρα (*cooling film*). Έτσι, μειώνεται σημαντικά η μετάδοση θερμότητας από το καυσάεριο στο πτερύγιο.



Για θερμοκρασίες **TET** έως και **1,300K**, η αντοχή των υλικών υψηλής θερμικής αντοχής θεωρείται ικανοποιητική. Όμως για υψηλότερες TET, η τοποθέτηση κατάλληλου συστήματος ψύξης κρίνεται απαραίτητη.

Ταξινόμηση αεριοστροβίλων

- Ανάλογα με την επανακυκλοφορία ή μη του εργαζόμενου μέσου:
 - Ανοικτού κύκλου** (open cycle)
 - Κλειστού κύκλου** (closed cycle)
- Ανάλογα με τον αριθμό των αξόνων/ατράκτων:
 - Μονού άξονα** (1-shaft)
 - Διπλού άξονα** (2-shaft)
 - Τριπλού άξονα** (3-shaft)
 - Ελεύθερου στροβίλου ισχύος** (Free Power Turbine, PT)
- Ανάλογα με τη χρήση θερμικών εναλλακτών ή επιπλέον θαλάμου καύσης:
 - Με προθέρμανση** (recuperated ή regenerative, HX)
 - Ενδιάμεσης ψύξης** (with intercooler, IC)
 - Με αναθέρμανση** (with reheat, RH) ή **μετάκαυση** (with afterburning, AB)

Ταξινόμηση αεριοστρόβιλων

● Ανάλογα με την εφαρμογή:

Στροβιλοαντιδραστήρας (turbojet): κατάλληλοι για πτήσεις υπερηχητικής ταχύτητας, μεγάλου ύψους και μικρής σχετικά εμβέλειας

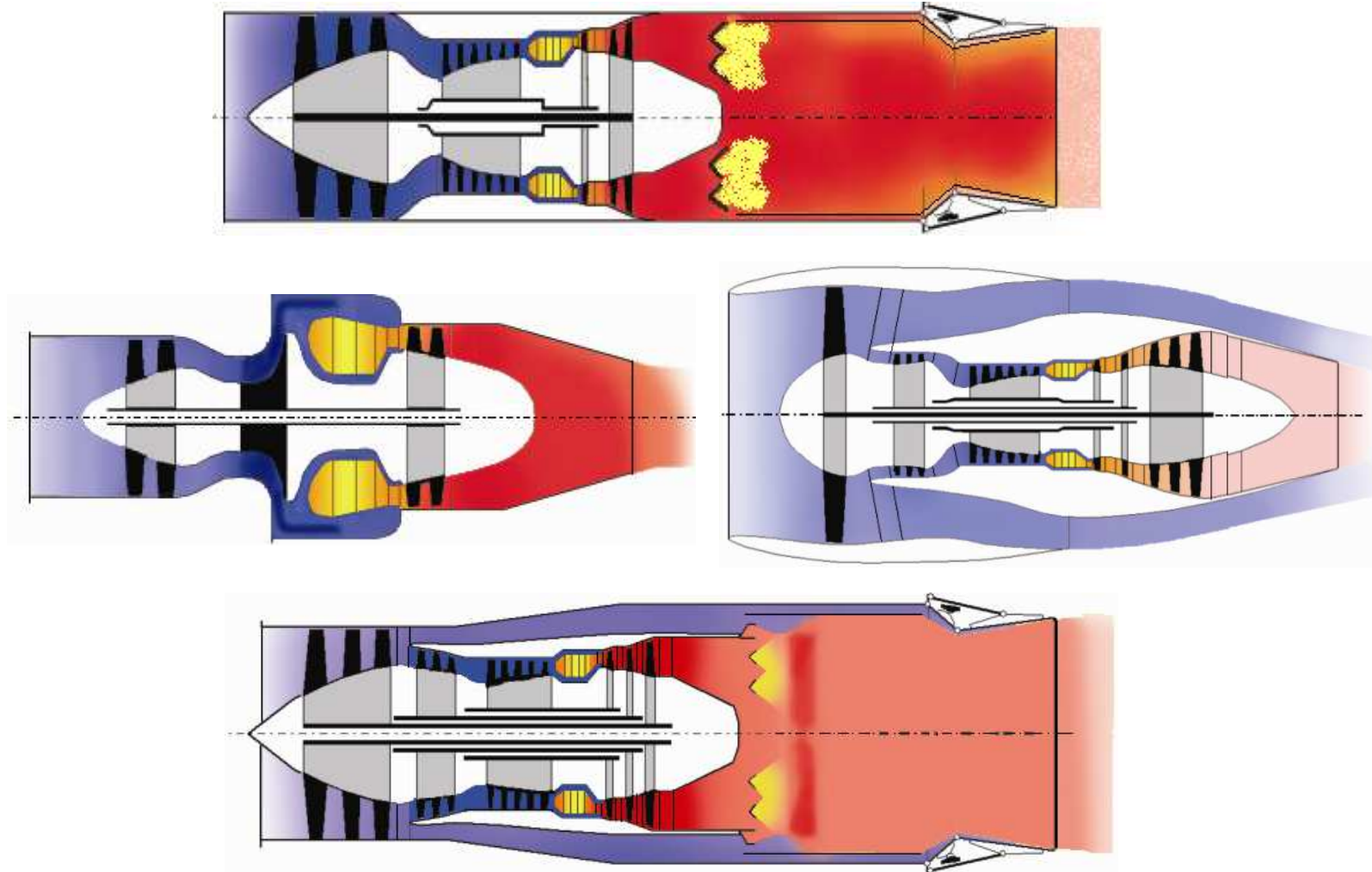
Στροβιλοανεμιστήρας (turbofan): αυξημένη παραγωγή ισχύος ανά μονάδα βάρους, καλή ειδική κατανάλωση καυσίμου και μειωμένος θόρυβος κατά την απογείωση και την προσγείωση

Χρήση σε σύγχρονα (πολιτικά αεροσκάφη μέσων και μεγάλων αποστάσεων ή μαχητικά αεροσκάφη τρίτης και άνω γενιάς,) αεροπλάνα υψηλών υποηχητικών, διηχητικών ή υπερηχητικών ταχυτήτων

Ελικοστρόβιλος (turboprop): Η ώση προέρχεται κυρίως (έως και 95%) από την περιστροφή μιας εξωτερικής έλικας (propeller). υψηλή προωθητική απόδοση, μικρή κατανάλωση καυσίμου σε μικρά ύψη (έως περίπου 7,000m) και μικρές ταχύτητες πτήσης (έως περίπου 700km/h).

Είναι κατάλληλοι για γρήγορη απογείωση (χρησιμοποιώντας μικρούς διαδρόμους) με μεγάλα φορτία, λόγω του ότι αναπτύσσουν μεγάλη προωθητική δύναμη με μικρές ταχύτητες πτήσης. Χρήση σε πολιτικά αεροσκάφη μικρών αποστάσεων και μικρά ή μεσαία στρατιωτικά μεταγωγικά αεροσκάφη.

Ταξινόμηση αεριοστρόβιλων

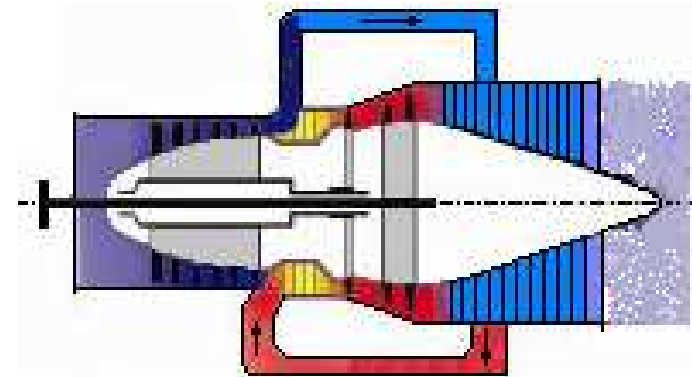
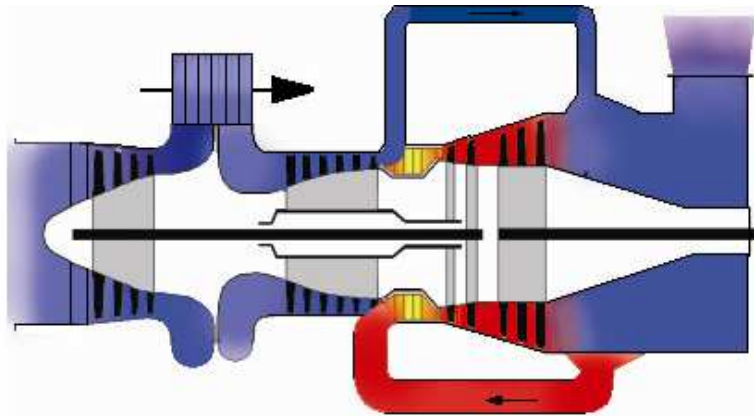
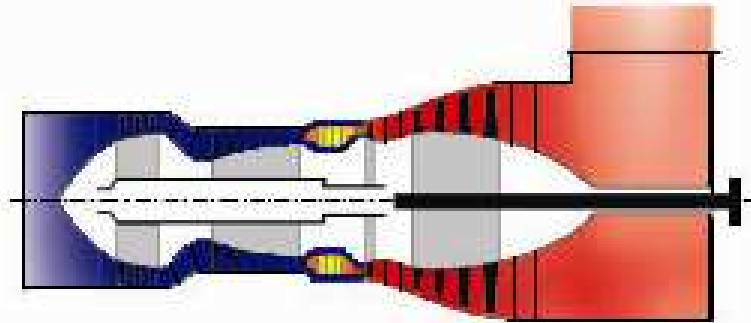
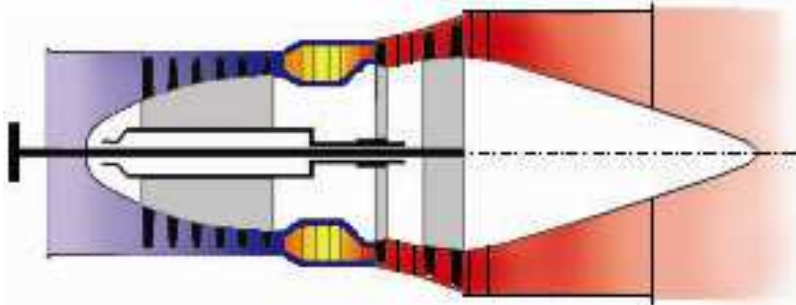


Ταξινόμηση αεριοστρόβιλων

Βιομηχανικοί (industrial):

Αξονοστροβιλοκινητήρες (turboshaft), χρησιμοποιούνται σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες, αντλητικά συγκροτήματα, πλοία, τρένα,

Τα ελικόπτερα αποτελούν μια εξαίρεση αεροπορικής εφαρμογής



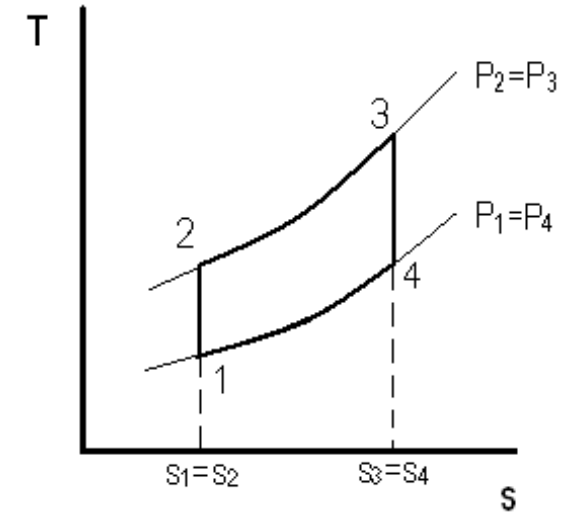
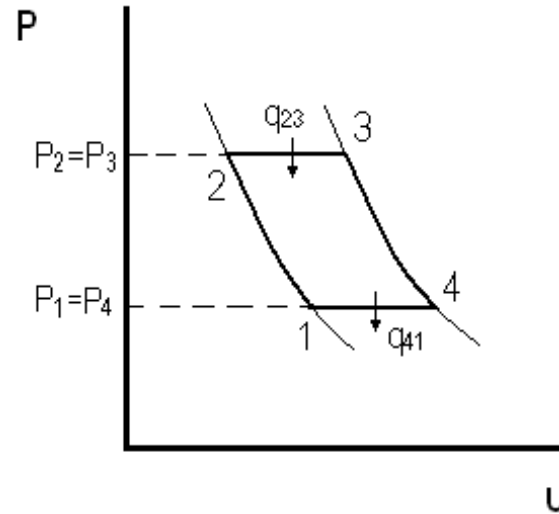
Ταξινόμηση αεριοστρόβιλων

Υποθέσεις πάνω στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία του ιδανικού κύκλου:

- Οι διαδικασίες συμπίεσης και εκτόνωσης είναι αντιστρεπτές και αδιαβατικές (δηλαδή ισεντροπικές). Οπότε το περίβλημα του αεριοστρόβιλου θεωρείται αδιαβατικό και δεν υπάρχουν απώλειες τριβής
- **Οι ολικές (ανακοπής) ιδιότητες ταυτίζονται με τις αντίστοιχες στατικές**
- Σε κανένα τμήμα του αεριοστρόβιλου δεν εμφανίζονται απώλειες πίεσης
- Το αέριο διατηρεί την ίδια σύσταση εντός του κύκλου και είναι ιδανικό αέριο με σταθερές ειδικές θερμότητες. Για ευκολία σαν ιδανικό αέριο θεωρείται ο αέρας
- Η παροχή μάζας παραμένει σταθερή (η μάζα διατηρείται)
- Η καύση είναι τέλεια και στιγμιαία
- Συνέπεια των υποθέσεων 5 και 6 είναι ότι ο θάλαμος καύσης ουσιαστικά προσομοιώνεται από ένα θερμικό εναλλάκτη ο οποίος τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή θερμότητας
- Ροή μονοδιάστατη (οι ιδιότητες του ρευστού παραμένουν σταθερές σε επίπεδα κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης) και ομοιόμορφη

Κύκλος Brayton-Joule

$$q - w = h_{\text{exit}} - h_{\text{inlet}}$$



$$UW = c_p \cdot (T_3 - T_2) \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \Rightarrow UW = c_p \cdot [T_3 - T_1 \cdot R_C^{-(\gamma-1)/\gamma}] \cdot [1 - R_C^{(\gamma-1)/\gamma}]$$

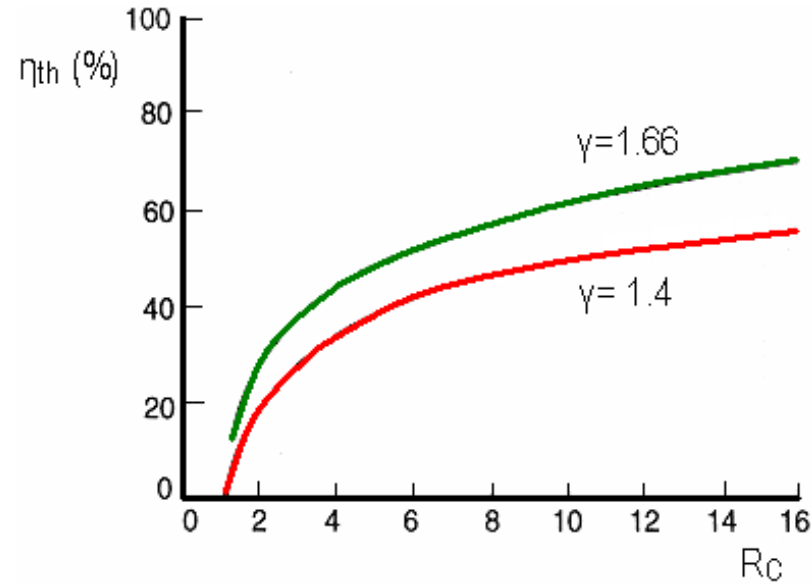
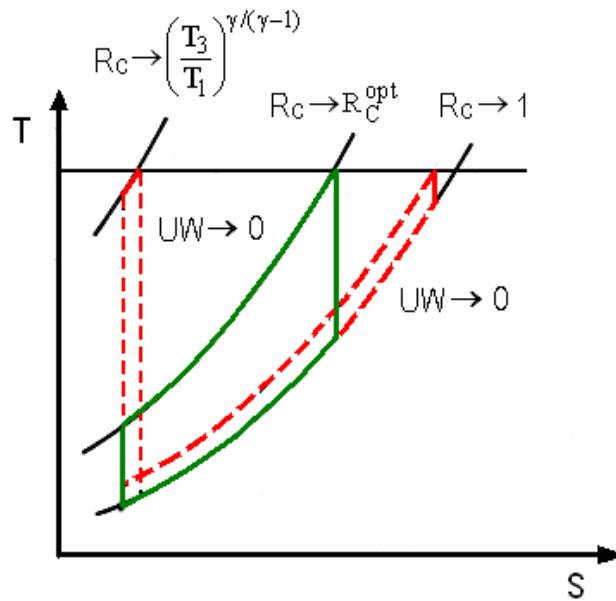
$R_C = P_2/P_1$ είναι ο **λόγος πιέσεων**

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \left(\frac{1}{R_C}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

Ειδικό έργο $SW = \frac{UW}{\dot{m}}$

Κύκλος Brayton-Joule

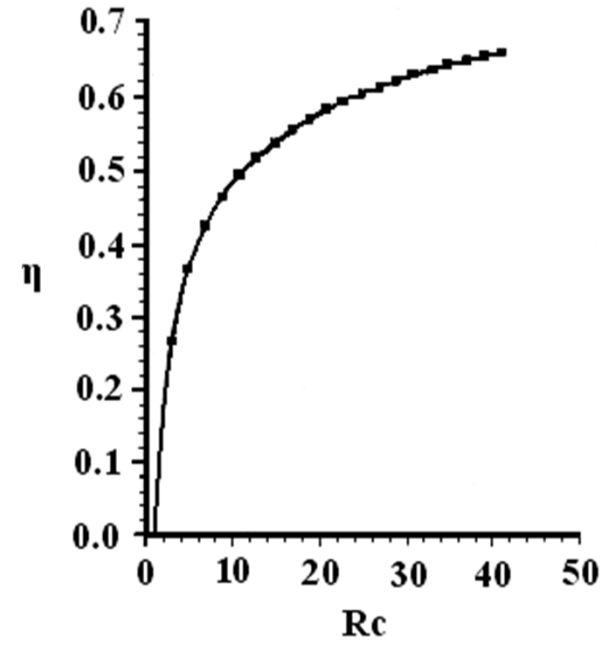
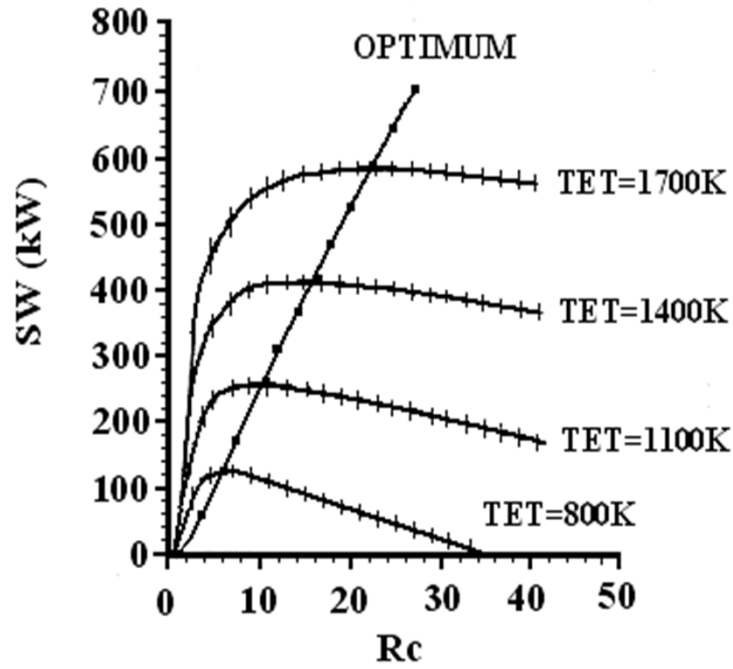
Εξάρτηση από το γ του αερίου



Εξάρτηση από το R_c του συμπιεστή

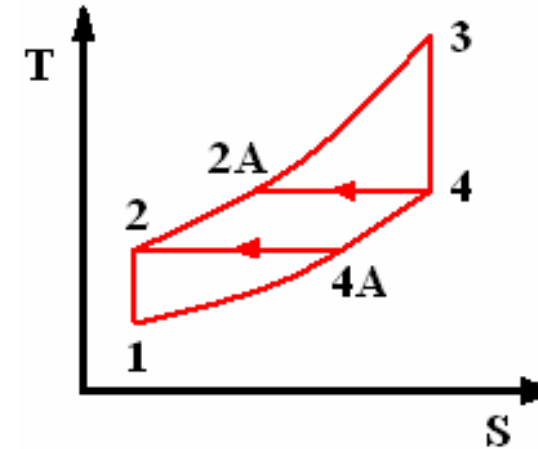
Κύκλος Brayton-Joule

Επιδόσεις



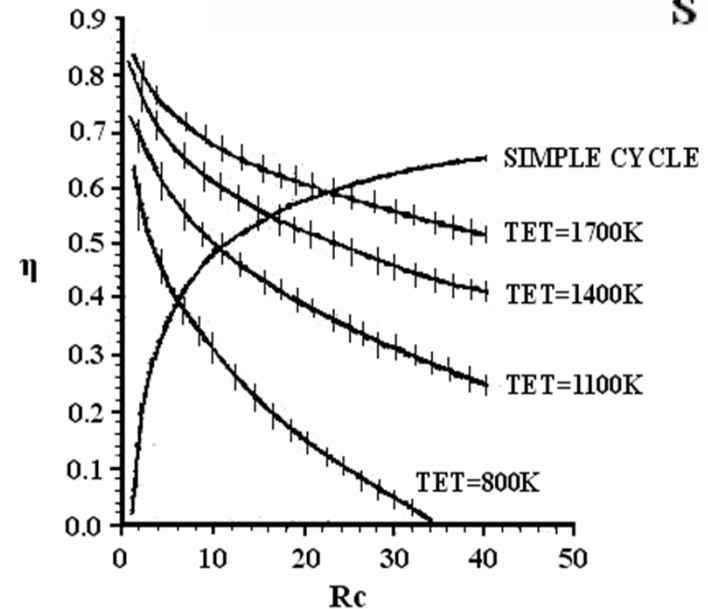
Κύκλος με Εναλλάκτη Θερμότητας ή Αναγεννητική Προθέρμανση

Όταν η προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα γίνεται με καυσαέρια που δεν αναμειγνύονται με αυτόν, τότε ο εναλλάκτης θερμότητας ονομάζεται *recuperator*, ενώ όταν αναμειγνύονται λέγεται *regenerator*

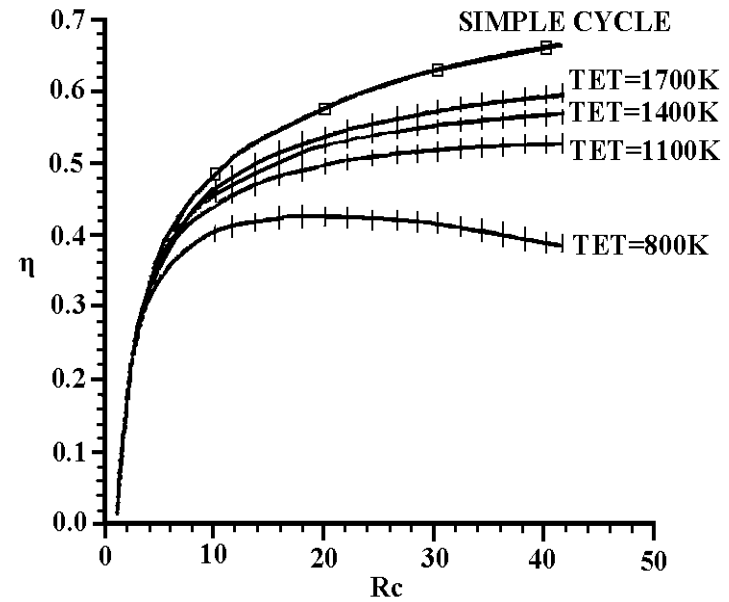
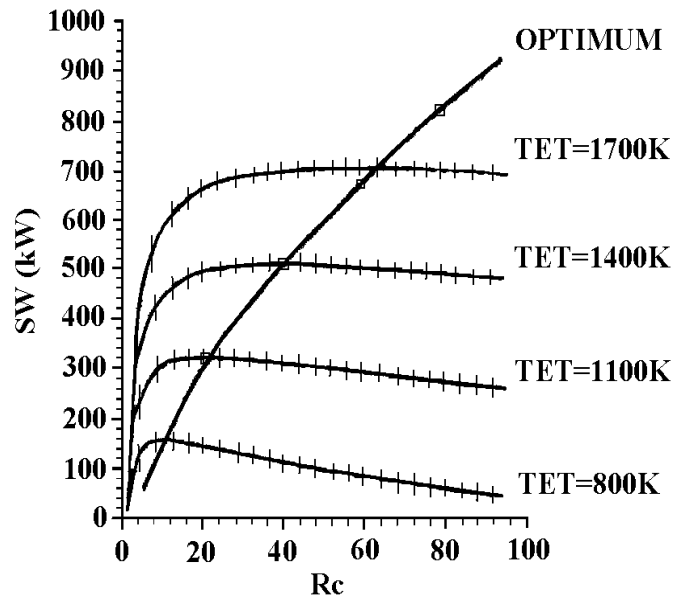
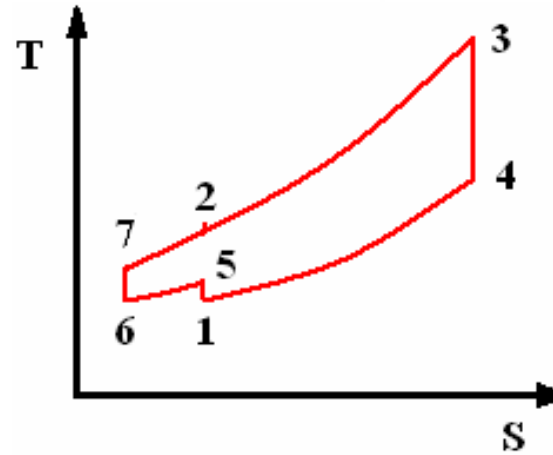


Οι ποσότητες CW και EW είναι οι ίδιες με τον απλό κύκλο άρα και τα μεγέθη UW και SW θα παραμείνουν αμετάβλητα

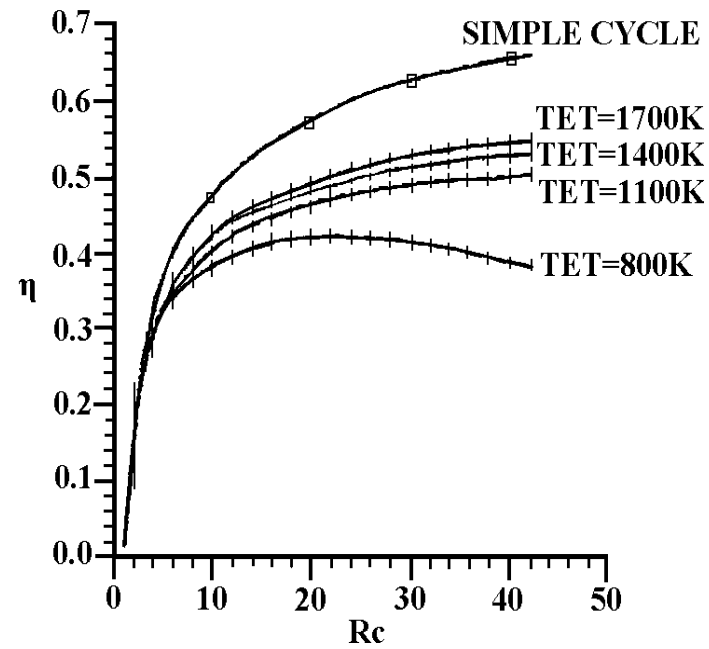
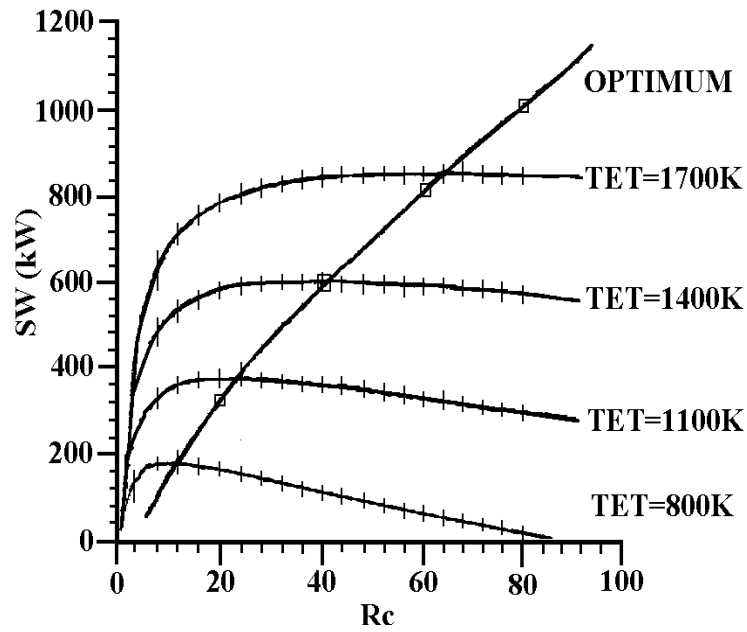
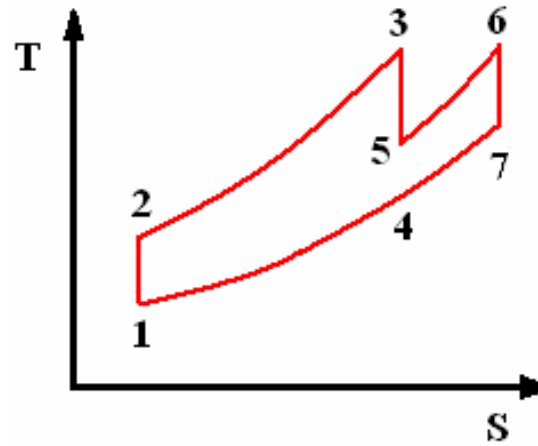
$$\eta_{thHX} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \cdot R_C^{(\gamma-1)/\gamma}$$



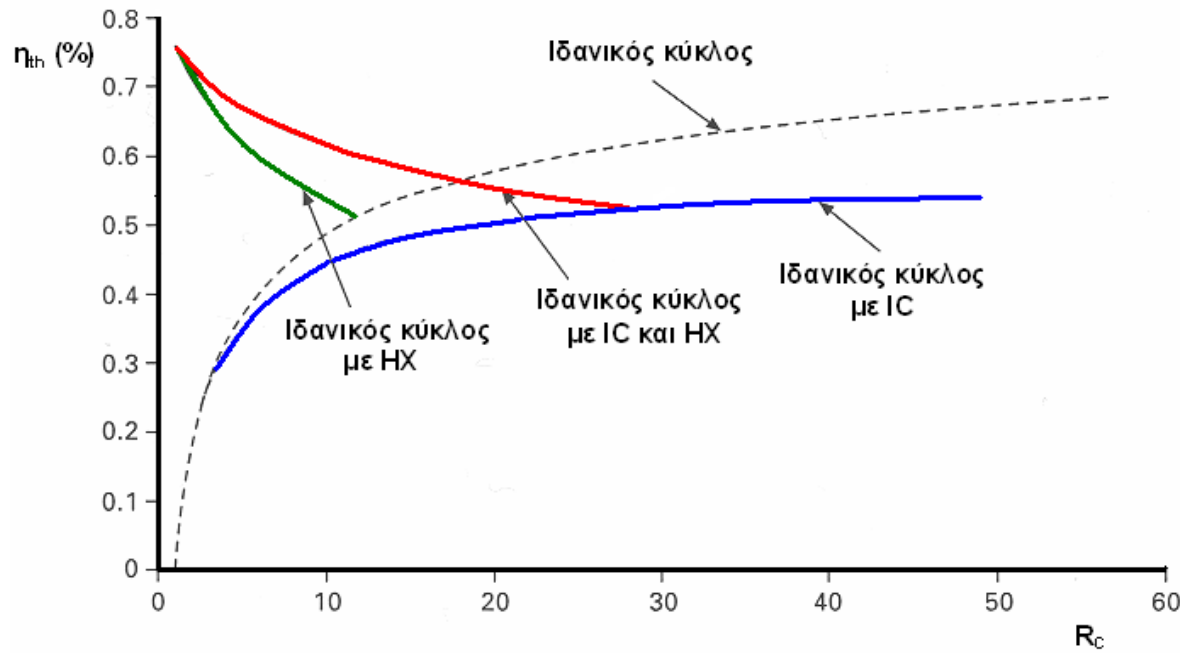
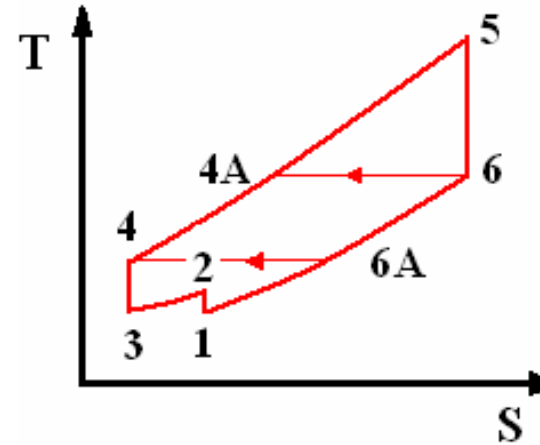
Κύκλος με Ενδιάμεση Ψύξη



Κύκλος με Αναθέρμανση

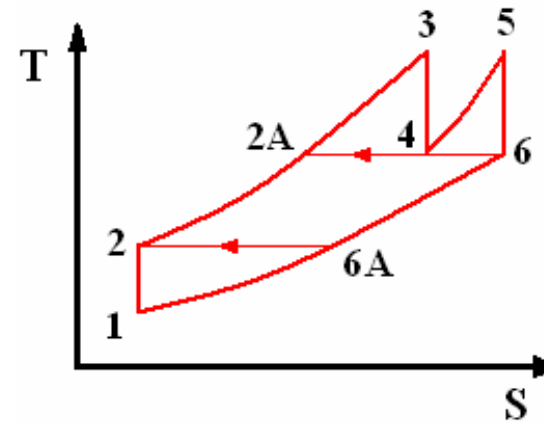


Κύκλος με Ενδιάμεση Ψύξη και Εναλλάκτη Θερμότητας

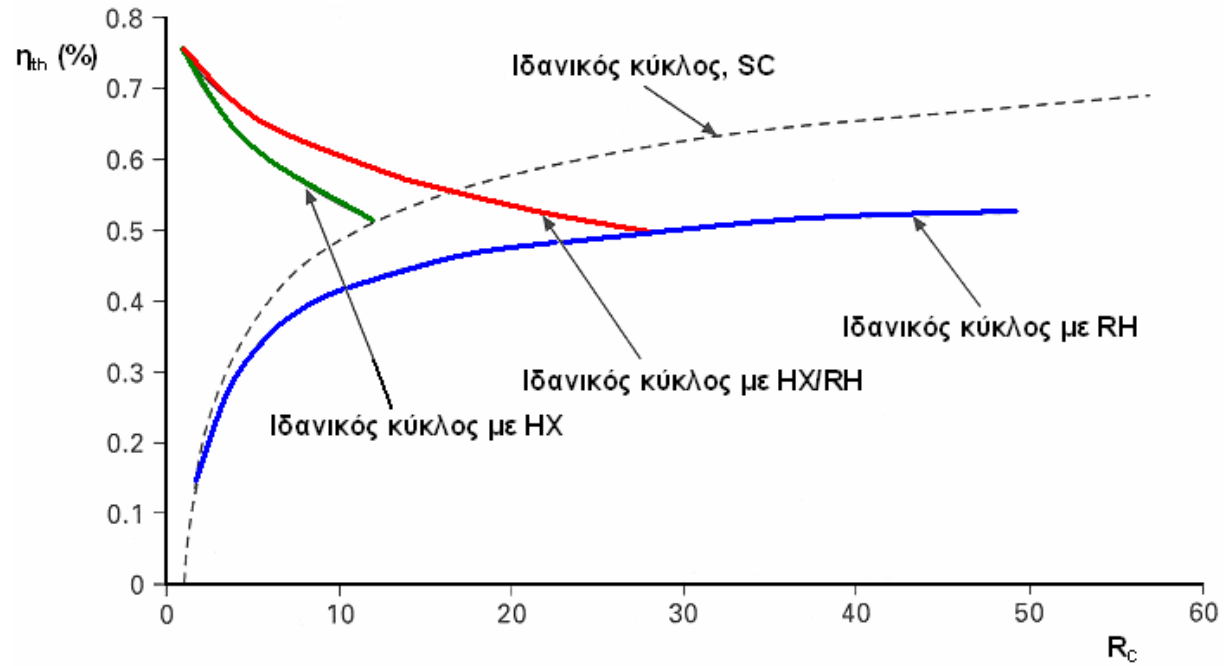


Σύγκριση βαθμών απόδοσης

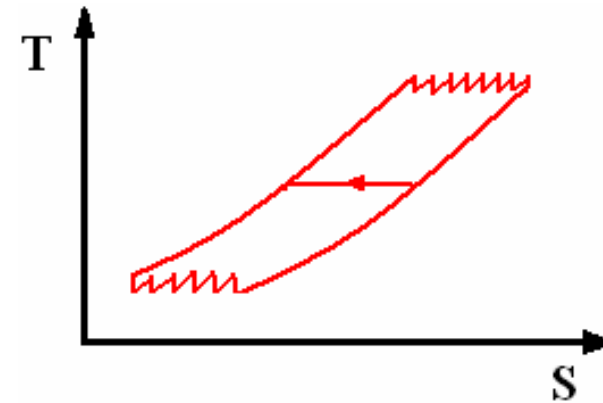
Κύκλος με Εναλλάκτη Θερμότητας και Αναθέρμανση



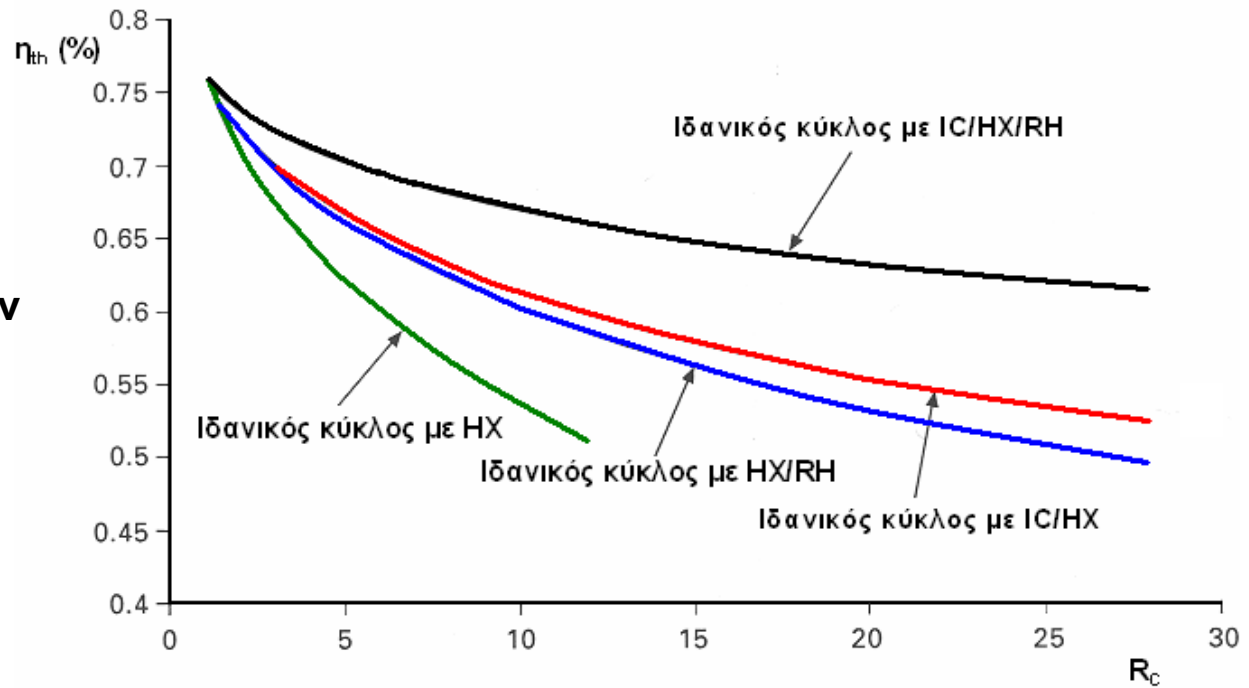
Σύγκριση βαθμών απόδοσης



Κύκλος με Ενδιάμεση Ψύξη, Εναλλάκτη Θερμότητας και Αναθέρμανση (Κύκλος Ericsson)



Σύγκριση βαθμών απόδοσης

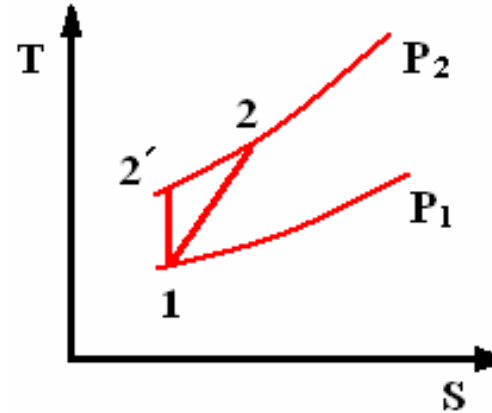


Αιτίες Διαφοροποίησης του Πραγματικού από τον Ιδανικό Κύκλο

- Οι ταχύτητες ροής είναι υψηλές, επομένως η μεταβολή της κινητικής ενέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου από κάθε τμήμα δεν είναι αμελητέα.
- Οι διεργασίες είναι μη αδιαβατικές και μη αντιστρεπτές.
- Τα φαινόμενα τριβής οδηγούν σε απώλειες πίεσης στους θαλάμους καύσης και στους εναλλάκτες καθώς επίσης και στους αγωγούς εισόδου και εξόδου
- Οι τιμές των c_p , και γ του εργαζόμενου μέσου μεταβάλλονται
- Η καύση δεν είναι ούτε πλήρης ούτε τέλεια
- Απώλειες τριβής και να εξασφαλίζεται η κίνηση βοηθητικών συστημάτων
- Οι εναλλάκτες θερμότητας, όταν χρησιμοποιούνται δεν είναι ιδανικοί
- Η ροή του εργαζόμενου μέσου είναι αρκετά πολύπλοκη και άρα δεν είναι ούτε μονοδιάστατη ούτε ομοιόμορφη

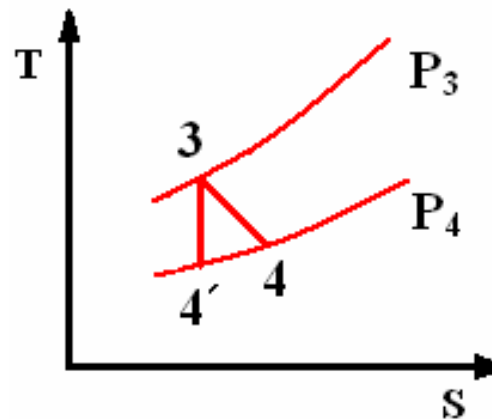
Απόδοση Ισεντροπικής Συμπίεσης

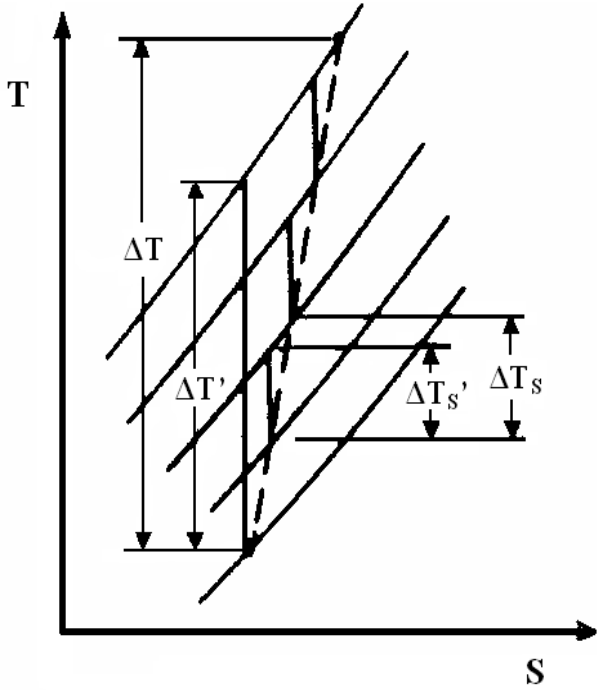
$$\eta_{isC} = \frac{\text{ιδανικό CW}}{\text{πραγματικό CW}} = \frac{\left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1}{\frac{T_{o2}}{T_{o1}} - 1}$$



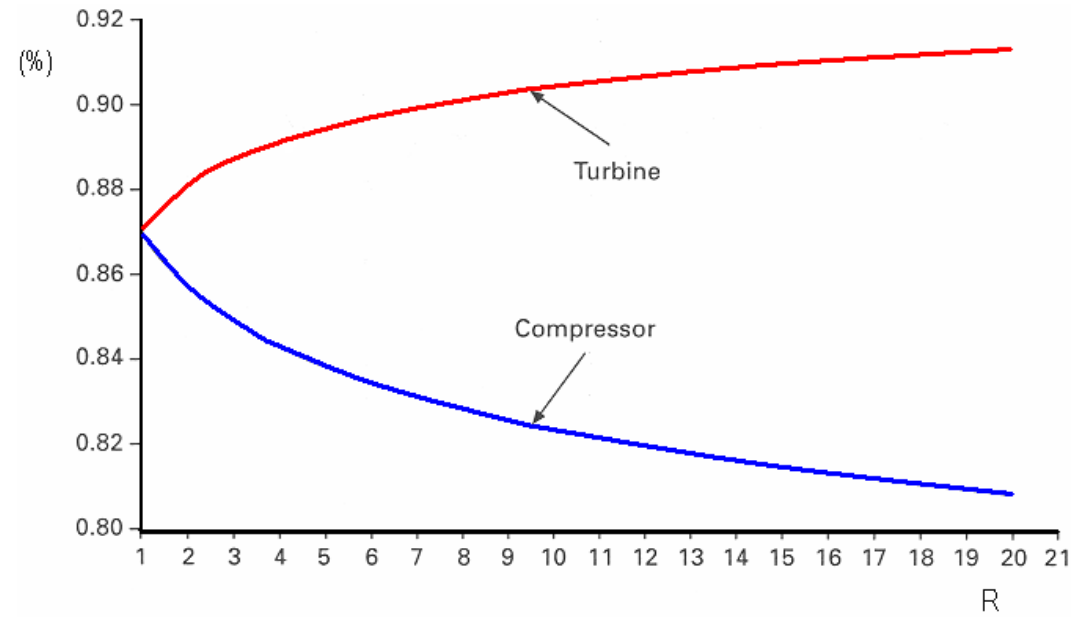
Απόδοση Ισεντροπικής Εκτόνωσης

$$\eta_{isT} = \frac{\text{πραγματικόEW}}{\text{ιδανικόEW}} = \frac{-(T_{o3} - T_{o4})}{-(T_{o3} - T_{o4}')} = \frac{1 - \frac{T_{o4}}{T_{o3}}}{1 - \left(\frac{P_{o4}}{P_{o3}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$





$$\eta_{isC} = \frac{\frac{T'_{o2}}{T_{o1}} - 1}{\frac{T_{o2}}{T_{o1}} - 1} = \frac{\left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1}{\left(\frac{P_{o2}}{P_{o1}}\right)^{(\gamma-1)/\gamma \cdot \eta_{polC}} - 1}$$



Απώλειες Πίεσης

Ψυχρή απώλεια

Θερμή ή ουσιώδης απώλεια

Εισαγωγή και εξαγωγή: σχετικά μικρές της τάξης των $\Delta P=10\text{mbar}$

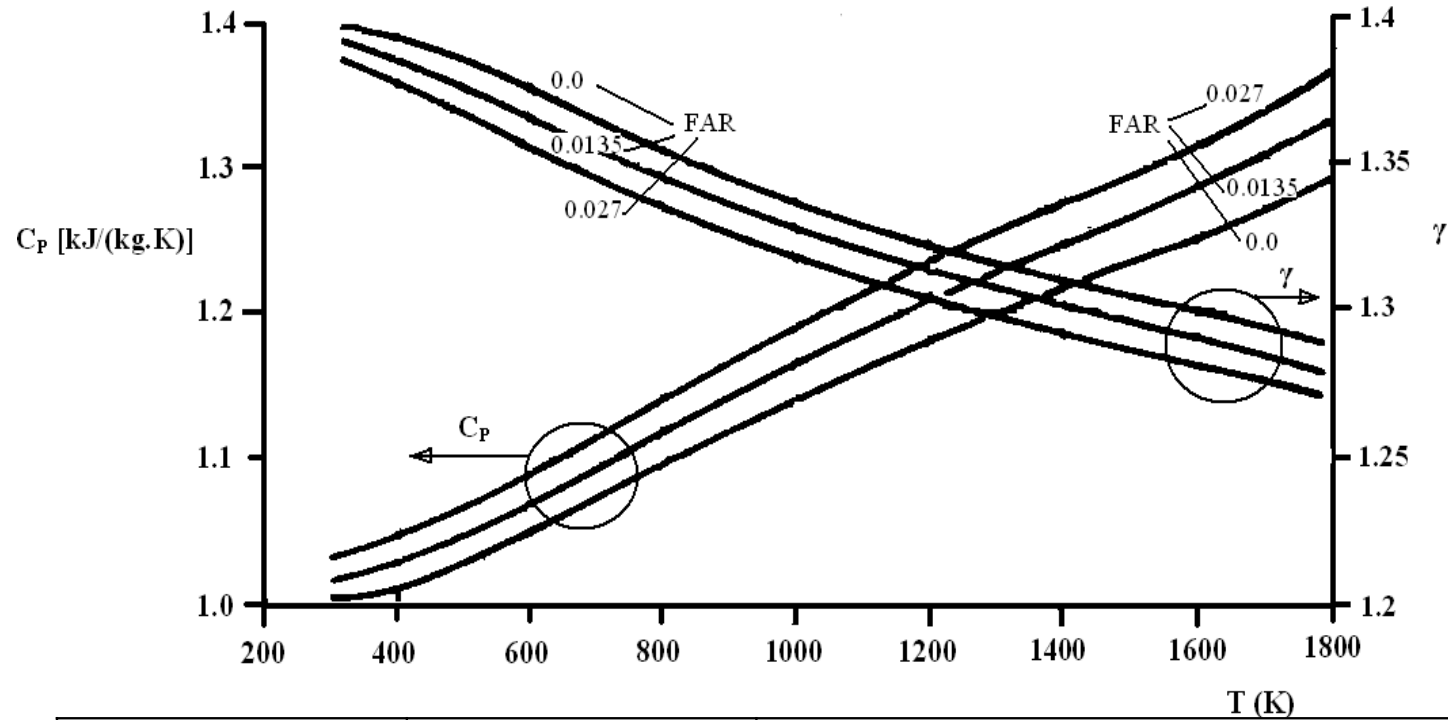
Συμπιεστή: έχουμε μικρό στραγγαλισμό, που συνεπάγεται ανηγμένη (στις συνθήκες εισόδου) πτώση πίεσης $\Delta P_{o12}/P_{o1}$ (P_{o1} = ατμοσφαιρική πίεση) της τάξης μεγέθους **0.01**, ενώ η αντίστοιχη ανηγμένη πτώση πίεσης στην έξοδο του **στροβίλου** είναι ακόμη μικρότερη.

Θάλαμος καύσης είναι κάπως σοβαρότερη, ενδεικτικά αναφέρεται ότι είναι της τάξης $\Delta P_{o23}/P_{o2} \approx 0.02$ για βιομηχανικούς και έως ≈ 0.06 για αεροπορικούς κινητήρες, ενώ της ίδιας τάξης μεγέθους είναι και η αντίστοιχη ανηγμένη πτώση πίεσης σε **αναθερμαντήρα**, εάν υπάρχει.

Ενδιάμεσος ψύκτης, η αντίστοιχη τάξη μεγέθους για την ανηγμένη πτώση πίεσης είναι **0.01**.

Εναλλάκτης θερμότητας, η ανηγμένη πτώση πίεσης, για κάθε πλευρά του (πλευρά αέρα (α), πλευρά καυσαερίου (g)), είναι της τάξης μεγέθους του **0.02**. $\eta_{HX} = 0.7 \div 0.92$. Θερμοκρασίας λειτουργίας μέχρι **950K**

Μεταβολή της Ειδικής Θερμότητας



| | «κρύο» μέρος | «θερμό» μέρος | |
|--------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|
| | εισαγωγή, συμπίεστής | θάλαμος καύσης | στρόβιλος, εξαγωγή |
| c_p σε kJ/(kg·K) | 1.005 | 1.100 | 1.150 |
| γ | 1.400 | 1.353 | 1.333 |

Μεταβολή της Υγρασίας

Η **σχετική υγρασία** (*Relative Humidity*, RH) του αέρα εκφράζει το ποσό των υδρατμών που είναι απαραίτητο για να κορεστεί ο αέρας

$$RH = \frac{P}{P_{\text{sat}}} \cdot 100\%$$

όπου P είναι η πίεση (στατική) των υδρατμών και P_{sat} είναι η πίεση (στατική) κορεσμού των υδρατμών σε mbar %

Η **ειδική υγρασία** (*Specific Humidity*, SH) εκφράζει την μάζα των υδρατμών που υπάρχει στην μονάδα της μάζας του ξηρού αέρα

$$SH = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{air}}}$$

Απόδοση Καύσης

συντελεστής απόδοσης καύσης η_{CC}

$$\eta_{CC} = \frac{T_{o3} - T_{o2}}{T'_{o3} - T_{o2}}$$

για δεδομένο λόγο καυσίμου/αέρα (*fuel/air ratio*, FAR), όπου

βασίζεται στην LCV (*Low Calorific Value = Fuel Calorific Value* ή αλλιώς *Fuel Heating Value*, LHV) του καυσίμου

[Παράγραφος 4.5], ενώ

είναι η θερμοκρασία που θα έβγαιναν τα καυσαέρια από το θάλαμο καύσης στην περίπτωση της πλήρους και τέλει καύσης (ιδανική περίπτωση).

$$\eta_{CC} = \left(\frac{FAR'}{FAR} \right)_{\Delta T} = \frac{m_f'}{m_f}$$

όπου ο δείκτης ΔT σημαίνει ότι η μεταβολή-αύξηση της θερμοκρασίας θεωρείται δεδομένη

$$\eta_{CC} = 99\%$$

Απόδοση του Πραγματικού Κύκλου Αξονοστροβιλοκινητήρα

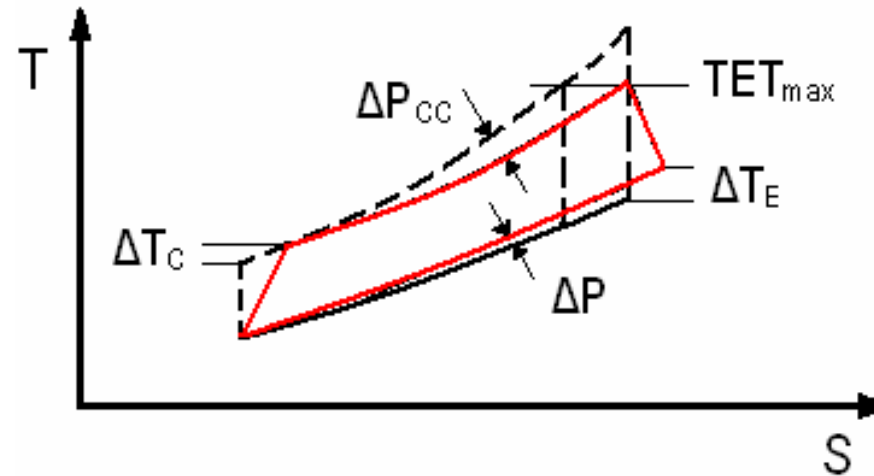
$$\text{sfc} = \frac{\text{μάζα καυσίμου}}{\text{ωφέλιμο έργο}} = \frac{\text{παροχή μάζας καυσίμου}}{\text{ωφέλιμη ισχύς}} = \frac{\text{fuel flow rate}}{\text{useful power}} =$$

$$= \frac{\text{heat input rate / fuel calorific value}}{\text{useful power}} \quad \Rightarrow$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\text{ωφέλιμο έργο στον άξονα}}{\text{εισαγόμενη θερμότητα}} = \frac{\text{useful shaft work}}{\text{heat input}} = \frac{\text{useful shaft power}}{\text{heat input rate}} = \frac{U\dot{W}}{\dot{m}_f \cdot \text{FCV}}$$

$$\Rightarrow \text{sfc} = \frac{1}{\eta_{\text{th}} \cdot \text{fuel calorific value}} = \frac{1}{\eta_{\text{th}} \cdot \text{FCV}} \quad [\text{kg}/(\text{W}\cdot\text{s})] = \text{kg}/\text{J}$$

Πραγματικός Κύκλος Αξονοστροβιλοκινητήρα



- το ΔT_C οφείλεται στην κατανάλωση περισσότερου έργου της πραγματικής συμπίεσης,
- το ΔT_E οφείλεται στην παραγωγή λιγότερου έργου της πραγματικής εκτόνωσης,
- το ΔP_{CC} οφείλεται στην πτώση πίεσης μέσα στον θάλαμο καύσης και
- το ΔP οφείλεται στις απώλειες πίεσης στην εισαγωγή και εξαγωγή.
- η TET_{max} είναι η ανώτερη επιτρεπόμενη θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στον στρόβιλο, δεδομένης της εκάστοτε τεχνολογίας

Ανάλυση κύκλου (cycle analysis)

μελέτη των θερμοδυναμικών μεταβολών του εργαζόμενου μέσου, καθώς αυτό διέρχεται μέσα από τον κινητήρα.

Παραμετρική ανάλυση (*parametric cycle analysis*) ή **λειτουργία στο σημείο σχεδιασμού** (*Design Point, DP*):

Η ανάλυση στο DP, οδηγεί στον προσδιορισμό όλων των χαρακτηριστικών μεγεθών **διαφορετικών κινητήρων**, για δεδομένες και διαφορετικές:

- συνθήκες περιβάλλοντος
- συντελεστές απόδοσης των επιμέρους συνιστωσών
- TET
- και λόγους πίεσης R_C

Ανάλυση κύκλου (cycle analysis)

Ανάλυση λειτουργίας του κινητήρα (*engine performance analysis*) ή **λειτουργία εκτός του σημείου σχεδιασμού** (*Off Design, OD*):

- Αναλύει την συμπεριφορά **ενός κινητήρα** -που έχει επιλεχθεί προηγουμένως από την ανάλυση λειτουργίας στο DP-σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας από εκείνες του σημείου σχεδιασμού.
- Προσδιορίζει, τα χαρακτηριστικά μεγέθη (συμπεριφορά) ενός συγκεκριμένου κινητήρα για διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος (T_a , P_a), ταχύτητες πτήσης (*flight conditions*), μείωσης της απόδοσης (*degradation*) των επιμέρους συνιστωσών, καυσίμου και αλλαγής του φορτίου (*part load, over load*) -δηλαδή μεταβολής της TET-, από εκείνες για τις οποίες είχε αρχικά σχεδιαστεί, κατά την ανάλυση DP.

Διαδικασία Υπολογισμού της Λειτουργίας στο Σημείο Σχεδιασμού

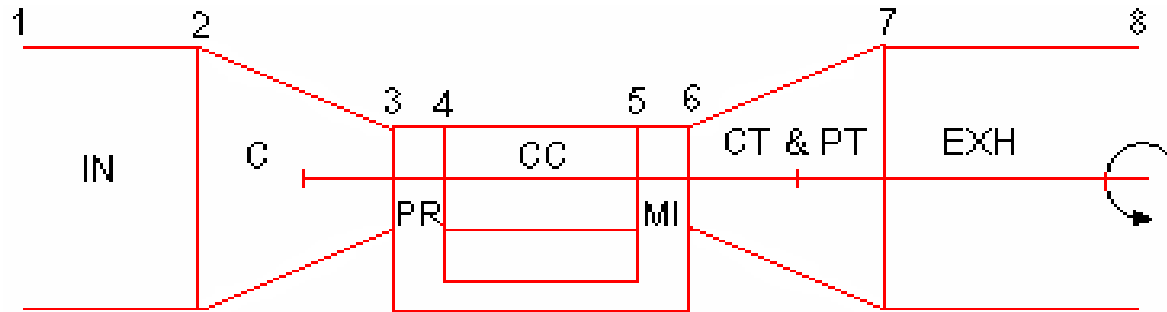
1. **Διαμόρφωση του κινητήρα** (συμβολικού διαγράμματο, *block diagram*)
2. **Υπολογισμοί** (εξομοίωση)
3. **Συμπλήρωση πίνακα λειτουργίας**: 2 ή 3 γραμμές (P_o , T_o , m) και στήλες τόσες όσα τα *station vectors*
4. Προσδιορισμός παραμέτρων επιδόσεων (*performance*):
CW, TW, UW, SW, F_s , HI, η_{th} και *sfc*
5. **Διαγράμματα λειτουργίας** (*performance charts*):
 - η_{th} (ή *sfc*) - R_C με παράμετρο το TET και
 - SW (ή F_s) - R_C με παράμετρο το TET

Προγράμματα εξομοίωσης

input file του προγράμματος εξομοίωσης:

- οι συνθήκες περιβάλλοντος (T_a , P_a , *flight Mach number* M)
- η παροχή μάζας αέρα (\dot{m})
- τα όρια απόδοσης των επιμέρους συνιστωσών (η_{isC} , η_{isT} , η_{CC} , η_{EXH}),
- οι απώλειες πίεσης των επιμέρους συνιστωσών (ΔP_{loss}),
- οι τιμές της ειδικής θερμότητας c_p του εργαζόμενου μέσου σε κάθε επιμέρους συνιστώσα
- το ποσοστό του αέρα ψύξης,
- το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου (FCV),
- η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο (TET), λαμβάνοντας υπόψη τα όρια της θερμικής αντοχής των πτερυγίων της πρώτης βαθμίδας του στροβίλου,
- το είδος του ακροφυσίου εξαγωγής. Για τους αεροπορικούς κινητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως συγκλίνοντα ακροφύσια για υποηχητικούς, ελάχιστα υπερηχητικούς αριθμούς *Mach* πτήσης και συγκλίνοντα-αποκλίνοντα ακροφύσια χρησιμοποιούνται σε αριθμούς *Mach* που προσεγγίζουν ή ξεπερνούν τα 2.4M. Για τους βιομηχανικούς πρόκειται για ειδικά κατασκευασμένους αεραγωγούς διαφυγής στο περιβάλλον με σχετικά πολύ μικρότερες ταχύτητες.

Υπολογισμός του Σημείου Σχεδιασμού Αξονοστροβιλοκινητήρων Απλός Κύκλος Brayton, Μονού Άξονα



Δεδομένα ατμόσφαιρας:

Τυπική ατμόσφαιρα ISO: *Ambient pressure*: $P_a=101.3\text{kPa}$, *Ambient temperature* : $T_a=288\text{K}$

Δεδομένα εργαζόμενου μέσου:

Το εργαζόμενο μέσο μέχρι και την είσοδο του θαλάμου καύσης, είναι αέρας, με παροχή μάζας (*air mass flow*): \dot{m}

$c_{pc}=1.005\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $\gamma_c=1.4$ μέχρι την είσοδο στον θάλαμο καύσης και $c_{ph}=1.150\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $\gamma_h=1.333$

Δεδομένα εισαγωγής: $M_{IN}=0$, $DT_{INloss}=DP_{INloss}=0$

Δεδομένα συμπίεστη: συνήθη όρια διακύμανσης $R_C = 5-30$, $\eta_{isC}=0.77-0.91$

Απλός Κύκλος Brayton, Μονού Άξονα

Δεδομένα διαχωριστή μάζας αέρα ψύξης και δεδομένα μίκτη μάζας αέρα ψύξης:

Η ψύξη κρίνεται απαραίτητη μόνο όταν $TET > 1,300K$

Δεδομένα θαλάμου καύσης:

$\eta_{CC} = 0.985-0.995$, $DP_{CCloss} = 3-5(\%)$, FCV (MJ/kg) (kg/s)

Δεδομένα στροβίλου:

TET με συνήθη όρια διακύμανσης 900-1,500(K), $\eta_{isT} = 0.83-0.97$

Δεδομένα εξαγωγής:

$DT_{EXHloss} = DP_{EXHloss} = 0$, $M_{ex} = 0$, αφού ο κινητήρας είναι βιομηχανικός, $DP_{EXH} = 2-3\%$ (η πίεση στην έξοδο είναι ίση με περίπου $1.003P_{\alpha}$)

Απλός Κύκλος Brayton, Μονού Άξονα

Υπολογιστική διαδικασία (Calculation procedure)

1-2 INTAKE

$$P_1 = P_\alpha \cdot \left[1 + \frac{\gamma_c - 1}{2} \cdot M_{in}^2 \right]^{\frac{\gamma_c}{\gamma_c - 1}}$$

$$P_{o2} = P_{o1} \cdot \left(1 - \frac{DP_{INloss}}{100} \right)$$

$$T_1 = T_\alpha \cdot \left[1 + \frac{\gamma_c - 1}{2} \cdot M_{in}^2 \right]$$

$$T_{o2} = T_{o1}$$

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

2-3 COMPRESSOR

$$P_{o3} = P_{o2} \cdot R_C$$

$$T_{o3} = T_{o2} \cdot \left[1 + \frac{R_C^{(\gamma_c - 1)/\gamma_c} - 1}{\eta_{isC}} \right]$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2$$

3-4 PREMASS

$$P_{o4} = P_{o3}$$

$$T_{o4} = T_{o3}$$

Απλός Κύκλος Brayton, Μονού Άξονα

5-6 MIXER

Κάνουμε την ακόλουθη απλουστευμένη υπόθεση:

εάν $TET = T_{o5} < 1,300$ τότε $D_{mc}=0$ και $DT_{cooling}=0$,

ενώ αν $T_{o5} \geq 1,300$ τότε $D_{mc}=0.025 \cdot T_{o5}-25$ και $DT_{cooling}=0.333 \cdot T_{o5}-333.333$

3-4 PREMASS

$$\dot{m}_4 = \dot{m} \cdot \left(1 - \frac{D_{mc}}{100} \right)$$

4-5 COMBUSTION CHAMBER (BURNER)

$$P_{o5} = P_{o4} \cdot \left[1 - \frac{\Delta P_{CCloss}}{100} \right]$$

Απλός Κύκλος Brayton, Μονού Άξονα

$$T_{o5} = TET$$

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_4 \cdot (c_{ph} \cdot T_{o5} - c_{pc} \cdot T_{o4})}{\eta_{CC} \cdot FCV \cdot 10^6}$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_4 + \dot{m}_f$$

$$FAR_{45} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_4}$$

5-6 MIXER

$$P_{o6} = P_{o5}$$

$$T_{o6} = T_{o5} - DT_{cooling}$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_4 + \dot{m}_f$$

7-8 EXHAUST

$$P_{o8} = P_a \cdot 1.003$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_6$$

6-7 COMPRESSOR & POWER TURBINE

$$P_{o7} = \frac{P_{o8} \cdot 100}{100 - DP_{EXHloss}}$$

$$T_{o7} = T_{o6} \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{P_{o7}}{P_{o6}} \right)^{\frac{(\gamma_h - 1)}{\gamma_h}} \right] \cdot \eta_{isT} \right\}$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_6$$

Απλός Κύκλος Brayton, Μονού Άξονα

7-8 EXHAUST

$$T_{o8} = T_{o7} \cdot \left(1 - \frac{DT_{EXHloss}}{100} \right) \quad (6-27)$$

Σε αυτό το σημείο κάθε κελί του πίνακα είναι πλέον συμπληρωμένο. Οπότε μπορούμε να προχωρήσουμε στο τελευταίο στάδιο υπολογισμών που είναι η ανάλυση λειτουργίας:

PERFORMANCE

$$CW = \dot{m}_2 \cdot c_{pc} \cdot (T_{o3} - T_{o2}) \cdot 10^{-6} \quad (\text{MW}) \quad (6-28)$$

$$TW = \dot{m}_6 \cdot c_{ph} \cdot (T_{o6} - T_{o7}) \cdot 10^{-6} \quad (\text{MW}) \quad (6-29)$$

$$HI = \dot{m}_f \cdot FCV \quad (\text{MW}) \quad (6-30)$$

$$UW = TW - CW \quad (\text{MW}) \quad (6-31)$$

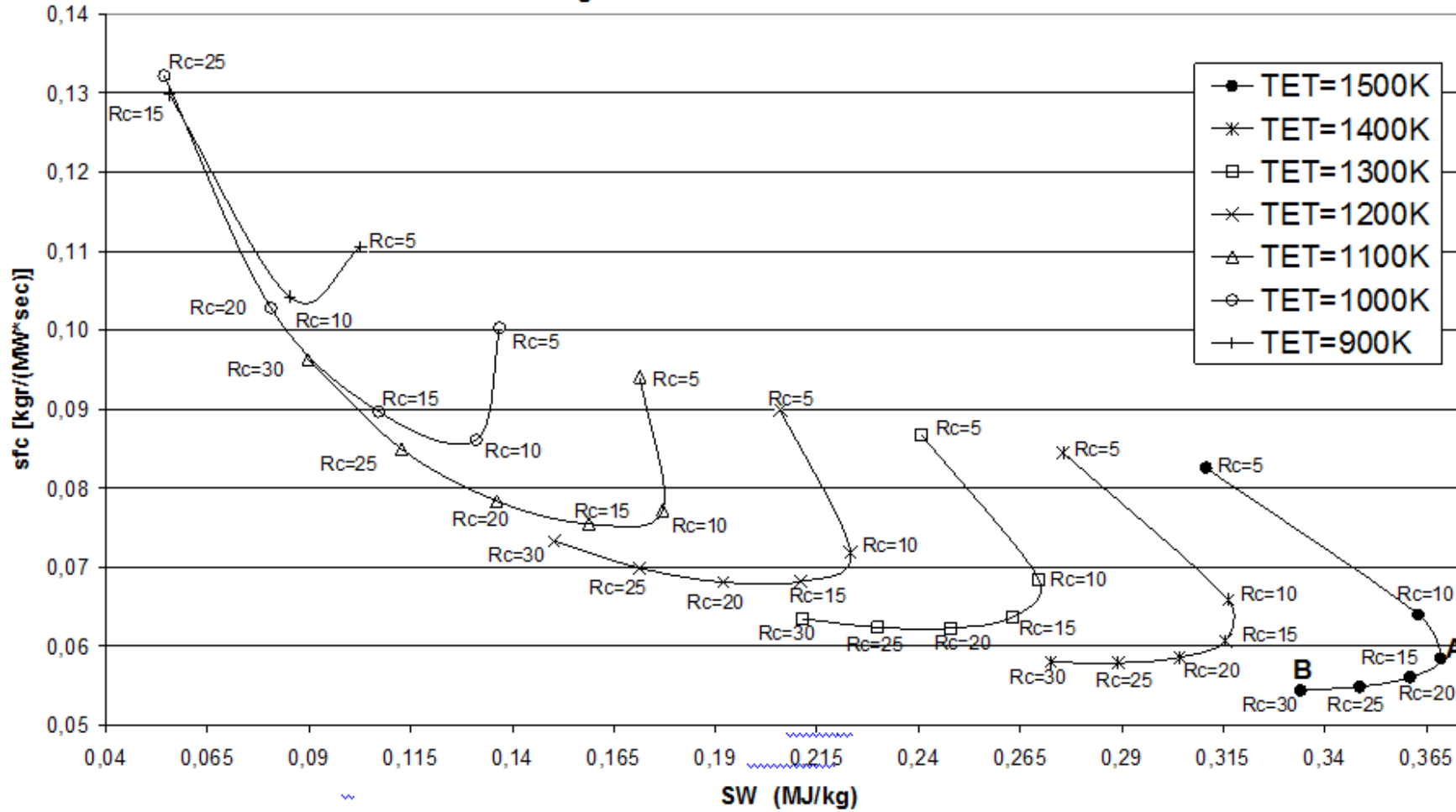
$$SW = \frac{UW}{\dot{m}} \quad (\text{MW} \cdot \text{s}/\text{kg} = \text{MJ}/\text{kg}) \quad (6-32)$$

$$\eta_{th} = \frac{UW}{HI} \quad (6-33)$$

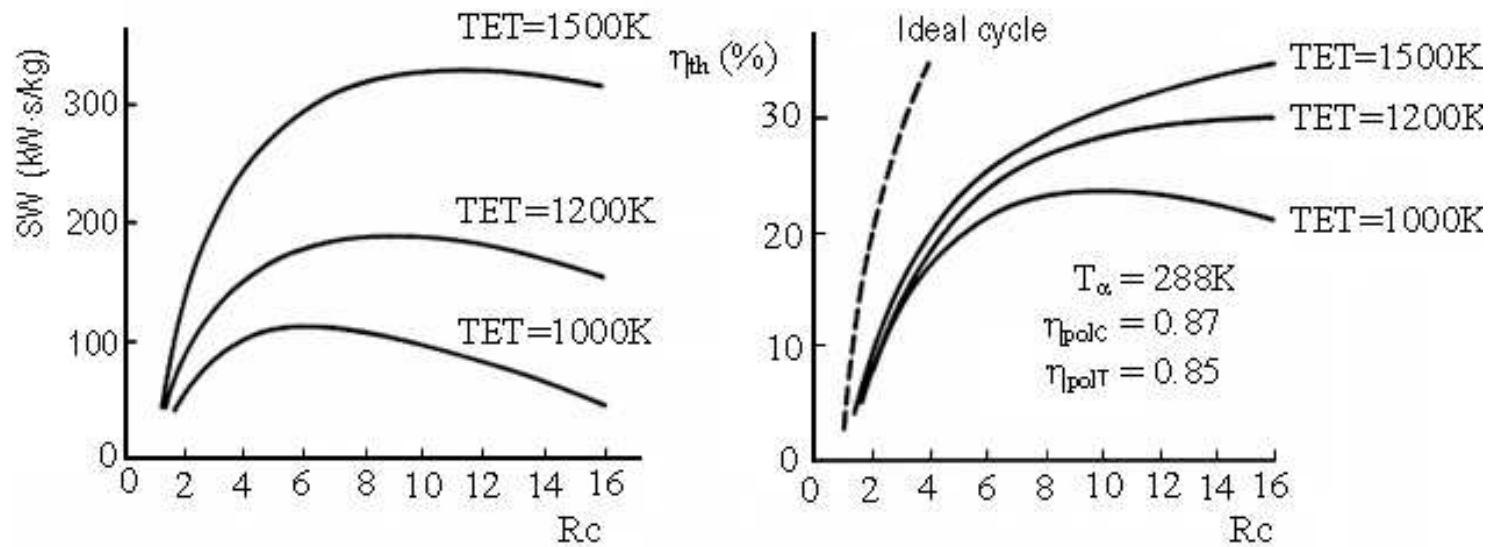
$$sfc = 1/(\eta_{th} \cdot FCV) \quad [\text{kg}/(\text{MW} \cdot \text{s}) = \text{kg}/\text{MJ}] \quad (6-34)$$

Απλός Κύκλος Brayton, Μονού Άξονα

Design Point Performance: 1-shaft GT



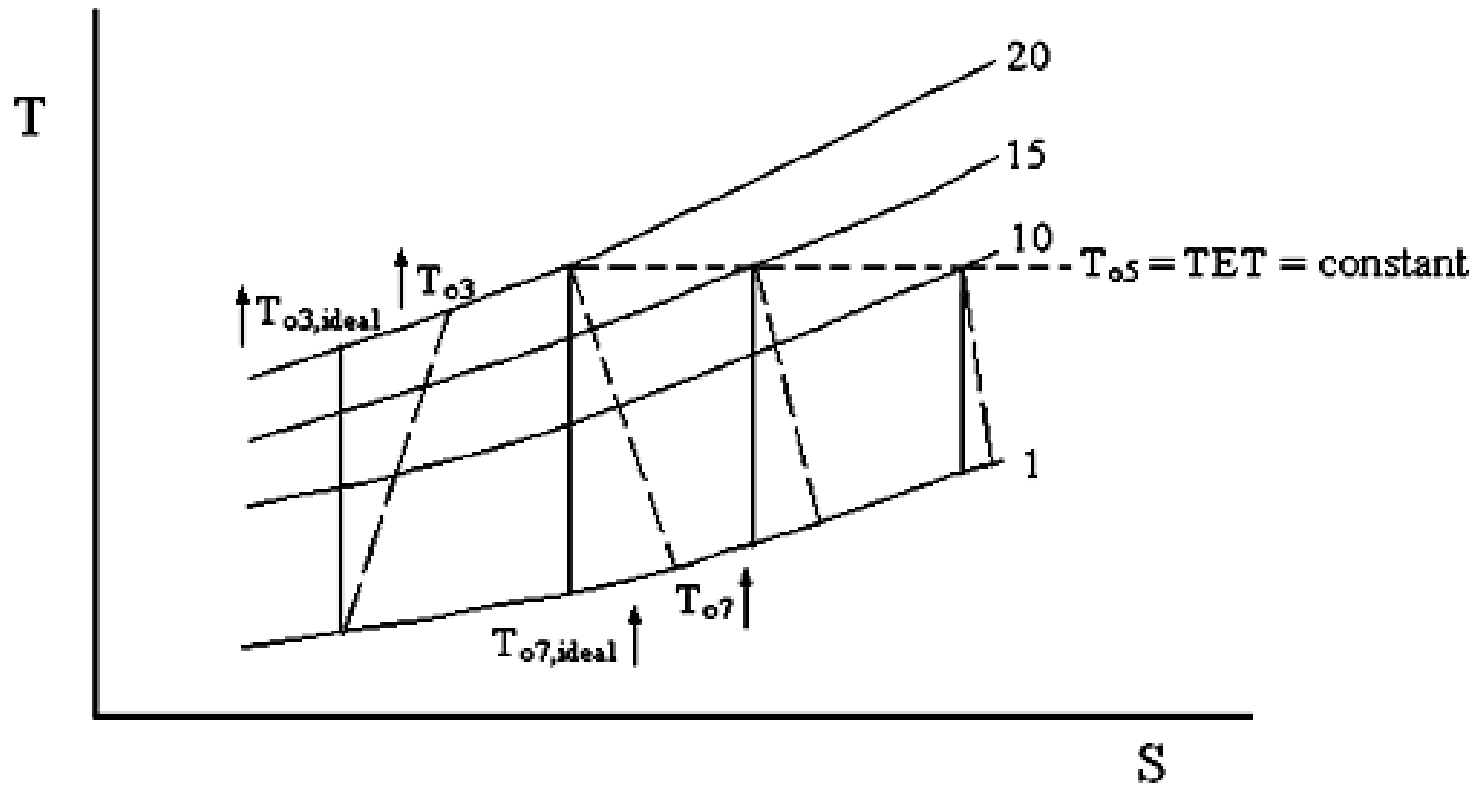
Απλός Κύκλος Brayton, Μονού Άξονα



Κάθε σημείο των διαγραμμάτων αντιστοιχεί σε διαφορετικό κινητήρα και όχι σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του ίδιου κινητήρα

Εμφάνιση μέγιστης τιμής του συντελεστή του η_{th} και στη συνέχεια η μείωση του βαθμού απόδοσης σε υψηλούς λόγους πίεσης (για σταθερή TET)

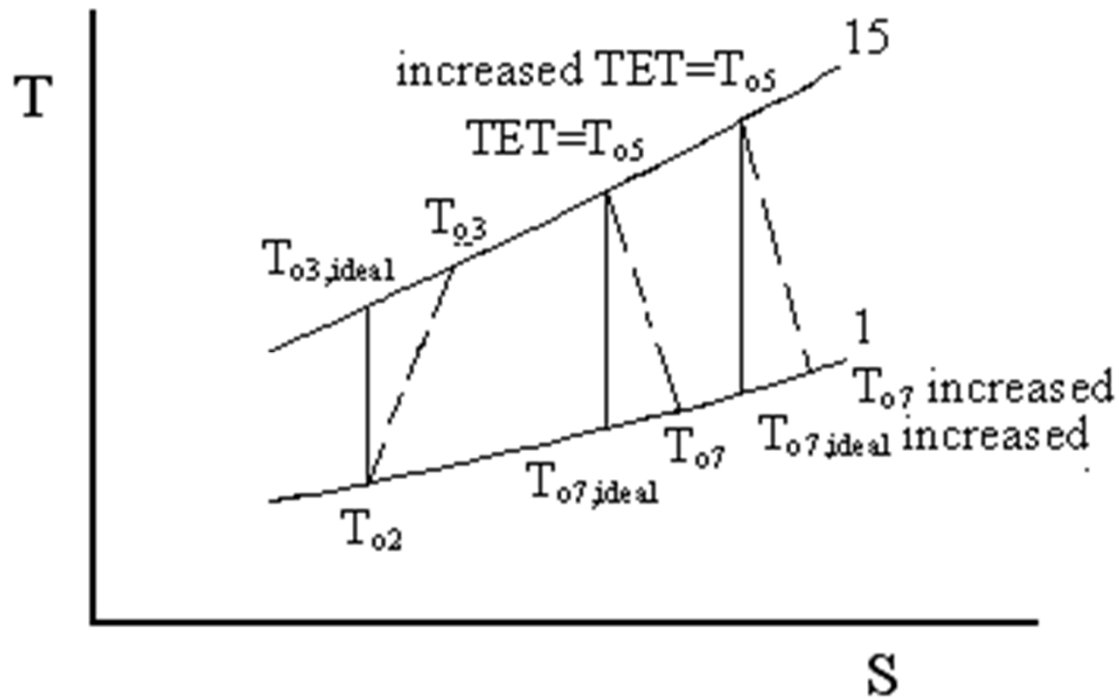
Απλός Κύκλος Brayton, Μονού Άξονα



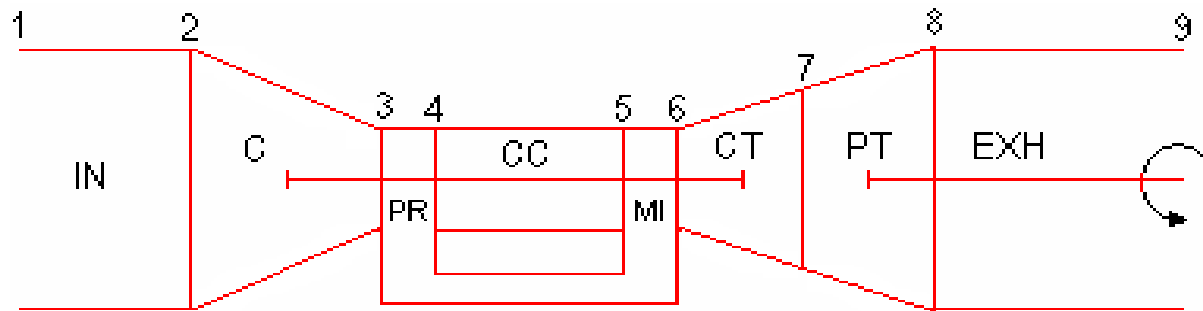
Σχήμα 6.4: Διαγραμματική εξέλιξη της εμφάνισης μεγίστου η_{th} για αυξανόμενο R_c και σταθερή TET .

Απλός Κύκλος Brayton, Μονού Άξονα

Διαγραμματική εξήγηση του συνεχώς αυξανόμενου η_{th} για αυξανόμενη TET και σταθερό R_C



Απλός Κύκλος Brayton, Διπλού Άξονα



Σύγκριση αεριοστρόβιλου 1-shaft και 2-shaft

- Εάν οι συντελεστές ισεντροπικής απόδοσης των δύο τύπων στροβίλων θεωρούνταν ίσοι με τον αντίστοιχο του κινητήρα 1-shaft, τότε η απόδοση του κινητήρα 2-shaft θα προέκυπτε λίγο καλύτερη, (γιατί ισχύει 1-shaft GT: $R_C \approx R_T$, 2-shaft GT: $R_C \approx R_{CT} \cdot R_{PT}$).

Η συμπεριφορά τους στο σημείο σχεδιασμού (η_{th} και SW), είναι περίπου η ίδια, για ίδιες συνθήκες.

Απλός Κύκλος Brayton, Διπλού Άξονα

- Κανονικά, η συμπεριφορά τους έπρεπε να είναι ακριβώς η ίδια.
- Όμως, ελάχιστα καλύτερη λειτουργία παρουσιάζουν οι κινητήρες με την διαμόρφωση *2-shaft*.
- Η διαφορά θα ήταν μεγαλύτερη υπέρ του *2-shaft*, εάν όπως ειπώθηκε στην αρχή της παραγράφου, χρησιμοποιούσαμε την ίδια τιμή του συντελεστή ισεντροπικής απόδοσης για όλους τους στροβίλους με αυτήν του στροβίλου του κινητήρα *1-shaft*.
- Η μικρή λοιπόν διαφορά στη συμπεριφορά εξηγείται από την επιλογή τιμών για τον συντελεστή ισεντροπικής απόδοσης του στροβίλου του συμπιεστή (CT) και του στροβίλου ισχύος (PT).
- Η διαφορά γίνεται πιο εμφανής όταν η θερμοκρασία TET είναι μικρή και ο λόγος R_c μεγάλος.

Απλός Κύκλος Brayton, Διπλού Άξονα

- Οι *2-shaft* χρησιμοποιούνται επίσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε βιομηχανίες με τον στρόβιλο ισχύος να περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα που καθορίζεται από το φορτίο, ενώ η ταχύτητα περιστροφής του αεριοπαραγωγού καθορίζεται από τις επιταγές της βέλτιστης λειτουργία.
- Αντίθετα, με τον *1-shaft* η ταχύτητα περιστροφής του αεριοπαραγωγού μεταβάλλεται ανάλογα το φορτίο. Σημαντικό επομένως πλεονέκτημα του *2-shaft* είναι η απαίτηση μικρότερης ισχύος εκκινητήρα (*starter*) και όπως ήδη ειπώθηκε παραπάνω καλύτερη λειτουργία εκτός του σημείου σχεδιασμού.
- Φυσικά, μειονέκτημα που απορρέει από τον τρόπο λειτουργίας του, είναι ότι ο αεριοστρόβιλος *2-shaft* δεν μπορεί να αντισταθεί στο *over-speeding* εάν αυτό προκληθεί από το δίκτυο.
- Οι *3-shaft* χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μηχανικής καθοδήγησης, και προέρχονται κυρίως από μετασκευές αεροπορικών (*aeroderivatives*). Οι **3-shaft** αεριοστρόβιλοι μπορούν να λειτουργήσουν σε πολύ υψηλούς λόγους πίεσης και έτσι να επιτύχουν υψηλή απόδοση χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση συμπιεστή μεταβλητής γεωμετρίας όπως στην περίπτωση των *2-shaft* όταν λειτουργούν σε υψηλούς λόγους πίεσης.

Ανάλυση λειτουργίας του κινητήρα (engine performance analysis) ή ανάλυση λειτουργίας του κινητήρα εκτός του σημείου σχεδιασμού (Off Design Performance, OD).

Δεδομένες οι συνιστώσες του κινητήρα
(δηλαδή είτε έχει κατασκευαστεί, είτε εξομοιωθεί μαθηματικά)

Στο σημείο αυτό ο κινητήρας μπορεί να βρεθεί **εξαιτίας**:

- αλλαγής των συνθηκών περιβάλλοντος (ambient conditions),
- της ταχύτητας πτήσης (flight Mach number), της αλλαγής της ισχύος/ώσης (αλλαγή της TET) δηλαδή λειτουργία με μερικό φορτίο part load performance),
- τη λειτουργία της μετάκαυσης
- συνδυασμός αυτών μαζί.

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερές στροφές για συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος ή και πτήσης με χαρακτηριστικά λειτουργίας επίσης σταθερά με το χρόνο, μιλούμε για **λειτουργία ισορροπίας** (equilibrium performance ή steady state).

Το σύνολο των σημείων που αντιστοιχούν στις καταστάσεις ισορροπίας συνήθως παριστάνεται σαν μια γραμμή πάνω στο χάρτη λειτουργίας του συμπιεστή, τη **γραμμή λειτουργίας** (running ή working ή operating line).

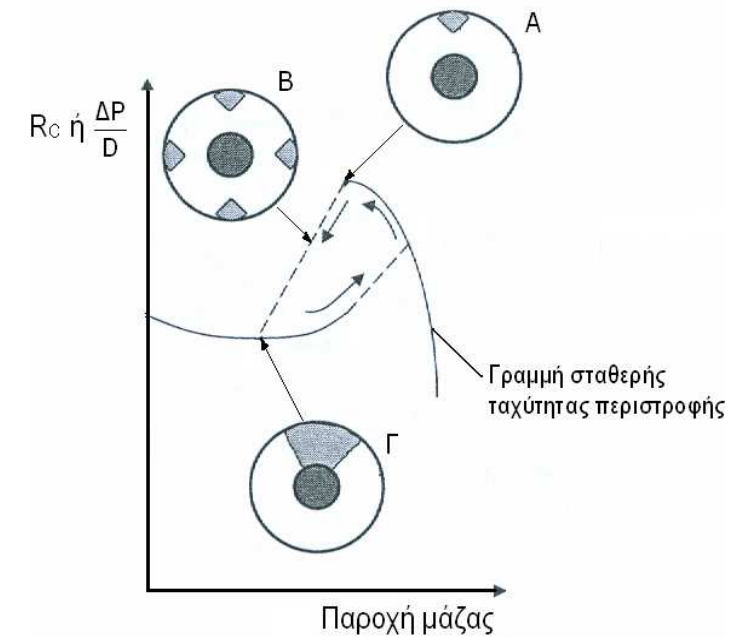
Φαινόμενα Ασταθούς Λειτουργίας Συμπιεστών

Αποκόλλησης της ροής (stall) από μία αεροτομή εμφανίζεται όταν η γωνία πρόσπτωσης (*incidence angle*) ξεπεράσει μία δεδομένη τιμή:

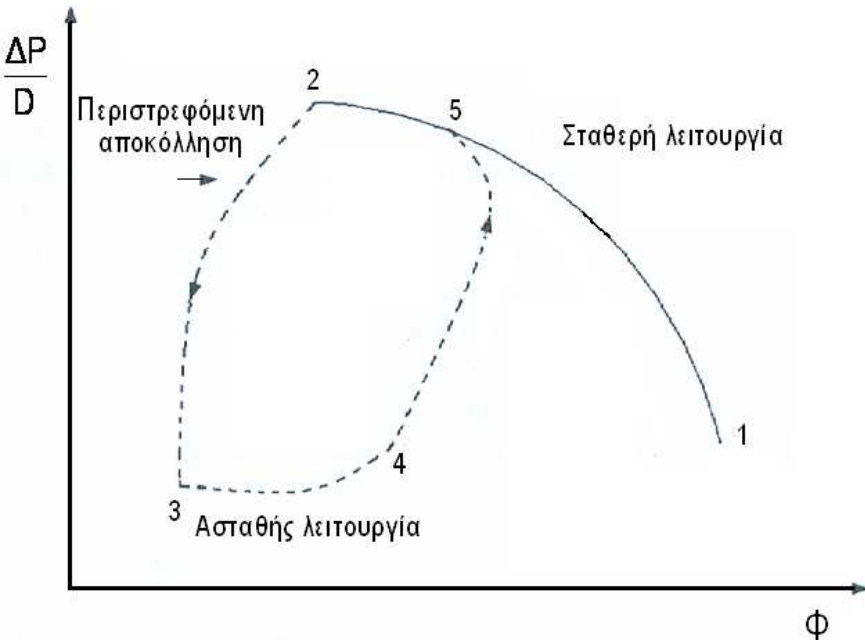
Σ' ένα πολυβάθμιο συμπιεστή αυτή μπορεί να γίνει αποδεκτή, όπως για παράδειγμα κατά την εκκίνηση του κινητήρα, όπου η ταχύτητα περιστροφής είναι σχετικά μικρή. Στην περίπτωση αυτή -υπό κανονικές συνθήκες- κάποια πτερύγια των πρώτων βαθμίδων μπορεί να βιώνουν κατάσταση αποκόλλησης ροής, αλλά η ομαλή λειτουργία να διατηρείται γιατί οι τελευταίες βαθμίδες λειτουργούν χωρίς φαινόμενα αποκόλλησης ροής και έτσι η ροή σταθεροποιείται

Περιστροφική αποκόλληση (rotating stall) έχουμε ανάπτυξη κυψελών αποκολλημένης ροής που περιστρέφονται περιφερειακά με ταχύτητα μικρότερη της ταχύτητας περιστροφής του άξονα (συνήθως μεταξύ 40% και 70% της ταχύτητας αυτής).

- A:** Κυψέλη αποκόλλησης μερικού ύψους (*part-span stall cell*)
- B:** Κυψέλες αποκόλλησης μερικού ύψους (*part-span stall cell*)
- Γ:** Κυψέλες αποκόλλησης πλήρους ύψους (*full-span stall cell*)



Φαινόμενα Ασταθούς Λειτουργίας Συμπιεστών



3: μερική αποκόλληση

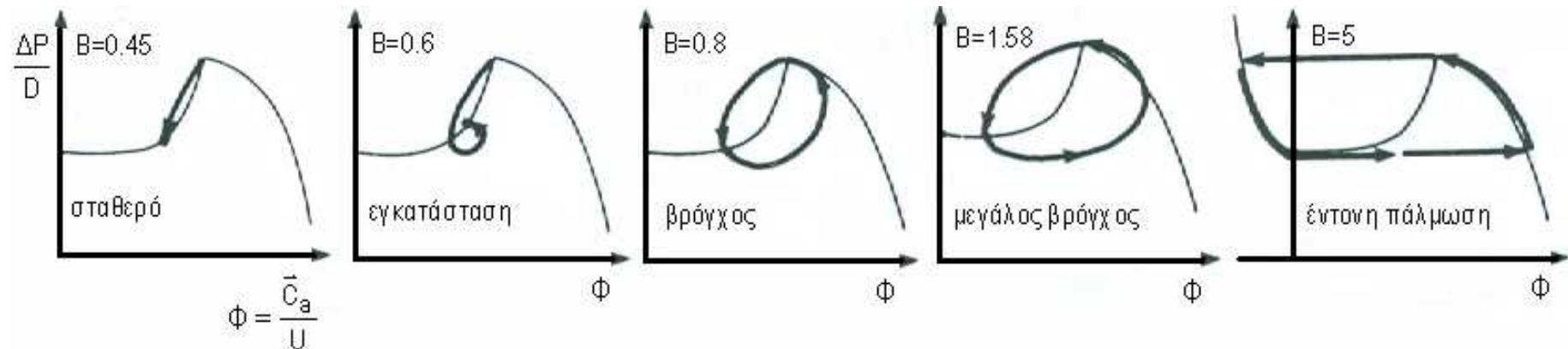
4: πλήρη αποκόλληση

Στην **πάλμωση** (*surge*) έχουμε συνολικές ταλαντώσεις της ροής δια μέσου του δακτυλιοειδούς αγωγού του συμπιεστή που επηρεάζουν πλέον και τη λειτουργία του θαλάμου καύσης και παριστάνονται από επαναλαμβανόμενους βρόγχους

Φαινόμενα Ασταθούς Λειτουργίας Συμπιεστών

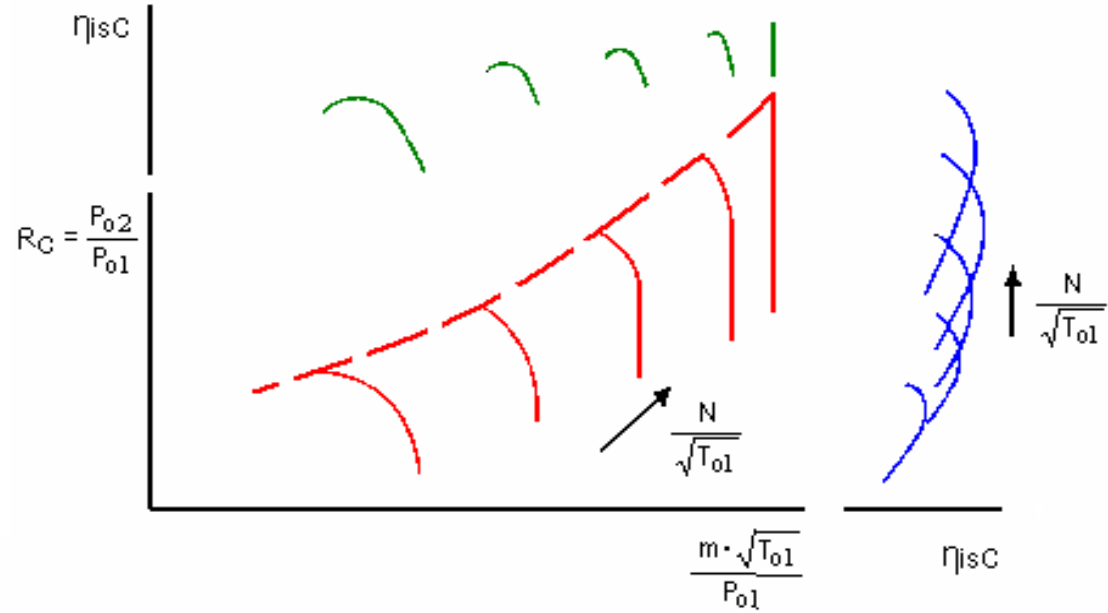
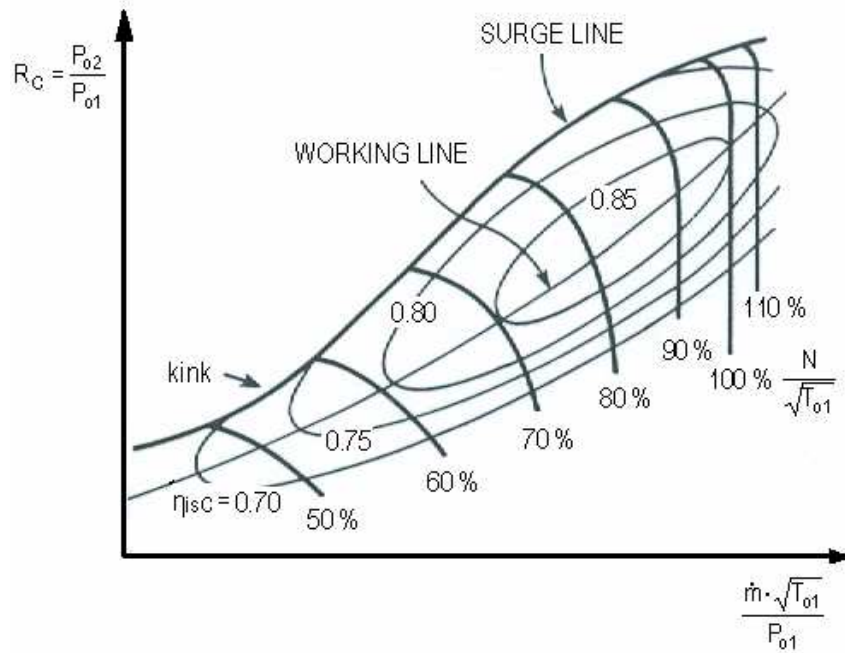
Η συμπεριφορά ενός συμπιεστή από τη στιγμή που το σημείο λειτουργίας του πλησιάζει το όριο ασταθούς λειτουργίας και μάλιστα να προσδιοριστεί κατά πόσο θα έχουμε περιστροφική αποκόλληση ή πάλμωση. Το ποιο από τα δυο φαινόμενα θα συμβεί καθορίζεται από την τιμή μιας παραμέτρου B , που ονομάζεται **πaráμετρος Greitzer**.

$$B = \frac{U}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{A \cdot L}{V_{CC}}}}$$



Χάρτης Συμπιεστή

αναπτυγμένος χάρτης



συνεπτυγμένος ή συμπαγής

Χάρτης Συμπιεστή

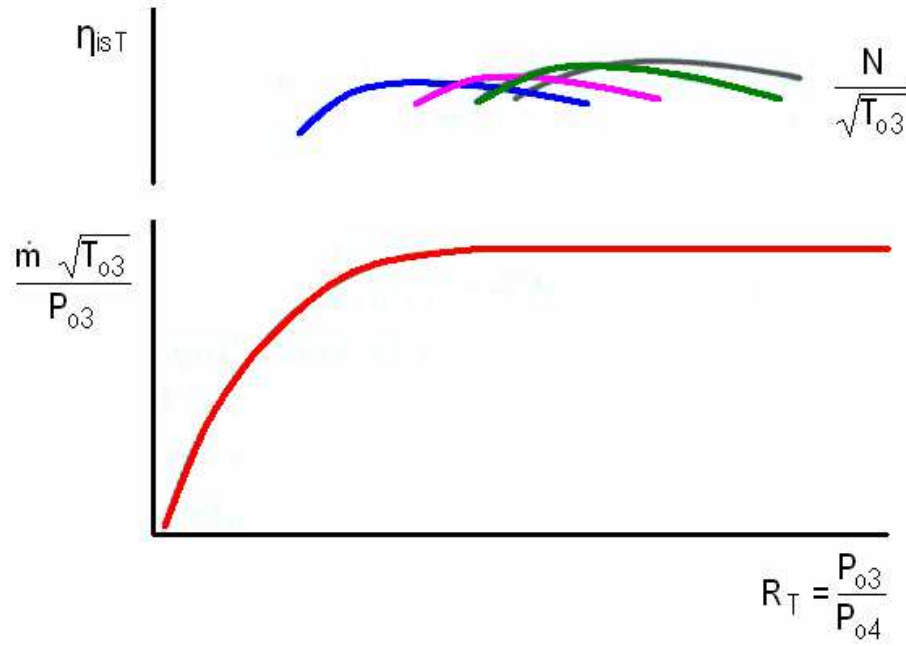
περιθώριο πάλμωσης (*Surge* ή *Stall Margin*, SM)

$$SM = \frac{R_C^{SL} - R_C^{DP}}{R_C^{DP}} \cdot 100\%$$

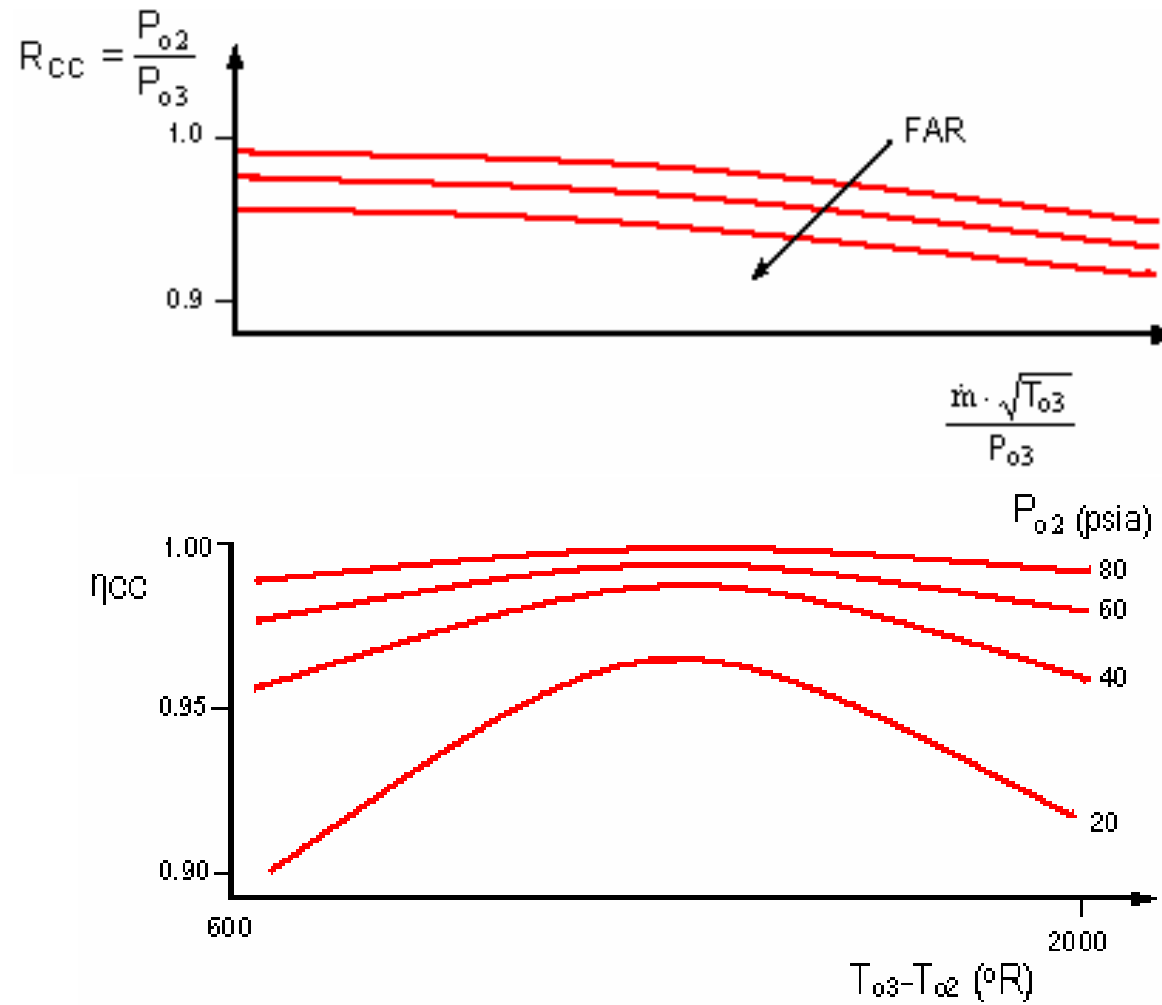
σημείο σχεδιασμού (DP) και γραμμή πάλμωσης (SL)

| Εφαρμογή GT | Ανεμιστήρας | LP/IP συμπιεστής | HP συμπιεστής |
|--------------------|-------------|------------------|---------------|
| Παραγωγή ενέργειας | - | 15-20 | 15-20 |
| Αντλίες | - | 10-15 | 15-20 |
| Άρμα μάχης/τρένο | - | 15-20 | 20-25 |
| Πλοίο | - | 10-15 | 15-20 |
| Πολιτικό α/φος | 10-15 | 15-20 | 20-25 |
| Ελικόπτερο | - | 15-20 | 20-25 |
| Μαχητικό α/φος | 15-20 | 20-25 | 25-30 |

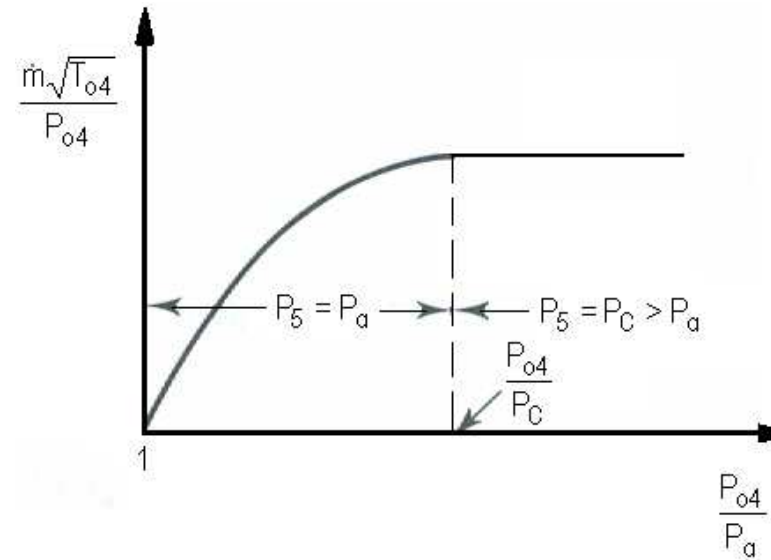
Χάρτης Στροβίλου



Χάρτης Θαλάμου Καύσης



Χάρτης Προωθητικού Ακροφυσίου



Βιομηχανικοί αεριοστρόβιλοι

Χρησιμοποιούνται κυρίως για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος πολύ μικρής (έως 1MW, *micro-GTs*), μικρής ή μεσαίας κλίμακας από 1 έως και 70MW

Εργοστάσια που παραγωγής ηλεκτρική ενέργειας:

- Μονάδες βάσης, (base load power plant). Λειτουργούν σχεδόν όλο το έτος.
- Μονάδες εποχιακές, (mid merit power plant). Χρησιμοποιούνται για να καλύψουν εποχιακές ανάγκες, όπως για παράδειγμα το χειμώνα όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι χαμηλές και παρατηρείται επιπλέον ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια λόγω αυξημένων αναγκών για θέρμανση και φωτισμό ή το καλοκαίρι όταν οι ανάγκες για κλιματισμό είναι μεγάλες.
- Μονάδες αιχμής, (peak loping load GT). Λειτουργούν λιγότερο από 10% ανά έτος.

Κριτήρια επιλογής αεριοστρόβιλου για μια μονάδα *base load* είναι κατά σειρά προτεραιότητας:

1. Υψηλός θερμικός βαθμός απόδοσης.
2. Υψηλή διαθεσιμότητα.
3. Χαμηλό κόστος κατασκευής.
4. Χρόνος κατασκευής και ένταξης της μονάδας στο σύστημα οπότε και αρχίζει η απόσβεση του κεφαλαίου της επένδυσης.
5. Κόστος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου, που αποτελεί το σημαντικότερο μέρος του κόστους της τιμής της μονάδας της ηλεκτρικής ενέργειας.
6. Περιβαλλοντικά ζητήματα: αέριοι ρύποι, κατανάλωση υδάτινων πόρων, αισθητική και μέγεθος εγκατάστασης, θόρυβος.

Μετασκευασμένοι Αεροπορικοί Αεριοστρόβιλοι (aeroderivative GTs)

Επιλογή ενός αεροπορικού αεριοστρόβιλου για την χρησιμοποίησή του, είτε σαν αυτούσιο κινητήρα, είτε σαν αεριοπαραγωγό που δίνει ισχύ σε έναν ελεύθερο στρόβιλο ισχύος. Με άλλα λόγια τη μετασκευή ενός αεροπορικού σε αξονοστροβιλοκινητήρα για βιομηχανική χρήση.

Επισημαίνεται, ότι η ανάπτυξη ενός νέου αεροπορικού αεριοστρόβιλου από το μηδέν κοστίζει τουλάχιστον 1 δις \$.

Οι μετασκευασμένοι αυτοί αεριοστρόβιλοι λειτουργούν με TET, R_C , κ.λπ., ίδιες με αυτές που είχαν όταν ήταν τοποθετημένοι σε αεροσκάφη και λειτουργούσαν σε συνθήκες πτήσης *cruise*.

Χρήση: CHP, *peak loping engines*, σαν κινητήρες αντλιών στη πετροχημική βιομηχανία, πλοία κ.α., με απαιτήσεις ισχύος έως 50MW.

Πλεονεκτήματα αυτής της επιλογής κινητήρα συνοψίζονται στα εξής:

- Χαμηλό κόστος κατασκευής, λόγω χρήσης κοινών τμημάτων (το κόστος ανάπτυξης και κατασκευής ενός νέου αεριοστρόβιλου για βιομηχανική χρήση κυμαίνεται από 40-100εκ. ευρώ).
- Χαμηλό κόστος συντήρησης, λόγω χρήσης κοινών ανταλλακτικών και της υφιστάμενης εμπειρίας λειτουργίας των αντίστοιχων αεροπορικών κινητήρων.
- Σχετικά σύντομος χρόνος ανάπτυξης και κατασκευής σε σχέση με αντίστοιχο καινούργιο κινητήρα (ένας καινούργιος βιομηχανικός κινητήρας χρειάζεται περίπου 4 χρόνια για να κατασκευαστεί από μηδενική βάση).
- Υψηλή διαθεσιμότητα.