

(ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ) ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΕΣ

Δίωρο No. 1

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ
6^ο Εξάμηνο

ΔΙΔΑΣΚΩΝ: Κ.ΓΙΑΝΝΑΚΟΓΛΟΥ, Καθηγητής ΕΜΠ
kgianna@mail.ntua.gr

Site - Επικοινωνία:

- Τα “πάντα” γύρω από το μάθημα βρίσκονται στο:

<http://velos0.ltt.mech.ntua.gr/kgianna>

ή 147.102.55.162/kgianna

- Παρακολουθείτε οτιδήποτε γύρω από το μάθημα στο παραπάνω site. Σε αυτό σας παραπέμπει και το **Helios**. Το **Helios** χρησιμοποιείται επικουρικά και κατά περίπτωση, λχ για να σας σταλεί ένα επείγον μήνυμα για το μάθημα, τις εξετάσεις του κλπ
- Επικοινωνία με τον διδάσκοντα στο kgianna@mail.ntua.gr. Δείτε πάντως τις ανακοινώσεις πριν επικοινωνήσετε.
- Απορίες πάνω στο μάθημα, καλύτερα δια ζώσης: στην τάξη ή στο γραφείο E309.

Οδηγίες για την Πορεία του Μαθήματος

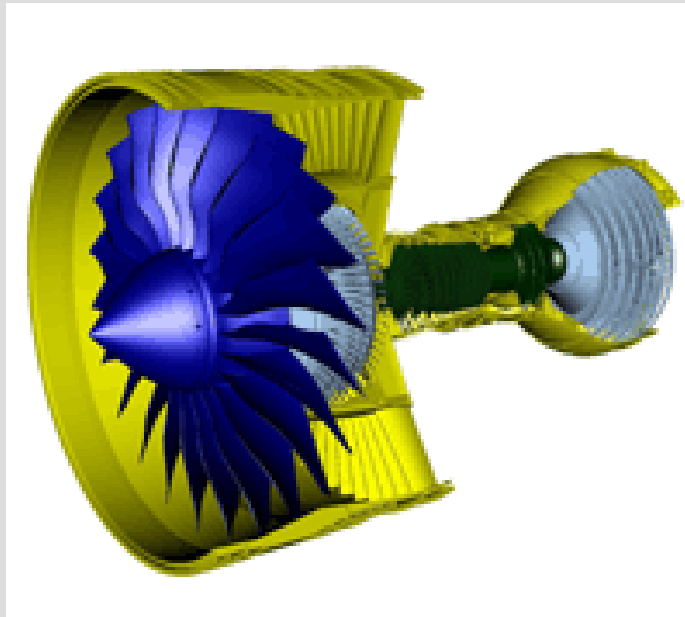
- Βιβλίο (με λυμένες και άλυτες ασκήσεις) από Τυπογραφική Μονάδα ΕΜΠ. Το βιβλίο είναι ελεύθερο να το κατεβάσετε και από το site του μαθήματος.
- Τυπολόγιο 8 σελίδων, από το site. Μοναδικό βοήθημα στις εξετάσεις. Έχει οτιδήποτε χρειάζεστε, μην το «ενισχύετε» με επιπλέον σημειώσεις, ειλικρινά ΔΕΝ ΧΡΕΙΑΖΕΤΑΙ
- Επαρκές πλήθος λυμένων θεμάτων εξετάσεων στο site.
- Μια υποχρεωτική υπολογιστική άσκηση (Homework)= ένα πολύ καλό test ενόψει εξέτασης. Deadline!
- Μια υποχρεωτική εργαστηριακή άσκηση. Deadline!
- Μη-πραγματοποιηθέντα δώρα μαθήματος αναπληρώνονται άμεσα (δείτε στο site, στις Ανακοινώσεις).

Οδηγίες για την Πορεία του Μαθήματος

- Όσες/οι έχουν ήδη παραδώσει ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ (άρα βαθμολογηθείσες) την υποχρεωτική υπολογιστική και την υποχρεωτική εργαστηριακή άσκηση δεν χρειάζεται να τις ξανακάνουν.
- Συνιστάται, όμως, να δουν την υπολογιστική άσκηση του τρέχοντος έτους και να κρίνουν αν πρέπει να τη λύσουν, έστω και χωρίς να την παραδώσουν, ώστε να είναι πιο προετοιμασμένες/οι για την εξέταση.

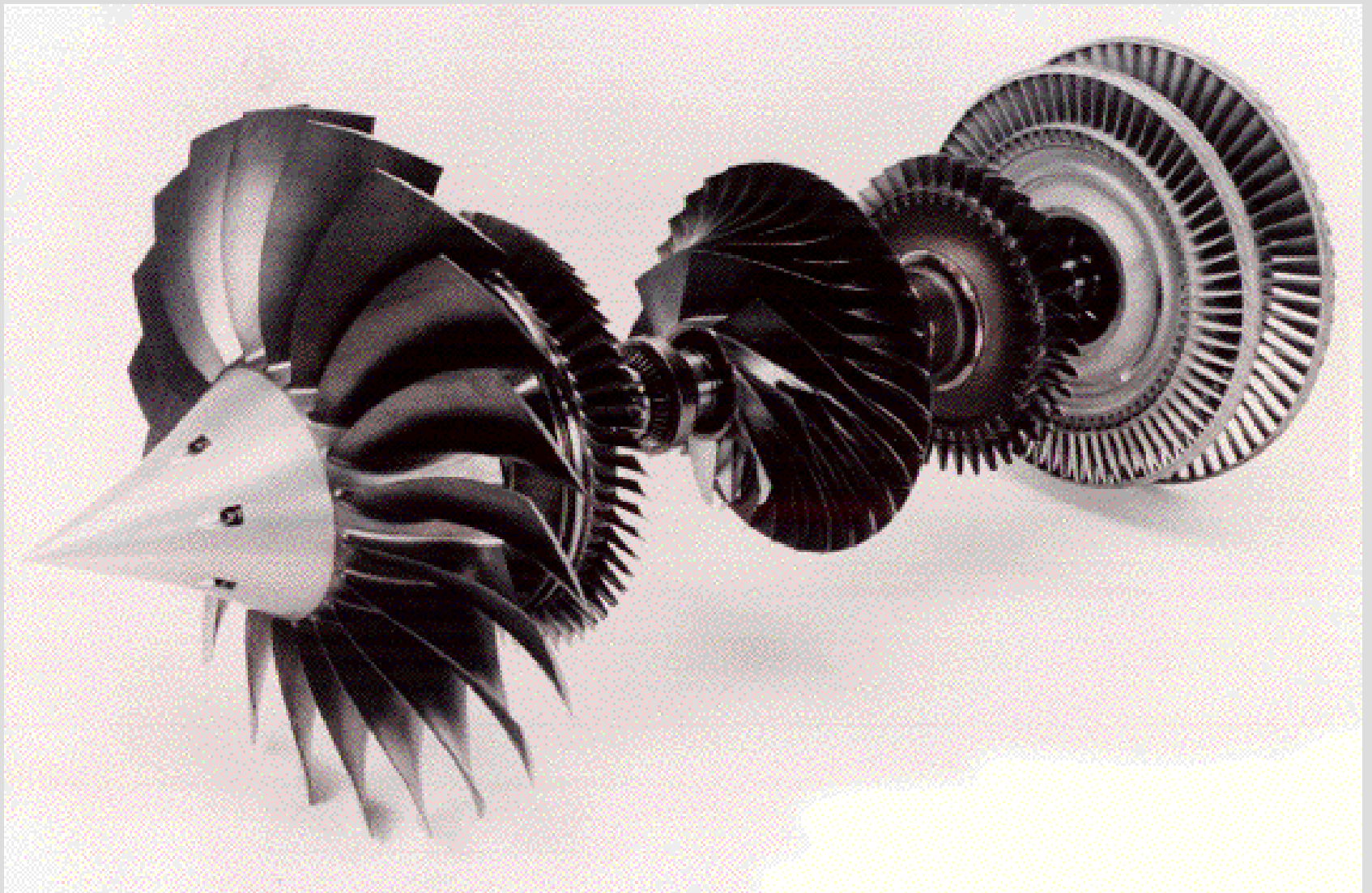
Ορισμός Στροβιλομηχανής - Βασικά χαρακτηριστικά:

- Συνεχής ροή εργαζόμενου μέσου
- Δυναμική αλληλεπίδραση ρευστού και κινούμενων πτερυγίων
- Συναλλαγή ενέργειας: Στρόβιλος (από το ρευστό στα περιστρεφόμενα πτερύγια) ή Εργοστροβιλομηχανή (από τα περιστρεφόμενα πτερύγια στο ρευστό)



Γνωστοί Τύποι (**Θερμικών**) Στροβιλομηχανών:

- **Συμπιεστής (Compressor)**
- **Στρόβιλος (Turbine)**
- Υδροστρόβιλος
- Αντλία
- Φυσητήρας
- Ανεμιστήρας
- Έλικας
- Προπέλα



Άτρακτος / Άξονας και (Περιφερειακές) Πτερυγώσεις

Κ. Γιαννάκογλου, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ



Συμπιεστής Μονάδας IV (120MW, ΔΕΗ Λαύριο)

Κ. Γιαννάκογλου, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Να ξεχωρίζουμε (πρακτικά) τους όρους:

- Συμπιεστό / Ασυμπίεστο ρευστό
(compressible / incompressible fluid)
- Συμπιεστή / Ασυμπίεστη ροή
(compressible / incompressible flow)

Μια θεώρηση:

Ασυμπίεστη ροή συμπιεστού ρευστού!!!!

= ροή συμπιεστού ρευστού (λ.χ. αέρα) σε μικρές ταχύτητες.
(Το να μελετάται η ροή ως ασυμπίεστη είναι «βολική»
προσέγγιση αποδεκτού (για το μηχανικό) σφάλματος!)

ΠΡΟΣΟΧΗ:

**Το μάθημα Θ.Σ. γενικά ασχολείται με συμπιεστό ρευστό σε
υψηλές ταχύτητες!!! Η παραδοχή (εξισώσεις) του ασυμπίεστου
πρέπει να χρησιμοποιούνται ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΑ (μόνο αν ...)**

Εφαρμογές Στροβιλομηχανών:

- Πρόωση Αεροσκαφών
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Θερμοηλεκτρικούς Σταθμούς

Ατμοστρόβιλοι

Αεριοστρόβιλοι

Σταθμοί Συνδυασμένης Παραγωγής Ενέργειας

- Επίγειες μεταφορές
- Ναυτιλία

Στροβιλοϋπερπληρωτές (turbochargers σε Diesel)

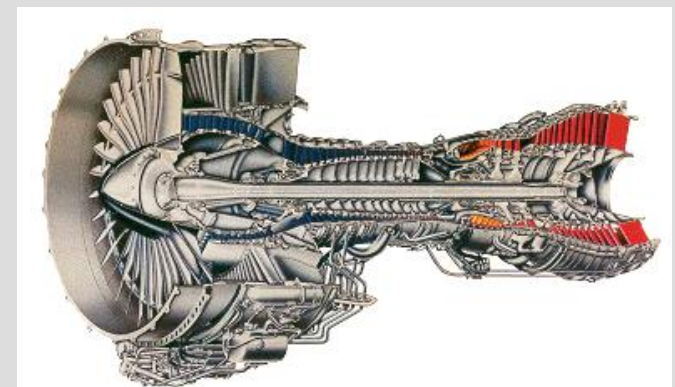
- Χημική Βιομηχανία

Αέριο υπό πίεση

Γραμμές μεταφοράς αερίων

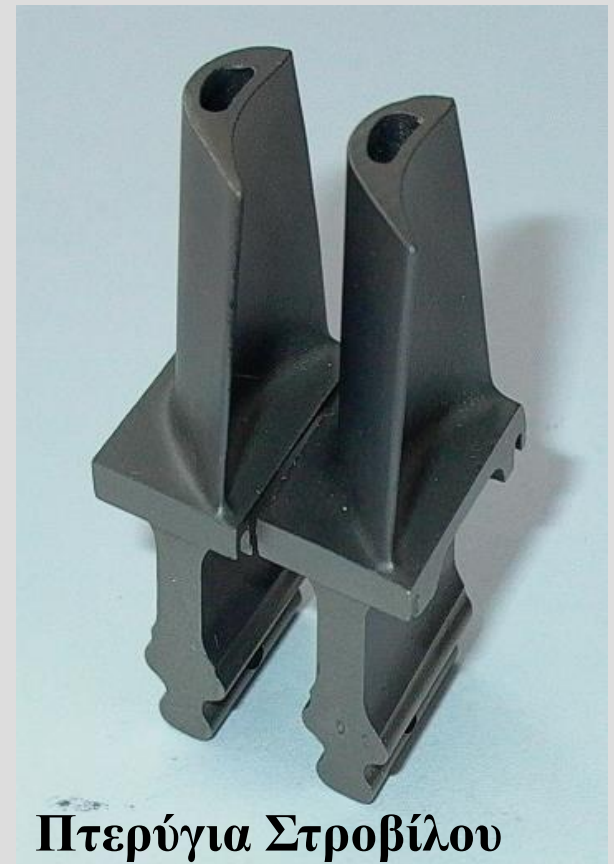
Διάφορες Ταξινομήσεις Στροβιλομηχανών:

- Ως προς την ύπαρξη περιβάλλοντος κελύφους:
Ανοικτή ή κλειστή στροβιλομηχανή
- Ως προς την πορεία που ακολουθεί το ρευστό:
Αξονική ή ακτινική στροβιλομηχανή
- Ως προς το είδος του εργαζόμενου μέσου:
Υδροστρόβιλοι – Αεριοστρόβιλοι - Ατμοστρόβιλοι





Πτερύγια Συμπιεστή

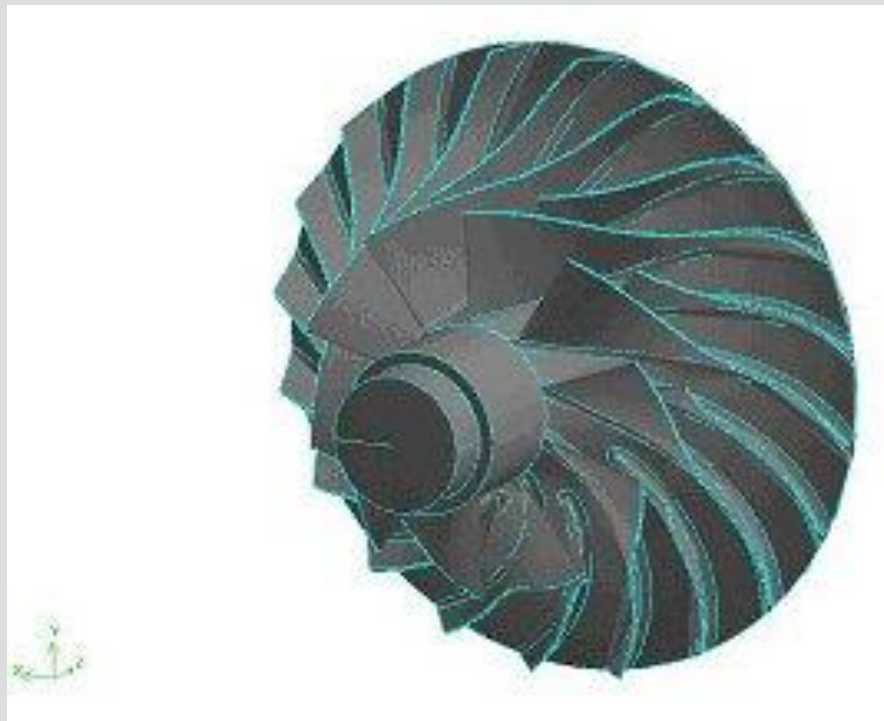


Πτερύγια Στροβίλου

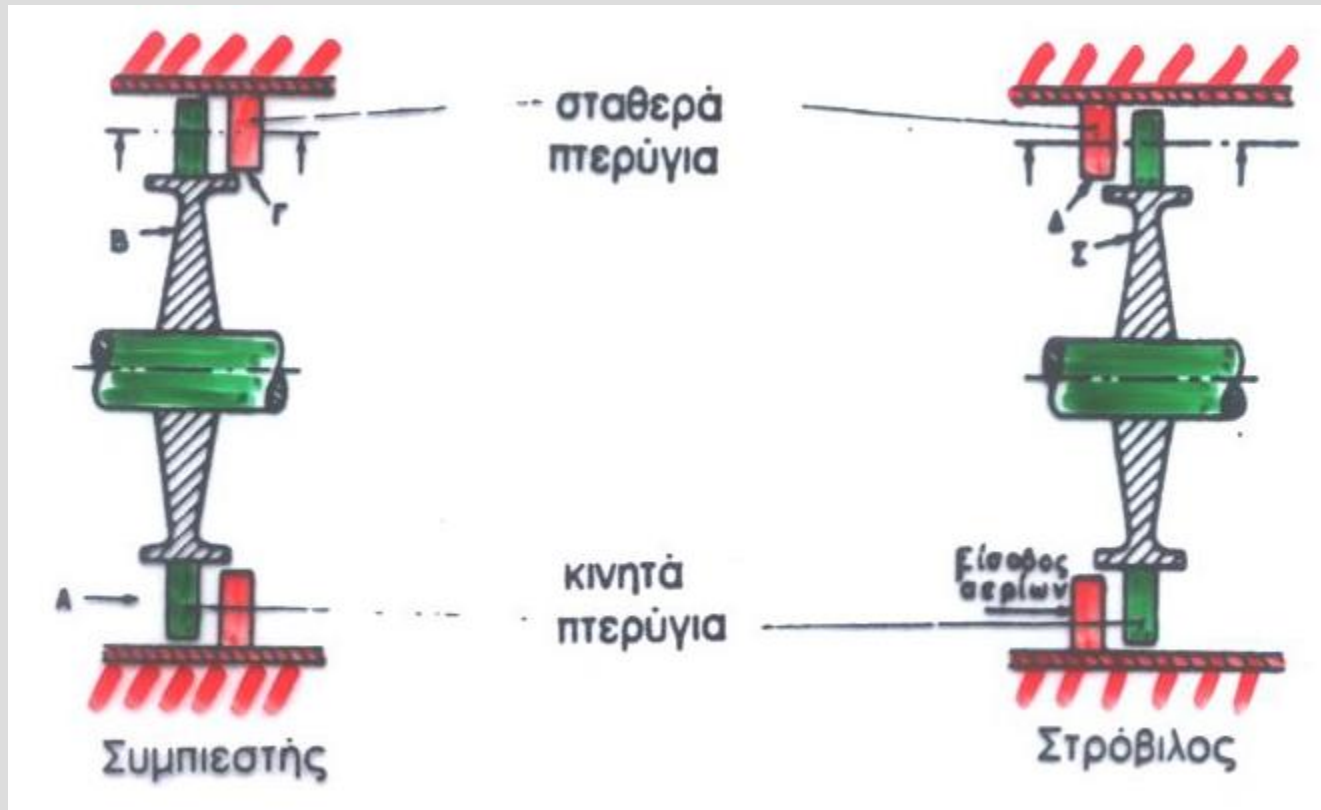
Πτερύγιο (Blade) – Πτερύγωση (Blade Row) – Βαθμίδα (stage)

←
**Σταθερή ή Ακίνητη Πτερύγωση (Stator)
Κινητή ή Περιστρεφόμενη Πτερύγωση
(Δρομέας, Rotor)**

↓
**Μονοβάθμιες Στροβιλομηχανές
Πολυβάθμιες Στροβιλομηχανές**



Ακτινικός (φυγοκεντρικός) συμπιεστής – Η πτερωτή



Βαθμίδα Συμπιεστή και Στροβίλου

Ορολογία:

- **Άξονας ή άτρακτος - shaft**
- **Πτερύγια - blades**
(σταθερά ή ακίνητα, κινητά ή περιστρεφόμενο)
(stationary, rotating)
- **Αεροτομή Πτερυγίου (blade airfoil)**
- **Πτερύγωση – blade row**
(σταθερή ή ακίνητη, κινητή ή περιστρεφόμενη)
(stationary / stator , rotating / rotor)
- **Βαθμίδα – stage**
(βαθμίδα συμπίεστή – compressor stage)
(βαθμίδα στροβίλου– turbine stage)
- **Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (ω)**
angular speed (1/sec)

Ορολογία:

•Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (ω)
angular speed (1/sec)

$\omega=2\pi N/60$, N =στροφές/λεπτό ή RPM (revolutions per minute)

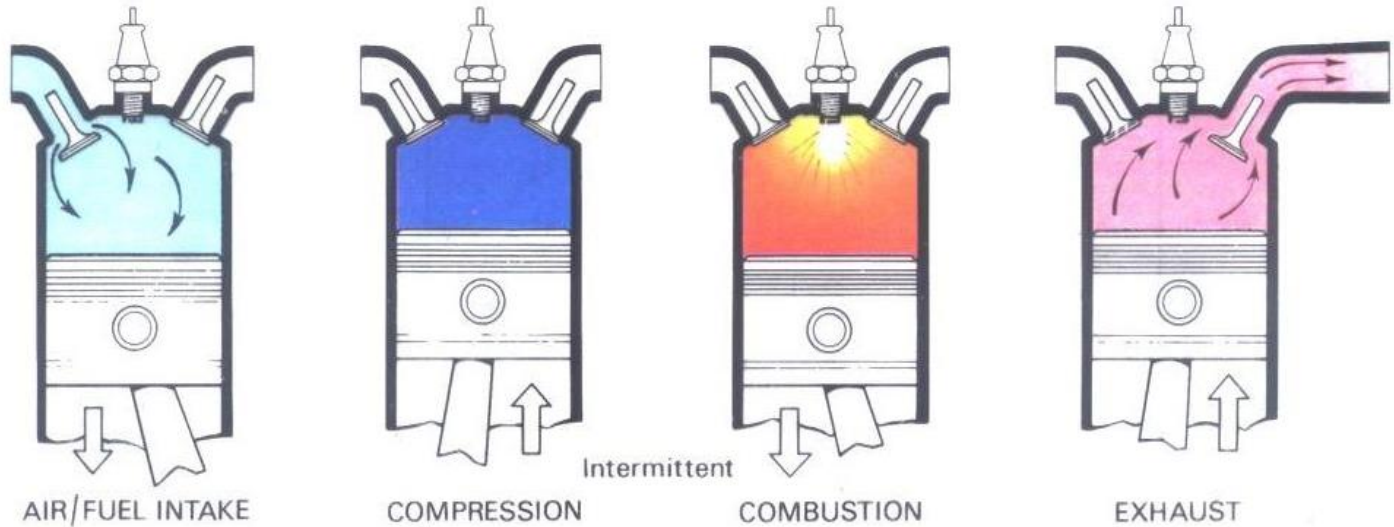
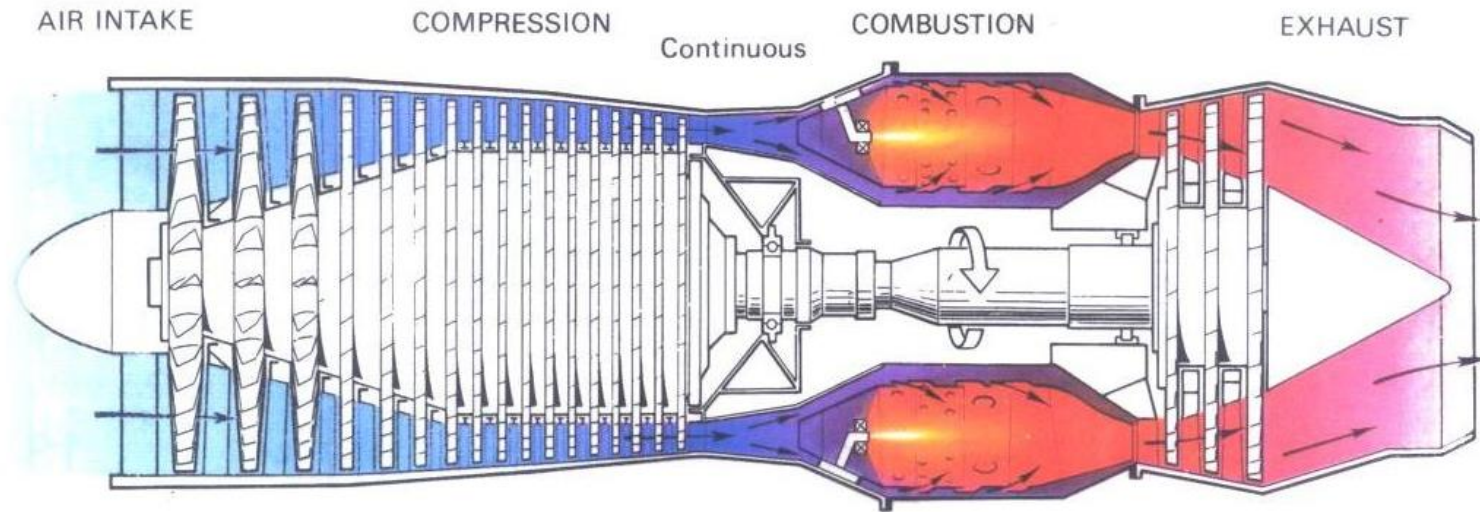
Προσέξτε:

Αν οι στροφές δίνονται ανά δευτερόλεπτο, τότε:

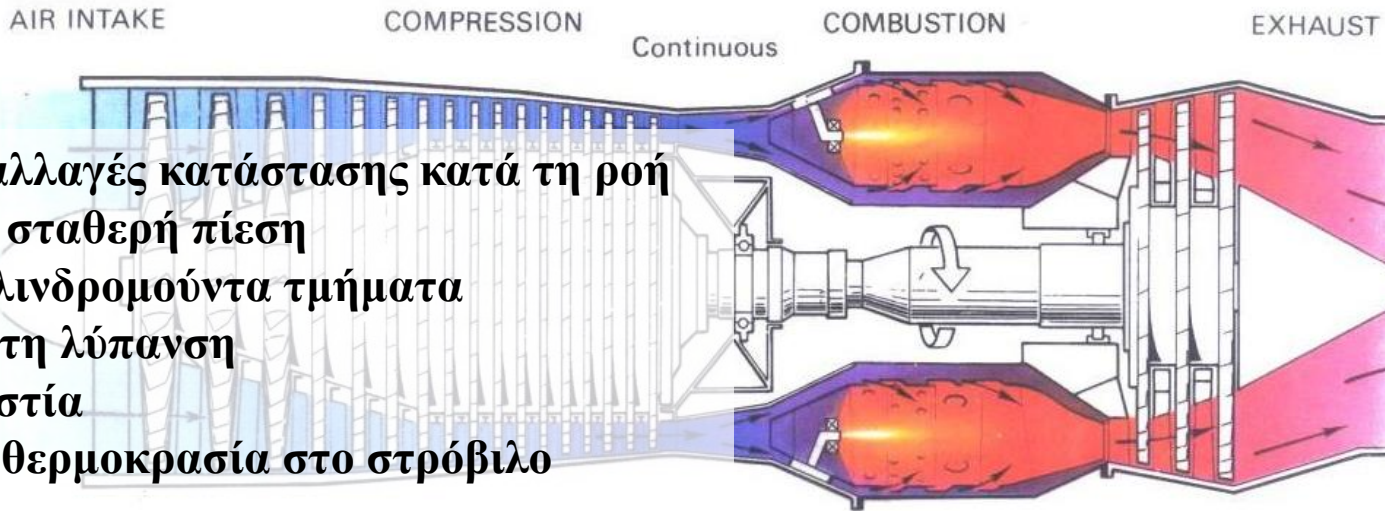
$\omega=2\pi N$ (σκέτο!)

•Γραμμική ταχύτητα περιστροφής σε ακτίνα R (σε μέτρα)

$U=\omega R= 2\pi N(\text{RPM})/60$ (m/sec)



Στροβιλομηχανή vs. Μηχανή Μετατόπισης



Συνεχείς αλλαγές κατάστασης κατά τη ροή

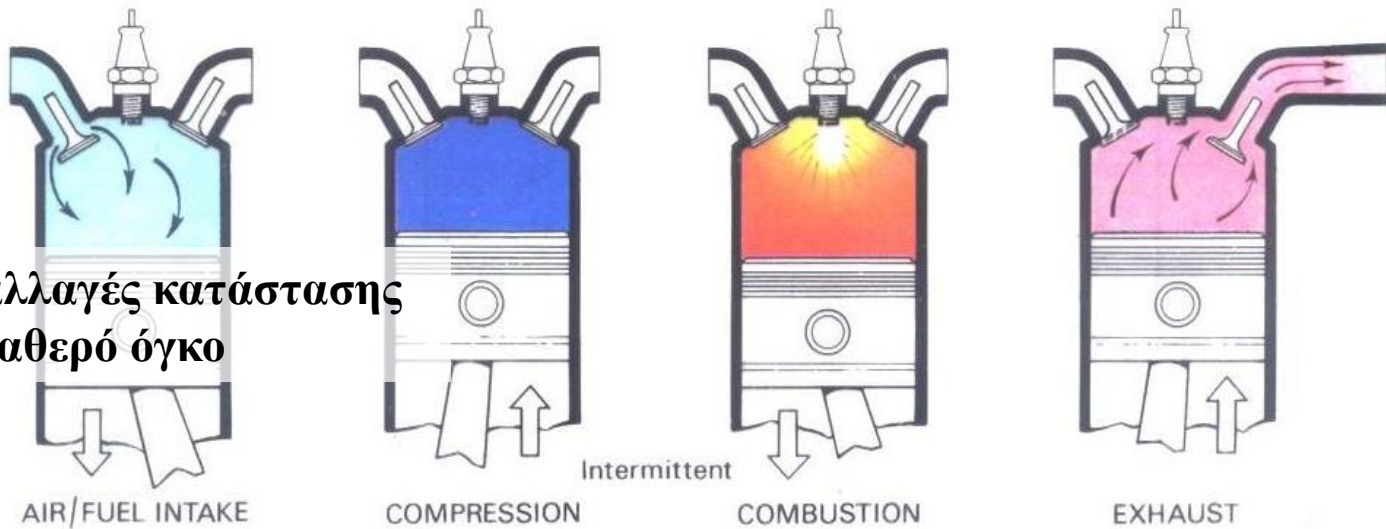
Καύση με σταθερή πίεση

(+) όχι παλινδρομούντα τμήματα

(+) ελάχιστη λύπανση

(+) αξιοπιστία

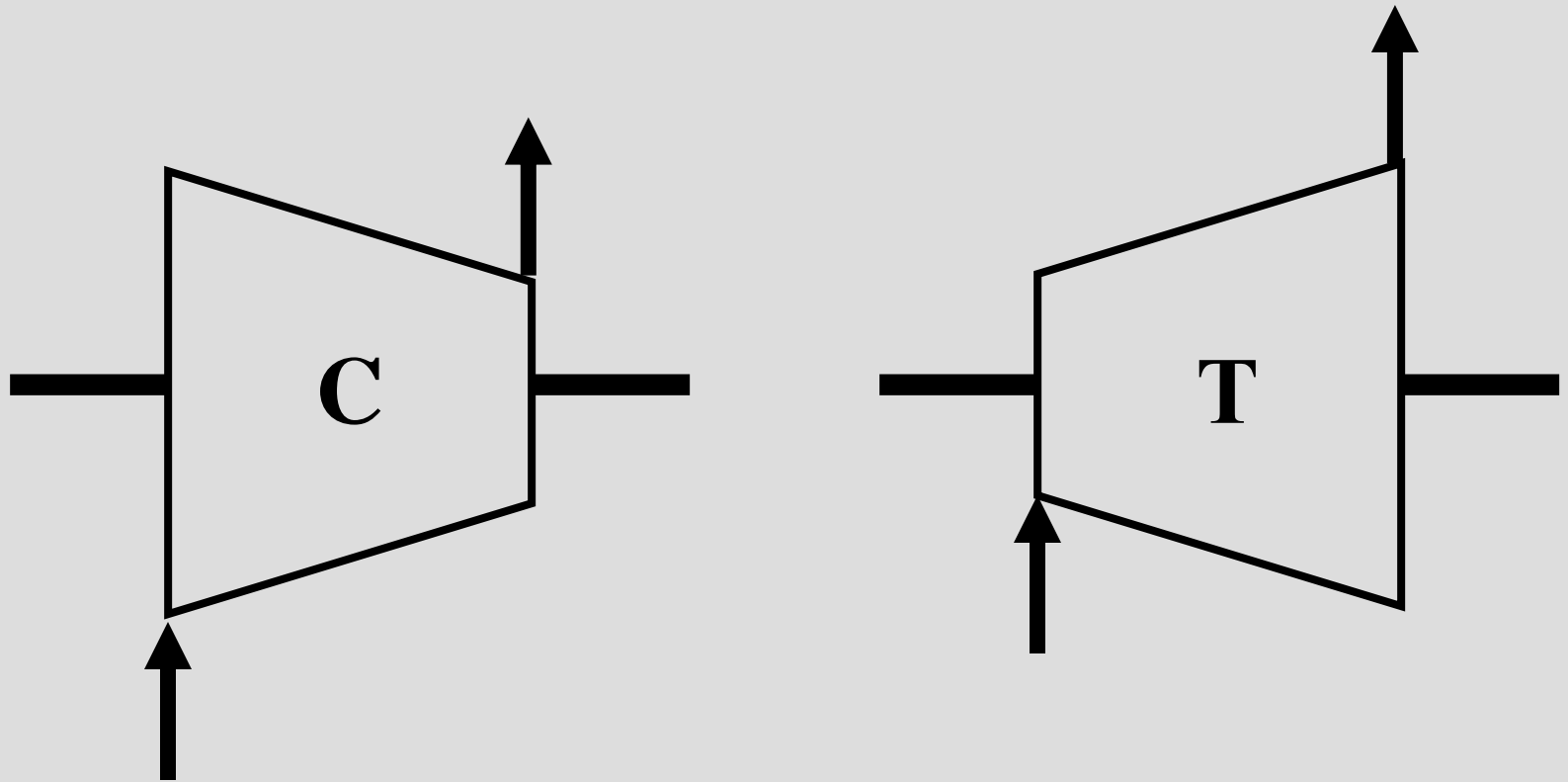
(-) υψηλή θερμοκρασία στο στρόβιλο



Περιοδικές αλλαγές κατάστασης

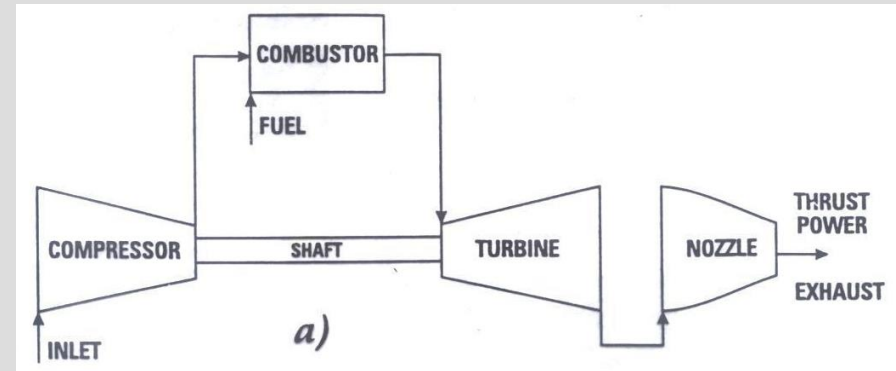
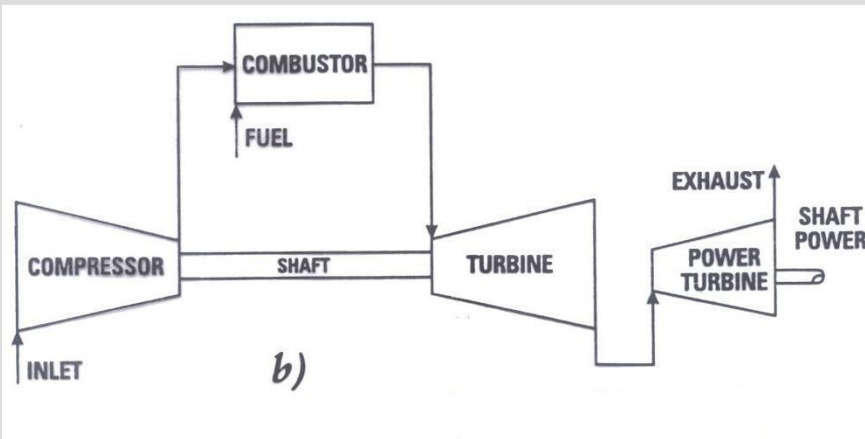
Καύση με σταθερό όγκο

Στροβιλομηχανή vs. Μηχανή Μετατόπισης



Τυπικοί συμβολισμοί Συμπιεστή & Στροβίλου

Παροχή Μάζας=(στατική πυκνότητα)*(διατομή)*(αξονική ταχύτητα)



Οι Στροβιλομηχανές ως Κινητήριες Μηχανές:

- Αεριοστρόβιλοι Μηχανικής Ισχύος (Gas Turbines)

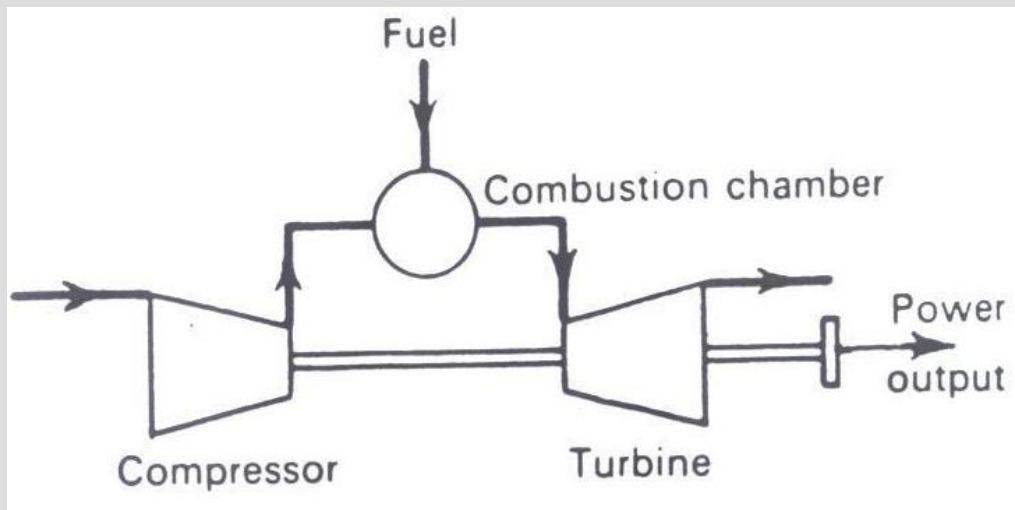
$$P = P_T - P_C$$

- Στροβιλοαντιδραστήρες (Turbojet)

$$P_{\Omega\Sigma\text{H}} = P_{\Delta\Sigma\text{M}\text{H}\Sigma} \quad \text{ενώ} \quad P_T = P_C + P_{\text{ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΑ}}$$

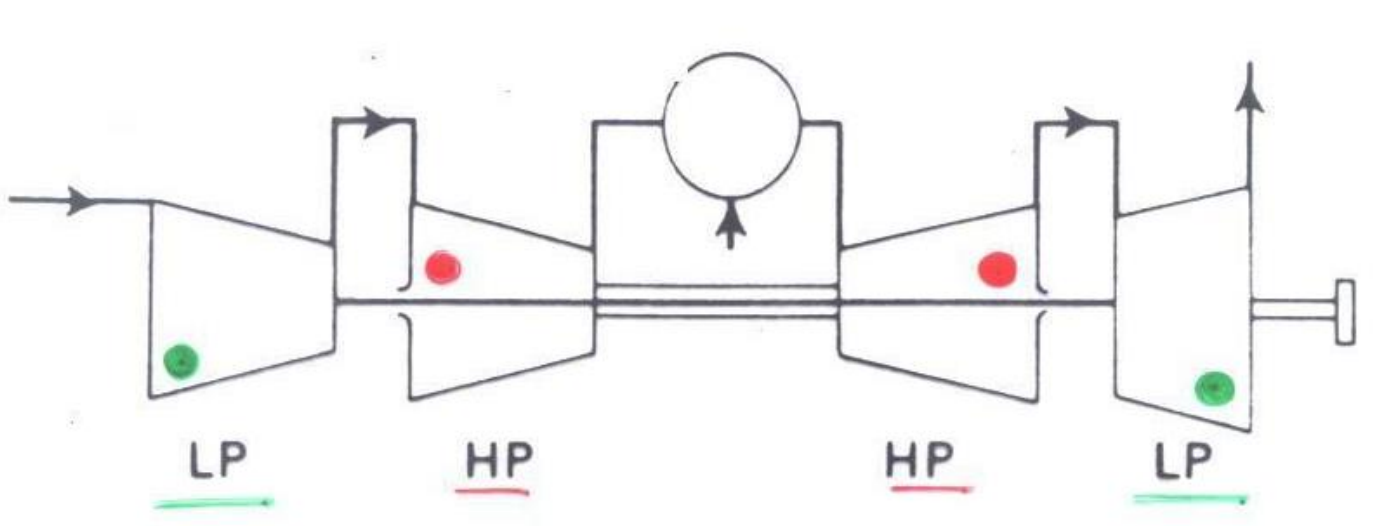
- Ατμοστρόβιλοι (Steam Turbines)

- Στρόβιλοι εκτόνωσης αερίου

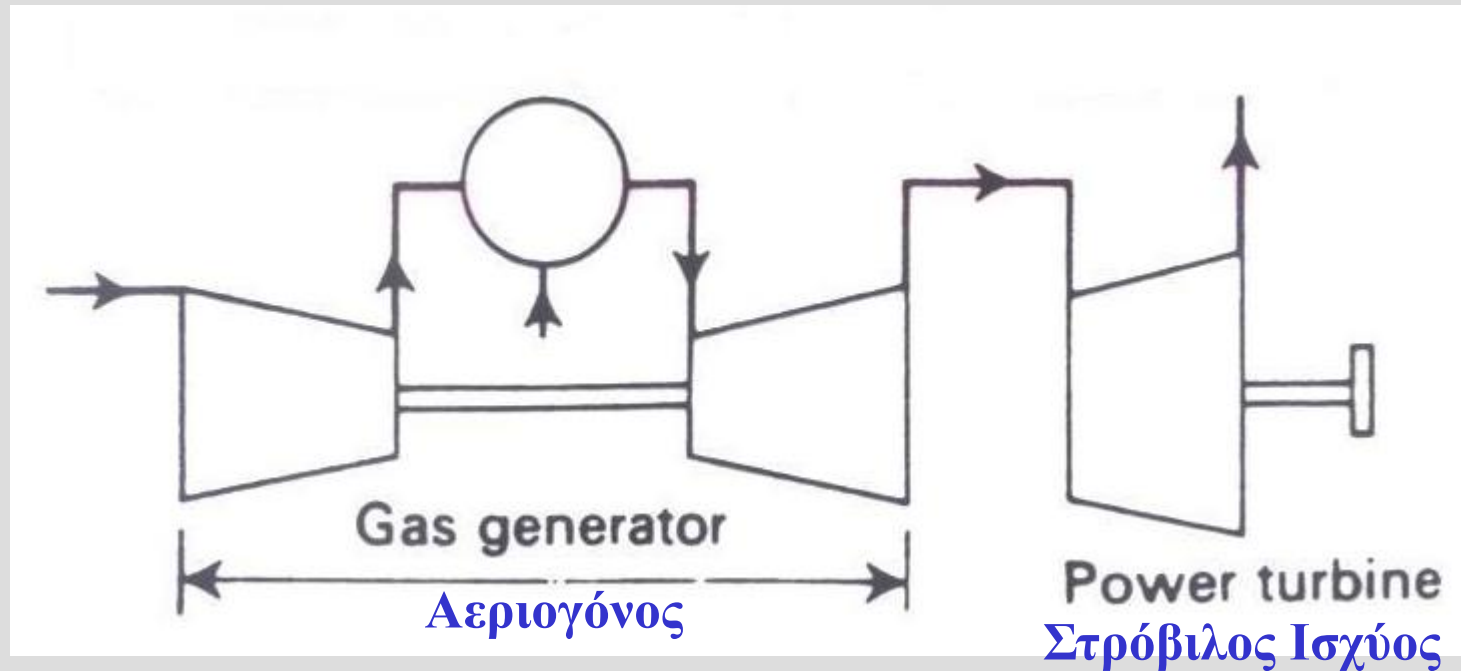


Αεριοστρόβιλος Μηχανικής Ισχύος (ανοικτού κυκλώματος) (Simple Gas Turbine System)

$$N(LP) < N(HP)$$

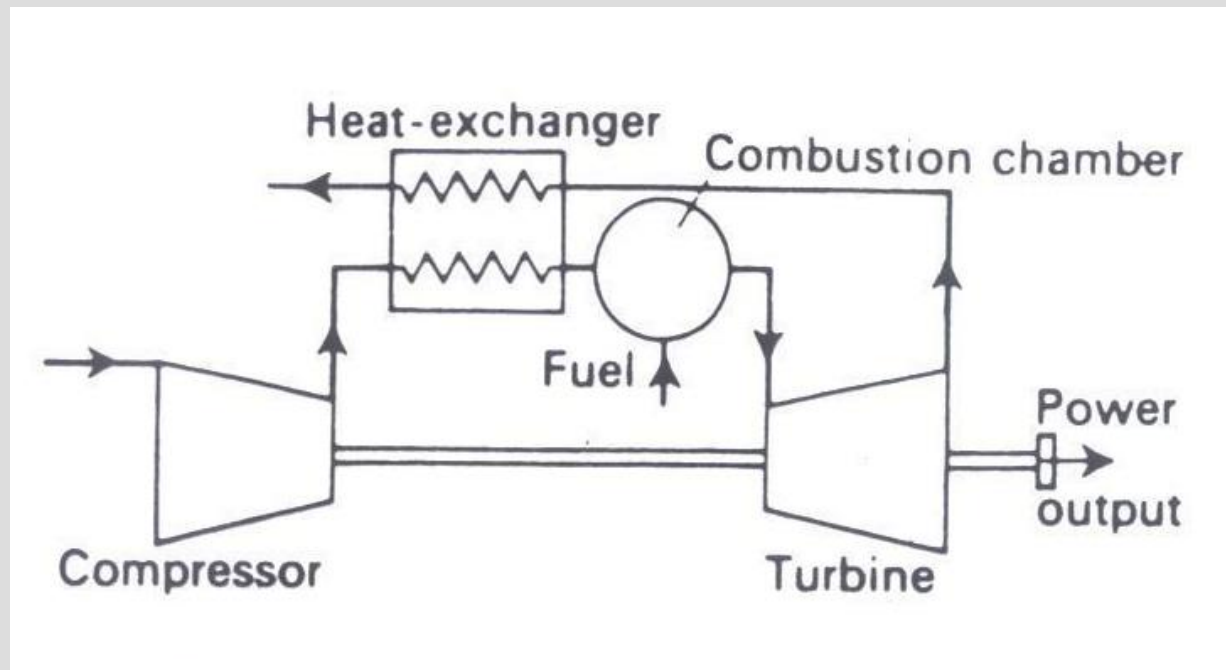


Αεριοστρόβιλος Πολλαπλών Τυμπάνων (Twin Spool Engine)



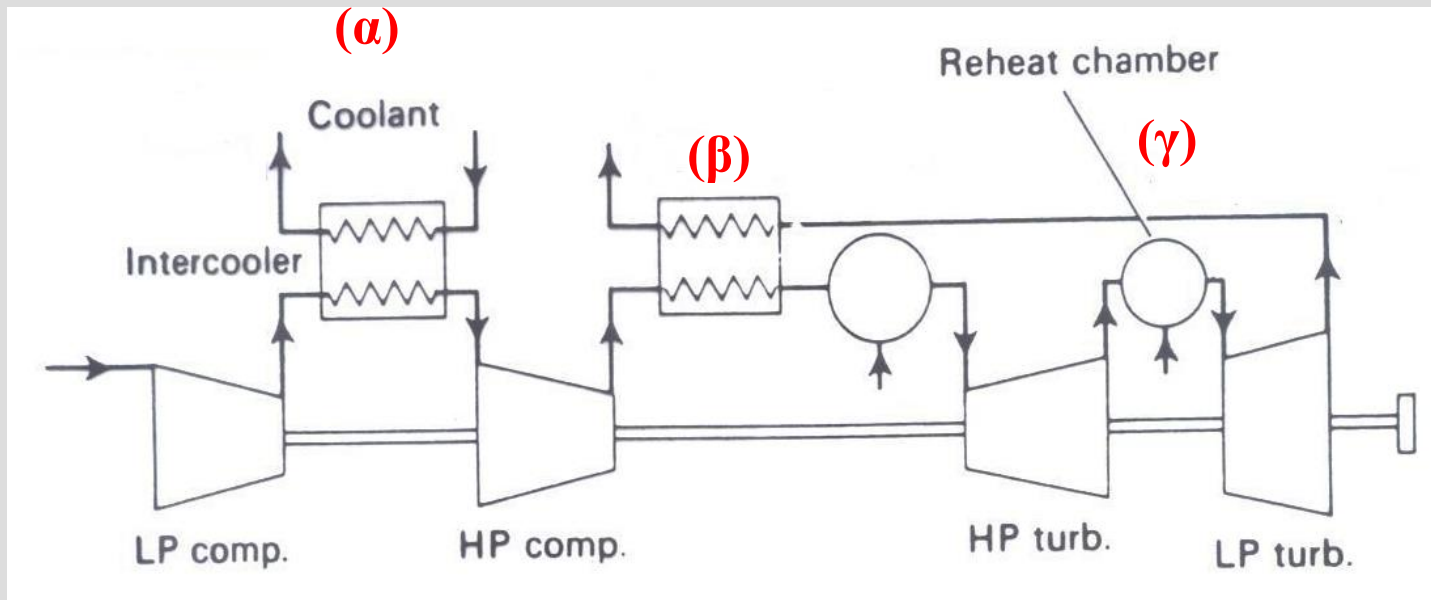
**Αεριοστρόβιλος σε Διάταξη Δίδυμων Ατράκτων
(Gas Turbine with Separate Power Turbine)**

- (+) Ευελιξία κατά τη λειτουργία (οδικές, ναυτικές εφαρμογές, τραίνα)**
- (+) Μονάδες Ηλεκτροπαραγωγής μεγάλης κλίμακας (γεννήτρια χωρίς μειωτήρα στροφών)**
- (+) Μονάδα εκκίνησης (starter) μόνο για αεριογόνο**
- (-) Ανεξέλεγκτη επιτάχυνση στο στρόβιλο ισχύος**



**Ανακόμιση θερμότητας καυσαερίων για θέρμανση του αέρα
εξόδου του συμπιεστή
(Single-Shaft Gas Turbine with Heat Exchanger)**

- (-)** Επιπλέον απώλειες πίεσης στον εναλλάκτη (~-10% παραγ. Ισχύ)
- (+)** Αύξηση Θερμικού Βαθμού Απόδοσης
- (!)** Αξίζει μόνο αν λειτουργεί πολλές ώρες



(α) Ενδιάμεση ψύξη κατά τη συμπίεση

(β) Ανακόμιση Καυσαερίων

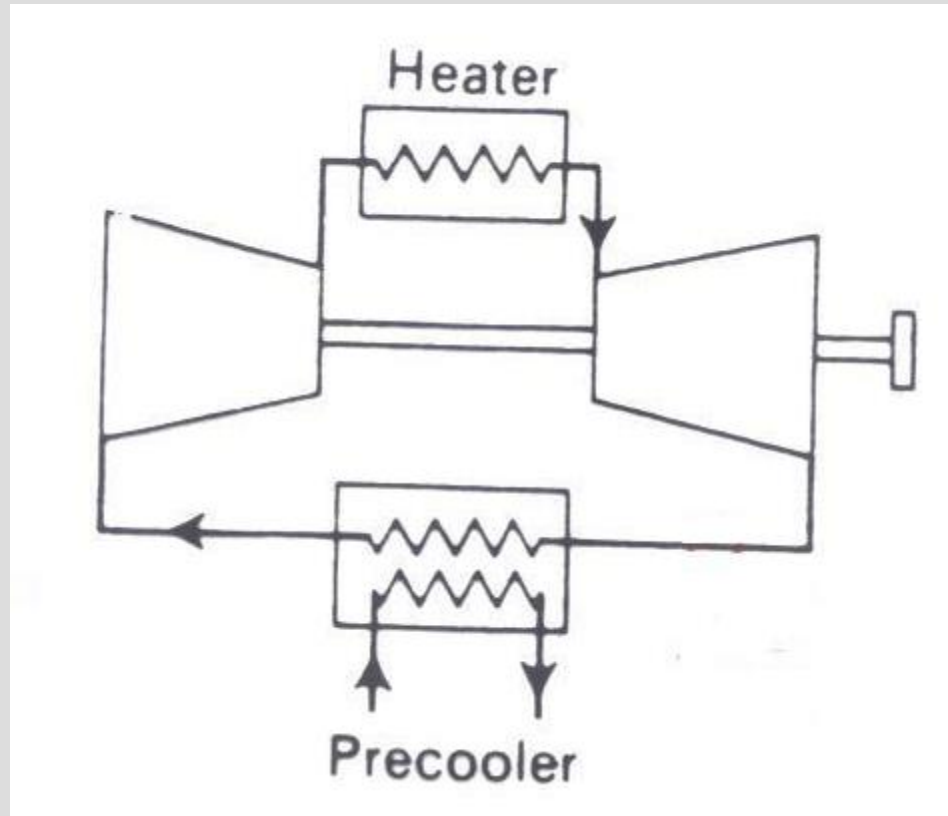
(γ) Ενδιάμεση αναθέρμανση κατά την εκτόνωση

(Complex plant with intercooling, heat exchange and reheat)

(+) Αύξηση παραγόμενου έργου

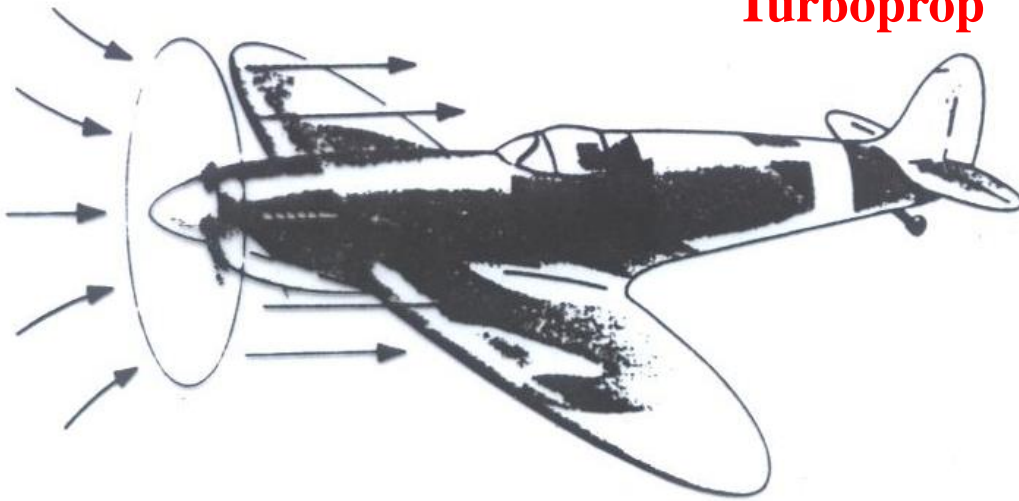
(+) Αύξηση Θερμικού Βαθμού Απόδοσης

(-) Αυξημένη κατανάλωση καυσίμου

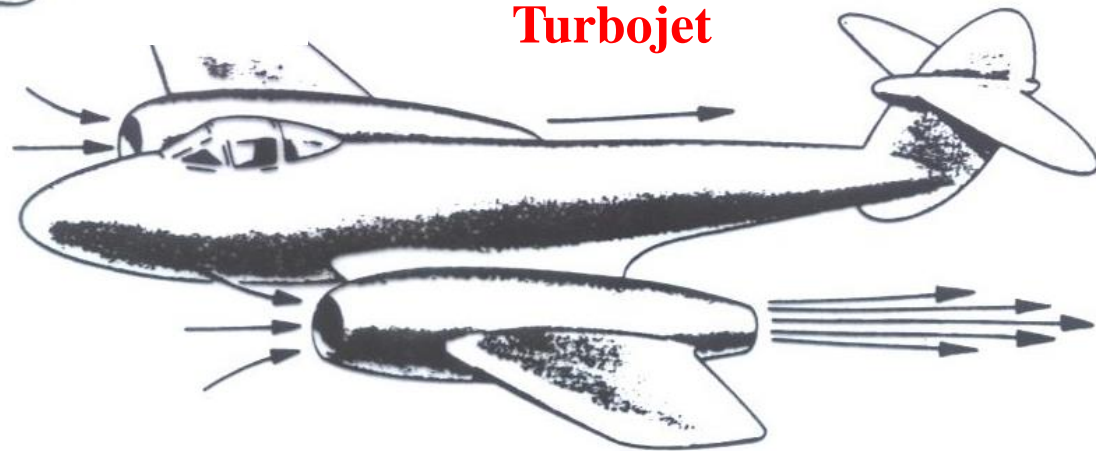


**Αεριοστρόβιλος μηχανικής ισχύος κλειστού κυκλώματος
(Closed Cycle Gas Turbine)**

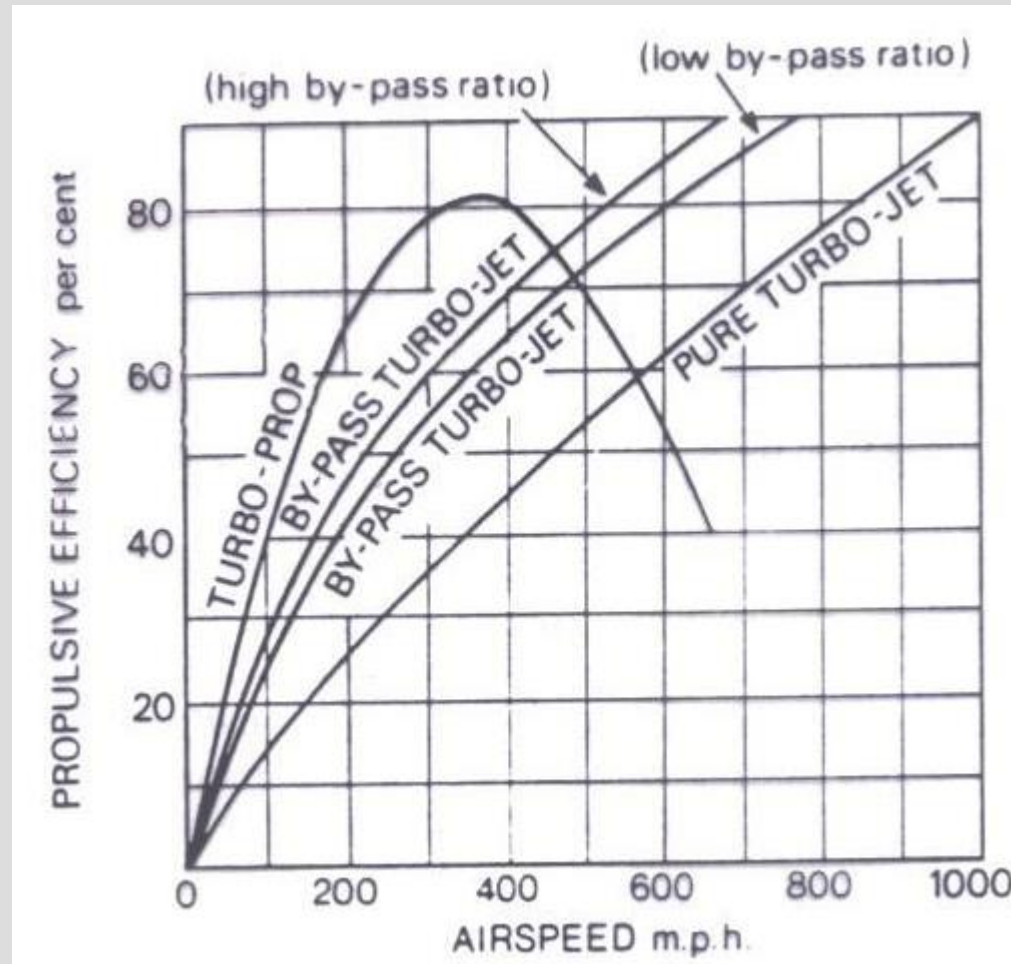
Turboprop



Turbojet



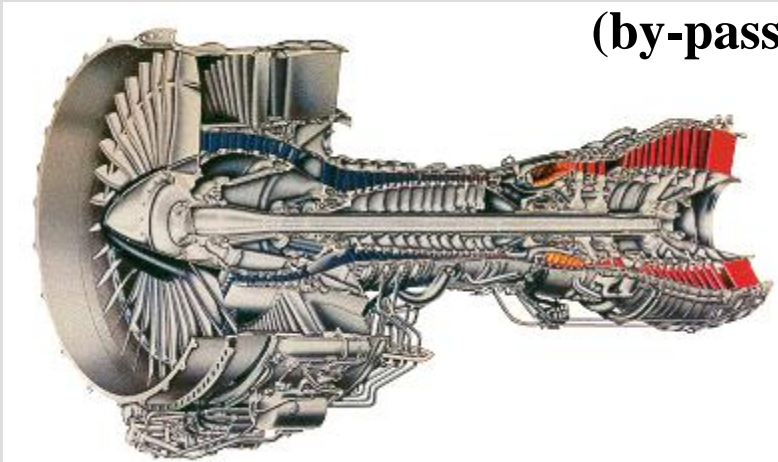
**Ελικοφόροι Στροβιλοαντιδραστήρας
και Στροβιλοαντιδραστήρας Απλού Ρεύματος
(Propeller and Jet Propulsion)**



Προωθητικός βαθμός απόδοσης και ταχύτητα αέρα

Λόγος Παράκαμψης
(by-pass ratio, B)

$$= \frac{m \text{ (ψυχρού ρεύματος)}}{m \text{ (θερμού ρεύματος)}}$$



B=1

Μαχητικά Α/Φ
υπερηχητικής
πτήσης

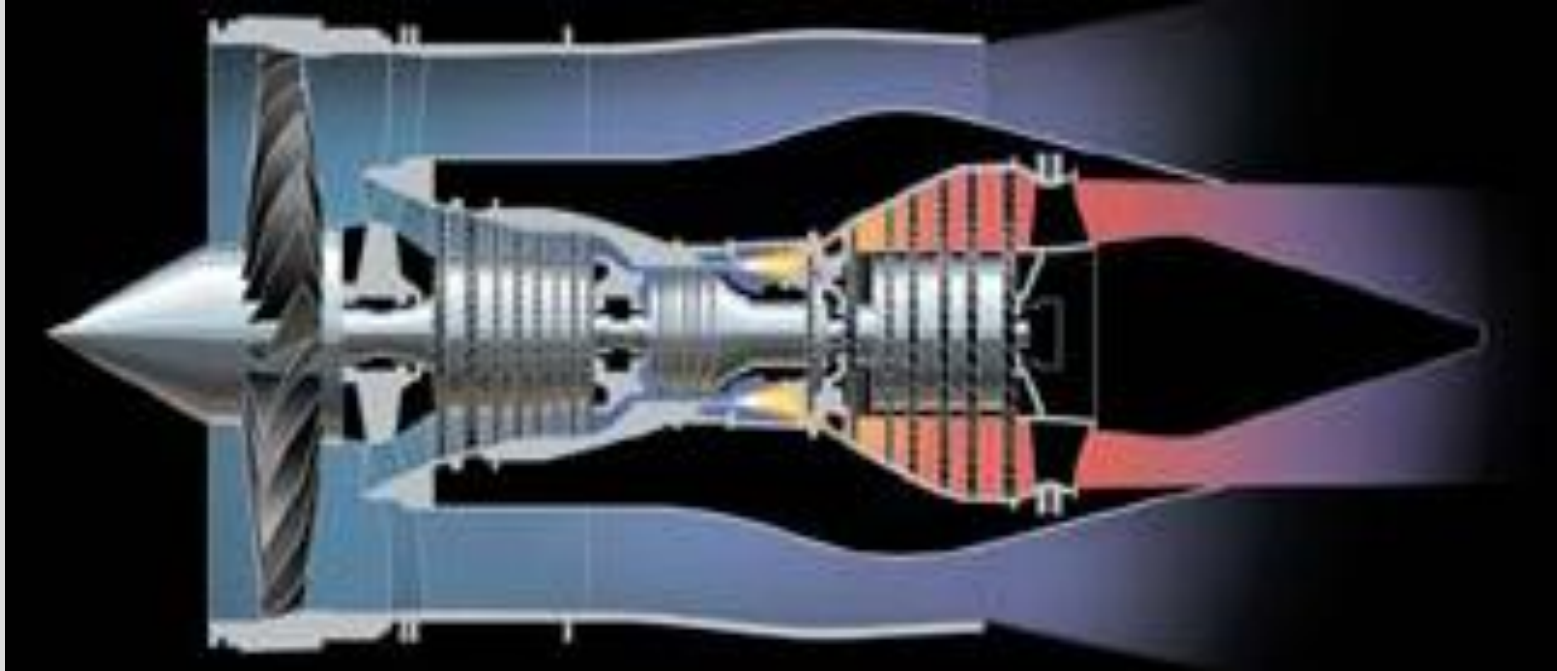
B=2-3

Μικρής Εμβέλειας
Α/Φ

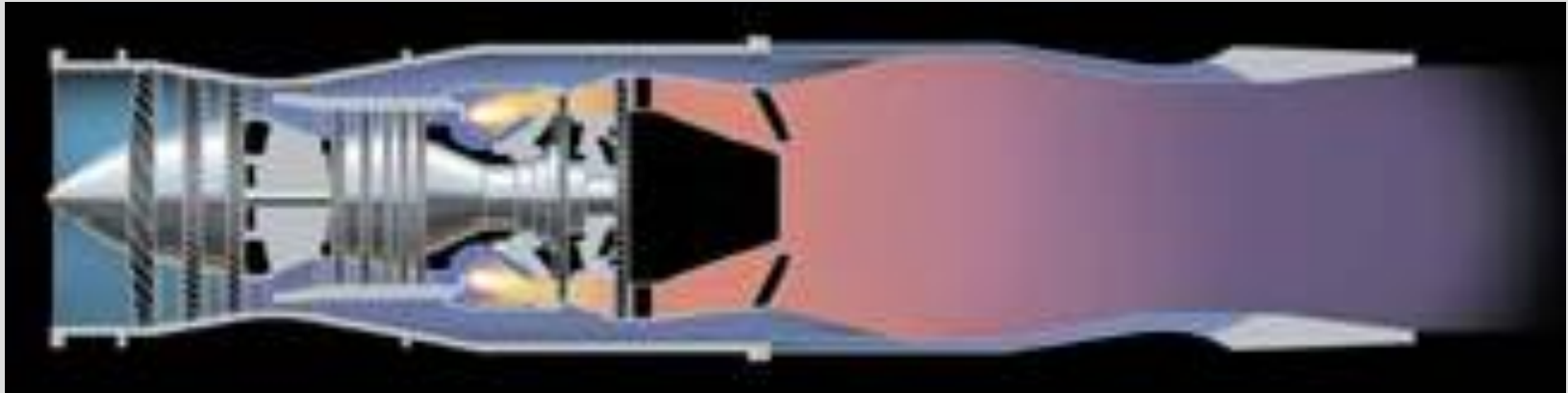
B=4-5

Μεγάλης Εμβέλειας
Επιβατικά Α/Φ,
χαμηλής ειδικής
κατανάλωσης

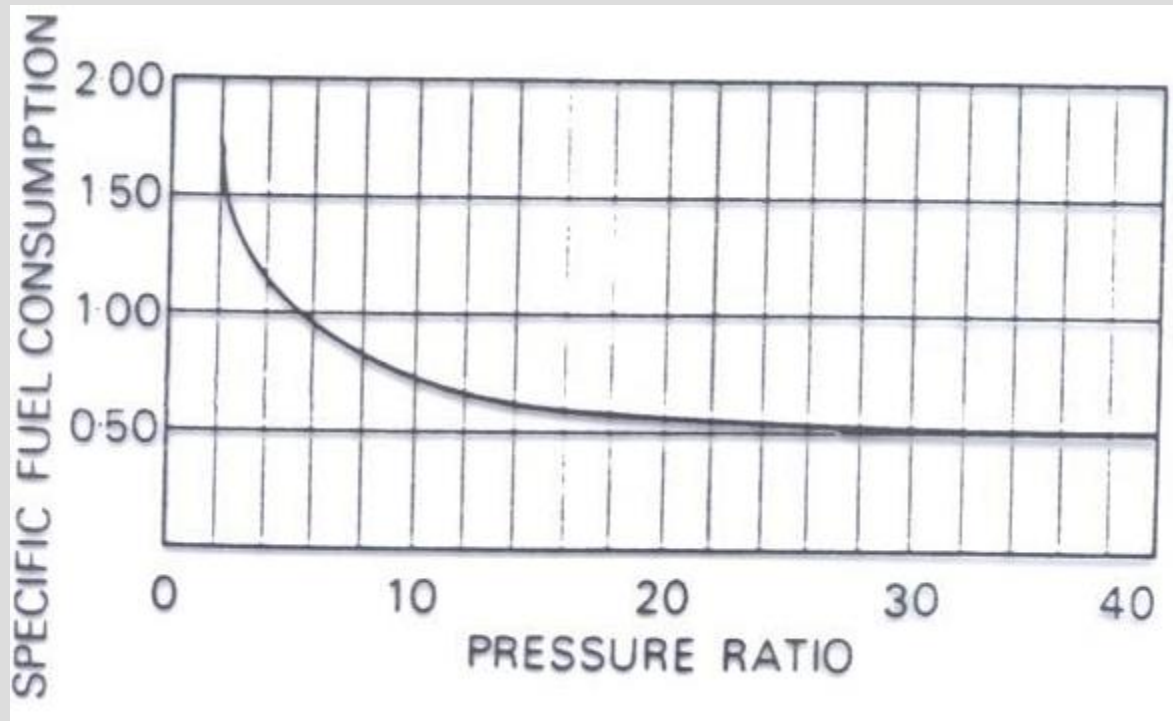
Στροβιλοαντιδραστήρας Διπλού Ρεύματος (TurboFan)



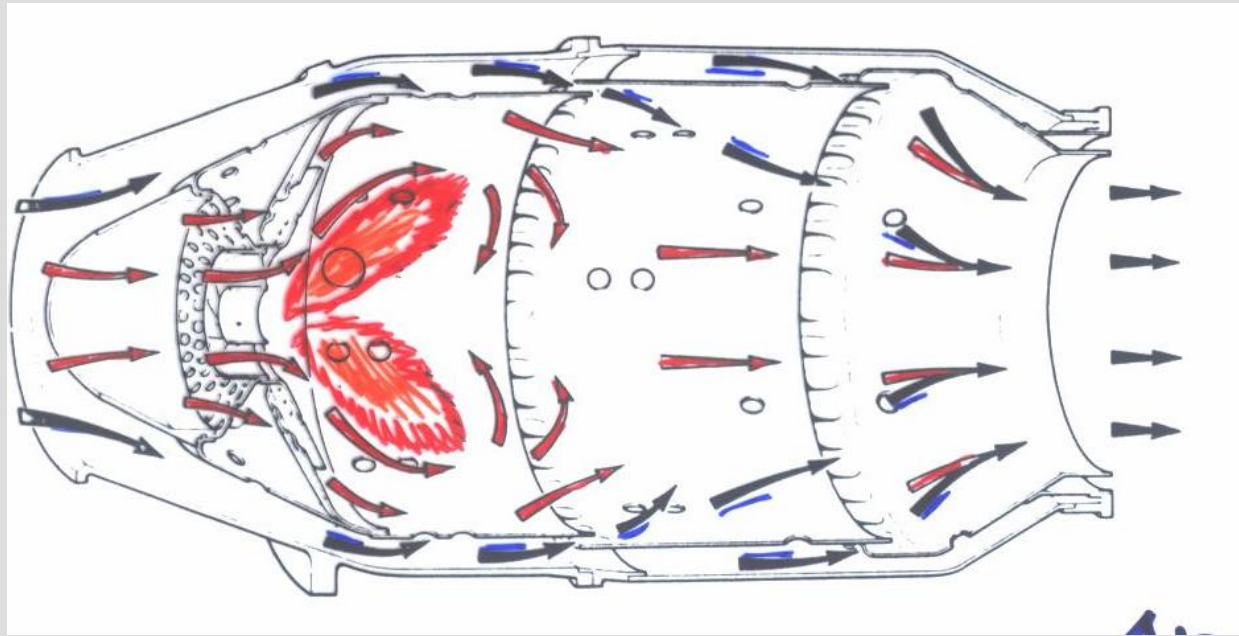
**Στροβιλοαντιδραστήρας τριπλού τυμπάνου, μεγάλου λόγου παράκαμψης, επιβατικού αεροσκάφους
(A high by-pass ratio three-shaft civil engine)**



**Στροβιλοαντιδραστήρας διπλού τυμπάνου, μικρού λόγου παράκαμψης, πολεμικού αεροσκάφους
(A low by-pass ratio two-shaft military engine)**

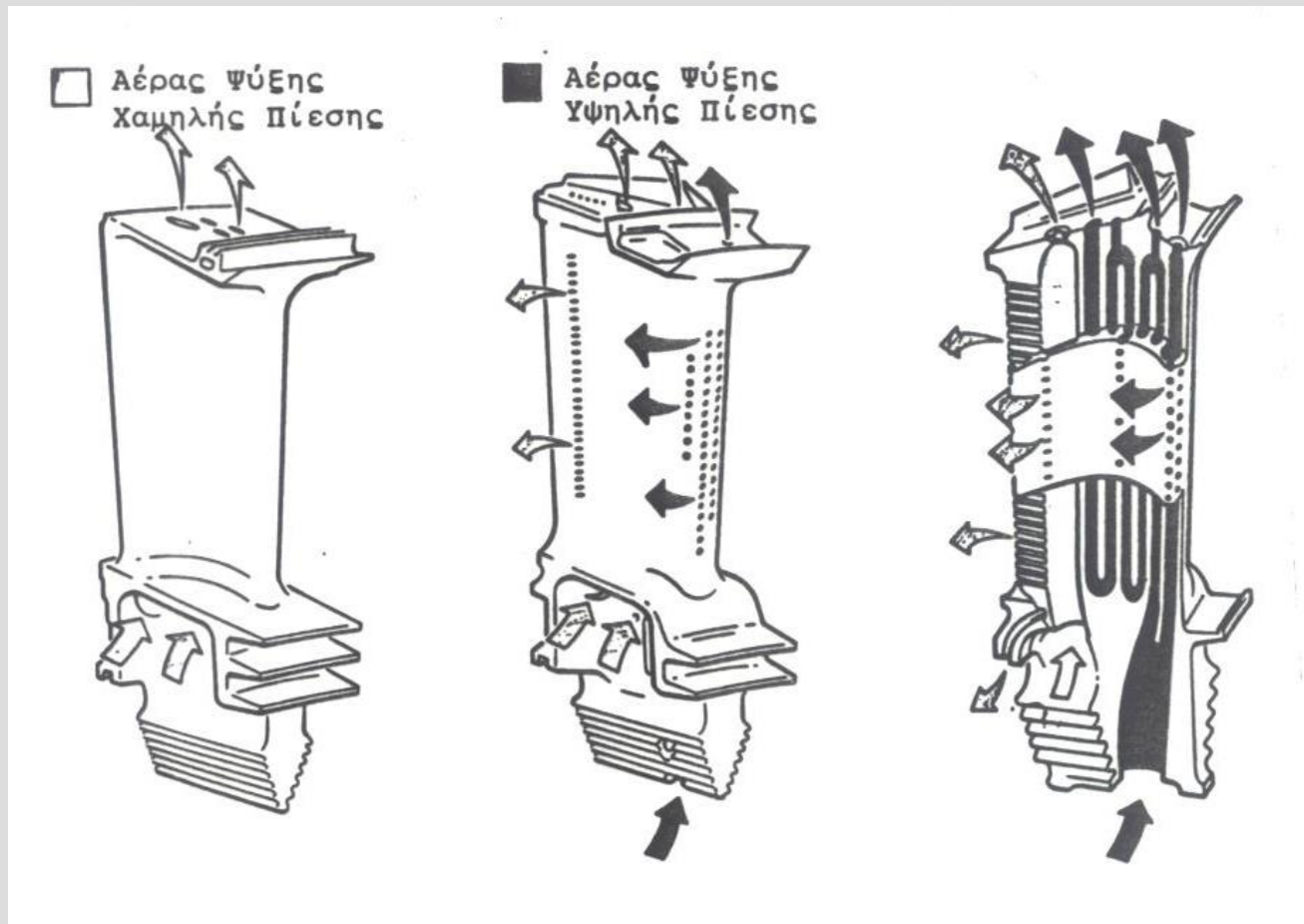


Ειδική κατανάλωση καυσίμου και λόγος πίεσης

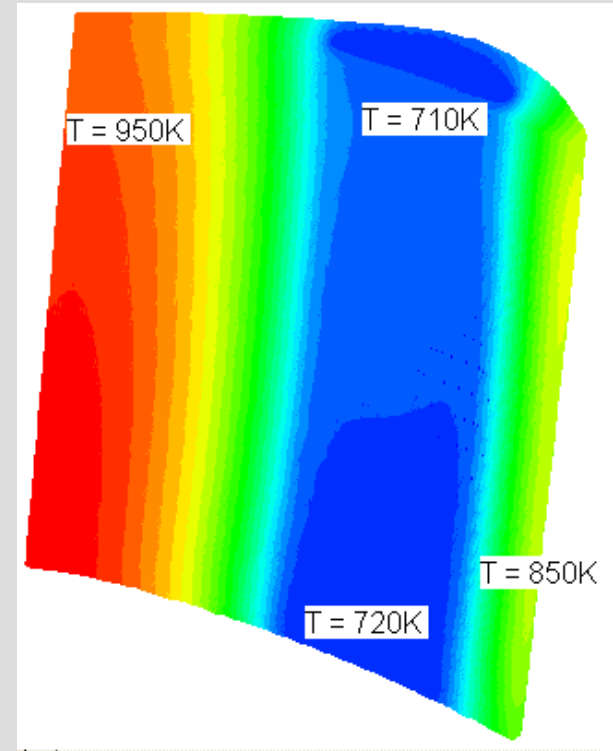


Θάλαμος Καύσης

Κανονική Λειτουργία: Αέρας/Καύσιμο~45/1
Σταθεροποιημένη Καύση: Αέρας/Καύσιμο~15/1



Ψύξη σε περύγια στροβίλου

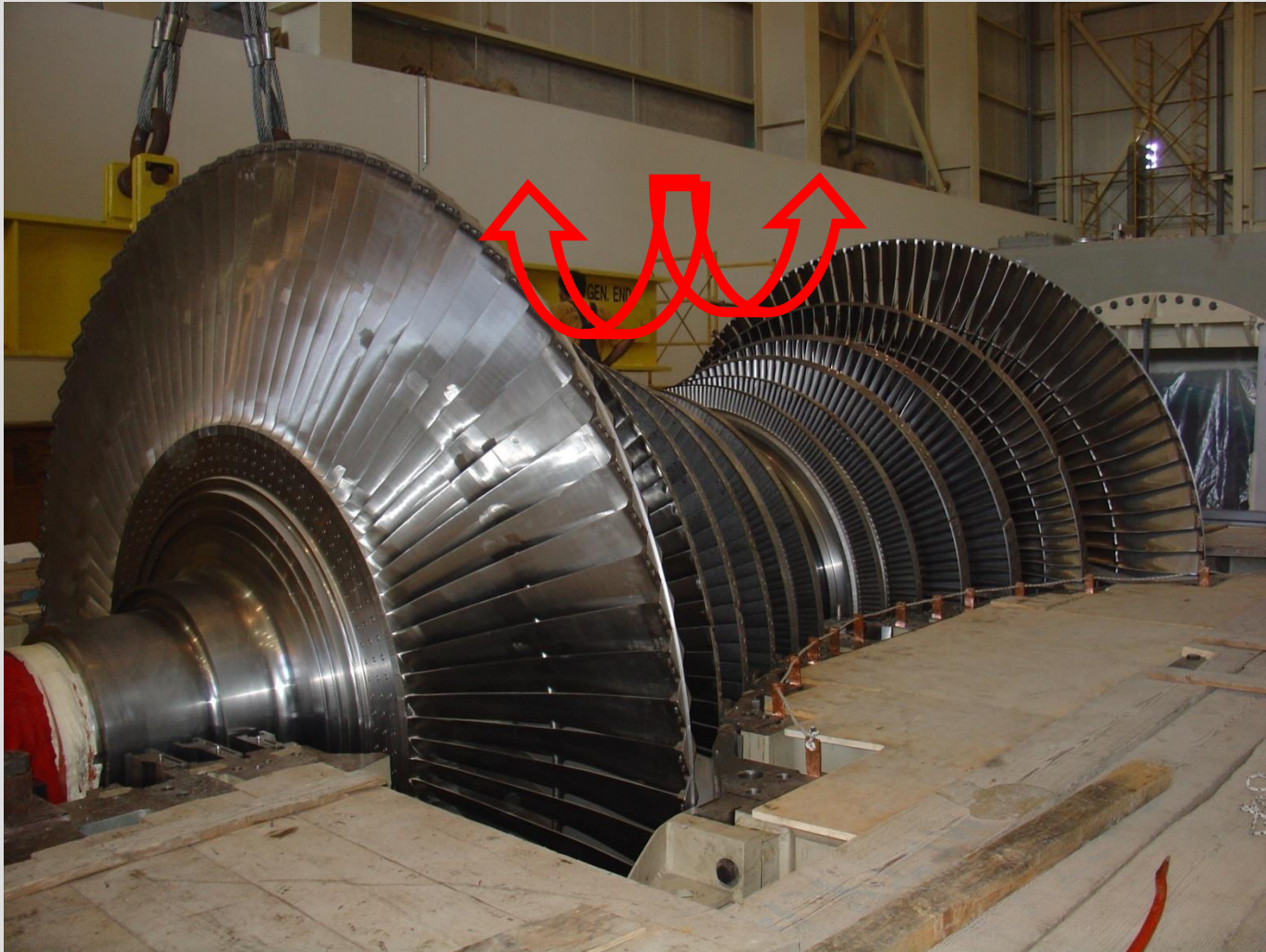


Ψύξη σε πτερύγια στροβίλου



Στροφείο Ατμοστρόβιλου XII (ΔΕΗ Λαύριο)

Κ. Γιαννάκογλου, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ



Στροφείο Ατμοστροβίλου ΧΠ (ΔΕΗ Λαύριο)

Κ. Γιαννάκογλου, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ



Βάση Στροφείου Ατμοστροβίλου XII (ΔΕΗ Λαύριο)

Κ. Γιαννάκογλου, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ



Συμπιεστής Μονάδας IV (120MW, ΔΕΗ Λαύριο)

Κ. Γιαννάκογλου, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ



Συμπιεστής Μονάδας IV (120MW, ΔΕΗ Λαύριο)

Κ. Γιαννάκογλου, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ



**Δρομέας 1^{ης} Βαθμίδας
Στροβίλου (ΔΕΗ Λαύριο)**

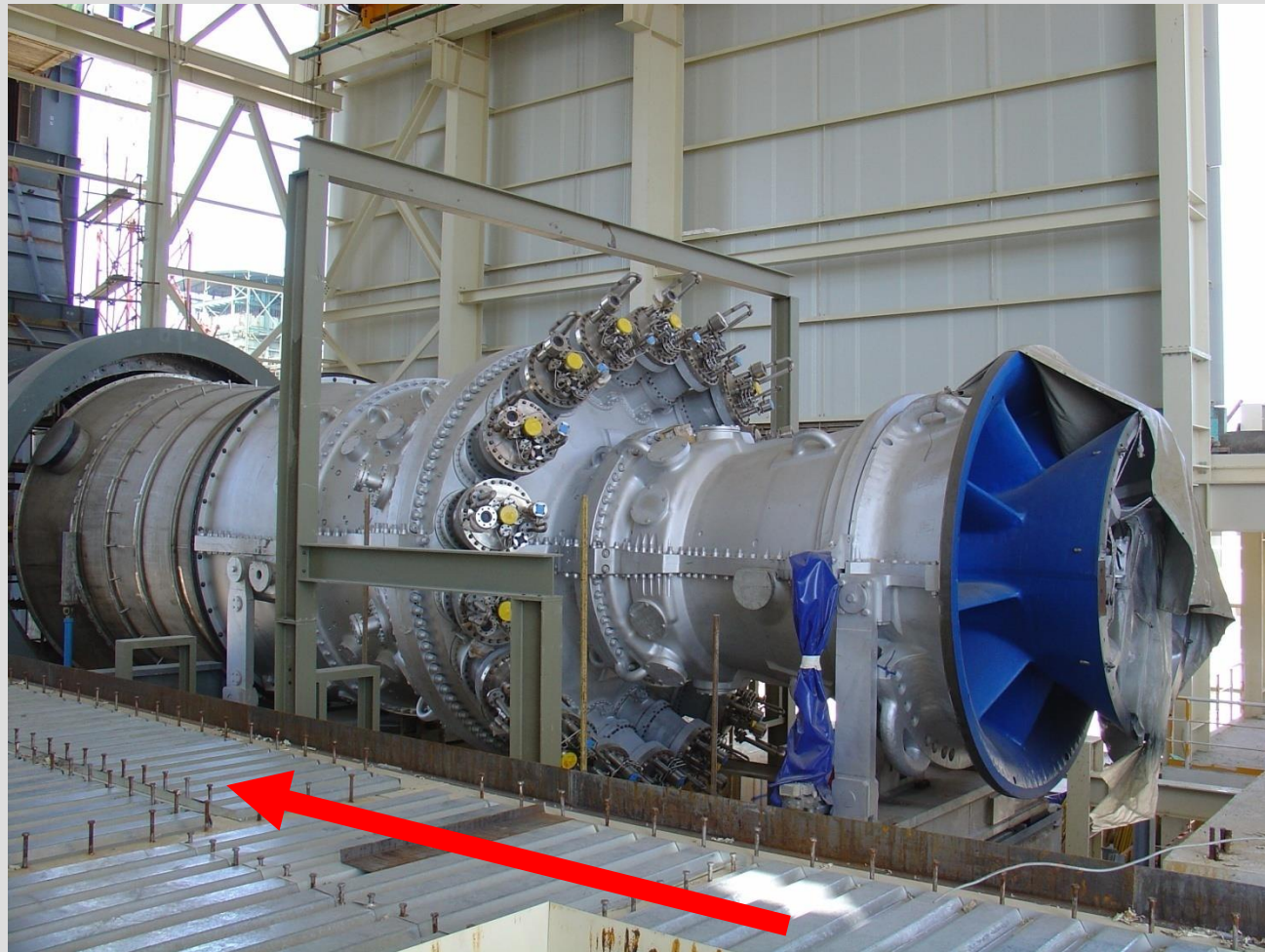


**Δρομέας 1/2/3^{ης} Βαθμίδας
Στροβίλου (ΔΕΗ Λαύριο)**



**Ατμοστρόβιλος Μονάδας V (ΔΕΗ Λαύριο)
Κινητά, σταθερά πτερύγια και Λαβύρινθοι**

Κ. Γιαννάκογλου, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ



Αεριοστρόβιλος Μονάδας V (ΔΕΗ Λαύριο)

Κ. Γιαννάκογλου, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ



Στροφείο Ατμοστροβίλου (9MW)

Κ. Γιαννάκογλου, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ



Ατυχήματα !!!