



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

School of Mechanical Engineering

Lab. Of Thermal Turbomachines

Parallel CFD & Optimization Unit (PCOpt/NTUA)

Ο Αξονικός Συμπιεστής

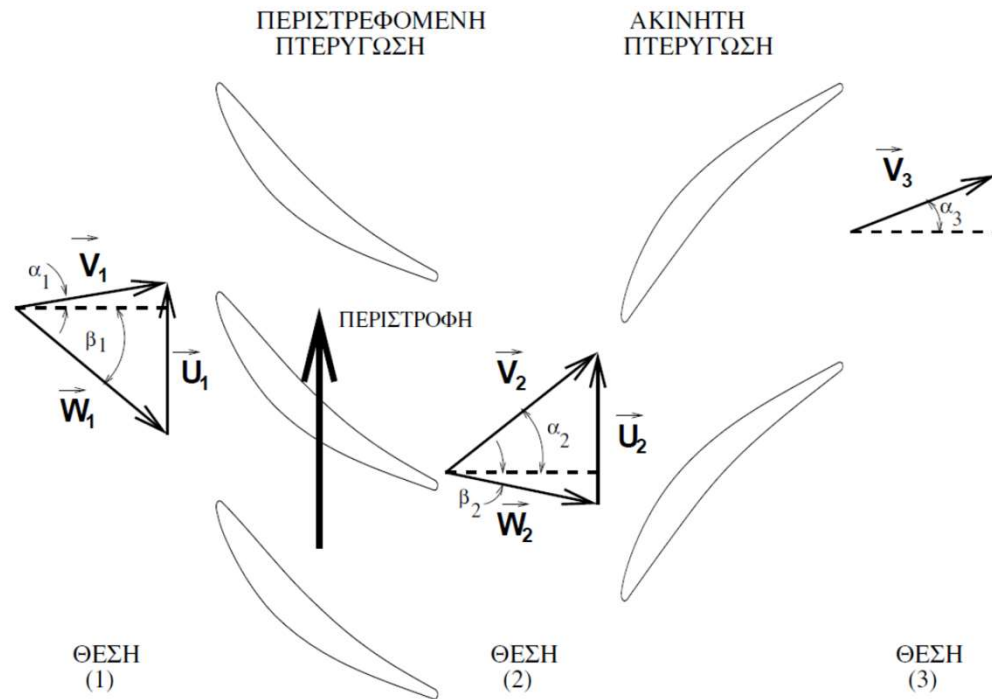
Kyriakos C. GIANNAKOGLOU, Professor NTUA

kgianna@mail.ntua.gr

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

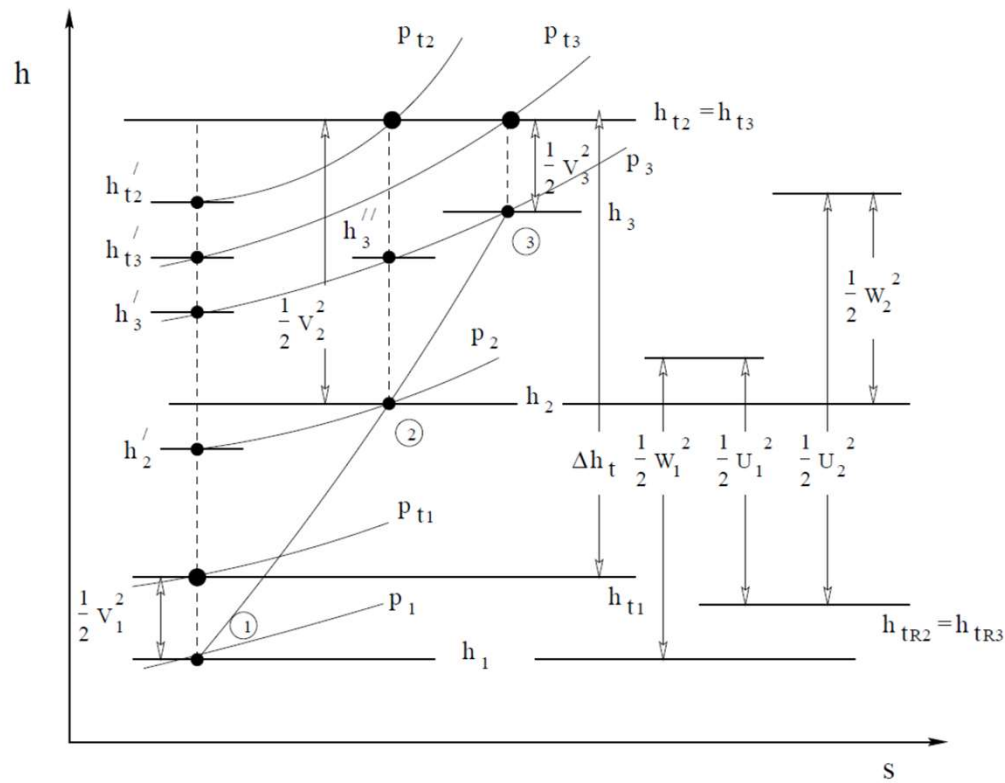


Βαθμίδα Αξονικού Συμπιεστή





Βαθμίδα Αξονικού Συμπιεστή





Παράμετροι που επιδρούν στον λόγο πίεση π_c

$$\eta_{t-t,c} = \frac{T_{t3}' - T_{t1}}{T_{t3} - T_{t1}} = \frac{\frac{T_{t3}'}{T_{t1}} - 1}{\frac{T_{t3}}{T_{t1}} - 1} = \frac{\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{T_{t3}}{T_{t1}} - 1}$$

$$\pi_c = \left[1 + \eta_{t-t,c} \left(\frac{T_{t3}}{T_{t1}} - 1 \right) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

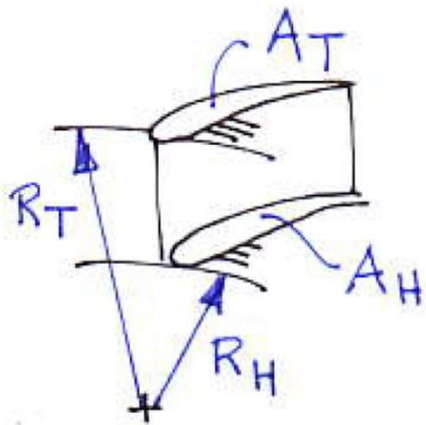
$$T_{t3} - T_{t1} \underset{\substack{\uparrow \\ R = \sigma \alpha \theta}}{=} \frac{U}{c_p} (V_{u2} - V_{u1}) \underset{\substack{\uparrow \\ V_a = \sigma \alpha \theta}}{=} \frac{1}{c_p} U V_a (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1)$$



Παράμετροι που επιδρούν στον λόγο πίεση π_c

$$T_{t3} - T_{t1} = \frac{U}{c_p} (V_{u2} - V_{u1}) = \frac{1}{c_p} U V_a (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1)$$

\uparrow $R = \sigma \tan \theta$ \uparrow $V_a = \sigma \tan \theta$



$$\sigma_{\max, \text{HUB}} = \frac{\rho_{\text{MET}} \omega^2}{A_{\text{HUB}}} \int_{R_H}^{R_T} A R dR$$

or $A = \sigma \tan \theta$

$$\sigma_{\max} = \frac{\rho_{\text{MET}} U_T^2}{2} \left[1 - \left(\frac{R_H}{R_T} \right)^2 \right]$$

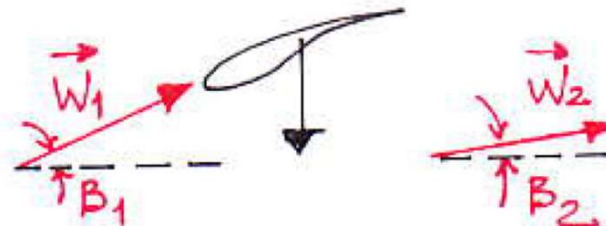


Παράμετροι που επιδρούν στον λόγο πίεση π_c

$$T_{t3} - T_{t1} \underset{\substack{\uparrow \\ R = \sigma \alpha \theta.}}{=} \frac{U}{c_p} (V_{u2} - V_{u1}) \underset{\substack{\uparrow \\ V_a = \sigma \alpha \theta.}}{=} \frac{1}{c_p} U V_a (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1)$$

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2}$$

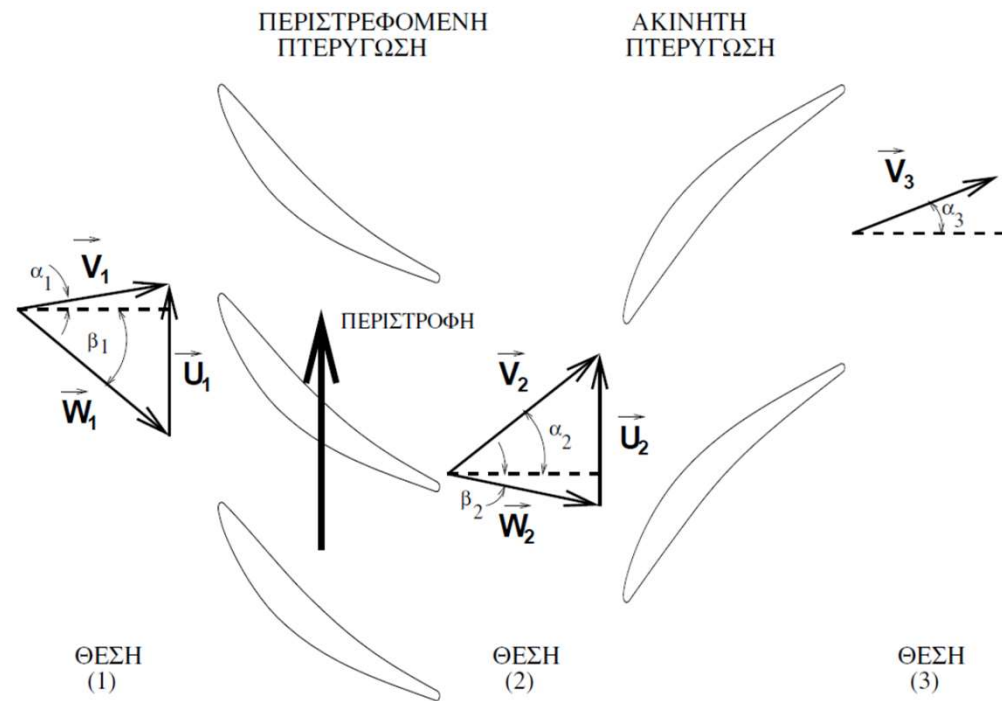
$$\frac{W_2}{W_1} > 0,72$$





Αδιάστατοι Παράμετροι Λειτουργίας Βαθμίδας Συμπιεστή

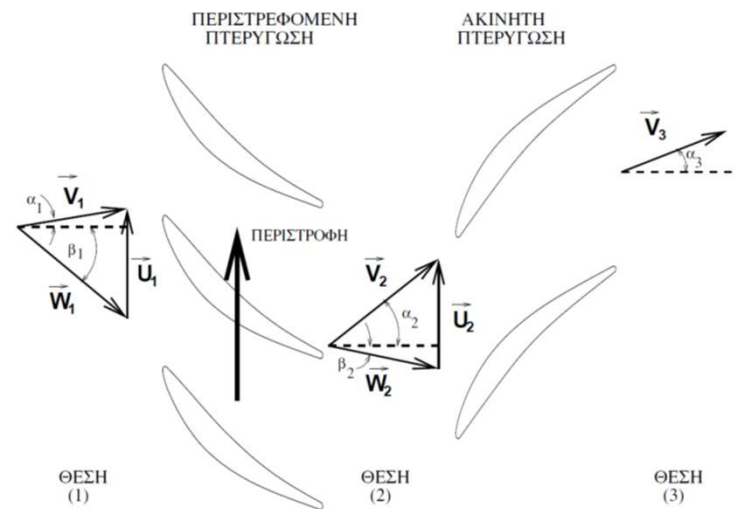
- Συντελεστής Παροχής (Φ)
- Συντελεστής Φόρτισης (Ψ)
- Βαθμός Αντίδρασης (r)





Συντελεστής Παροχής Φ

$$\Phi = \frac{V_a}{U} = \frac{V_a}{V_u - W_u} = \frac{V_a}{V_a(\tan\alpha_1 - \tan\beta_1)} = \frac{1}{\tan\alpha_1 - \tan\beta_1}$$





Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- Συντελεστής Παροχής: $\Phi = \frac{V_a}{U}$

Αν $U = \text{σταθ.}$ και $V_a = \text{σταθ.} \Rightarrow$

$$\Phi = \frac{V_{a,i}}{U_i} = \frac{V_{a,i}}{V_{u,i} - W_{u,i}} = \frac{1}{\tan\alpha_i - \tan\beta_i}$$

για $i = 1, 2, 3$



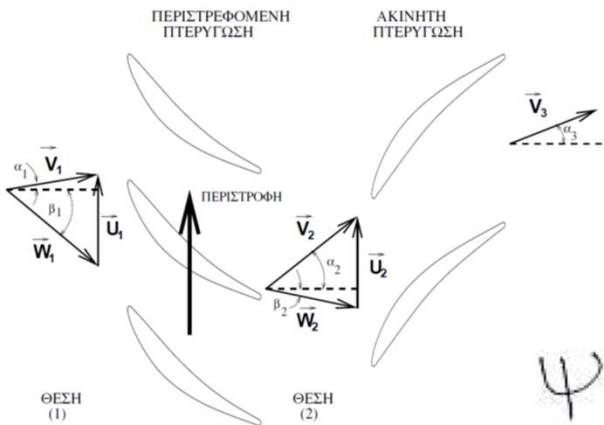
Συντελεστής Φόρτισης Ψ

$$\Psi = \frac{h_{t3} - h_{t1}}{U^2} = \frac{U(v_{u2} - v_{u1})}{U^2} = \frac{v_{u2} - v_{u1}}{U}$$

\uparrow
 $U = \text{σταθ.}$

$$= \frac{U + w_{u2} - v_{u1}}{U} = 1 + \frac{w_{u2} - v_{u1}}{V_a} \cdot \frac{V_a}{U} = 1 + \left(\frac{w_{u2}}{V_a} - \frac{v_{u1}}{V_a} \right) \Phi$$

\uparrow
 $V_a = \text{σταθ.}$



$$\Psi = 1 + \Phi (\tan \beta_2 - \tan \alpha_1)$$

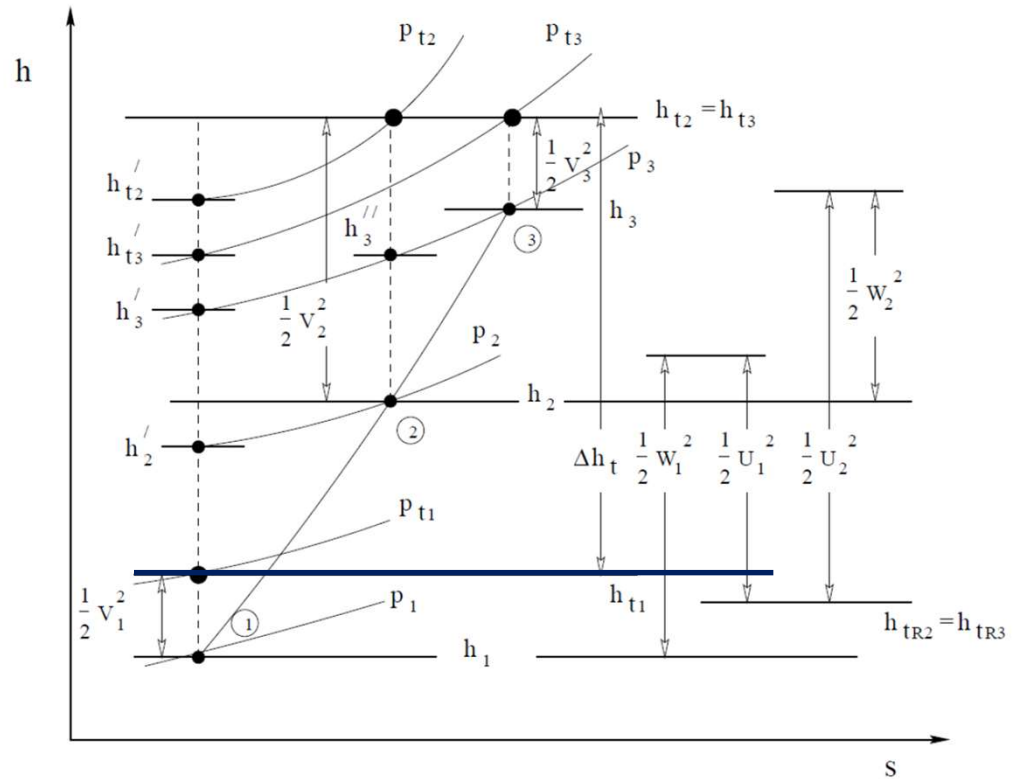
Εναλλακτικά:

$$\Psi = \frac{v_{u2} - v_{u1}}{U} = \frac{w_{u2} - w_{u1}}{U} \cdot \frac{V_a}{V_a} = \Phi (\tan \beta_2 - \tan \beta_1)$$



Ισεντροπικός Συντελεστής Φόρτισης Ψ_{is}

$$\begin{aligned} \Psi_{is} &= \frac{h_{t3}' - h_{t1}}{U^2} = \\ &= \frac{\eta_{t-t,c}(h_{t3} - h_{t1})}{U^2} \\ &= \Psi \cdot \eta_{t-t,c} \end{aligned}$$





Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- Συντελεστής Φόρτισης:

$$\Psi = \frac{\Delta h_t}{U^2} = \frac{h_{t2} - h_{t1}}{U^2}$$

Αν $U = \text{σταθ.}$ και $V_a = \text{σταθ.} \Rightarrow$

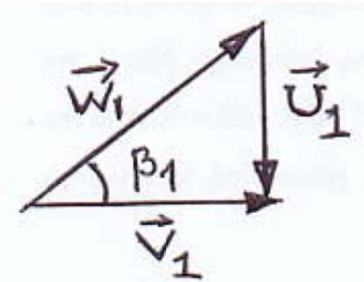
$$\Psi = 1 + \Phi(\tan\beta_2 - \tan\alpha_1) = \Phi(\tan\beta_2 - \tan\beta_1)$$

- Ισεντροπικός Συντελεστής Φόρτισης: $\Psi_{is} = \frac{\Delta h_{t,is}}{U^2} = \eta_{is,C} \Psi$



Συντελεστής Παροχής Φ

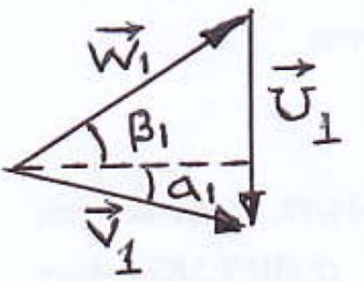
Αν $\alpha_1 = 0^\circ$:



$$\Phi = \frac{Va}{U} = \frac{Va}{-Wu_1} = -\frac{1}{\tan\beta_1}$$

$$\text{ή } \tan\beta_1 = -1/\Phi$$

Αν $\alpha_1 \neq 0^\circ$:

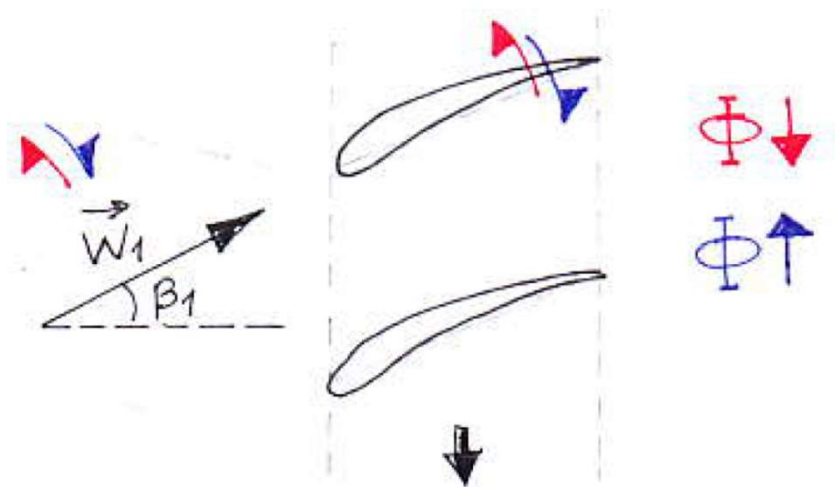


$$\frac{1}{\Phi} = \tan\alpha_1 - \tan\beta_1$$

Λειτουργία στο σημείο σχεδιασμού (**design point**) & λειτουργία εκτός σημείου σχεδιασμού (**off design**)



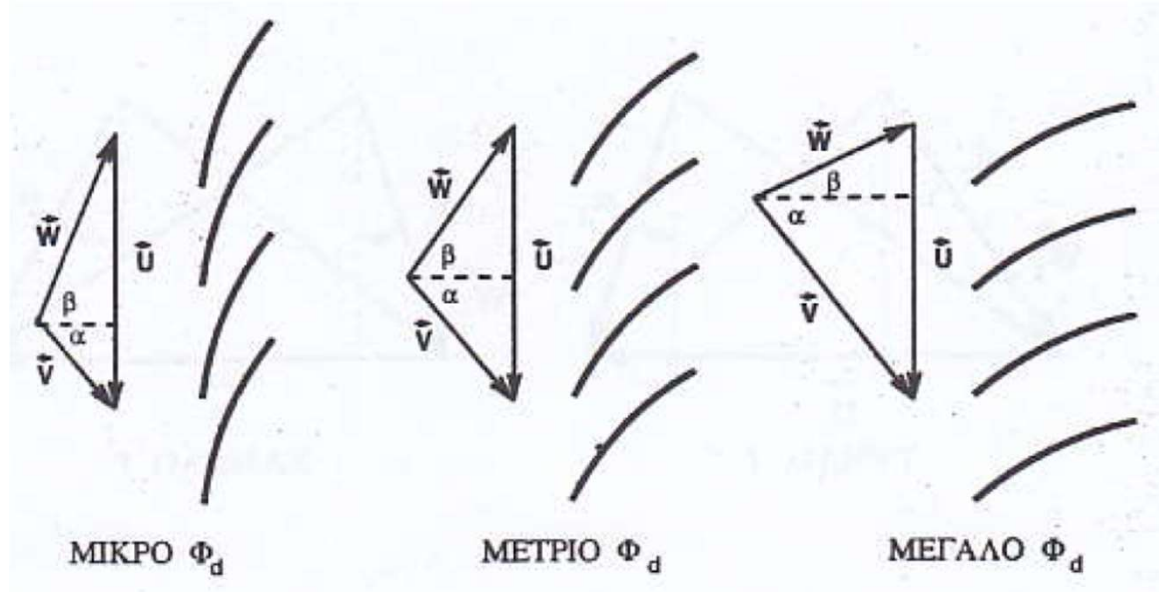
Συντελεστής Παροχής Φ & Θέση Πτερυγίου





Σημεία Λειτουργίας

Διατάξεις στρεφόμενων πτερυγίων αξονικού σχεδιασμού για διαφορετικές τιμές του Φ στο σημείο σχεδιασμού (**design point**) = Φ_d .





Βαθμός Αντίδρασης (r)

Εκφράζει την εσωτερική δομή μιας βαθμίδας

$$r = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_1} = \frac{\Delta h_{\text{ROTOR}}}{\Delta h_{\text{STAGE}}}$$

Για ασυμπίεστη και
ισεντροπική ροή ($\Delta h = \Delta p / \rho$)

$$r = \frac{P_2 - P_1}{P_3 - P_1}$$

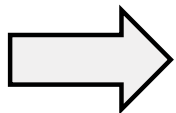


Βαθμός Αντίδρασης (r)

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = U_2 \\ h_{tR_1} = h_{tR_2} \end{array} \right\} h_2 - h_1 = \frac{1}{2} (W_1^2 - W_2^2)$$

**Παραδοχές: $V_a = \text{σταθ.}$ $U = \text{σταθ.}$
Επαναληπτική βαθμίδα**

$$\left. \begin{array}{l} h_3 - h_1 = \left(h_{t3} - \frac{V_3^2}{2} \right) - \left(h_{t1} - \frac{V_1^2}{2} \right) \\ V_1 = V_3 \end{array} \right\} h_{t3} - h_{t1} = h_{t2} - h_{t1} = U (V_{a2} - V_{a1})$$



$$r = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_1} = \frac{\frac{1}{2} (W_1^2 - W_2^2)}{U (V_{a2} - V_{a1})} \Rightarrow \boxed{r = \frac{(W_1^2 - W_2^2)}{2U (V_{a2} - V_{a1})}}$$



Βαθμός Αντίδρασης (r)

Όμως:

$$\begin{aligned}
 W_1^2 - W_2^2 &= (W_{a_1}^2 + W_{u_1}^2) - (W_{a_2}^2 + W_{u_2}^2) = W_{u_1}^2 - W_{u_2}^2 = \\
 &= (W_{u_1} - W_{u_2}) \cdot (W_{u_1} + W_{u_2}) = \\
 &= (V_{u_1} - U - V_{u_2} + U) \cdot (V_{u_1} - U + V_{u_2} - U) = \\
 &= (V_{u_1} - V_{u_2}) \cdot (V_{u_1} + V_{u_2} - 2U)
 \end{aligned}$$



Βαθμός Αντίδρασης (r)

Άρα:

$$\begin{aligned} r &= \frac{(W_1^2 - W_2^2)}{2U(V_{u2} - V_{u1})} = \frac{(V_{u1} - V_{u2})(V_{u1} + V_{u2} - 2U)}{2U(V_{u2} - V_{u1})} = \\ &= \frac{2U - V_{u1} - V_{u2}}{2U} = 1 - \frac{V_{u1} + V_{u2}}{2U} \end{aligned}$$

**Παραδοχές: $V_a = \text{σταθ.}$ $U = \text{σταθ.}$
Επαναληπτική βαθμίδα**

Ή, ακόμη:

$$\begin{aligned} r &= 1 - \frac{V_a}{2U} \cdot \frac{V_{u1} + V_{u2}}{V_a} = 1 - \frac{V_a}{2U} \left\{ \frac{V_{u1}}{V_a} + \frac{W_{u2} + U}{V_a} \right\} = \\ &= 1 - \frac{\Phi}{2} \left\{ \tan \alpha_1 + \frac{1}{\Phi} + \tan \beta_2 \right\} \end{aligned}$$



Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- Βαθμός Αντίδρασης:

$$r = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_1}, \quad r = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1} \quad (C_p = const.)$$

Αν $U = σταθ.$ και $V_a = σταθ.$ και επαναληπτική βαθμίδα \Rightarrow

$$\begin{aligned} r &= \frac{W_1^2 - W_2^2}{2U(V_{u2} - V_{u1})} = 1 - \frac{V_{u1} + V_{u2}}{2U} \\ &= 1 - \frac{\Phi}{2}(\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2) \\ &= \frac{1}{2} - \frac{\Phi}{2}(\tan\alpha_1 + \tan\beta_2) \end{aligned}$$



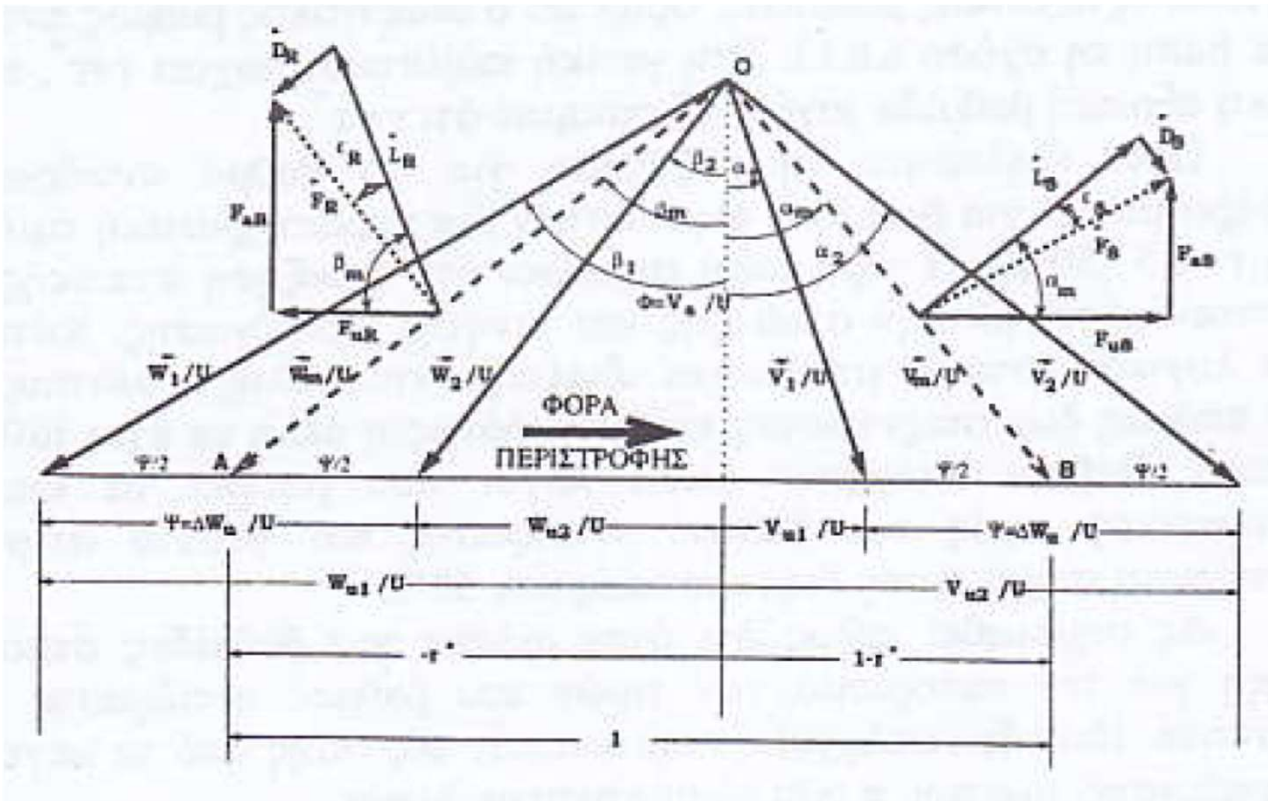
Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- Θεωρητικός Βαθμός Αντίδρασης:

$$r_{th} = 1 - \frac{V_{u1} + V_{u2}}{2U}$$



Αδιάστατα Τρίγωνα Ταχυτήτων



$$\Phi = \frac{V_a}{U}$$

$$\Psi = \frac{Vu_2 - Vu_1}{U}$$

$$r_{th} = 1 - \frac{Vu_1 + Vu_2}{2U}$$



Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- Επίλυση Τριγώνων Ταχυτήτων Αξονικού Συμπιεστή:

Αν $U = \text{σταθ.}$ και $V_a = \text{σταθ.}$ και επαναληπτική βαθμίδα \Rightarrow

$$\frac{V_{u1}}{U} = 1 - r - \frac{\Psi}{2} \quad , \quad \frac{V_{u2}}{U} = 1 - r + \frac{\Psi}{2} \quad ,$$
$$\frac{W_{u1}}{U} = -r - \frac{\Psi}{2} \quad , \quad \frac{W_{u2}}{U} = -r + \frac{\Psi}{2}$$



Παραπομπή στο Τυπολόγιο

$$\frac{V_1}{U} = \frac{V_3}{U} = \sqrt{\Phi^2 + \left(1 - r - \frac{\Psi}{2}\right)^2},$$

$$\frac{V_2}{U} = \sqrt{\Phi^2 + \left(1 - r + \frac{\Psi}{2}\right)^2},$$

$$\frac{W_1}{U} = \sqrt{\Phi^2 + \left(-r - \frac{\Psi}{2}\right)^2},$$

$$\frac{W_2}{U} = \sqrt{\Phi^2 + \left(-r + \frac{\Psi}{2}\right)^2}$$

$$\tan\alpha_1 = \tan\alpha_3 = \frac{1}{\Phi} \left(1 - r - \frac{\Psi}{2}\right),$$

$$\tan\alpha_2 = \frac{1}{\Phi} \left(1 - r + \frac{\Psi}{2}\right),$$

$$\tan\beta_1 = \frac{1}{\Phi} \left(-r - \frac{\Psi}{2}\right),$$

$$\tan\beta_2 = \frac{1}{\Phi} \left(-r + \frac{\Psi}{2}\right)$$



Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- Γωνίες Απόκλισης της Ροής:

$$\beta_1 - \beta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{-\Psi\Phi}{\Phi^2 + r^2 - \frac{\Psi^2}{4}} \right)$$

$$\alpha_2 - \alpha_3 = \tan^{-1} \left(\frac{\Psi\Phi}{\Phi^2 + (1-r)^2 - \frac{\Psi^2}{4}} \right)$$



Άσκηση 42

42. Για επαναληπτική βαθμίδα αξονικού συμπιεστή, με σταθερές τη γραμμική ταχύτητα περιστροφής και την αξονική ταχύτητα σε κάθε θέση του μονοδιάστατου υπολογισμού διαμέσου της, δείξτε ότι οι γωνίες απόκλισης της ροής στην κινητή (ϵ_R) και στην ακίνητη (ϵ_S) πτερύγωση δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις.

$$\epsilon_R = \tan^{-1} \left[\frac{-\Psi\Phi}{\Phi^2 + \Gamma^2 - \frac{\Psi^2}{4}} \right] \quad \epsilon_S = \tan^{-1} \left[\frac{\Phi\Psi}{\Phi^2 + (1-\Gamma)^2 - \frac{\Psi^2}{4}} \right]$$

Θα σας φανεί, ενδεχόμενα, χρήσιμη η τριγωνομετρική ταυτότητα

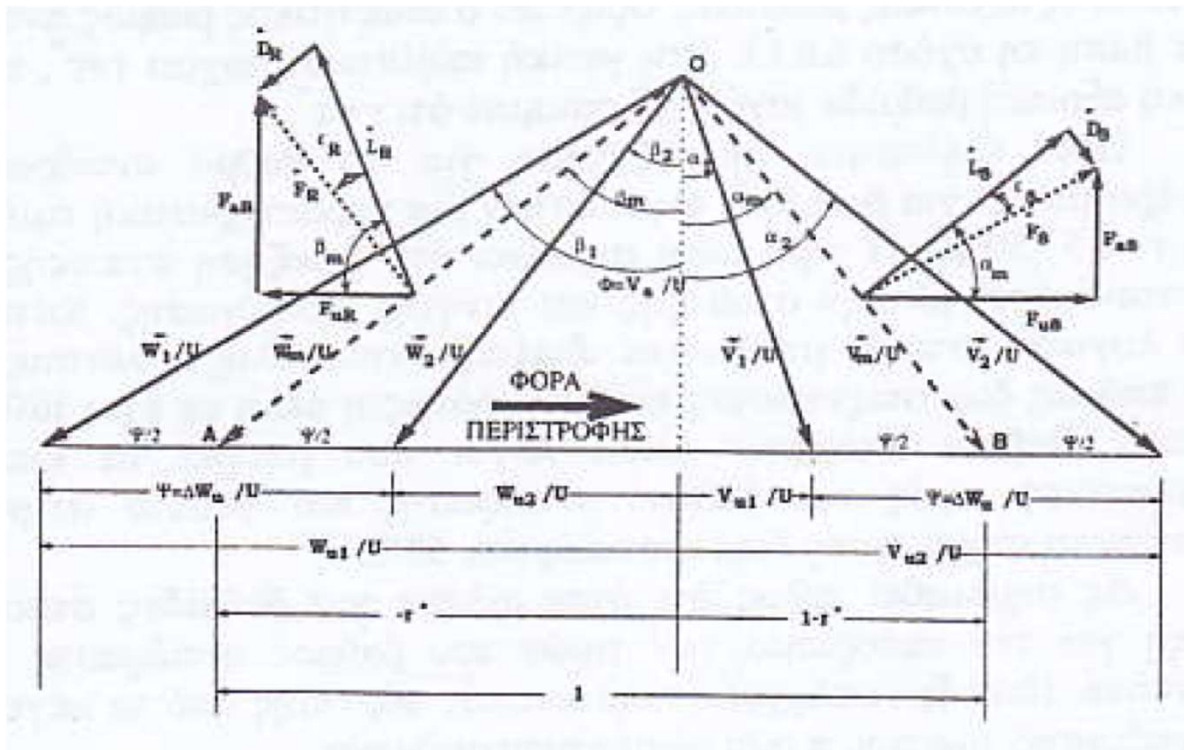
$$\tan(\alpha - \beta) = \frac{\tan \alpha - \tan \beta}{1 + \tan \alpha \cdot \tan \beta}$$

Hint: Είναι $\epsilon_R = \Delta\beta$ και $\epsilon_S = \Delta\alpha$



Διερεύνηση Τιμών του Βαθμού Αντίδρασης r

Στο πρότυπο τη εξωτερικής αεροδυναμικής



$$\tan \epsilon_R = \epsilon_R = \frac{D_R}{L_R}$$

$$\tan \epsilon_S = \epsilon_S = \frac{D_S}{L_S}$$



Διερεύνηση Τιμών του Βαθμού Αντίδρασης r

Αποδεικνύεται ότι:

$$\eta_{s-s,C} = \Phi \left[\frac{r^* - \Phi \varepsilon_R}{\Phi + \varepsilon_R r^*} + \frac{1 - r^* - \Phi \varepsilon_S}{\Phi + \varepsilon_S (1 - r^*)} \right]$$

Σε πιά τιμή του θεωρητικού r (r^*) έχουμε max. Βαθμό απόδοσης (όλα τα άλλα σταθερά);

$$r_{opt}^* = \frac{1 + \frac{\Phi}{\varepsilon_S} \left(1 - \sqrt{\frac{1 + \varepsilon_S^2}{1 + \varepsilon_R^2}} \right)}{1 + \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_S} \sqrt{\frac{1 + \varepsilon_S^2}{1 + \varepsilon_R^2}}}$$



Διερεύνηση Τιμών του Βαθμού Αντίδρασης r

Αν $\varepsilon_R = \varepsilon_S$ (σταθερή & κινητή πτερύγωση με την ίδια αεροδυναμική συμπεριφορά):

$$r_{opt}^* = \frac{1}{2}$$

Και ο βαθμός απόδοσης γίνεται:

$$\eta_{s-s,r^*=opt} = 2\Phi \frac{1-2\varepsilon\Phi}{\varepsilon+2\Phi}$$

Άρα για $r^*=1/2$, το μέγιστο γίνεται για $\Phi=?$ & έχει τιμή:

$$\Phi = \frac{1}{2}(\sqrt{1+\varepsilon^2}-\varepsilon)$$

$$\eta_{s-s,max} = 1+2\varepsilon^2-2\varepsilon\sqrt{1+\varepsilon^2}$$



Διερεύνηση Τιμών του Βαθμού Αντίδρασης r

Αν $\varepsilon_R = \varepsilon_S$ (σταθερή & κινητή πτερύγωση με την ίδια αεροδυναμική συμπεριφορά):

$$r_{opt}^* = \frac{1}{2}$$

Και ο βαθμός απόδοσης γίνεται:

$$\eta_{s-s,r^*=opt} = 2\Phi \frac{1-2\varepsilon\Phi}{\varepsilon+2\Phi}$$

Άρα για $r^*=1/2$, το μέγιστο γίνεται για $\Phi=?$ & έχει τιμή:

$$\Phi = \frac{1}{2}(\sqrt{1+\varepsilon^2}-\varepsilon)$$

$$\eta_{s-s,max} = 1+2\varepsilon^2-2\varepsilon\sqrt{1+\varepsilon^2}$$



Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- Βαθμός Απόδοσης Στατικές-προς-Στατικές Συνθήκες:

$$\eta_{s-s,C} = \Phi \left(\frac{r^* - \Phi \epsilon_R}{\Phi + \epsilon_R r^*} + \frac{1 - r^* - \Phi \epsilon_S}{\Phi + \epsilon_S (1 - r^*)} \right)$$

όπου ϵ_S και ϵ_R είναι ο λόγος έλκουσας προς άνωση (D/L) στη σταθερή και την κινητή πτερύγωση αντίστοιχα.

Μέγιστο $\eta_{s-s,C}$ για

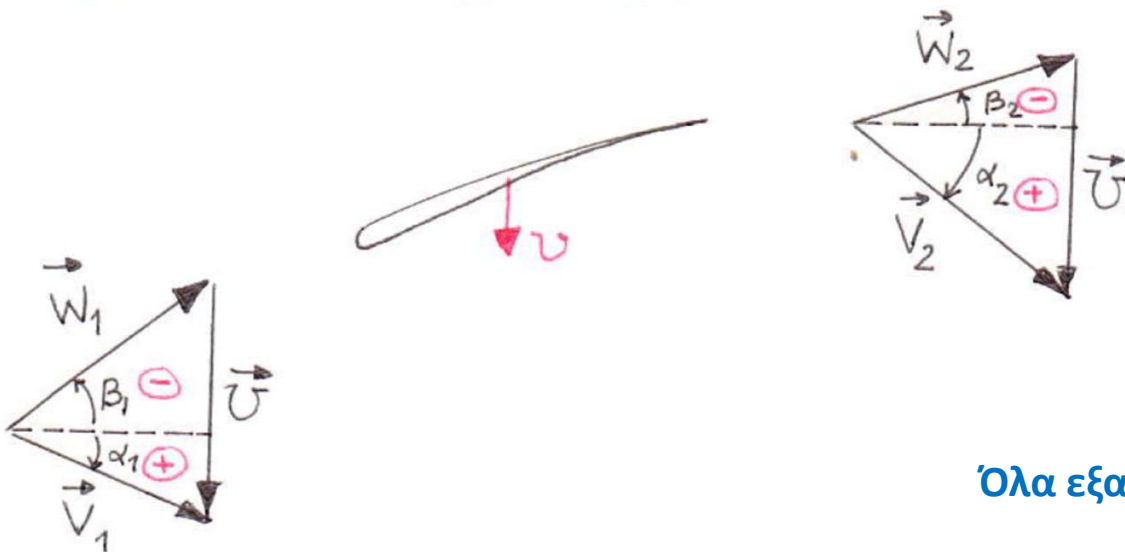
$$r_{opt}^* = \frac{1 + \frac{\Phi}{\epsilon_S} \left(1 - \sqrt{\frac{1+\epsilon_S^2}{1+\epsilon_R^2}} \right)}{1 + \frac{\epsilon_R}{\epsilon_S} \sqrt{\frac{1+\epsilon_S^2}{1+\epsilon_R^2}}}$$



Ποιοτική Ερμηνεία του Θεωρ. Βαθμού Αντίδρασης (r^*)

$$r^* = \frac{1}{2} - \left(\underbrace{\tan\beta_2}_{\ominus} + \underbrace{\tan\alpha_1}_{\oplus} \right) \frac{\Phi}{2}$$

**Παραδοχές: $V_a = \text{σταθ.}$ $U = \text{σταθ.}$
Επαναληπτική βαθμίδα**

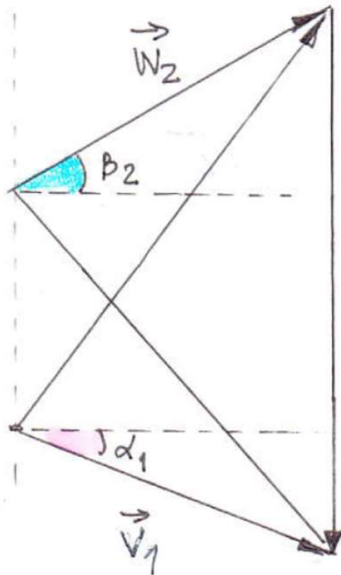


Όλα εξαρτώνται από το πρόσημο του όρου: $(\tan\beta_2 + \tan\alpha_1)$



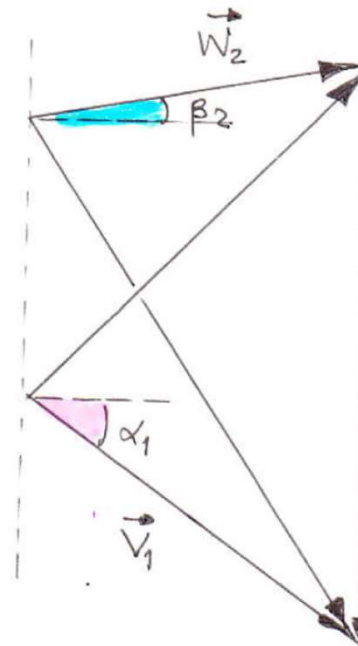
Ποιοτική Ερμηνεία του Θεωρ. Βαθμού Αντίδρασης (r^*)

High reaction ($r^* > 1/2$) με $\tan\beta_2 + \tan\alpha_1 < 0$



$$\Delta p_{\text{ROTOR}} > \Delta p_{\text{STATOR}}$$

Low reaction ($r^* < 1/2$) με $\tan\beta_2 + \tan\alpha_1 > 0$



$$\Delta p_{\text{ROTOR}} < \Delta p_{\text{STATOR}}$$



Βαθμίδα Αξονικού Συμπιεστή $r^*=1/2$

Η περίπτωση με τον μέγιστο βαθμό απόδοσης (υπό απλοποιητικές παραδοχές):

Είναι $\beta_2 = -\alpha_1$, αφού:

$$r = \frac{1}{2} - \frac{\Phi}{2}(\tan\alpha_1 + \tan\beta_2)$$

Ισοσκελή Τρίγωνα (ποια?)

$$\Psi = 1 + \Phi(\tan\beta_2 - \tan\alpha_1)$$

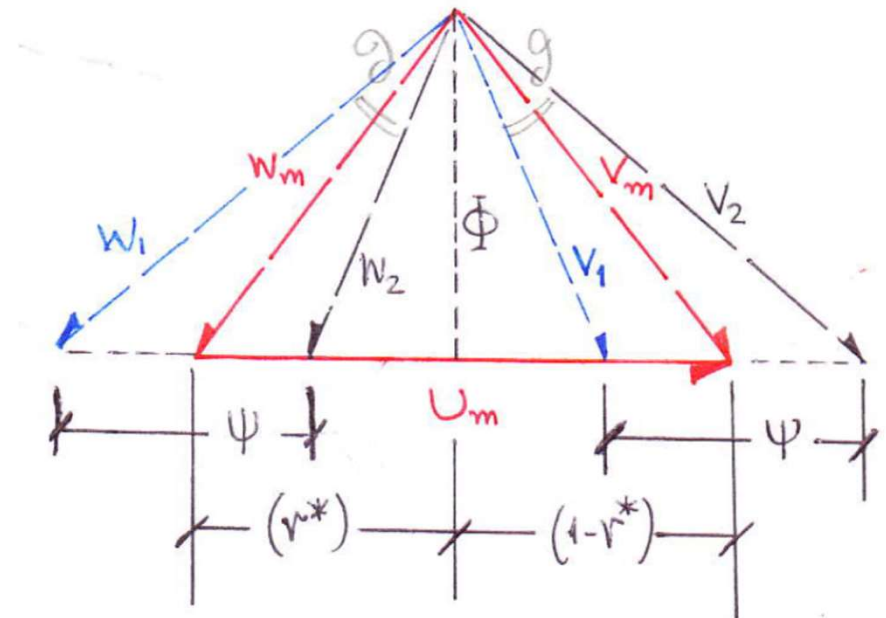
ή

$$\Psi = 1 - 2\Phi\tan\alpha_1$$

$$\Psi = 1 + 2\Phi\tan\beta_2$$

Με ίσες γωνίες απόκλισης της ροής:

$$\theta = \beta_1 - \beta_2 = \alpha_1 - \alpha_2$$



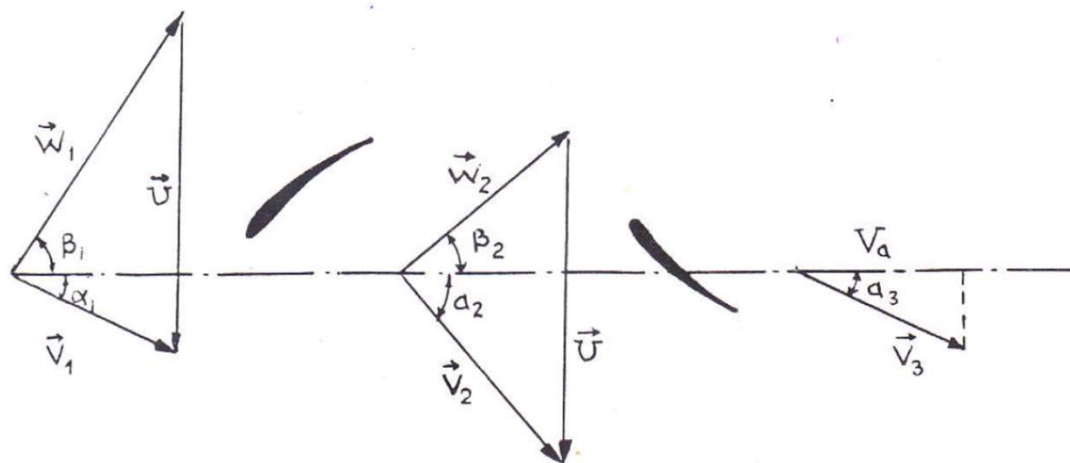


Άσκηση 10

Μια επαναληπτική βαθμίδα αξονικού συμπιεστή έχει τις ακόλουθες τιμές αδιάστατων παραμέτρων στο σημείο σχεδίασης: $\Gamma^* = 0.6$, $\Phi = 0.5$, $\Psi = 0.35$. Θεωρώντας ότι οι γωνίες εξόδου σχετικά με τις πτερυγώσεις παραμένουν αμετάβλητες για μικρές μεταβολές της παροχής, υπολογίστε τις νέες τιμές των Γ^* και Ψ για ελάττωση της παροχής κατά 10% σχετικά με την τιμή του σημείου σχεδίασης, με σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Να προσδιοριστούν οι γωνίες εισόδου και εξόδου της ροής στην κινητή και την ακίνητη πτερύγωση για το αρχικό σημείο λειτουργίας και να σχεδιαστεί πώς μεταβάλλονται τα τρίγωνα ταχυτήτων με την ελάττωση του Φ . Πώς μεταβάλλεται η σχετική φόρτιση των δύο πτερυγώσεων όταν ελαττώνεται το Φ ; Η βαθμίδα έχει σχεδιαστεί για σταθερή αξονική ταχύτητα διά μέσου της.

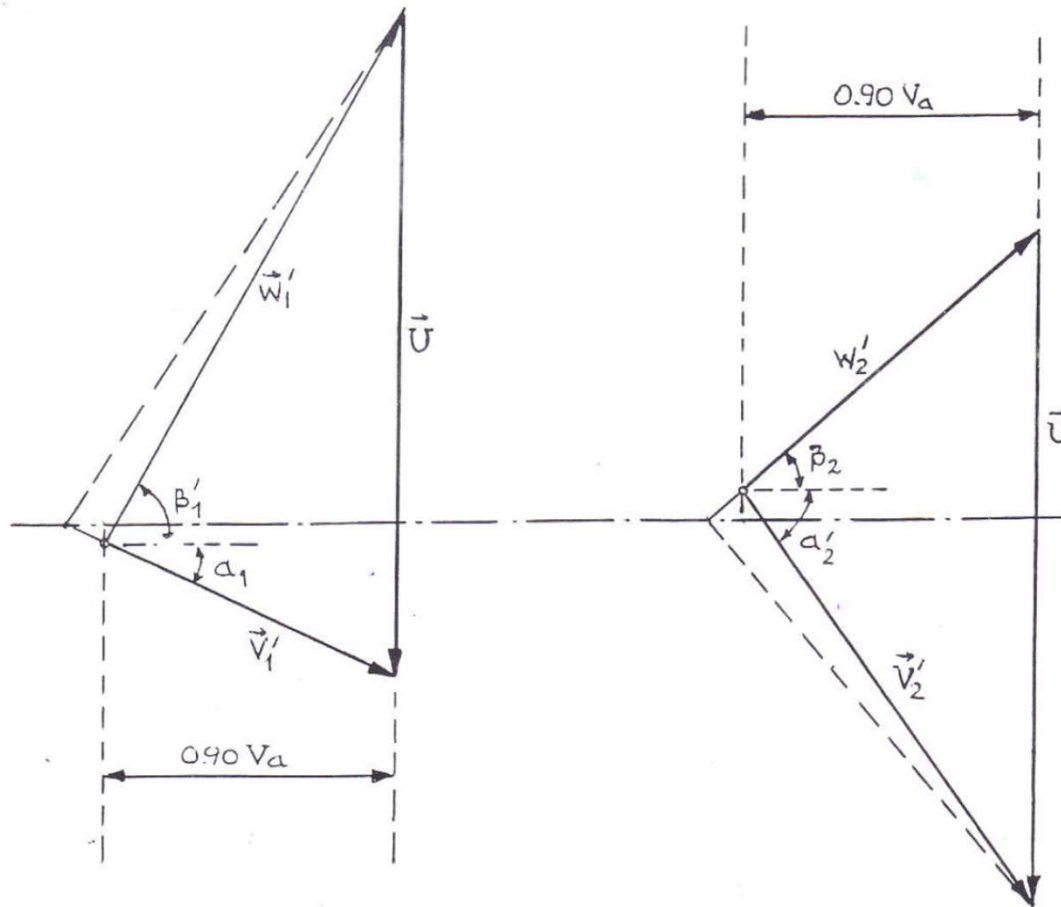


Άσκηση 10





Άσκηση 10





Άσκηση 17

17. Βαθμίδα αξονικού συμπιεστή, όπως αυτή του παρακάτω σχήματος, αναρροφά αέρα από το περιβάλλον, συνθηκών $p_{at}=1 \text{ bar}$, $T_{at}=288 \text{ K}$, και περιστρέφεται με ταχύτητα 9000 RPM. ζητείται:

(α) Να σχεδιασθεί το τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο των στρεφομένων πτερυγίων και να υπολογισθούν τα στοιχεία του. Πόση παροχή αέρα αναρροφά ο συμπιεστής;

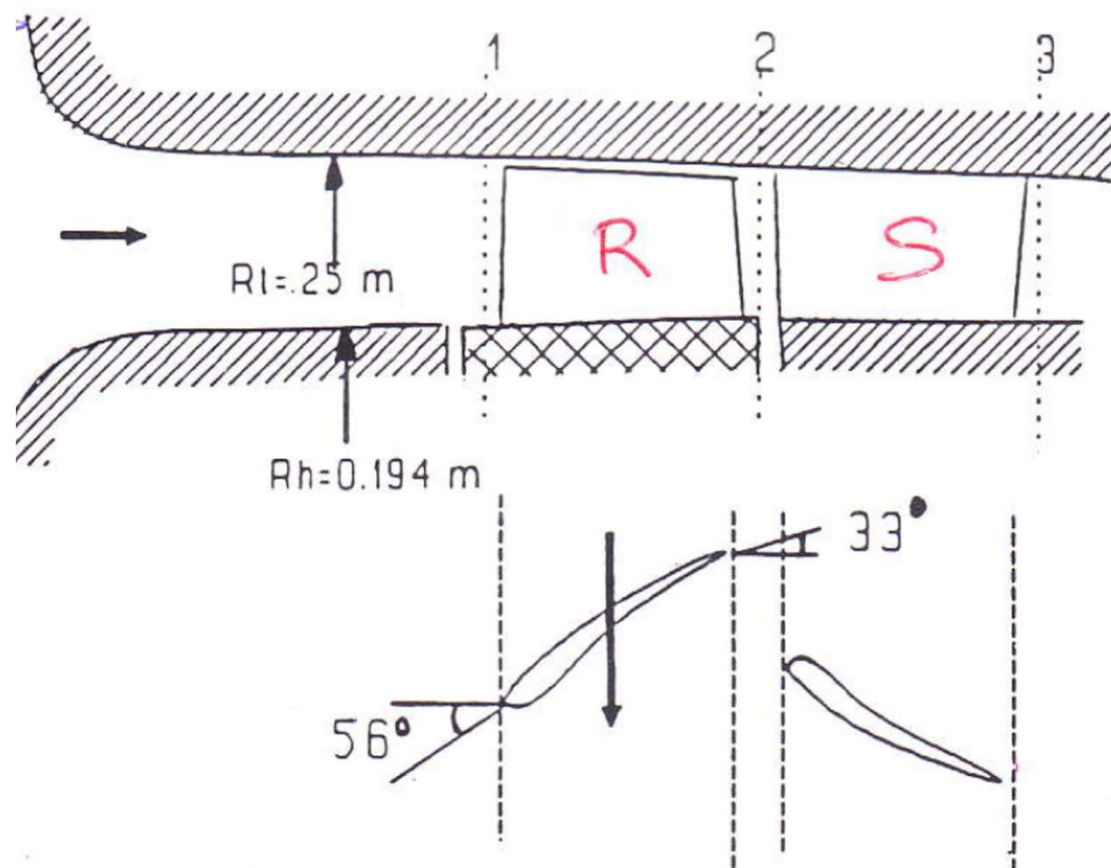
(β) Ποιά είναι η ολική πίεση στην έξοδο των στρεφομένων πτερυγίων;

(γ) Ποιός είναι ο βαθμός απόδοσης ολικών-προς-ολικές συνθήκες της κινητής πτερύγωσης;

Για τους υπολογισμούς γίνεται η παραδοχή ότι η ροή ακολουθεί τις γεωμετρικές γωνίες των πτερυγίων. Η μεταβολή πυκνότητας από την είσοδο στην έξοδο των κινητών πτερυγίων θεωρείται μικρή ενώ η αξονική ταχύτητα παραμένει σταθερή κατά μήκος της βαθμίδας. Ο συντελεστής απωλειών των κινητών πτερυγίων είναι $\bar{\omega}_1=0,04$. Ο αέρας θεωρείται τέλειο αέριο με $C_p=1004,5 \text{ J/kgK}$, $R=287 \text{ J/kgK}$, και οι απώλειες στον αγωγό εισόδου είναι αμελητέες. Οι υπολογισμοί γίνονται στη μέση αριθμητική ακτίνα, που παραμένει σταθερή κατά μήκος της βαθμίδας.



Άσκηση 17





Άσκηση 29

29. Μελετάμε μονοδιάστατα μια βαθμίδα αξονικού συμπιεστή, στη σταθερή μέση ακτίνα της $R=0,24$ m. Η βαθμίδα αναρροφά αέρα από το περιβάλλον (300 K, 1 bar) μέσω αγωγού που δε δίνει συστροφή στο ρευστό ενώ προκαλεί 2% απώλειες ολικής πίεσης. Η ροή εισέρχεται στην κινητή πτερύγωση με τη γωνία μετάλλου των πτερυγίων της που έχει μέγεθος 47° . Η κινητή πτερύγωση, όταν περιστρέφεται με 8700 RPM στρέφει τη ροή κατά 30° . Θεωρούμε ότι ο αέρας είναι τέλει αέριο και ότι η αξονική συνιστώσα της ταχύτητας είναι σταθερή σε όλη τη βαθμίδα. Αν ο βαθμός απόδοσης ολικών προς ολικές συνθήκες της κινητής πτερύγωσης είναι 0,90:

- (α) Υπολογίστε τα στοιχεία των τριγώνων ταχυτήτων εκατέρωθεν της κινητής πτερύγωσης. Σχεδιάστε τα μαζί με μια προσεγγιστική μορφή του πτερυγίου (χωρίς πάχος).
- (β) Υπολογίστε όσα θερμοδυναμικά μεγέθη (ολικά, στατικά) στην έξοδο της κινητής πτερύγωσης είναι δυνατό.



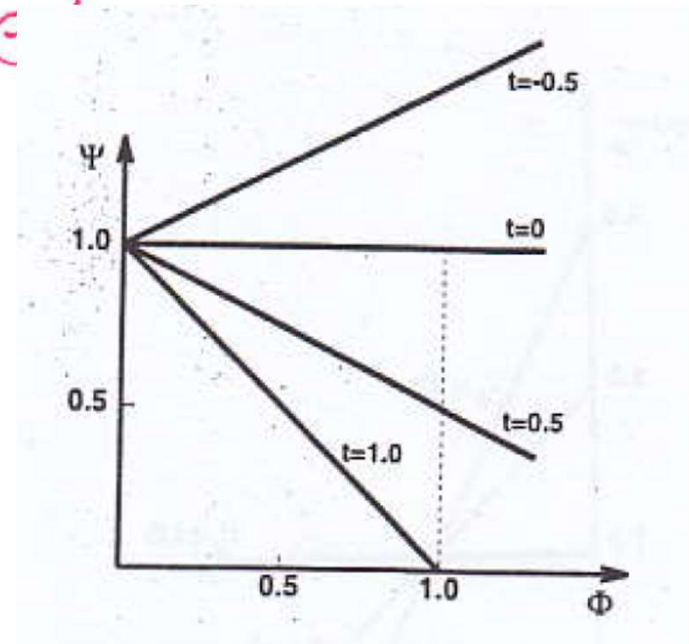
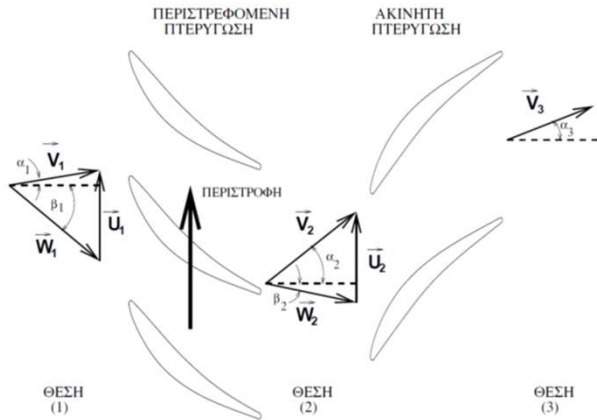
Θεωρητική Αδιάστατη Χαρακτηριστική Βαθμίδας Αξονικού Συμπιεστή

$$\Psi = 1 + \Phi (\tan \beta_2 - \tan \alpha_1)$$

L_2 L_1

Λογικές παραδοχές: $\alpha_1 = \beta_1 = \text{σταθερές}$
 $t = \tan \alpha_1 - \tan \beta_2$

$\Psi = 1 - \Phi t$, με $t > 0$



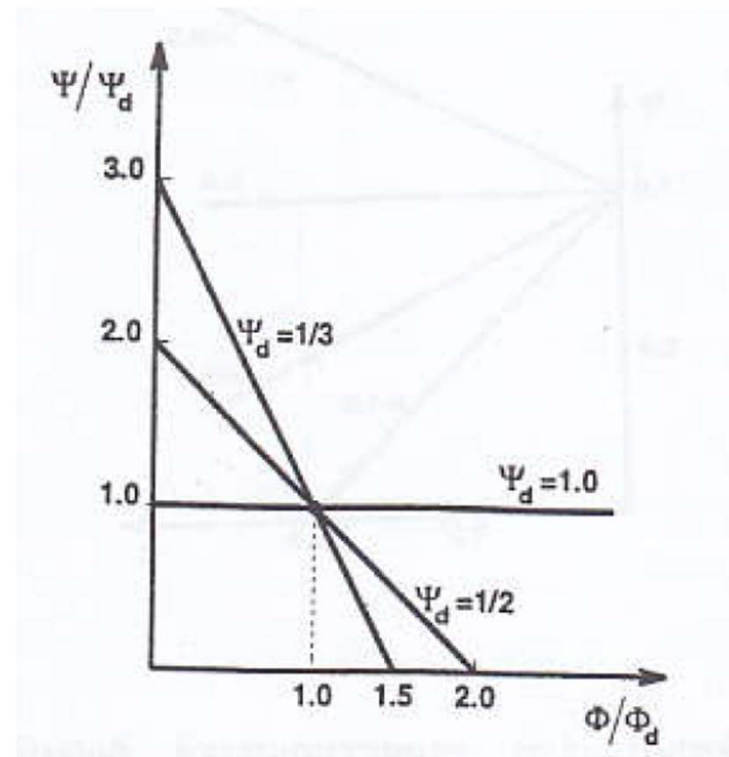


Θεωρητική Αδιάστατη Χαρακτηριστική Βαθμίδας Αξονικού Συμπιεστή

Σε σχέση με το σημείο σχεδιασμού (δείκτης d):

$$\left. \begin{aligned} t &= \frac{1-\Psi}{\Phi} \\ t &= \frac{1-\Psi_d}{\Phi_d} \end{aligned} \right\} \Psi = 1 + \Phi \frac{\Psi_d - 1}{\Phi_d}$$

$$\frac{\Psi}{\Psi_d} = \frac{1}{\Psi_d} + \frac{\Phi}{\Phi_d} \left(1 - \frac{1}{\Psi_d} \right)$$





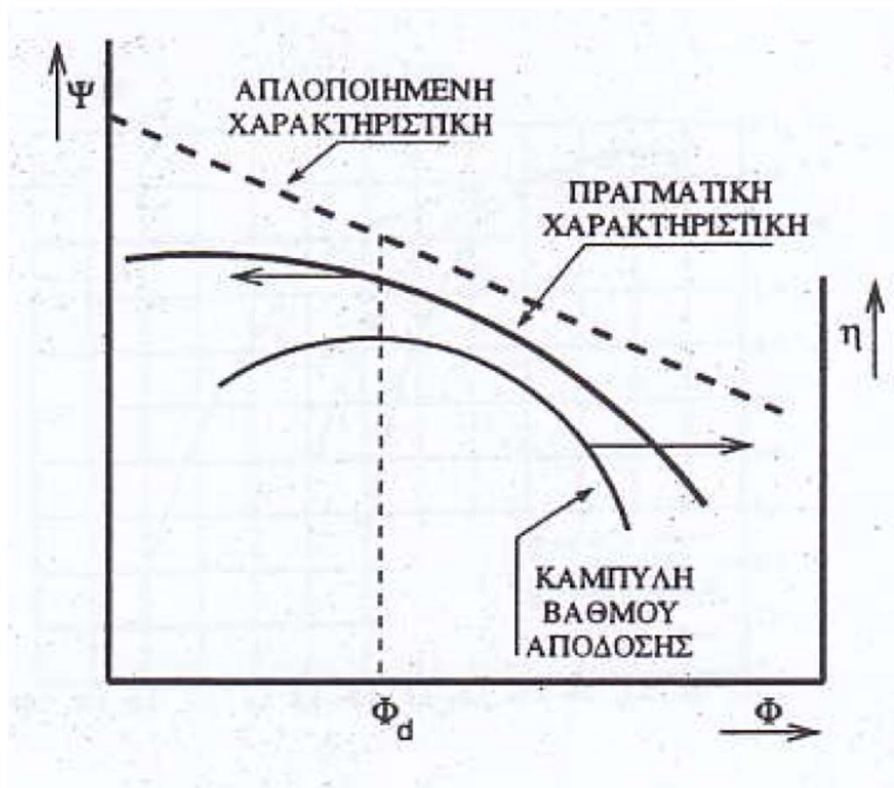
Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- Θεωρητική Αδιάστατη Χαρακτηριστική Αξονικού Συμπιεστή:

Αν (d) συμβολίζει λειτουργία στο σημείο σχεδιασμού, ισχύει $\frac{\Psi}{\Psi_d} = \frac{1}{\Psi_d} + \frac{\Phi}{\Phi_d} \left(1 - \frac{1}{\Psi_d}\right)$, αν και μόνο αν $\tan\alpha_1 - \tan\beta_2 = \text{σταθερό}$ για 'λογικές' αλλαγές του σημείου λειτουργίας.



Πραγματική Αδιάστατη Χαρακτηριστική Βαθμίδας Αξονικού Συμπιεστή



Οι αδιάστατες χαρακτηριστικές είναι ανεξάρτητες:

- του αριθμού Mach
 - της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής (των στροφών)
 - του αριθμού Reynolds
- Μοναδικότητα των καμπυλών αυτών για έναν συμπιεστή



Πραγματική Αδιάστατη Χαρακτηριστική Βαθμίδα Αξονικού Συμπιεστή

$$\frac{P_{t2}}{P_{t1}} = \frac{P_{t1} + \Delta P_t}{P_{t1}} = 1 + \frac{\Delta P_t}{P_{t1}} = \left\{ 1 + \frac{\eta_{t-t} \Delta T_t}{T_{t1}} \right\}^{\gamma-1}$$

Επειδή $\eta_{t-t} \Delta T_t \ll T_{t1}$ και $(1+x)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \approx 1 + \frac{\gamma}{\gamma-1} x$ (Taylor) προκύπτει

$$1 + \frac{\Delta P_t}{P_{t1}} = 1 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{\eta_{t-t} \Delta T_t}{T_{t1}} \Rightarrow \frac{\Delta P_t}{P_{t1}} = \frac{c_p}{R} \frac{\eta_{t-t} \Delta T_t}{T_{t1}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta P_t}{\rho_{t1}} = \eta_{t-t} \Delta h_t \Rightarrow \frac{\Delta P_t}{\rho_{t1} U^2} = \eta_{t-t} \psi$$

σε πολλά βιβλία:
pressure coefficient.



Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Αξονικού Συμπιεστή

Αδιάστατες Παράμετροι Λειτουργίας:

$$\Phi_1 = \frac{\dot{Q}_1}{A_1 U_1} = \frac{\dot{m}}{\rho_1 A_1 U_1} \quad \Psi_{is_1} = \frac{\Delta h_{tis}}{U_1^2}$$

Συνήθης/Χρηστική προσεγγιστική έκφραση του Φ_1 :

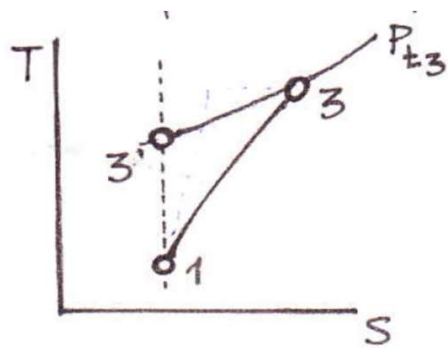
$$\Phi_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_{t1} A_1 U_1} \quad \rho_{t1} = \frac{P_{t1}}{R T_{t1}}$$

$$\frac{\dot{m} \sqrt{\gamma R T_{t1}}}{P_{t1}} = \gamma \Phi_1 A_1 \frac{U_1}{\sqrt{\gamma R_3 T_{t1}}} \quad (1)$$



Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Αξονικού Συμπιεστή

Για την Ισεντροπική Φόρτιση:



$$\left. \begin{aligned} \Delta h_{tis} &= h_{t3'} - h_{t1} \\ h_{t3'} &= h_{t1} \left(\frac{P_{t3}}{P_{t1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta h_{tis} = \frac{\alpha_{t1}^2}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_{t3}}{P_{t1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

αφού $\alpha_{t1} = \sqrt{\gamma R T_{t1}}$

$$\frac{P_{t3}}{P_{t1}} = \left[1 + \psi_{is1} \frac{U_1^2 (\gamma-1)}{\alpha_{t1}^2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2)$$



Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Αξονικού Συμπιεστή

Σύνοψη / Φυσική Σημασία των (1) & (2):

$$\left\{ \frac{\dot{m} \sqrt{T_{t1}}}{P_{t1}} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{σταθέρης} \\ \text{αερίου} \end{array} \right\} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \text{στοιχεία} \\ \text{γεωμετρίας} \end{array} \right\} \cdot \left\{ \frac{N}{\sqrt{T_{t1}}} \right\} \cdot \phi_1$$

$$\pi_c = \pi_c \left(\left\{ \begin{array}{l} \text{σταθέρης} \\ \text{αερίου} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} \text{στοιχεία} \\ \text{γεωμετρίας} \end{array} \right\}, \left\{ \frac{N}{\sqrt{T_{t1}}} \right\}, \psi_{is_1}(\phi_1) \right)$$

αφού:

$$\frac{\omega_1}{\sqrt{\gamma R T_{t1}}} = \frac{\frac{2\pi N}{60} R}{\sqrt{\gamma R T_{t1}}} = (\text{σταθ}, R) \cdot \frac{N}{\sqrt{T_{t1}}}$$



Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Αξονικού Συμπιεστή

Εφαρμογή των Συσχετίσεων για δεδομένο συμπιεστή, δεδομένο εργαζόμενο μέσο:

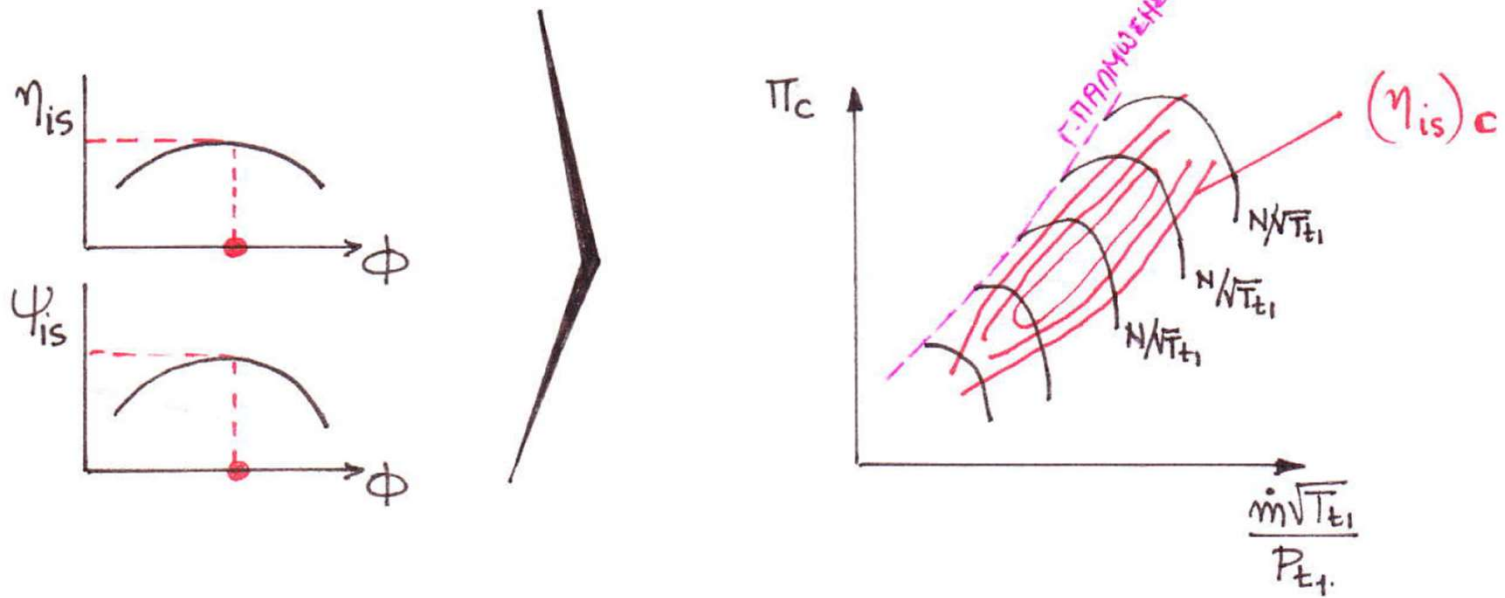
$$\left\{ \frac{\dot{m}\sqrt{T_{t1}}}{P_{t1}} \right\} = F_1 \left\{ \frac{N}{\sqrt{T_{t1}}}, \Phi \right\}$$

$$\left\{ \pi_c \right\} = F_2 \left\{ \frac{N}{\sqrt{T_{t1}}}, \psi_{is}(\Phi) \right\}$$

Για κάθε τιμή των ανηγμένων στροφών $\frac{N}{\sqrt{T_{t1}}}$, η γνώση των τιμών του Φ και του ψ_{is} αρκεί για να υπολογιστεί η ανηγμένη παροχή $\frac{\dot{m}\sqrt{T_{t1}}}{P_{t1}}$ και ο λόγος πίεσης π_c του μονοβάθμιου συμπιεστή.

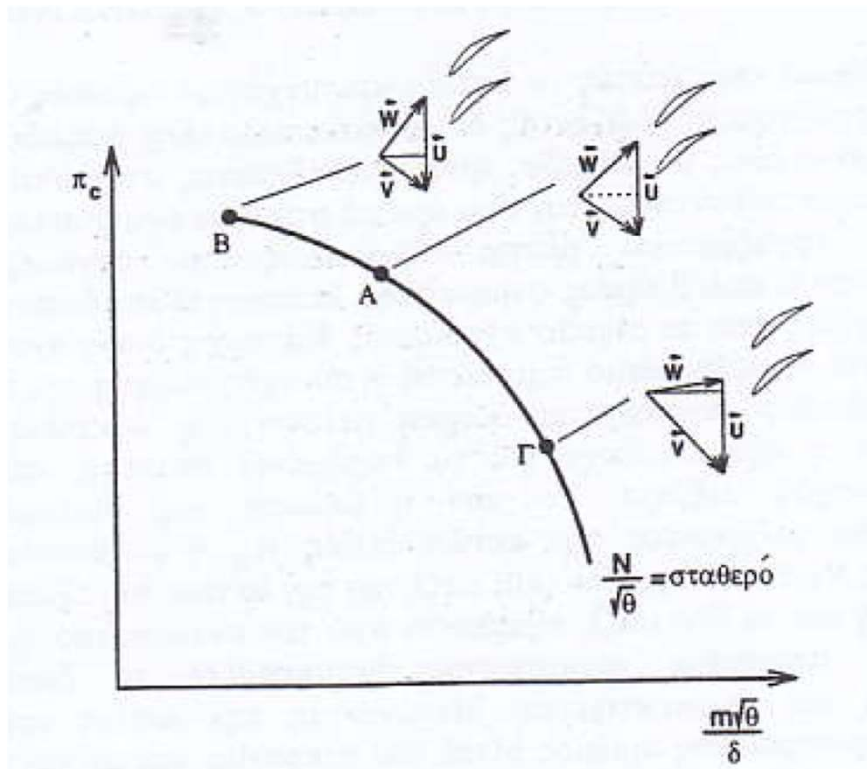


Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Αξονικού Συμπιεστή





Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Αξονικού Συμπιεστή



$$\sqrt{\theta} = \frac{\sqrt{\gamma R T_{t1}}}{340.2 \text{ m/s}}$$

$$\delta = \frac{P_{t1}}{1.0332 \times 10^5 \text{ Pa}}$$

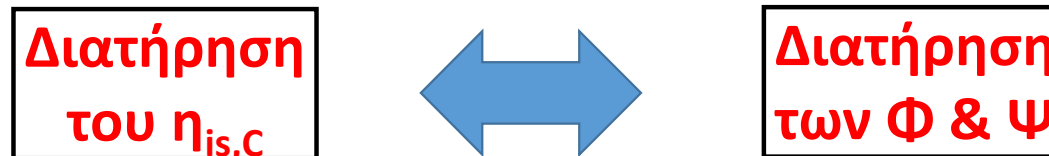


Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Αξονικού Συμπιεστή

Ελεύθεροι Παράμετροι Λειτουργίας:

- Η γεωμετρία σε κλίμακα / γεωμετρική ομοιότητα
- Οι στροφές
- Οι (ολικές) συνθήκες εισόδου (p_{t1}, T_{t1})
- Το εργαζόμενο μέσο.

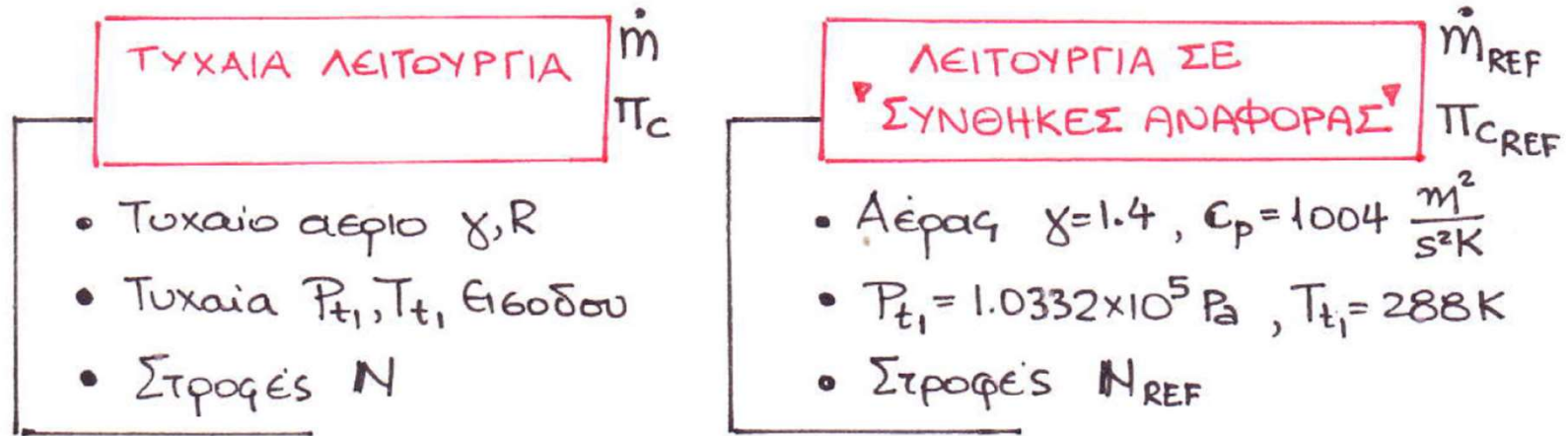
Τρόπος αντιστοίχισης, σε οποιαδήποτε αλλαγή:



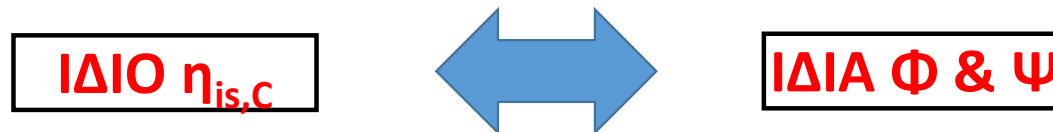
π_c



Λειτουργία σε ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΣΗΜΕΙΑ (ίδια μηχανή)



Αντίστοιχα Σημεία Λειτουργίας





Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Αξονικού Συμπιεστή

Ίδιο Φ (ή Φ_1) / σχ. (1):

$$\frac{\dot{m} \sqrt{\gamma R T_{t1}}}{P_{t1}} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \frac{1}{A_1} \cdot \frac{\sqrt{\gamma R T_{t1}}}{\frac{2\pi}{60} N R_1} = \frac{\dot{m}_{REF} \cdot 340.2}{1.0332 \times 10^5} \cdot \frac{1}{1.4} \cdot \frac{1}{A_1} \cdot \frac{340.2}{\frac{2\pi}{60} N_{REF} R_1}$$

Ορίζονται:

$$\sqrt{\theta} = \frac{\sqrt{\gamma R T_{t1}}}{340.2 \text{ m/s}} \quad \delta = \frac{P_{t1}}{1.0332 \times 10^5 \text{ Pa}}$$

Και προκύπτει:

$$\frac{\dot{m} \sqrt{\theta}}{\delta} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\sqrt{\theta}}{N} = \dot{m}_{REF} \cdot \frac{1}{1.4} \cdot \frac{1}{N_{REF}} \quad (10)$$



Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Αξονικού Συμπιεστή

Ίδιο Ψ_{is} / σχ. (2):

$$\begin{aligned} \text{Ίδιο } \left\{ \frac{U_1^2 (\gamma-1)}{\gamma R T_{t_1}} \right\}^{-1} (\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1) &\Rightarrow \\ \Rightarrow \left\{ \left(\frac{2\pi}{60} \right)^2 \frac{N^2 R_1^2 (\gamma-1)}{\gamma R T_{t_1}} \right\}^{-1} (\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1) &= \left\{ \left(\frac{2\pi}{60} \right)^2 \frac{N_{REF}^2 R_1^2 (1.4-1)}{(340.2)^2} \right\}^{-1} (\pi_{c,REF}^{\frac{1}{3.5}} - 1) \end{aligned}$$

Και προκύπτει:

$$\left\{ \left(\frac{N}{\sqrt{\theta}} \right)^2 (\gamma-1) \right\}^{-1} (\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1) = \left\{ N_{REF}^2 (1.4-1) \right\}^{-1} (\pi_{c,REF}^{\frac{1}{3.5}} - 1) \quad (20)$$



Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Αξονικού Συμπιεστή

Απειρία επιλογής στροφών N_{REF} για τον ίδιο η_{is} :

$$\frac{\dot{m}\sqrt{\theta}}{\delta} \cdot \frac{1}{\gamma} \frac{\sqrt{\theta}}{N} = \dot{m}_{REF} \cdot \frac{1}{1.4} \frac{1}{N_{REF}} \quad (10)$$

$$\left\{ \left(\frac{N}{\sqrt{\theta}} \right)^2 (\gamma-1) \right\}^{-1} \left(\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) = \left\{ N_{REF}^2 (1.4-1) \right\}^{-1} \left(\pi_{c,REF}^{\frac{1}{3.5}} - 1 \right) \quad (20)$$



Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Αξονικού Συμπιεστή

Περιορισμός της απειρίας – Κριτήριο ο ίδιος περιφερειακός αρ. Mach (M_u)

$$\text{ΚΟΙΝΟ } \frac{U}{\sqrt{\delta R T_{t_1}}} \Rightarrow \text{ΚΟΙΝΟ } \frac{N}{\sqrt{\delta R T_{t_1}}} \Rightarrow \boxed{N_{REF} = \frac{N}{\sqrt{\theta}}} \quad (300)$$

Αν ισχύει η (300), τότε:

$$\dot{m}_{REF} = \frac{\dot{m} \sqrt{\theta}}{\delta} \cdot \frac{1.4}{\delta} \quad (100)$$

$$\pi_{C_{REF}} = \left\{ 1 + \frac{0.4}{\delta-1} \left(\pi_c^{\frac{\delta-1}{\delta}} - 1 \right) \right\}^{3.5} \quad (200)$$



Χαρακτηριστικές Καμπύλες Λειτουργίας Αξονικού Συμπιεστή

Αν **ΑΕΡΑΣ** (τέλειο αέριο) και στην «τυχαία» λειτουργία ισχύουν οι:

$$\dot{m}_{REF} = \frac{\dot{m} \sqrt{\theta}}{\delta}$$

(1000)

$$\pi_{C_{REF}} = \pi_c$$

(2000)



Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- Λειτουργία σε 'Συνθήκες Αναφοράς': Εργαζόμενο μέσο ο αέρας, τέλειο αέριο, $\gamma = 1,4$, $C_p = 1004,6 \text{ m}^2/\text{s}^2 \text{ K}$
 $R = 287,03 \text{ m}^2/\text{s}^2 \text{ K}$, $p_{t1} = 1,0332 \times 10^5 \text{ Pa}$,
 $T_{t1} = 288 \text{ K}$, $\sqrt{\gamma R T_{t1}} = 340 \text{ m/s}$.



Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- Βασικές Σχέσεις:

$$\dot{m} \frac{\sqrt{\gamma RT_{t1}}}{p_{t1}} = \gamma \Phi_1 A_1 \frac{U_1}{\sqrt{\gamma RT_{t1}}}$$

(πρόκειται για προσεγγιστική σχέση που χρησιμοποιεί ότι $\rho_1 = \rho_{t1}$).

$$\frac{p_{t3}}{p_{t1}} = \left(1 + \Psi_{is,1} \frac{(\gamma - 1) U_1^2}{a_{t1}^2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

όπου $a_{t1} = \sqrt{\gamma RT_{t1}}$, $\Psi_{is,1} = \frac{\Delta h_{t,is}}{U_1^2}$.

Ορισμοί: $\sqrt{\vartheta} = \frac{\sqrt{\gamma RT_{t1}}}{340 \text{ m/s}}$, $\delta = \frac{p_{t1}}{1,0332 \times 10^5 \text{ Pa}}$.



Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- Λειτουργία σε Τυχαίο Σημείο και στις Συνθήκες Αναφοράς με ίδιο Ισεντροπικό Βαθμό Απόδοσης:

Προϋποθέτει διατήρηση του Φ , δηλαδή

$$\frac{\dot{m}\sqrt{\vartheta}}{\delta} \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\sqrt{\vartheta}}{N} = \dot{m}_{ref} \cdot \frac{1}{1,4} \cdot \frac{1}{N_{ref}}$$

και διατήρηση του Ψ , δηλαδή

$$\left(\left(\frac{N}{\sqrt{\vartheta}} \right)^2 (\gamma - 1) \right)^{-1} (\pi_C^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1) =$$

$$(N_{ref}^2 (1,4 - 1))^{-1} (\pi_{C,ref}^{\frac{1}{3,5}} - 1)$$



Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- Αντίστοιχα Σημεία Λειτουργίας:
Ισχύει $N_{ref} = N/\sqrt{\vartheta}$ και

$$\dot{m}_{ref} = \frac{\dot{m}\sqrt{\vartheta}}{\delta} \cdot \frac{1,4}{\gamma}$$

και

$$\pi_{C,ref} = \left(1 + \frac{0,4}{\gamma - 1} (\pi_C^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1) \right)^{3,5}$$



Άσκηση 48

Αγοράζουμε ένα μονοβάθμιο αξονικό συμπιεστή για τη συμπίεση του αερίου NH_3 (τέλειο αέριο, $R=490 \text{ J/kg/K}$, $C_p=2175 \text{ J/kg/K}$) σε μια βιομηχανική εγκατάσταση. Σκοπός μας, προφανώς, είναι να λειτουργήσει με το μέγιστο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης. Γνωρίζουμε ότι μια δοκιμή του σε συνθήκες αναφοράς έδωσε μέγιστη απόδοση για λόγο πίεσης 1,65 και 8000 RPM.

Στην εγκατάστασή μας, ο συμπιεστής θα συμπιέσει το αέριο NH_3 που βρίσκεται σε πίεση 1 bar και θερμοκρασία 373 K, διακινώντας 2 kg/sec, με 13000 RPM.

- (α) Σε τι πίεση θα παίρνουμε το αέριο NH_3 στην έξοδο του συμπιεστή;
- (β) Ποιός ο λόγος πίεσης της βαθμίδας και η παροχή εργαζόμενου μέσου στο αντίστοιχο σημείο της συμπίεσης του αερίου NH_3 , όταν λειτουργεί σε συνθήκες αναφοράς (αέρας);
- (γ) Περιγράψτε τη διαδικασία που θα ακολουθούσατε (αιτιολογία, ποιές ακριβώς σχέσεις θα χρησιμοποιούσατε, με ποιές γνωστές ποσότητες και για ποιούς αγνώστους θα λύνατε) για να βρείτε, σε ένα διάγραμμα λόγου πίεσης-παροχής μάζας, Κ σημεία πάνω στη χαρακτηριστική λειτουργίας μέγιστης απόδοσης, για λειτουργία σε συνθήκες αναφοράς (αέρας).



Άσκηση 48

Λειτουργία στο A

Λειτουργία στο B

2810 ϕ_1 :

$$\frac{\dot{m}\sqrt{\theta}}{\delta} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\sqrt{\theta}}{N} = \dot{m}_{REF} \cdot \frac{1}{1,4} \cdot \frac{1}{N_{REF}}$$

2810 ψ_{is} :

$$\left\{ \left(\frac{N}{\sqrt{\theta}} \right)^2 (\delta-1) \right\}^{-1} \left(\pi_c \frac{\delta-1}{\delta} - 1 \right) = \left\{ N_{REF}^2 (1,4-1) \right\}^{-1} \left(\pi_{c_{REF}} \frac{1}{3,5} - 1 \right)$$



Άσκηση 48

$$\underline{\underline{2\delta L_0 \phi_1 :}}$$

$$\frac{\dot{m}\sqrt{\theta}}{\delta} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\sqrt{\theta}}{N} = \dot{m}_{REF} \cdot \frac{1}{1,4} \cdot \frac{1}{N_{REF}}$$



Άσκηση 48

ιδιο ψ_{is} :

$$\left\{ \left(\frac{N}{\sqrt{\theta}} \right)^2 (\delta-1) \right\}^{-1} \left(\text{JT}_c^{\frac{\delta-1}{\delta}} - 1 \right) = \left\{ N_{\text{REF}}^2 (1,4-1) \right\}^{-1} \left(\text{JT}_{\text{C REF}}^{\frac{1}{3,5}} - 1 \right)$$



Άσκηση 25

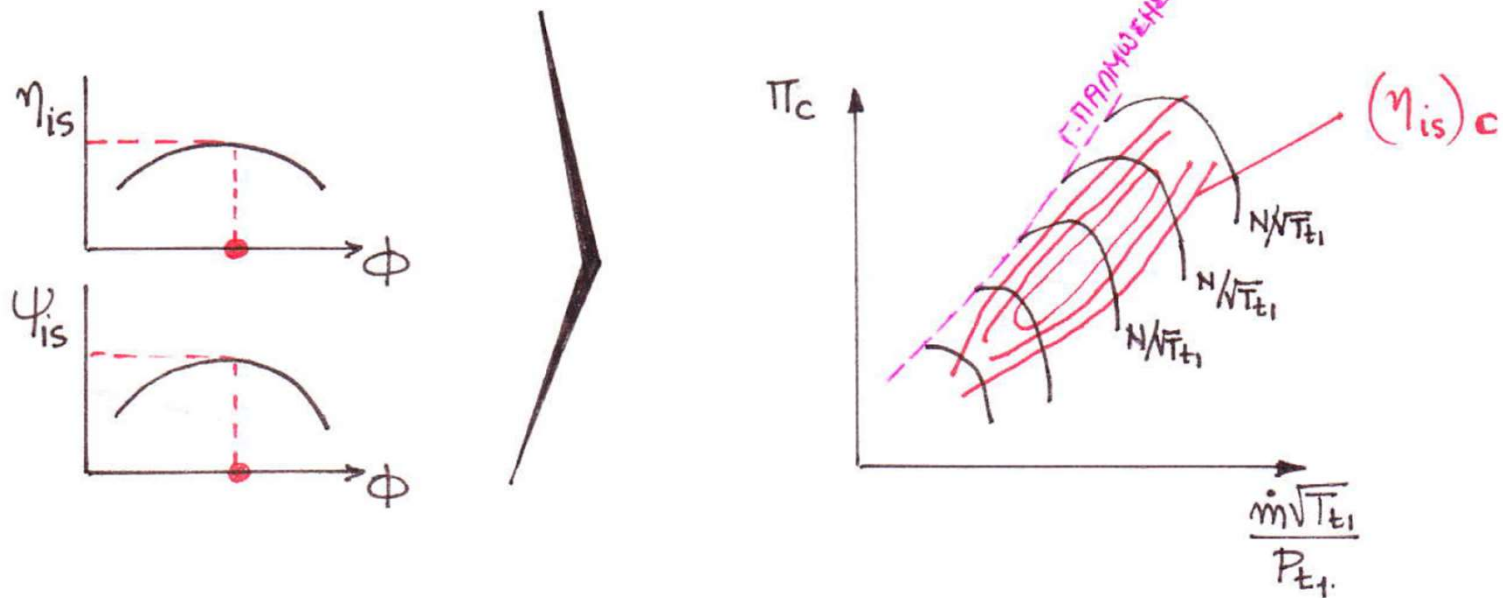
Αξονικός συμπιεστής σχεδιάστηκε για να λειτουργεί σε συνθήκες αναφοράς, στις 4.000 RPM. Για λόγους οικονομίας όμως, δοκιμάζεται στο εργαστήριο με μειωμένη πίεση στην είσοδό του, γεγονός που επιτυγχάνεται με στραγγαλιστική βαλβίδα στον αγωγό εισόδου του. Κατά τη δοκιμή, η θερμοκρασία του αέρα στο εργαστήριο είναι σταθερή και ίση με 20°C.

- (α) Σε ποιές στροφές πρέπει να γίνει η δοκιμή ώστε αυτή να αποτελεί αντίστοιχο σημείο του σημείου σχεδίασης;
- (β) Αν η πίεση εισόδου στη δοκιμή είναι 60 kPa, με παροχή αέρα 30 kg/s, ποιά είναι η παροχή μάζας στο αντίστοιχο σημείο λειτουργίας στις συνθήκες αναφοράς;
- (γ) Βρείτε το λόγο της ισχύος του συμπιεστή κατά τη δοκιμή προς την ισχύ του κατά τη λειτουργία στο αντίστοιχο σημείο σε συνθήκες αναφοράς, δηλαδή την οικονομία σε ισχύ.
- (δ) Επαναλάβετε το προηγούμενο ερώτημα για τη ροπή του συμπιεστή αντι της ισχύος.



Φαινόμενα Ασταθούς Λειτουργίας Συμπιεστών

Περιστροφική Αποκόλληση (Rotating Stall) Πάλμωση (Surge)

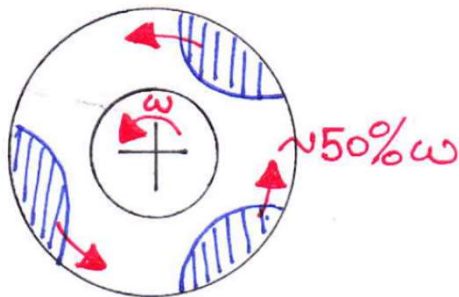




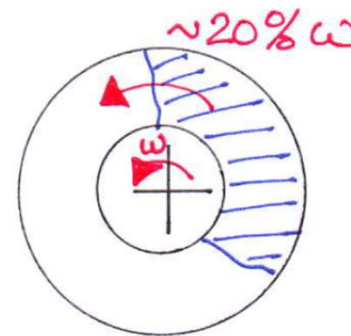
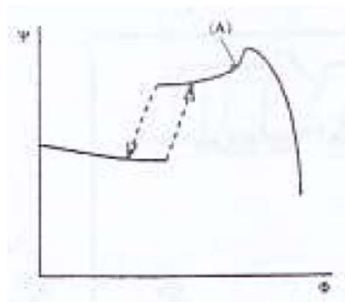
Φαινόμενα Ασταθούς Λειτουργίας Συμπιεστών

Περιστροφική Αποκόλληση (Rotating Stall)

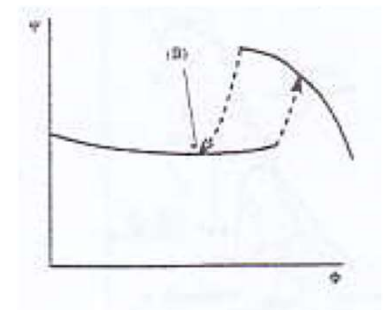
Εμφάνιση κυψελών αποκολλημένης ροής που περιστρέφονται στη φορά περιστροφής του άξονα, αλλά με μικρότερη (20% ως 50%) ταχύτητα



Κυψέλες αποκόλλησης μερικού ύψους



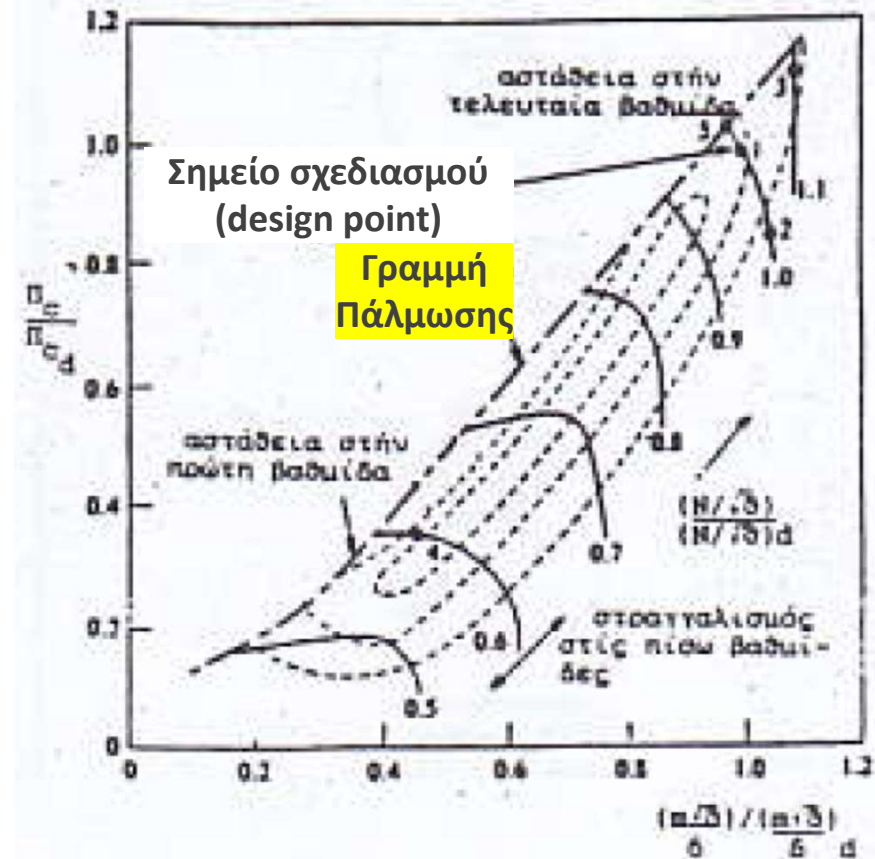
Κυψέλες αποκόλλησης πλήρους ύψους





Φαινόμενα Ασταθούς Λειτουργίας Συμπιεστών

Τυπική χαρακτηριστική βαθμίδας συμπιεστή, όπου φαίνεται η γραμμή πάλμωσης (surge line)





Φαινόμενα Ασταθούς Λειτουργίας Συμπιεστών

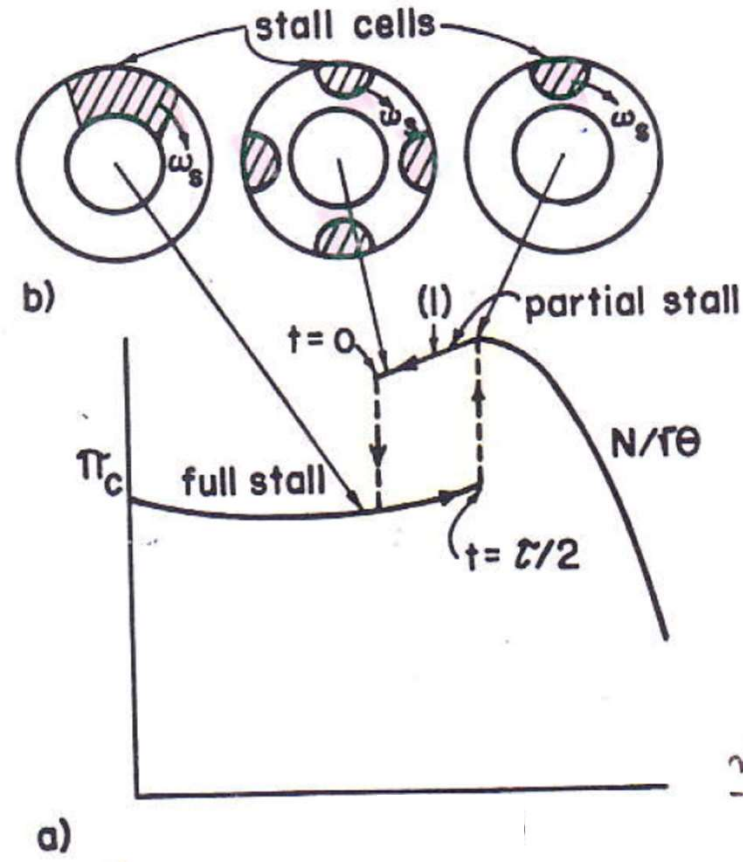
Φυσική ερμηνεία της
περιστροφικής
αποκόλλησης:





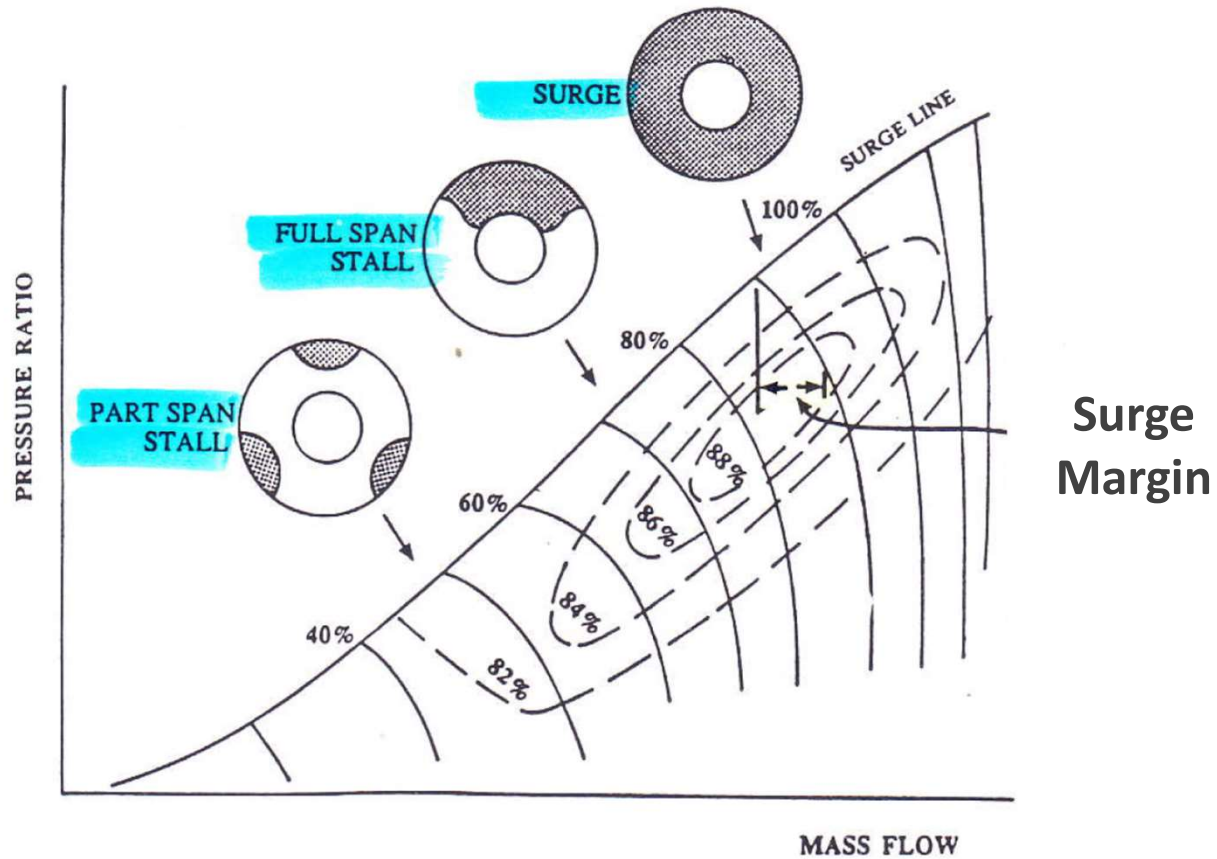
Φαινόμενα Ασταθούς Λειτουργίας Συμπιεστών

Υστέρηση





Φαινόμενα Ασταθούς Λειτουργίας Συμπιεστών

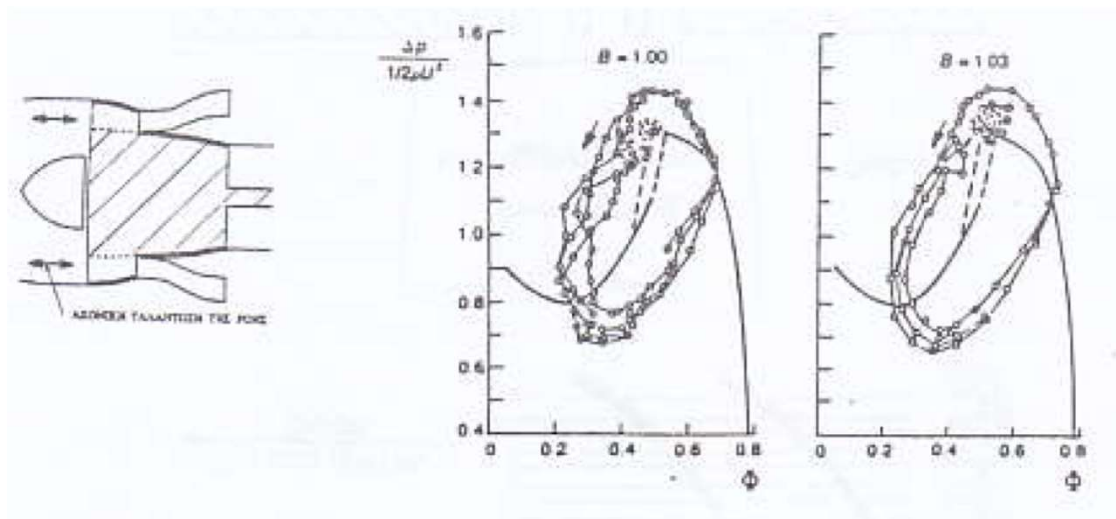




Φαινόμενα Ασταθούς Λειτουργίας Συμπιεστών

Πάλμωση (Surge)

Αν και η ροή παραμένει πρακτικά αξονοσυμμετρική, ταλαντώνεται συνολικά με μικρότερες συχνότητες από την περιστροφική αποκόλληση. Οι συχνότητες σχετίζονται και με το συμπιεστή αλλά και με τα παρελκόμενα (αγωγό εξόδου, όγκο τροφοδοτούμενου θαλάμου, στραγγαλιστική διάταξη)



Τροχιά του ΣΛ στο πεδίο των χαρακτηριστικών



Φαινόμενα Ασταθούς Λειτουργίας Συμπιεστών

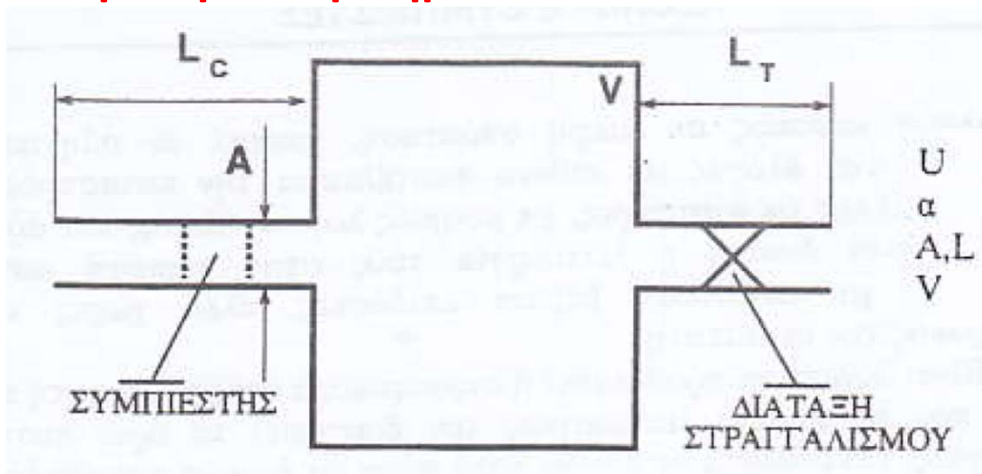
Αποτελέσματα ασταθούς λειτουργίας:

- Πτώση βαθμού απόδοσης
- Ταλαντώσεις μηχανικών μερών
- Αύξηση θερμοκρασίας
- Πάλμωση... μέχρι και αναρρόφηση φλόγας από τον ΘΚ



Φαινόμενα Ασταθούς Λειτουργίας Συμπιεστών

Εμπειρικό κριτήριο του Greitzer:



U περιφερειακή ταχύτητα πτερυγίων σε μια μέση γραμμή
 a ταχύτητα ήχου
 A, L διατομή και μήκος αγωγού
 V όγκος τροφοδοτούμενου θαλάμου.

$$B = \frac{U}{2\omega_H L}$$

$$\omega_H = \alpha \sqrt{\frac{A}{LV}}$$

Αν $B < 0.7 \rightarrow$ Περιστροφική Αποκόλληση
 Αν $B > 0.7 \rightarrow$ Πάλμωση



Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- **Κριτήριο Ευσταθούς Λειτουργίας Συμπιεστή:** Παράμετρος του Greitzer
$$B = \frac{U}{2\omega_H L_C}$$
 όπου $\omega_H = a\sqrt{\frac{A}{L_C V}}$ (U = περιφερειακή ταχύτητα στη μέση γραμμή, a = ταχύτητα ήχου, A = διατομή αγωγού, L_C = μήκος αγωγού, V = όγκος τροφοδοτούμενου θαλάμου). Αν $B > 0,7$ τότε έχουμε πάλμωση, αλλιώς περιστροφική αποκόλληση.



Άσκηση 11

Σε κάποια ενδιάμεση θέση κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς φυσικού αερίου παρεμβάλλεται συμπιεστής. Ποιά είναι η πιο πιθανή μορφή ασταθούς λειτουργίας (πάλμωση ή περιστροφική αποκόλληση) στην οποία μπορεί να υποπέσει και γιατί.

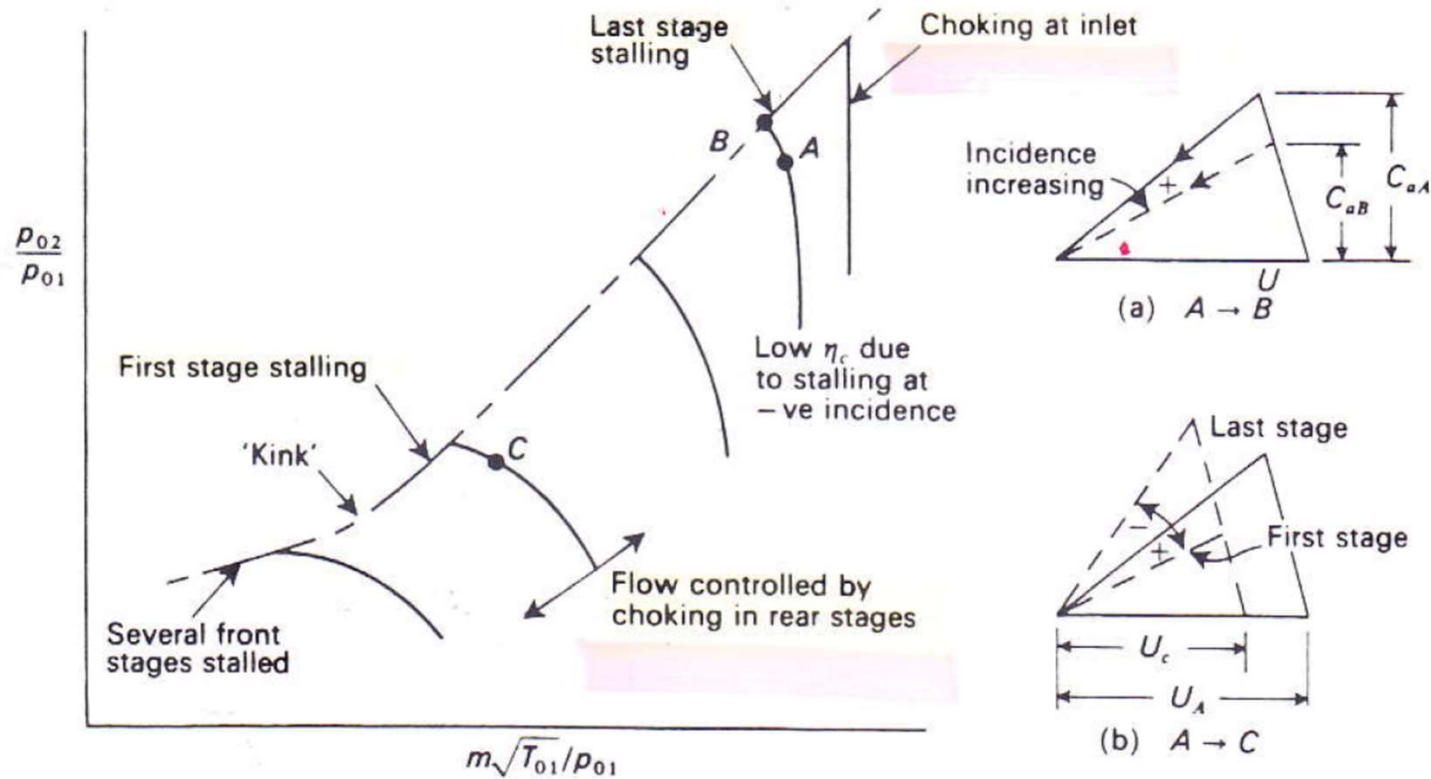
$$B = \frac{U}{2\omega_H L_C}$$

$$\omega_H = \alpha \sqrt{\frac{A}{L_C V}}$$

$$B = \frac{U}{2\alpha} \sqrt{\frac{V}{AL_C}}$$



Χαρακτηριστικές Πολυβάθμιου Συμπιεστή





Χρήση Οδηγών Πτερυγίων (Inlet Guide Vanes)

