



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής &
Βελτιστοποίησης

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΕΣ
(6^ο Εξάμηνο Σχολής Μηχ.Μηχ. ΕΜΠ)

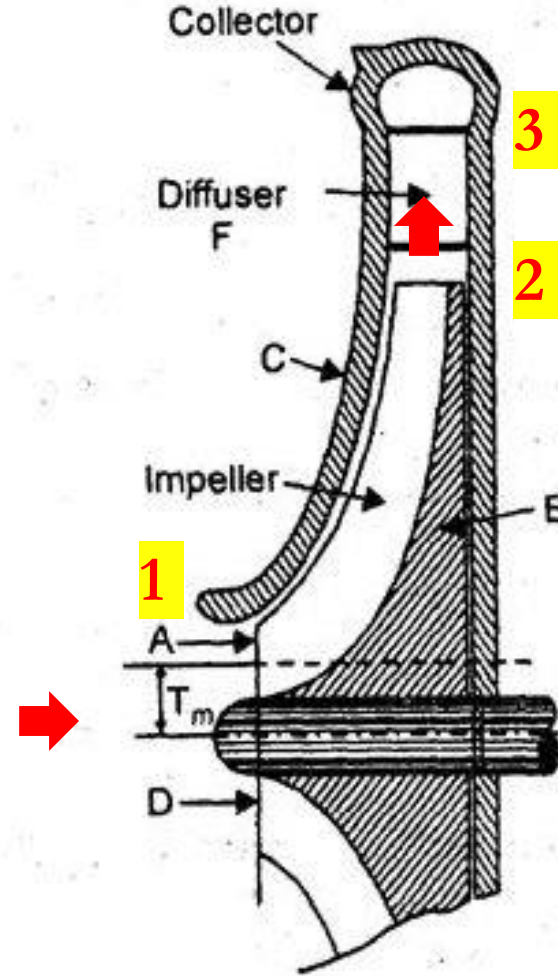
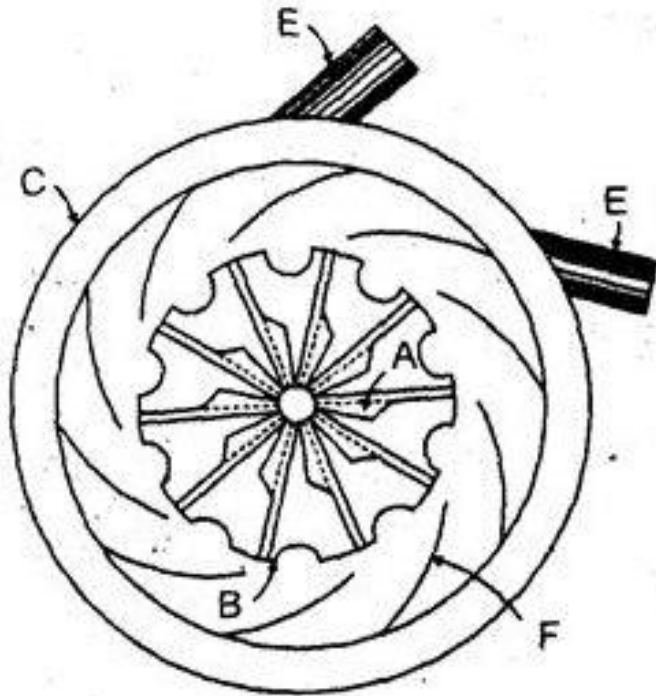
*Ο ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ή
ΑΚΤΙΝΙΚΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ*

Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

kgianna@mail.ntua.gr

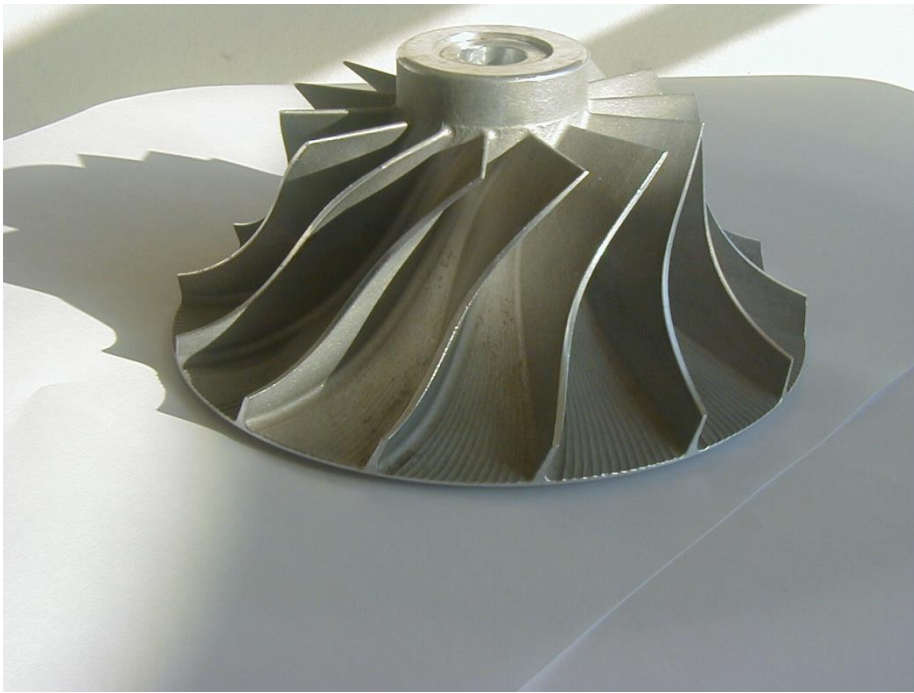
<http://velos0.ltt.mech.ntua.gr/research/>

Ακτινικός ή Φυγοκεντρικός Συμπιεστής

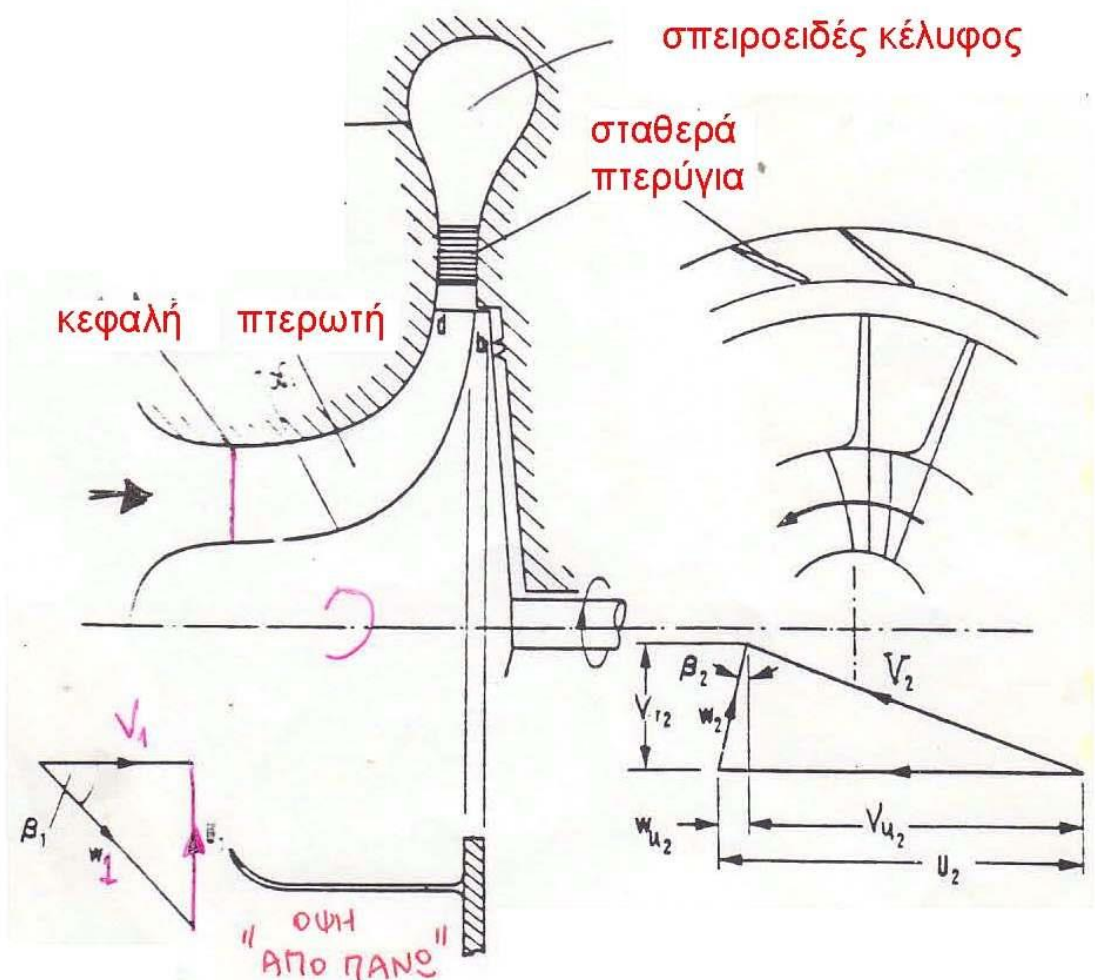


Αξονική είσοδος ($V_{\alpha 1}$), ακτινική έξοδος (V_{r2}) της ροής.

Αιτινικός ή Φυγοκεντρικός Συμπιεστής



Ακτινικός Συμπιεστής – Ορολογία Μερών



- Πτερωτή – Impeller**
- Επαγωγός – Inducer**
- Καθαρά Ακτινικό Τμήμα**
- Shrouded Impeller???**
- Διαχωριστικά Πτερύγια (Splitter Vanes)**
- Διαχύτης (Diffuser)**
- (Vaned or Vaneless)**
- Σπειροειδές Κέλυφος (Collector, Volute)**

Θ. Euler στην Πτερωτή

$$h_{tR1} = h_{tR2} \Rightarrow h_1 + W_1^2/2 - U_1^2/2 = h_2 + W_2^2/2 - U_2^2/2 \Rightarrow$$

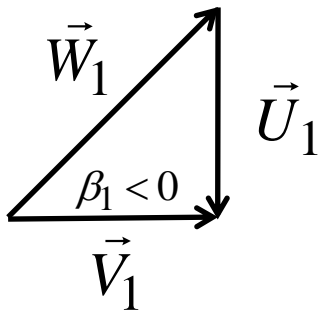
$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2}(W_1^2 - W_2^2) + \frac{1}{2}(U_2^2 - U_1^2) \Rightarrow$$

$$h_2 - h_1 = \frac{W_1^2}{2} \left(1 - \frac{W_2^2}{W_1^2} \right) + \frac{1}{2} U_1^2 \left(\frac{R_2^2}{R_1^2} - 1 \right)$$

Επιβράδυνση
(De Haller)

Φυγοιέντρωση

«Ένα Σενάριο» ($\alpha_1 = 0^\circ$):

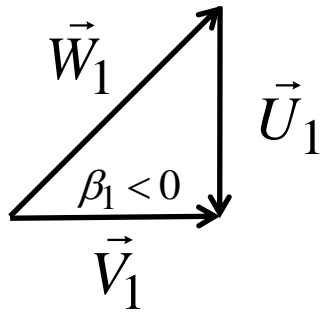


$$\beta_1 = 45^\circ \Rightarrow \frac{U_1}{W_1} = |\sin \beta_1| = 0.7 \Rightarrow \frac{U_1^2}{W_1^2} = 0.5$$

$$h_2 - h_1 = \frac{W_1^2}{4} \left(1 + \left(\frac{R_2^2}{R_1^2} - 1 \right) \right)$$

Ακτινικός Συμπιεστής – Πως Αυξάνει η Στατική Πίεση

«Ένα Σενάριο» ($\alpha_1=0^\circ$):



$$h_2 - h_1 = \frac{W_1^2}{4} \left(1 + \left(\frac{R_2^2}{R_1^2} - 1 \right) \right)$$

Αν $R_2/R_1=2$, τότε:

(επιβράδυνση/αλλαγή ακτίνας) = 1/3 !!!!

Στον ακτινικό συμπιεστή, η ανάκτηση στατικής πίεσης (θυμηθείτε $\Delta h = \Delta p / \rho$, αν ασυμπιεστή & ισεντροπική) οφείλεται κυρίως στην αλλαγή ακτίνας (φυγοκέντρωση, Coriolis), παρά στην επιβράδυνση της ροής.



Ακτινικός Συμπιεστής – Σύγκριση με Αξονικό Συμπιεστή

- Ίδιο περίπου βάρος με τον αντίστοιχο ΑΞC.
- Χειρότερη αεροδυναμική απόδοση από ΑΞC. (πιο πολύπλοκο πεδίο ροής)
- Για την ίδια παροχή αέρα, μεγαλύτερη εμβαδόν εμπρόσθιας όψης, άρα μεγαλύτερη οπισθέλκουσα (σε αεροπορικούς κινητήρες).
- Πιο ασφαλής/στιβαρή (robust) μηχανή (άντληση φυσικού αερίου, ελικόπτερα, τεχνητές καρδιές).
- Μικρότερο μήκος από ΑΞC.
- Πιο ανθεκτικός σε FOD, μικρότερη απώλεια β. απόδοσης από επικαθήσεις.
- Πιο εύκολο matching με το στρόβιλο, στον αεριοστρόβιλο.
- Πολύ μεγάλο π_c ανά βαθμίδα (8,..., 12).
- Οικονομικοί «καθημερινής χρήσης» ΑκτC με πτερύγια από αλουμίνιο.

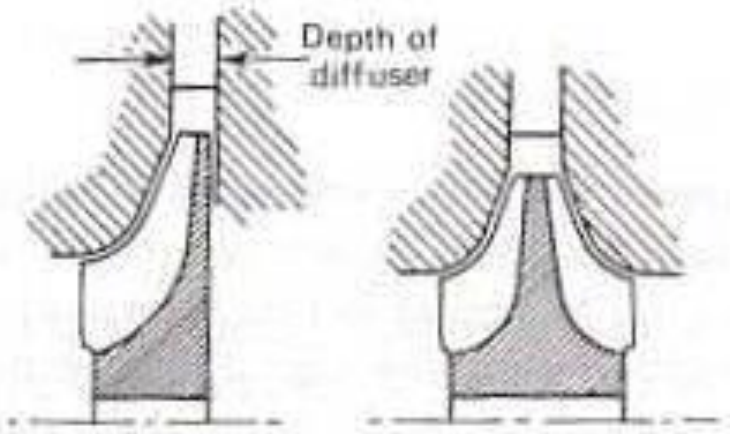
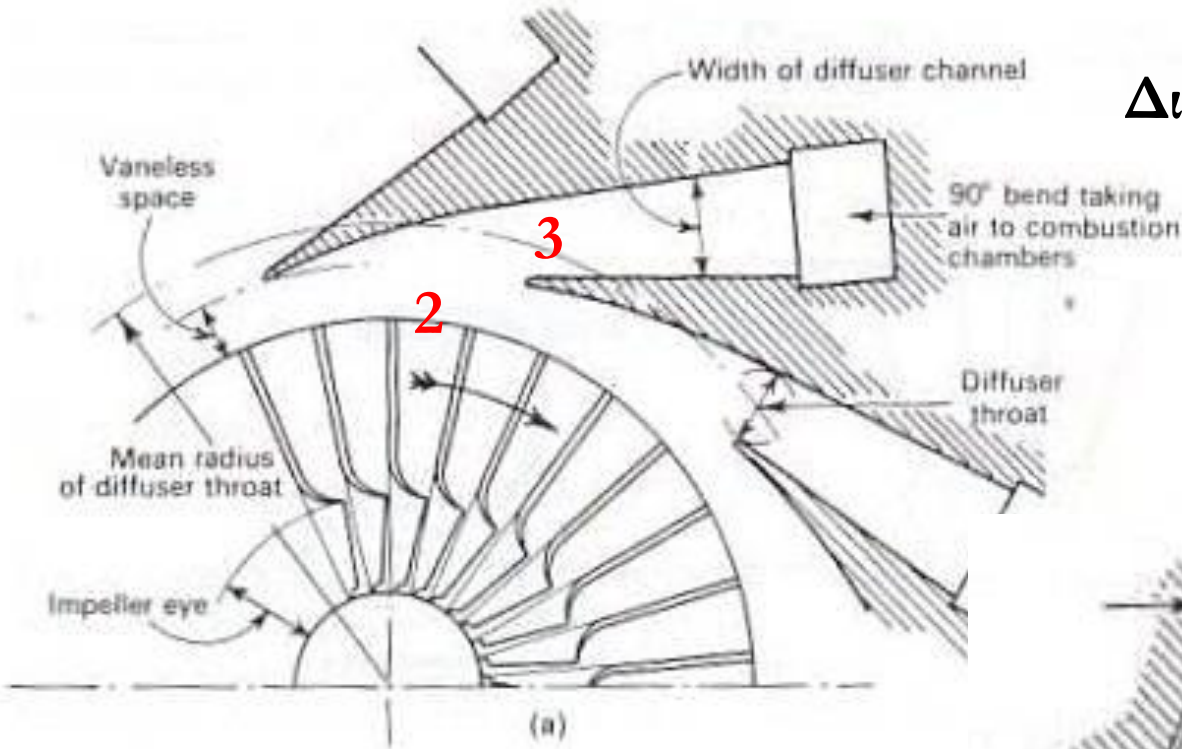
Ακτινικός Συμπιεστής – Πτερωτή (Impeller)

Splitter Vanes
Διαχωριστικά Πτερόγια



Vaneless Diffuser

Διαχύτης χωρίς πτερόγια



$$R_2 V_{u2} = R_3 V_{u3}$$

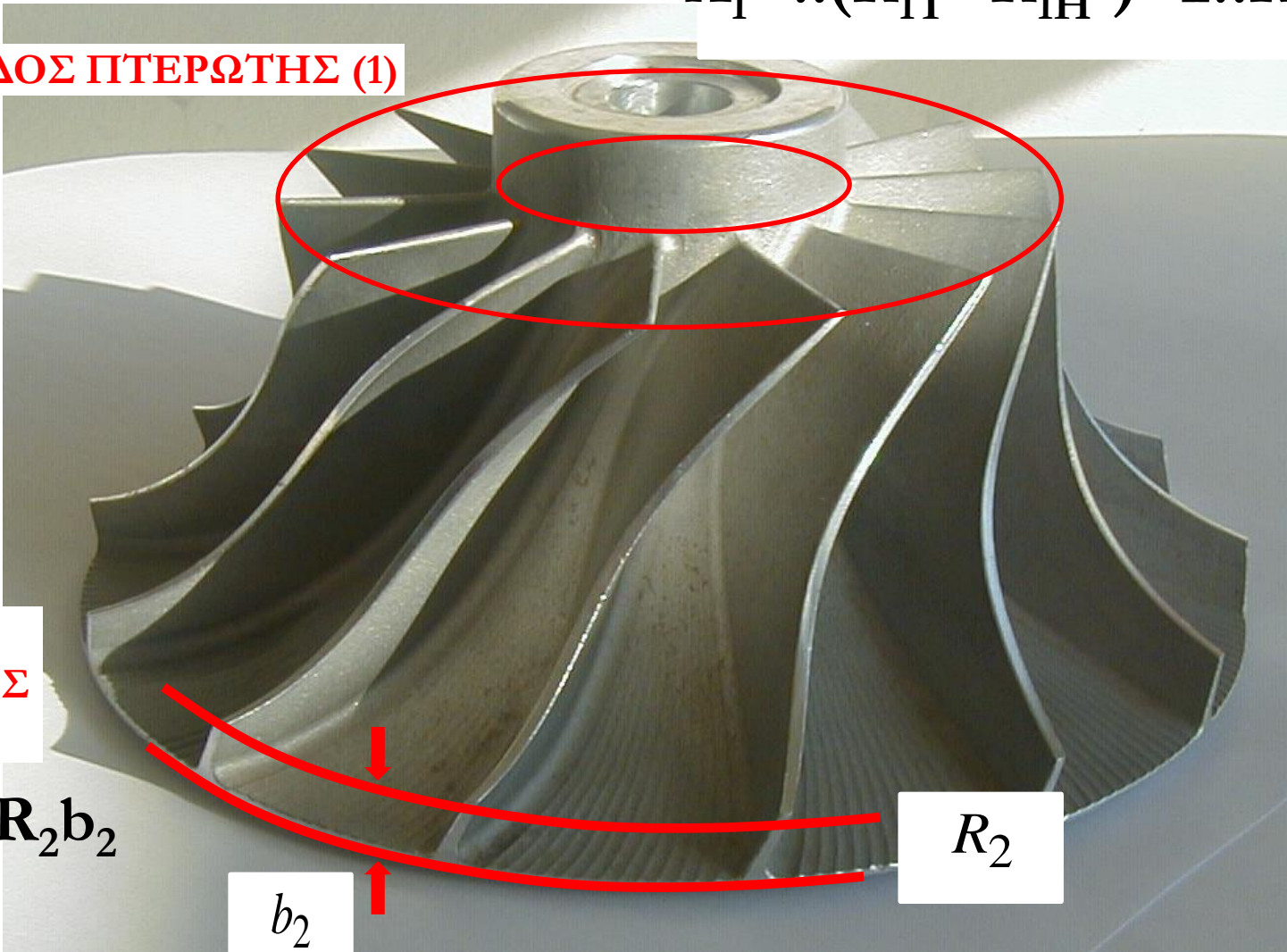
Διατομές που διαρρέει το ρευστό στις θέσεις 1 & 2

$$A_1 = \pi(R_{1T}^2 - R_{1H}^2) = 2\pi R_{1m} b_1$$

ΕΙΣΟΔΟΣ ΠΤΕΡΩΤΗΣ (1)

ΕΞΟΔΟΣ ΠΤΕΡΩΤΗΣ (2)

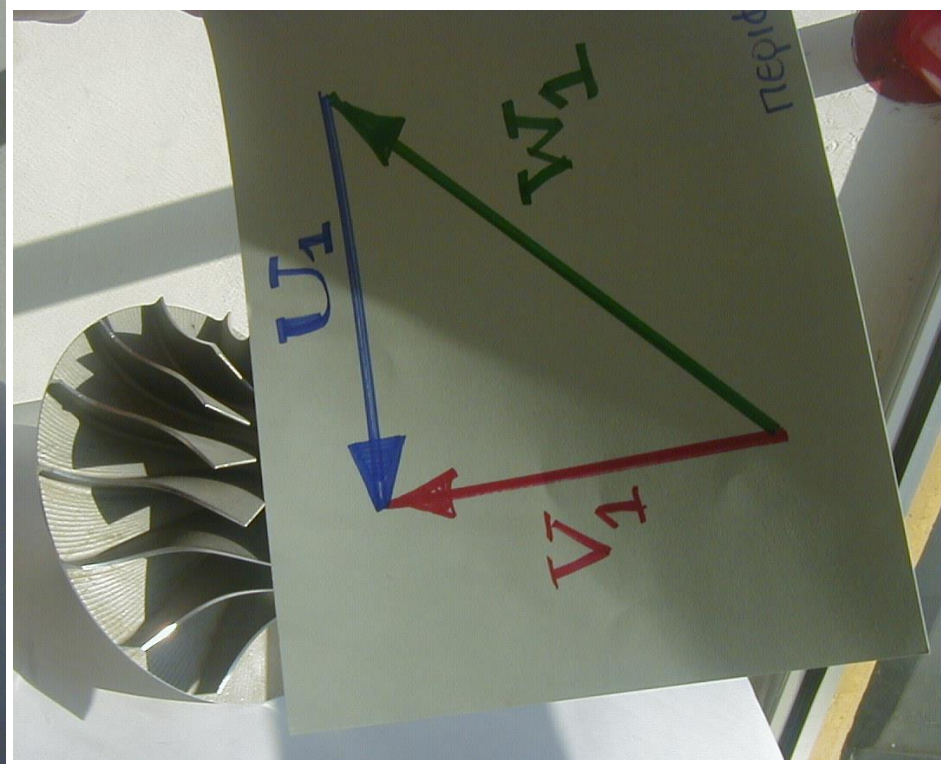
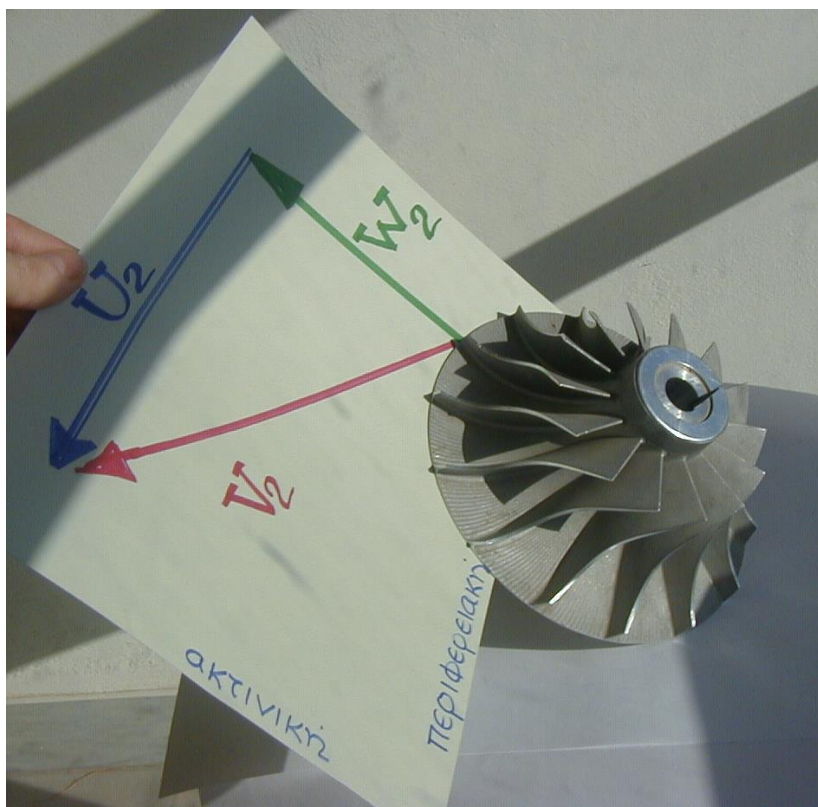
$$A_2 = 2\pi R_2 b_2$$



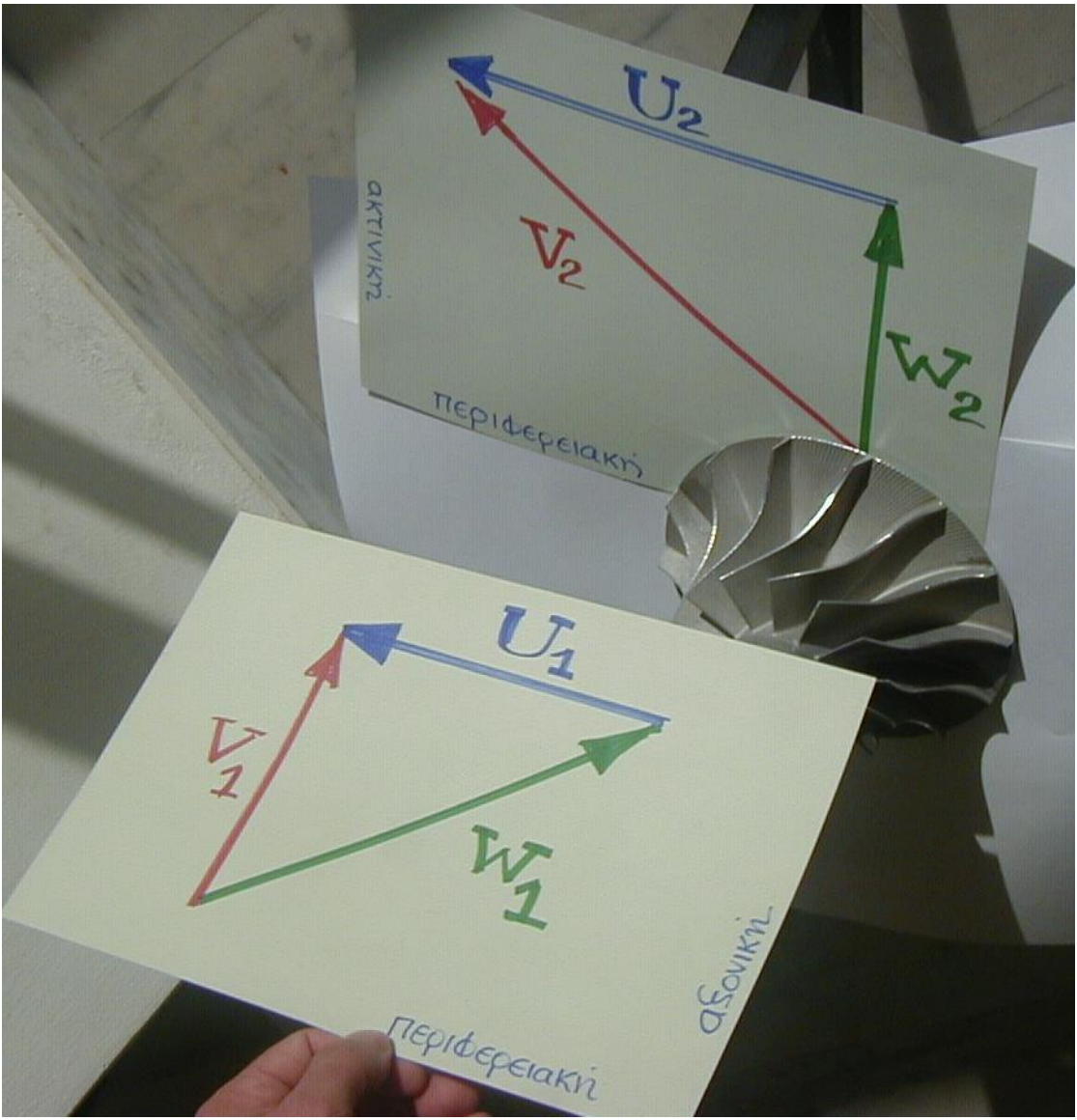
Τρίγωνα Ταχυτήτων (1-2)



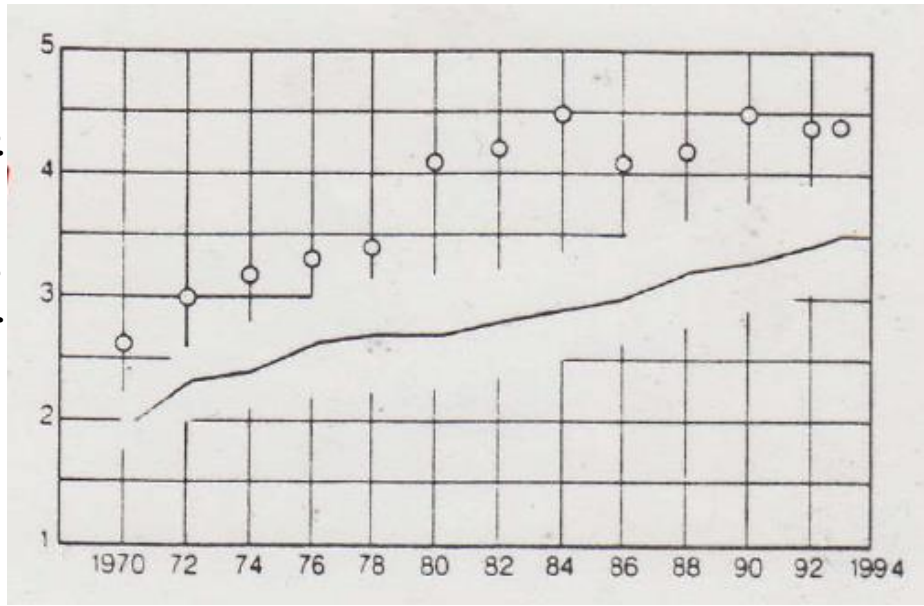
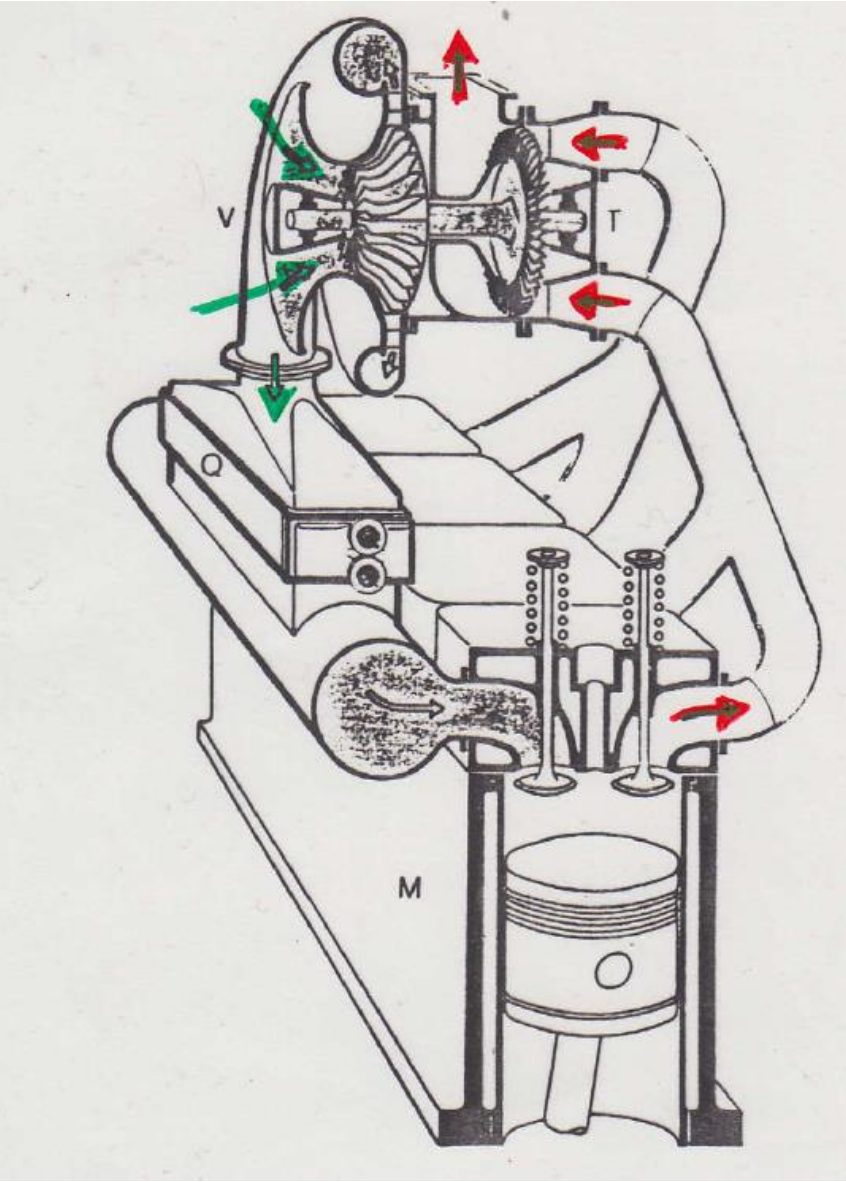
Τρίγωνα Ταχυτήτων (1-2)



Τριγωνα Ταχυτήτων (1-2)

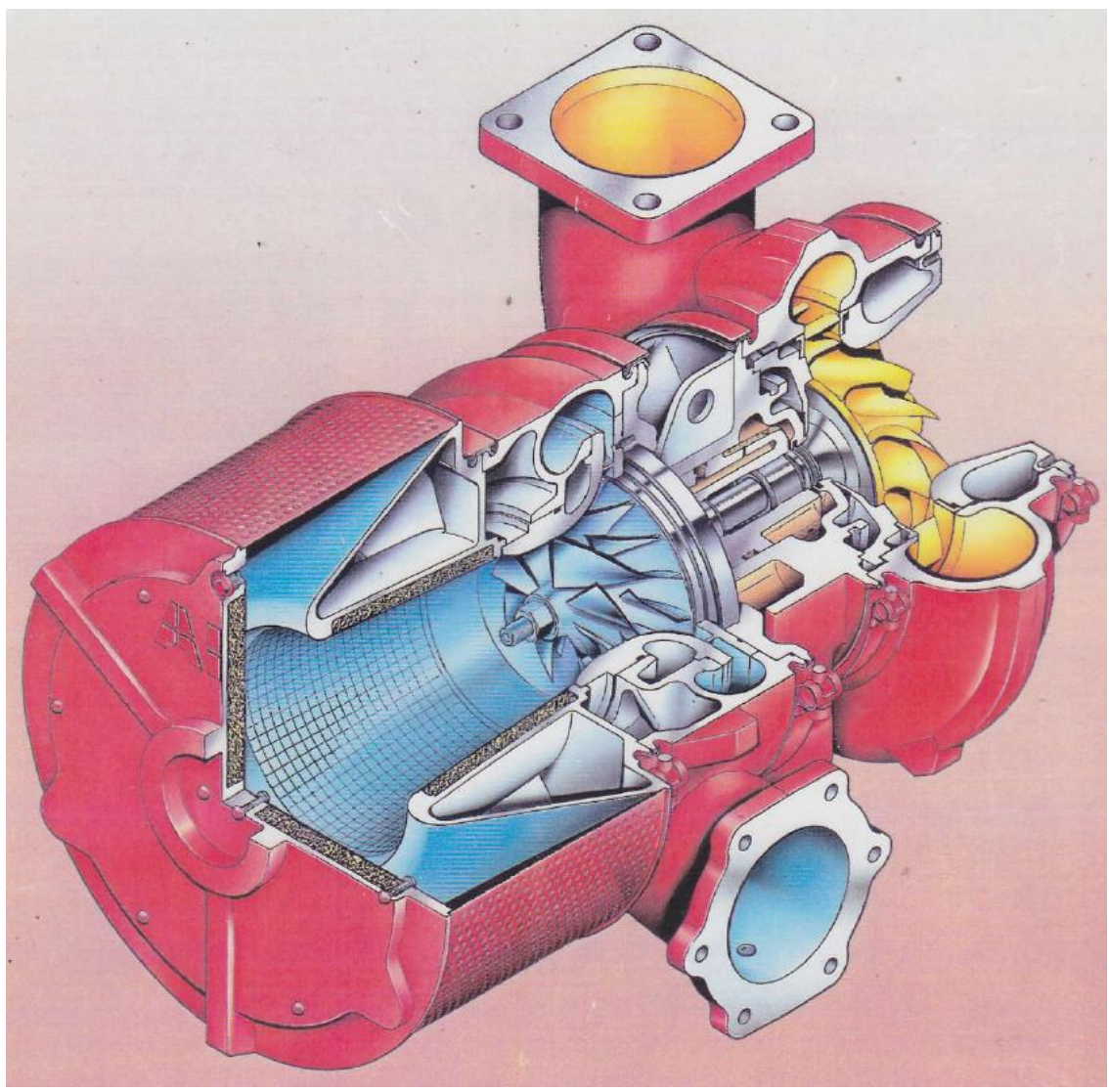


Χρήση Στροβιλοϋπερπληρωτή σε μηχανή Diesel

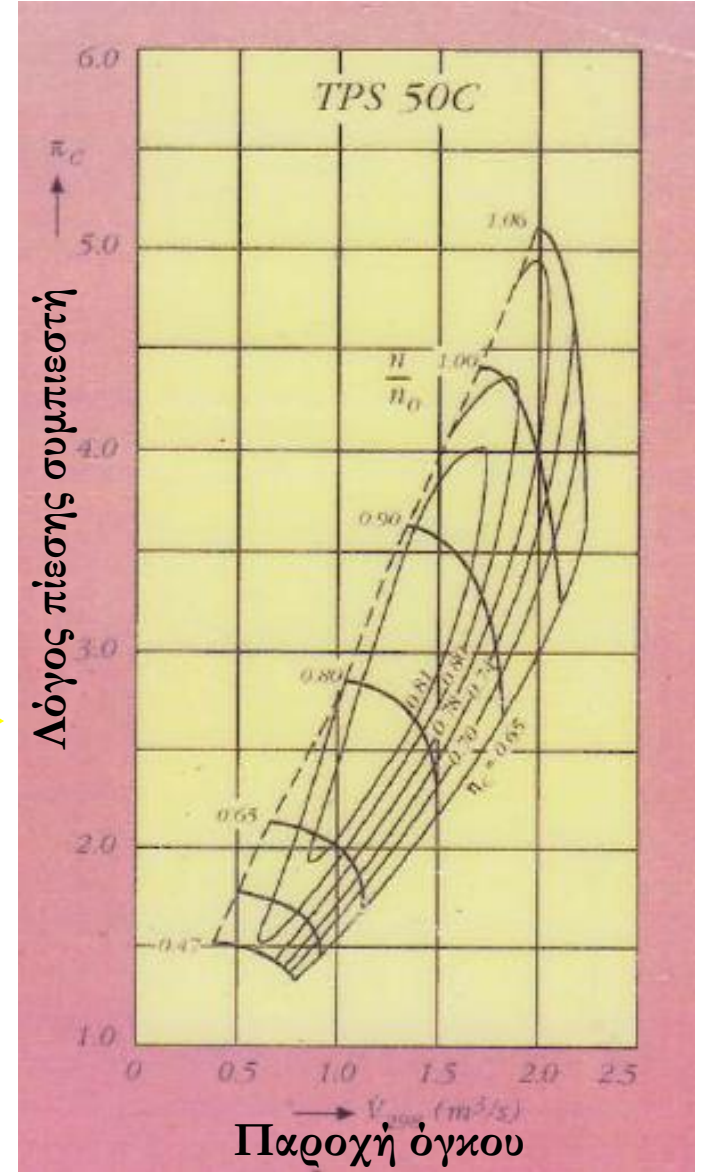
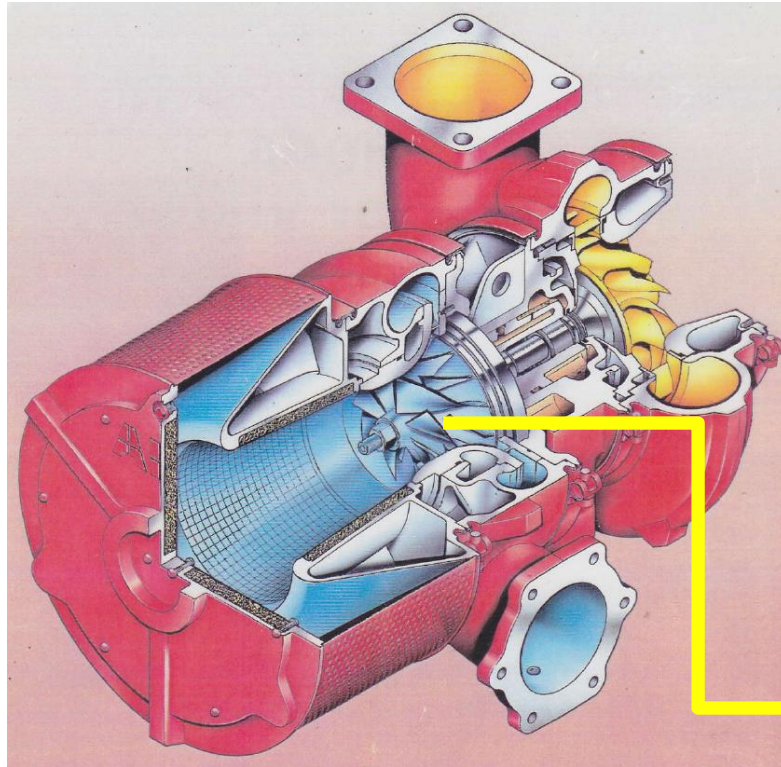


Ο λόγος πίεσης π_c του συμπιεστή των στροβιλοϋπερπληρωτών (turbochargers) της εταιρίας ABB (παλιό σχήμα). Η αύξηση αντιστοιχεί στην αύξηση του β. απόδοσης της μηχανής από τη χρήση στροβιλοϋπερπλήρωσης.

Στροβιλοϋπερπληρωτής (ABB)



Στροβιλοϋπερπληρωτής (ABB)

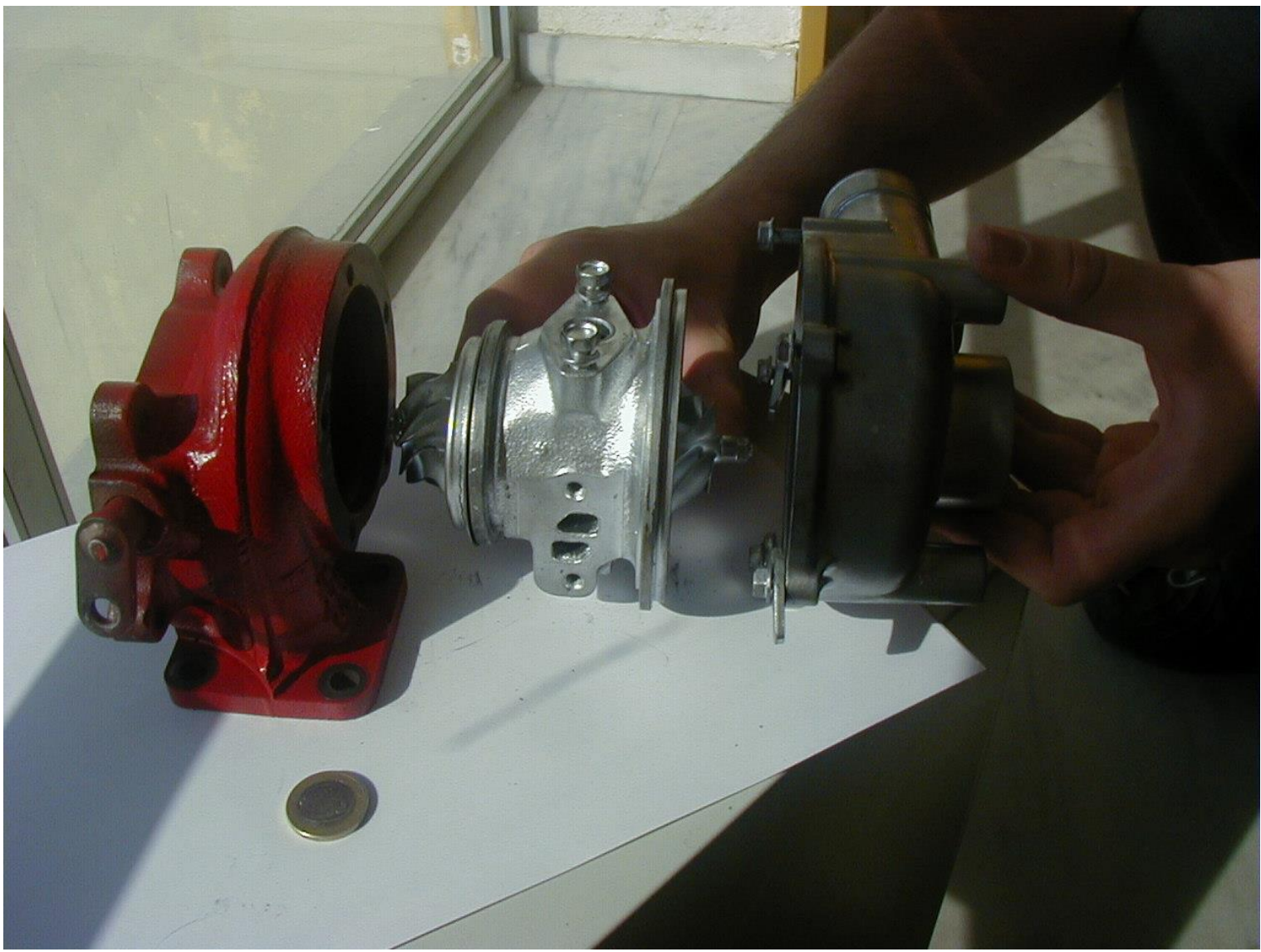


Χάρτης του συμπιεστή ενός στροβιλοϋπερπληρωτή (turbocharger) της εταιρίας ABB.

Στροβιλοϋπερπληρωτής (αυτοκινήτου)



Στροβιλοϋπερπληρωτής (αυτοκινήτου)



Στροβιλοϋπερπληρωτής (αυτοκινήτου)



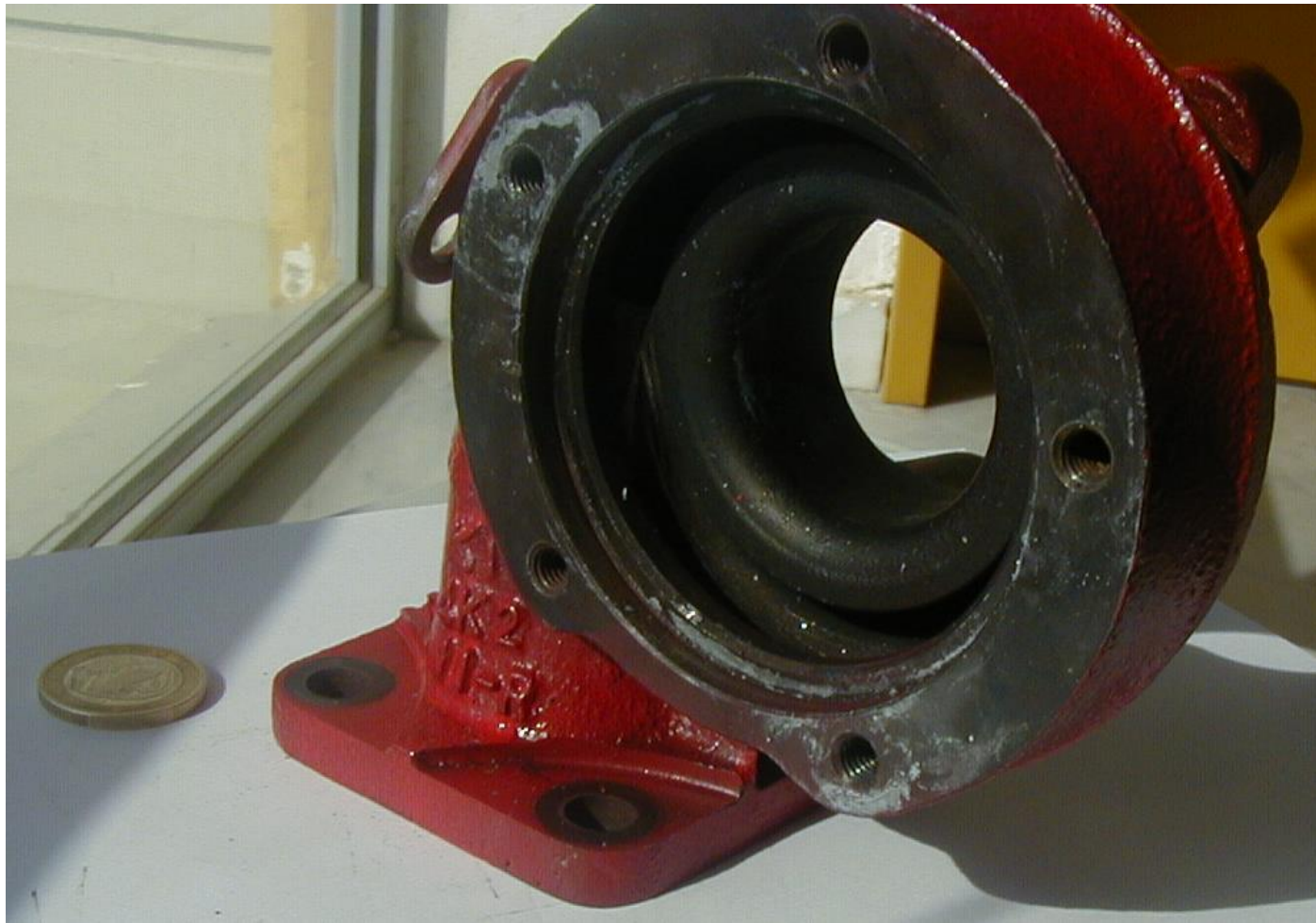
Στροβιλοϋπερπληρωτής (αυτοκινήτου)



Στροβιλοϋπερπληρωτής (αυτοκινήτου)



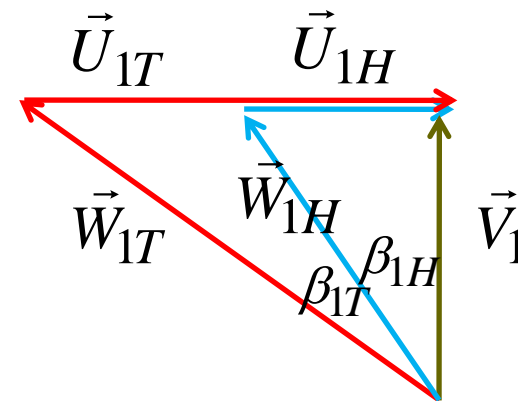
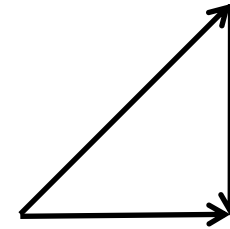
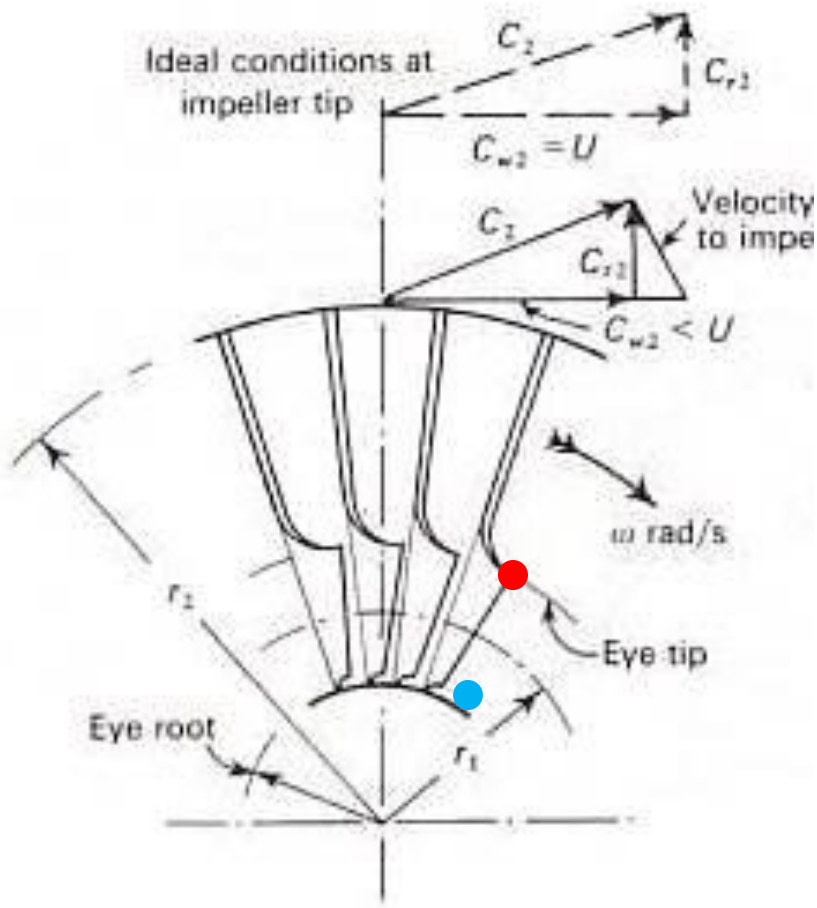
Στροβιλοϋπερπληρωτής (αυτοκινήτου)



Στροβιλοϋπερπληρωτής (αυτοκινήτου)

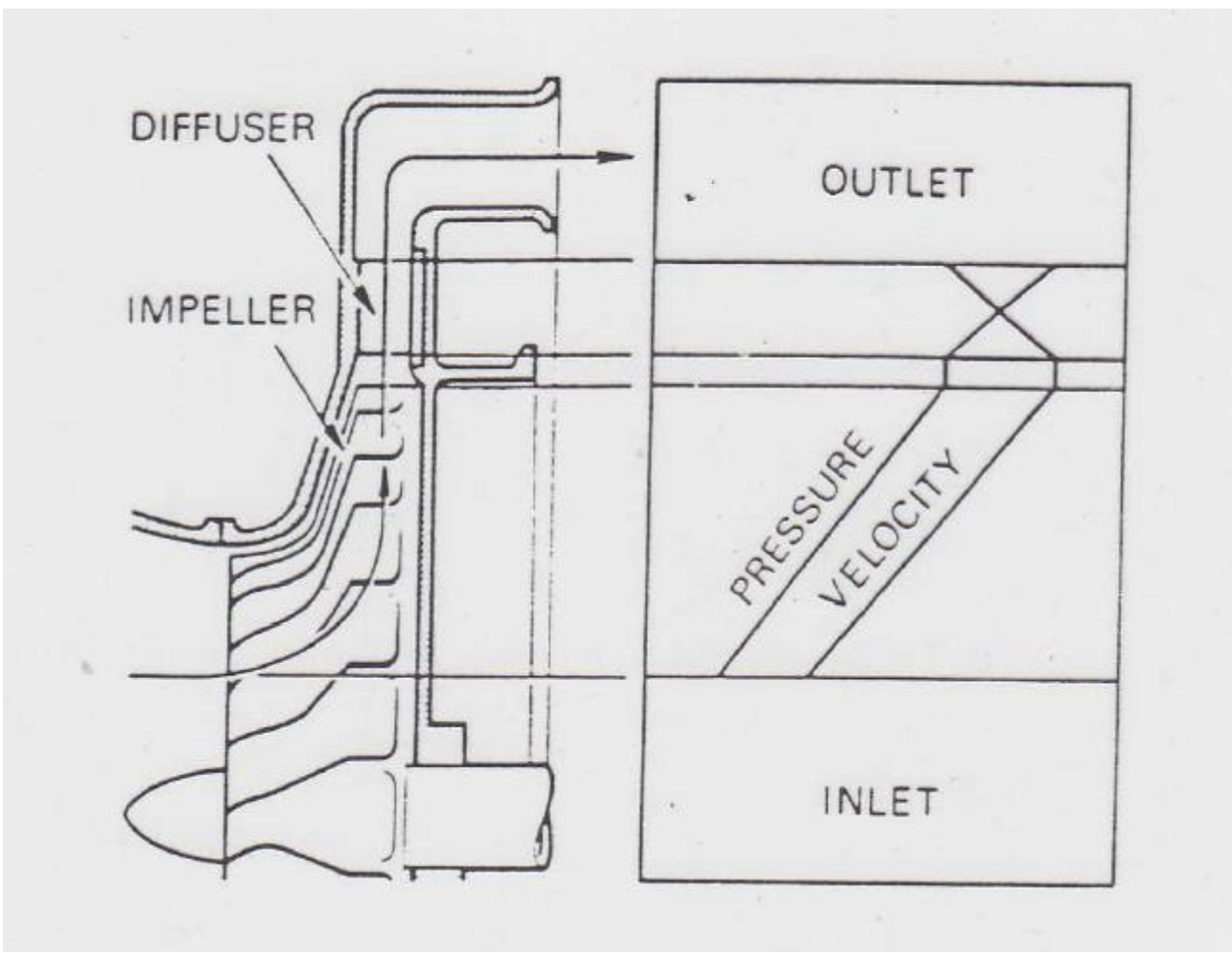


Τρίγωνα Ταχυτήτων στην Είσοδο



Προσοχή σε ποιο επίπεδο είναι τα δύο αυτά τρίγωνα!!!!

Μεταβολές p & V σε Φυγοκεντρικό Συμπιεστή



Δεν είναι λογικό η στατική πίεση (1-2-3) να αυξάνει διαρκώς;



Τύποι Πτερωτών (με κριτήριο τη β_2 ')

Καθαρά ακτινική έξοδος (radial/straight blades)

Εύκολη, φτηνή κατασκευή.

Οπισθοκλινή Πτερόγια (Backward leaned)

Καλύτερη απόδοση από τα ίσια.

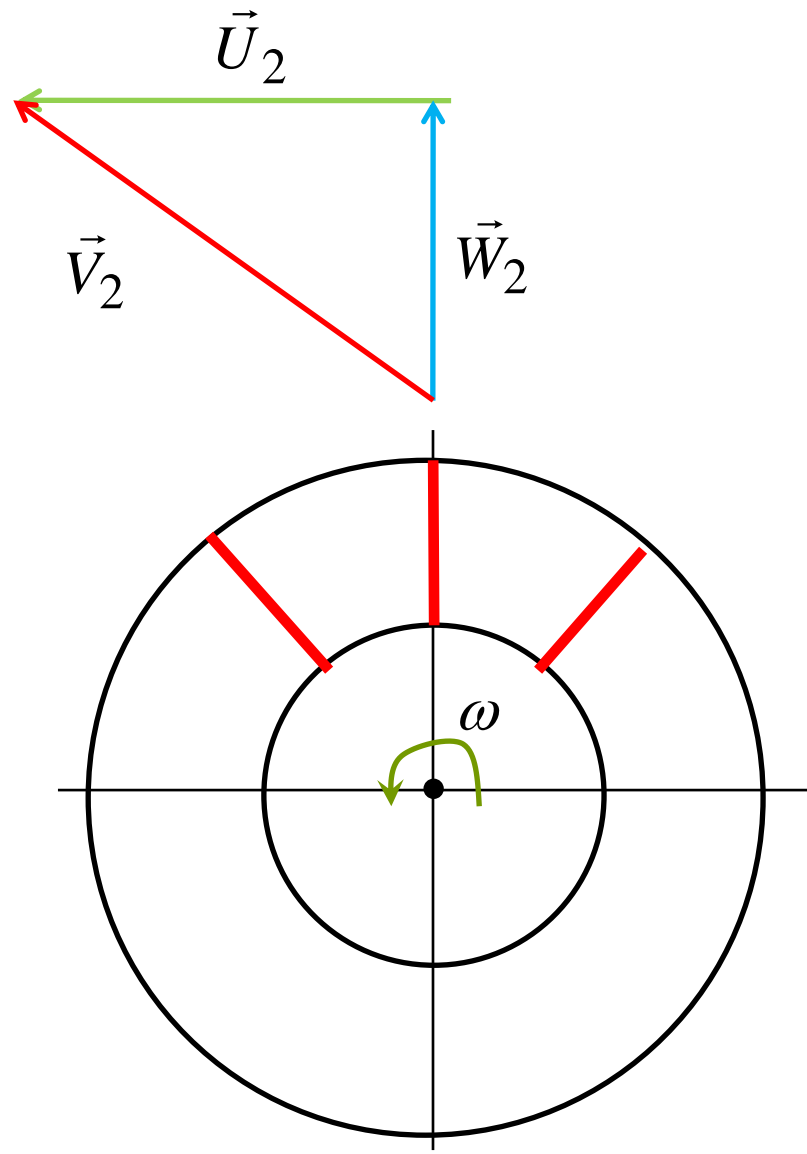
Μεγαλύτερο κόστος κατασκευής.

Εμπροσθοκλινή Πτερόγια (Forward leaned)

Όχι συχνή χρήση, λόγω δυναμικής αστάθειας.

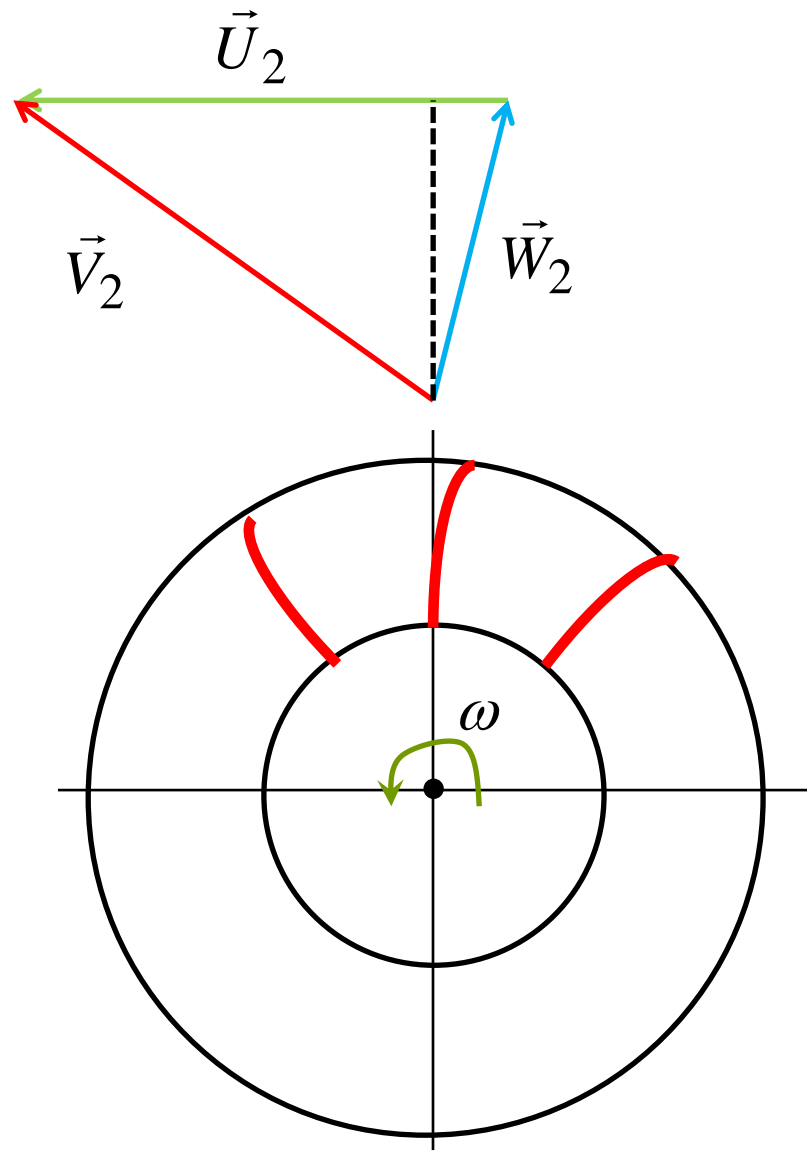
....αποτελεί απόφαση του σχεδιαστή.....

Πτερύγια με καθαρά ακτινική έξοδο



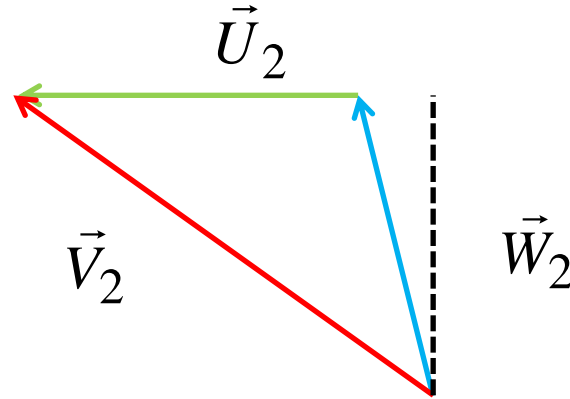
$$\beta_2 = 0$$

Πτερύγια με οπισθόκλιση

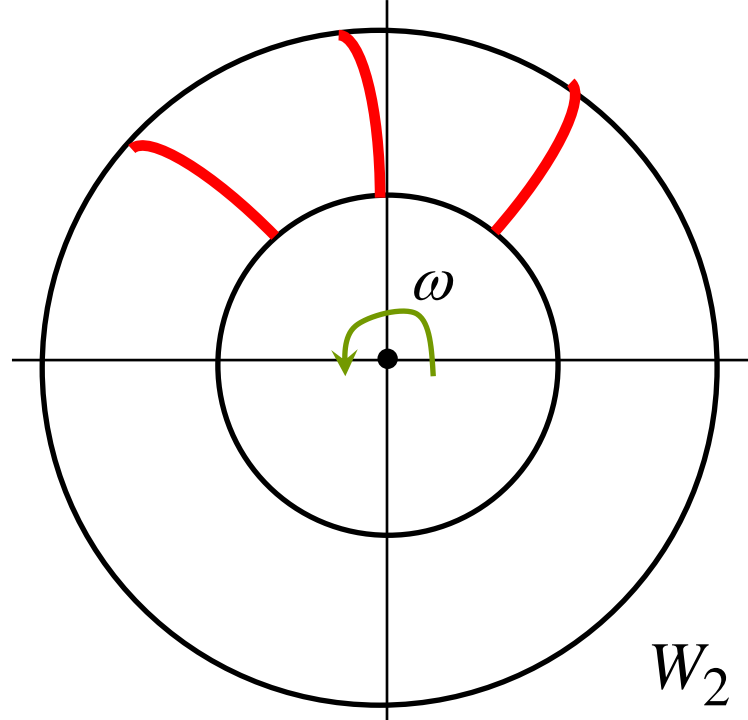


$$\beta_2 < 0$$

Πτερύγια με εμπροσθόκλιση



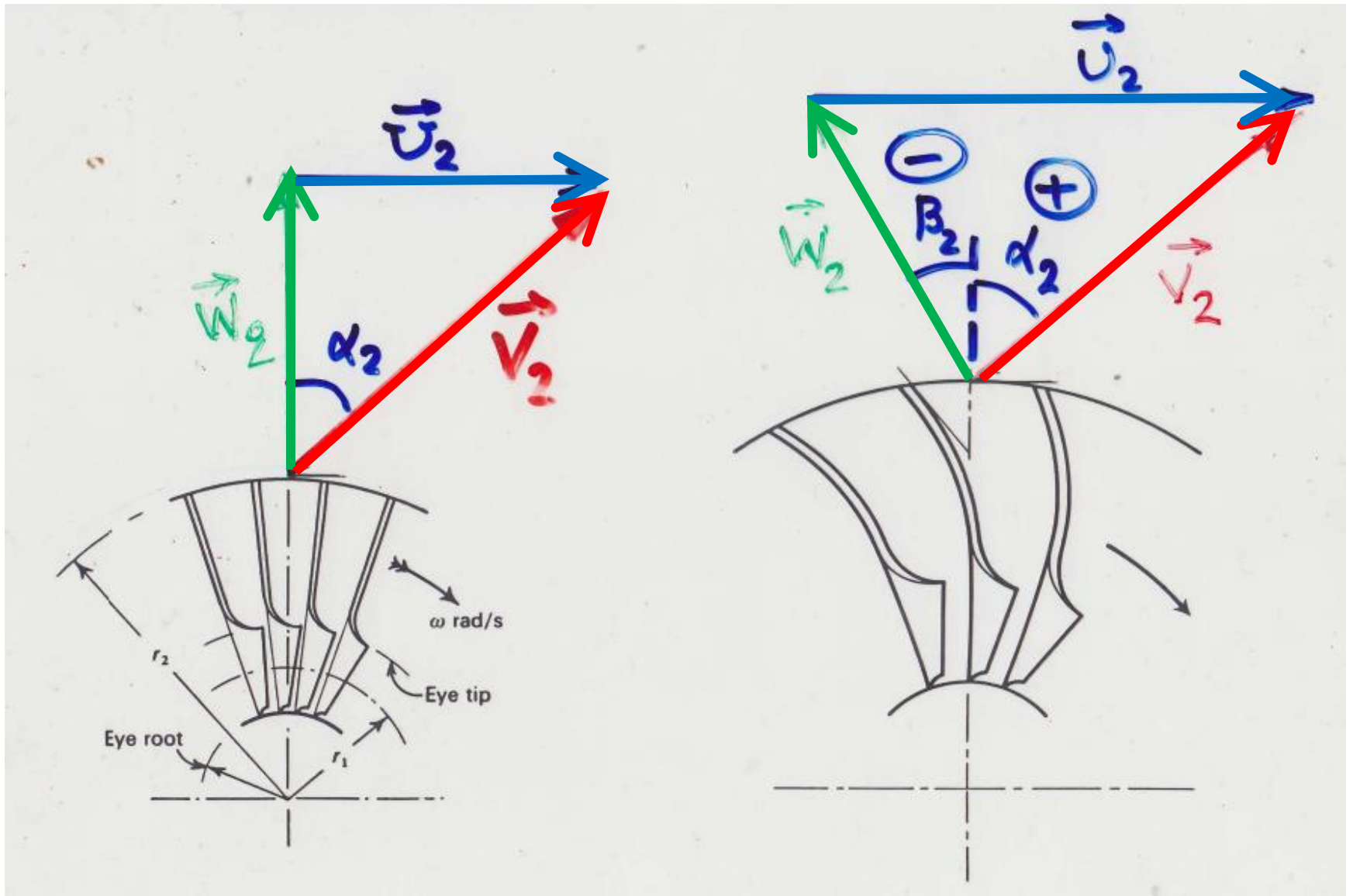
$$\beta_2 > 0$$



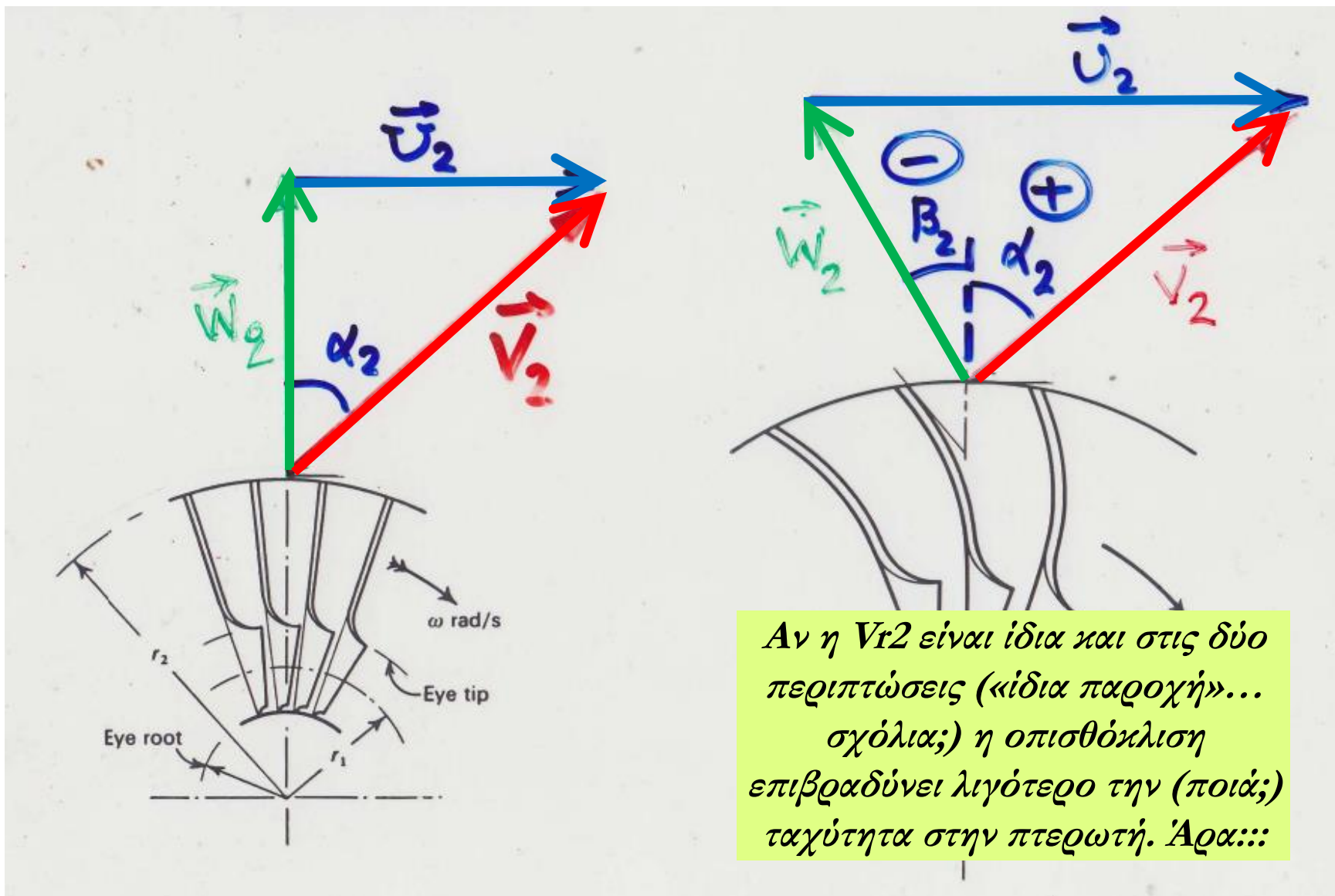
(υπό παραδοχές)
λιγότερη επιβράδυνση

$$W_2 \uparrow \Rightarrow W_2 / W_1 \uparrow \Rightarrow \eta \uparrow$$

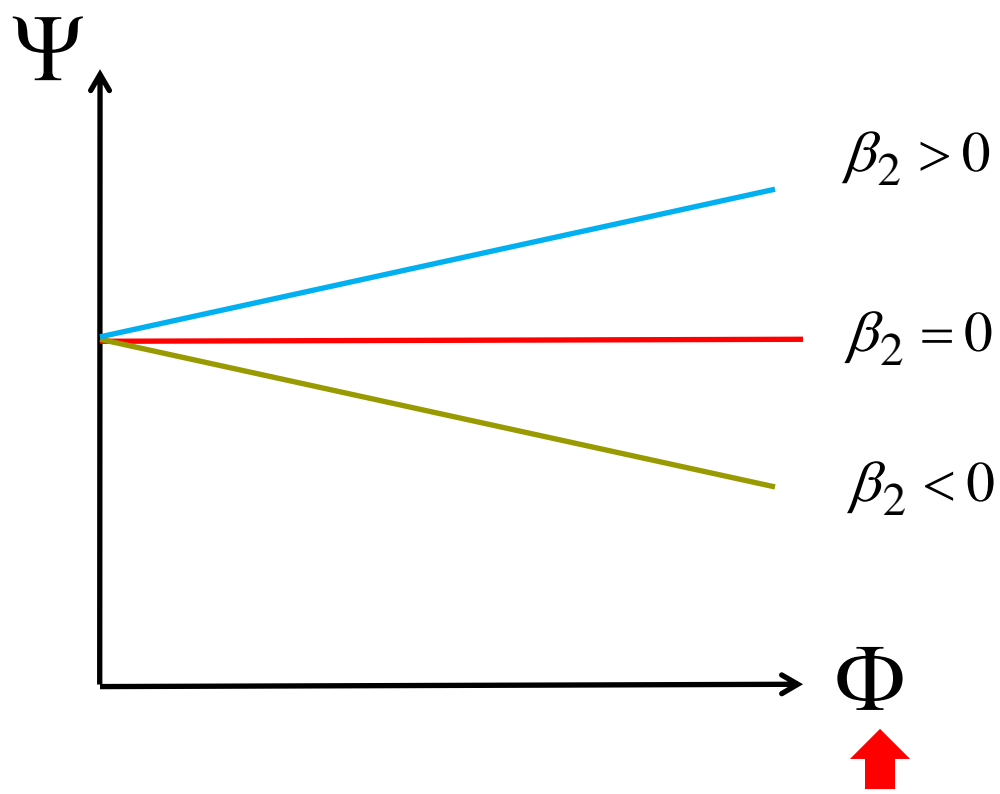
Άρα, αν δεν υπήρχε Ολίσθηση (βλ. παρακάτω) θα ήταν:



Άρα, αν δεν υπήρχε Ολισθήση (βλ. παρακάτω) θα ήταν:



Περί κλίσης πτερυγίων στη θέση 2



Εμπροσθοκλινή Πτερόγια
(Forward leaned)

Καθαρά ακτινική έξοδος
(radial/straight blades)

Οπισθοκλινή Πτερόγια
(Backward leaned)

(θεωρώντας ότι β_2 είναι πρακτικά η γωνία μετάλλου – μετά θα «μπει» και η ολίσθηση)

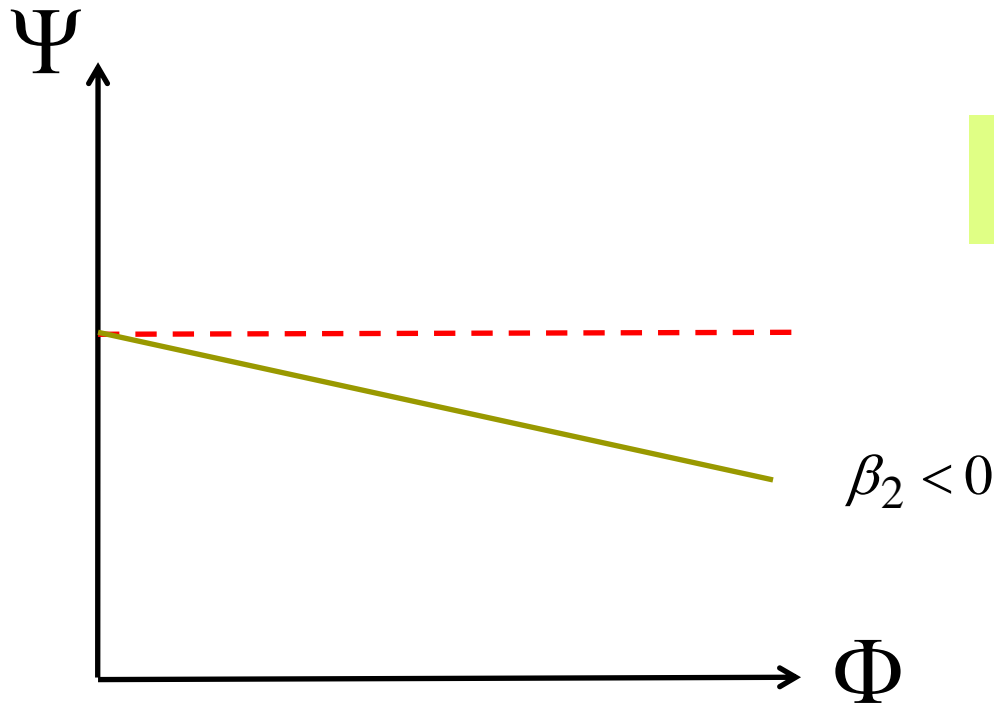
$$\Delta h_t = U_2 V_{u2} - U_1 V_{u1} = U_2 V_{u2} = U_2 (U_2 + W_{u2}) = U_2^2 + U_2 V_{r2} \tan \beta_2$$

Έστω $\alpha_1 = 0^\circ$

A red arrow points to the $U_2 V_{r2}$ term, and an orange circle highlights the $\tan \beta_2$ term.

Ο ρυθμός μείωσης του λόγου πίεσης με την αύξηση της παροχής είναι ενδεικτικός παράγοντας ευστάθειας.

Περί κλίσης πτερυγίων στη θέση 2

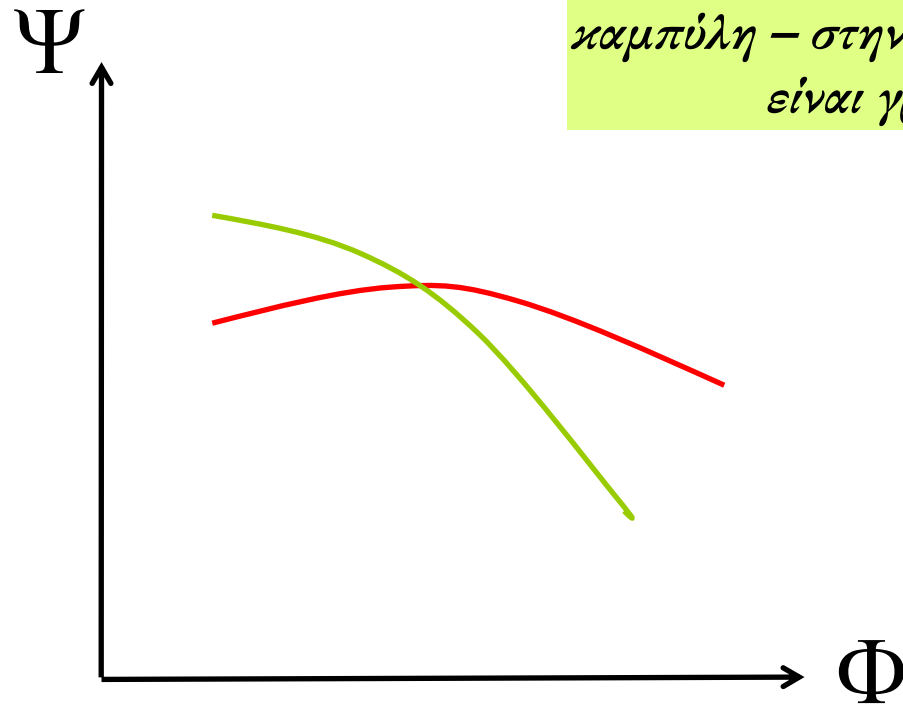


*Θεωρητική-ιδανική καμπύλη –
για αυτό είναι ευθεία!*

Οπισθοκλινή Πτερόγια
(Backward leaned)

Η κλίση της καμπύλης στα οπισθοκλινή πτερόγια είναι ηπιότερη από ότι στους αξονικούς συμπιεστές και αυτό κάνει τον ακτινικό συμπιεστή λιγότερο ευαίσθητο σε αλλαγές παροχής.

Ποιος από τους δύο ακτινικούς συμπιεστές έχει οπισθόκλιση;;;

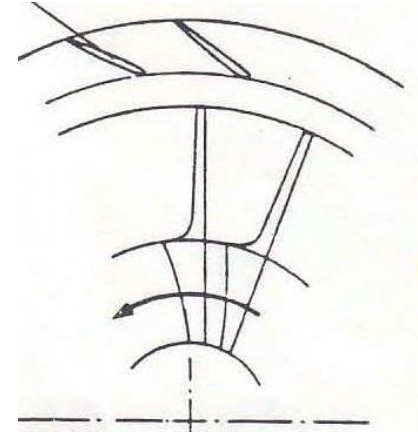
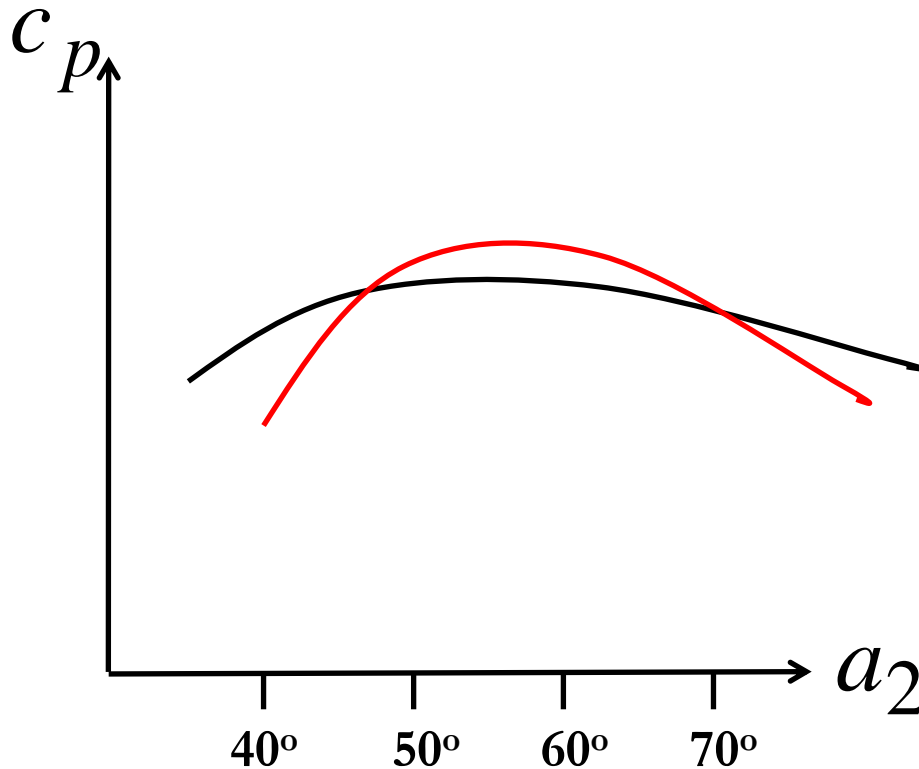


*Αρκετά με τη θεωρητική-ιδανική
καμπύλη – στην πράξη τίποτα δεν
είναι γραμμικό!*

Ερώτηση – Διαχύτης (2-3) με ή όχι πτερόγια;

Ποιος ο vaned και ποιος ο vaneless diffuser ;;;

(c_p = συντελεστής ανάκτησης πίεσης)

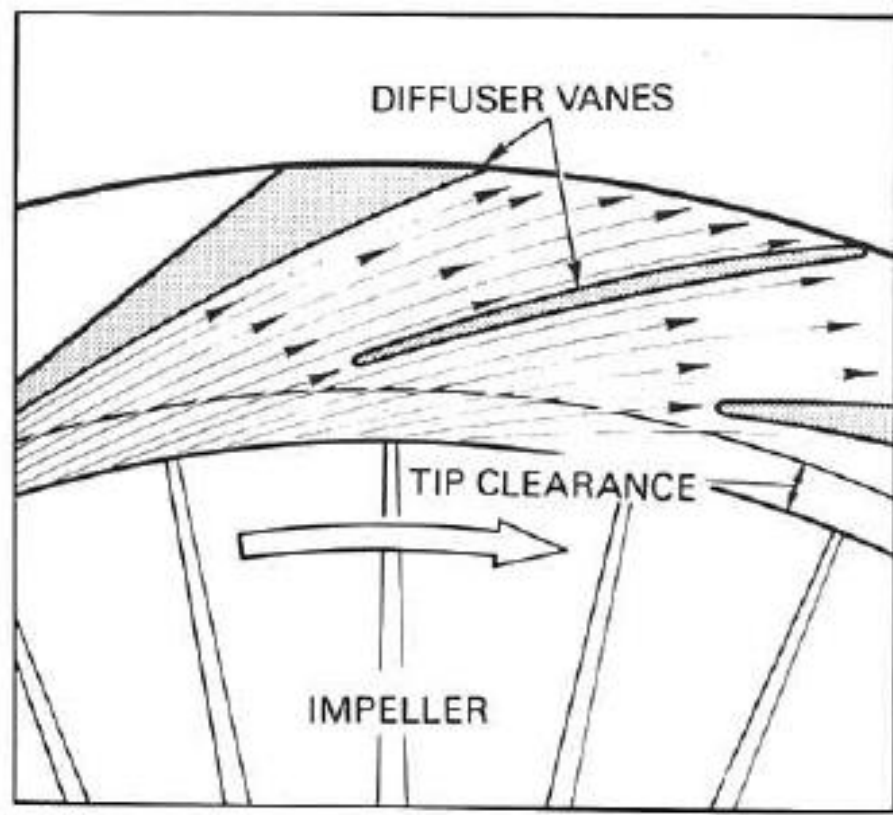


$$c_p = \frac{p_3 - p_2}{p_{t2} - p_2}$$

«καλές» τιμές:
0.50 ως 0.70

Max. εύρος λειτουργίας vs. max. ανάκτηση πίεσης στο διαχύτη

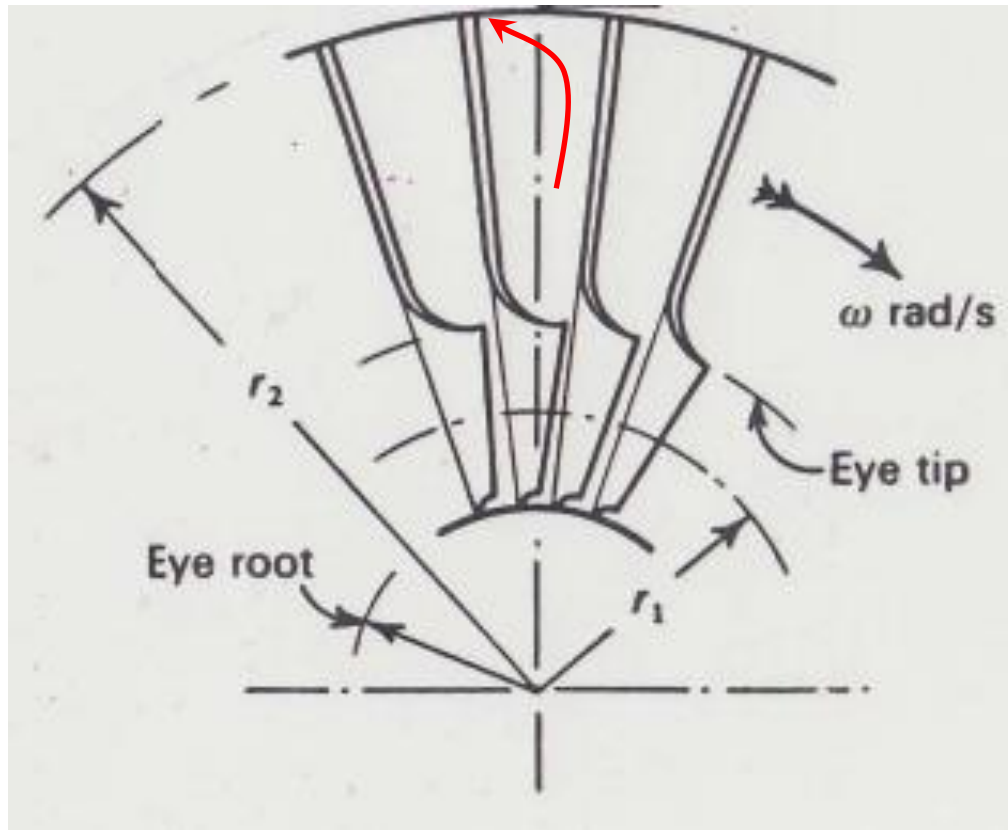
Η Ροή στο Διαχύτη με Πτερύγια



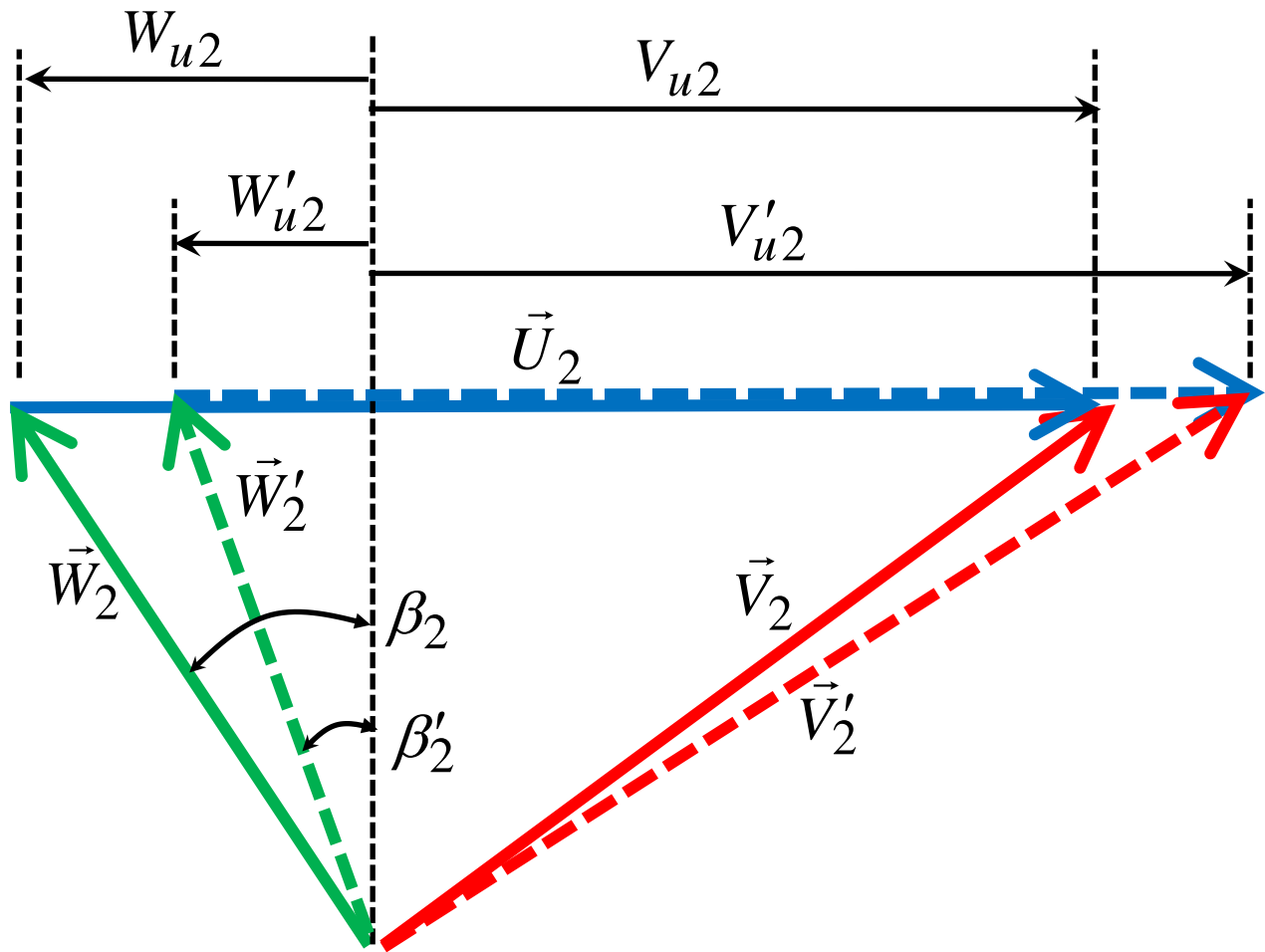
Η ροή στο διαχύτη (με πτερύγια)

Η Ροή στην Έξοδο της Πτερωτής (Θέση 2)

Δέσμη Ομόρρους

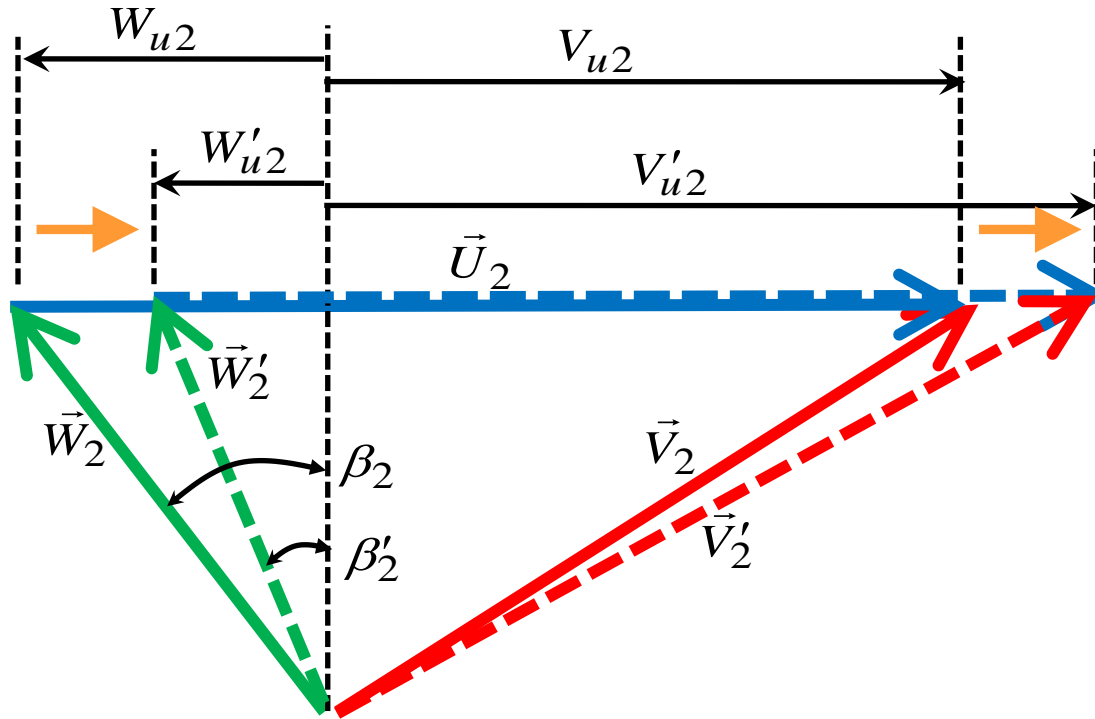


Ολίσθηση (Slip)



Τρίγωνο ταχυτήτων για «άπειρα περύγια» = διακεκομμένη γραμμή
 Πραγματικό τρίγωνο ταχυτήτων = συνεχής γραμμή

Ολίσθηση (Slip)



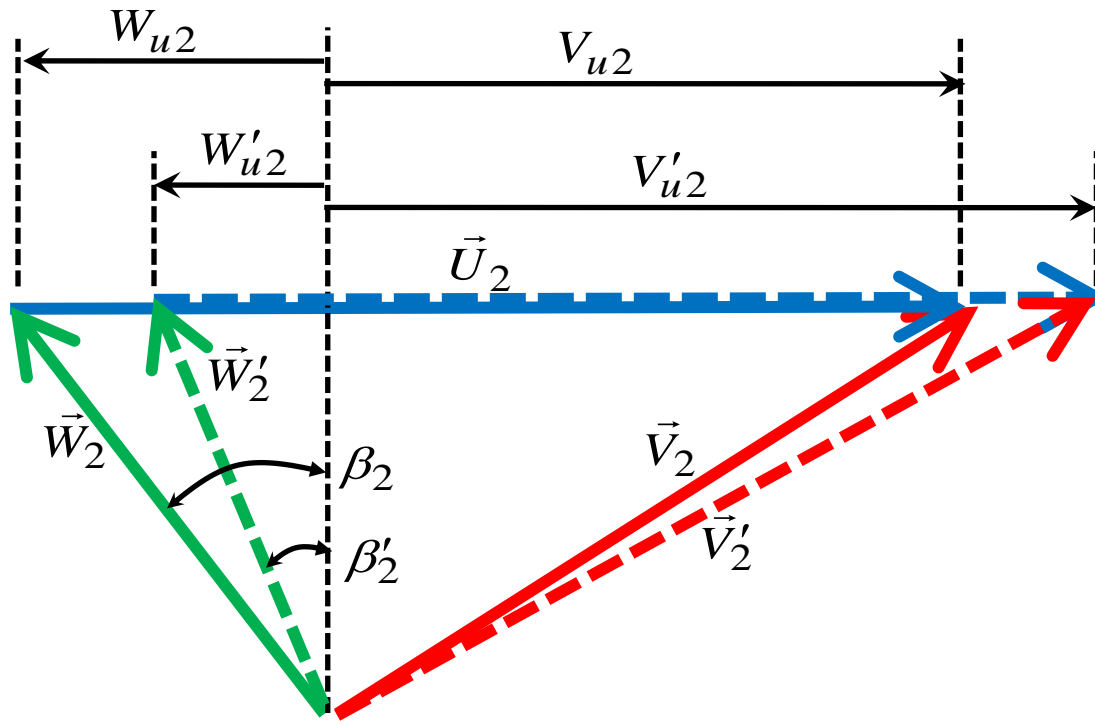
Παράγοντας Ολίσθησης (slip factor):

$$\sigma = \frac{V_{u2}}{V'_{u2}} \leq 1$$

Ταχύτητα Ολίσθησης (slip velocity): \rightarrow

$$V_{us} = V'_{u2} - V_{u2} = W_{u2} - W'_{u2} > 0$$

Ολίσθηση (Slip)



Για αξονική είσοδο της ροής ($\alpha_1=0^\circ$):

$$\Delta h_t = U_2 V_{u2} = U_2 (U_2 + W_{u2}) = U_2^2 + U_2 V_{r2} \tan \beta_2 \quad \dot{\eta}$$

$$\Delta h_t = U_2 V_{u2} = \sigma U_2 V'_{u2} = \sigma (U_2 + W'_{u2}) = \sigma U_2 (U_2 + V_{r2} \tan \beta'_2)$$

$$\sigma = \frac{V_{u2}}{V'_{u2}} \leq 1$$

Παράγοντας Ολίσθησης – Εμπειρική σχέση Stanitz:

$$\sigma = 1 - \frac{0.63\pi}{n} \cdot \frac{1}{1 + \Phi_2 \tan \beta'_2}$$

όπου n ο αριθμός των πτερυγίων και

$$\Phi_2 = \frac{V_{r2}}{U_2}$$



Χαρακτηριστικές Λειτουργίας Ακτινικού Συμπιεστή

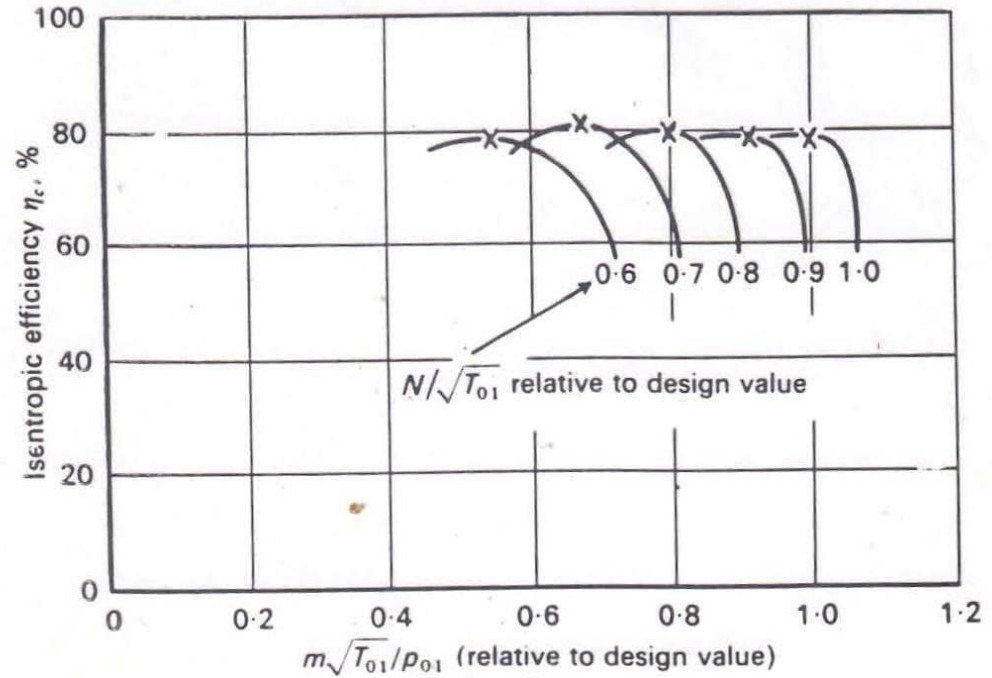
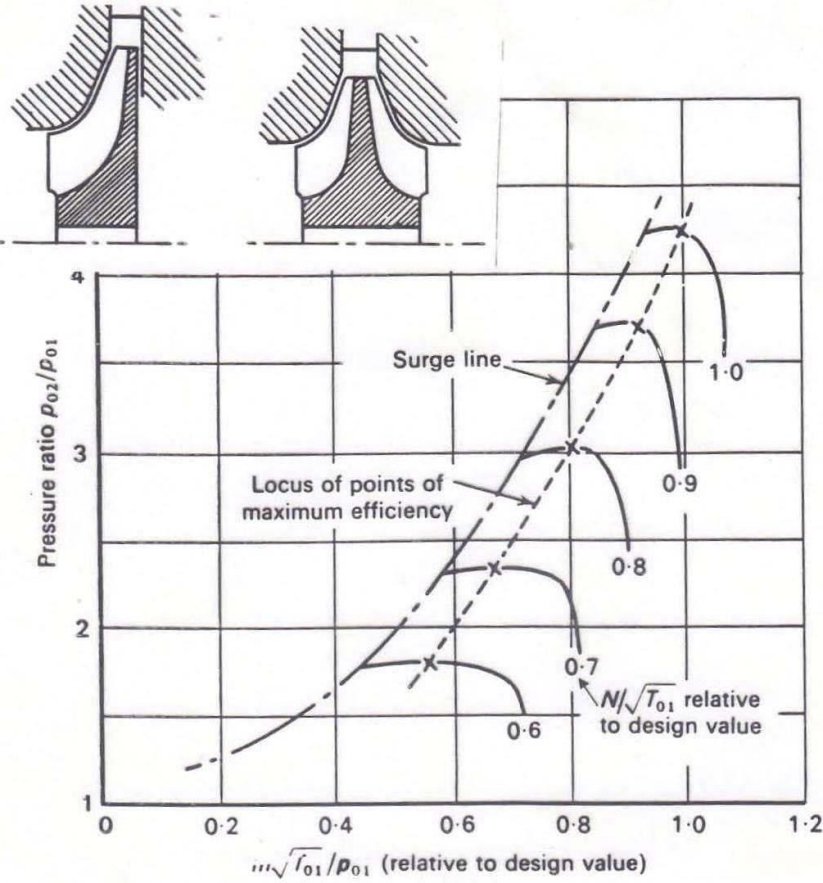
Αδιάστατες χαρακτηριστικές ποσότητες:

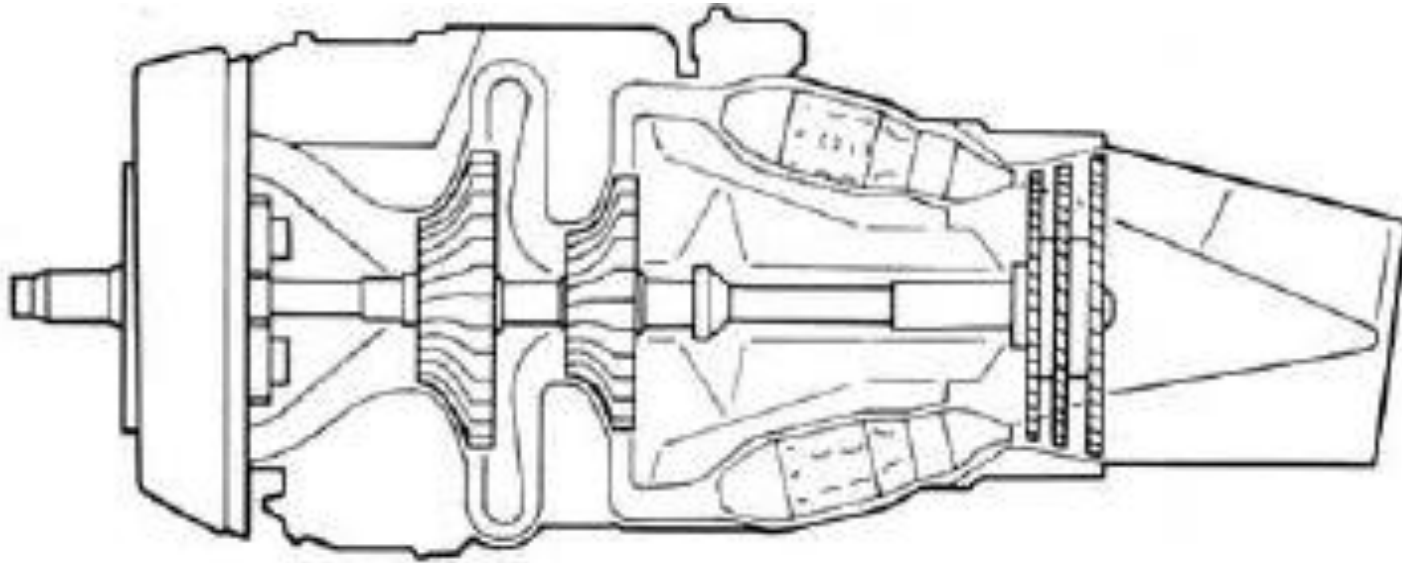
$$\Phi = \frac{V_{a1}}{U_2} \qquad \Psi = \frac{\Delta h_t}{U_2^2}$$

Γενικά:

- Ευρύτερη περιοχή λειτουργίας από ότι οι ΑΞΣ.
- Λειτουργία σε μεγαλύτερο εύρος παροχών
- Πάνω όριο παροχής = ηχητικός στραγγαλισμός (choking)
- Κάτω όριο παροχής = ασταθής λειτουργία

Χαρακτηριστικές Λειτουργίας Ακτινικού Συμπιεστή





SINGLE-ENTRY TWO-STAGE
CENTRIFUGAL TURBO-PROPELLER

Ελικοφόρος Στροβιλοαντιδραστήρας με **διβάθμιο φυγοκεντρικό συμπιεστή**
απλής εισόδου (του αέρα)