



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

School of Mechanical Engineering

Lab. Of Thermal Turbomachines

Parallel CFD & Optimization Unit (PCOpt/NTUA)

Ο Ακτινικός Στρόβιλος

Kyriakos C. GIANNAKOGLU, Professor NTUA

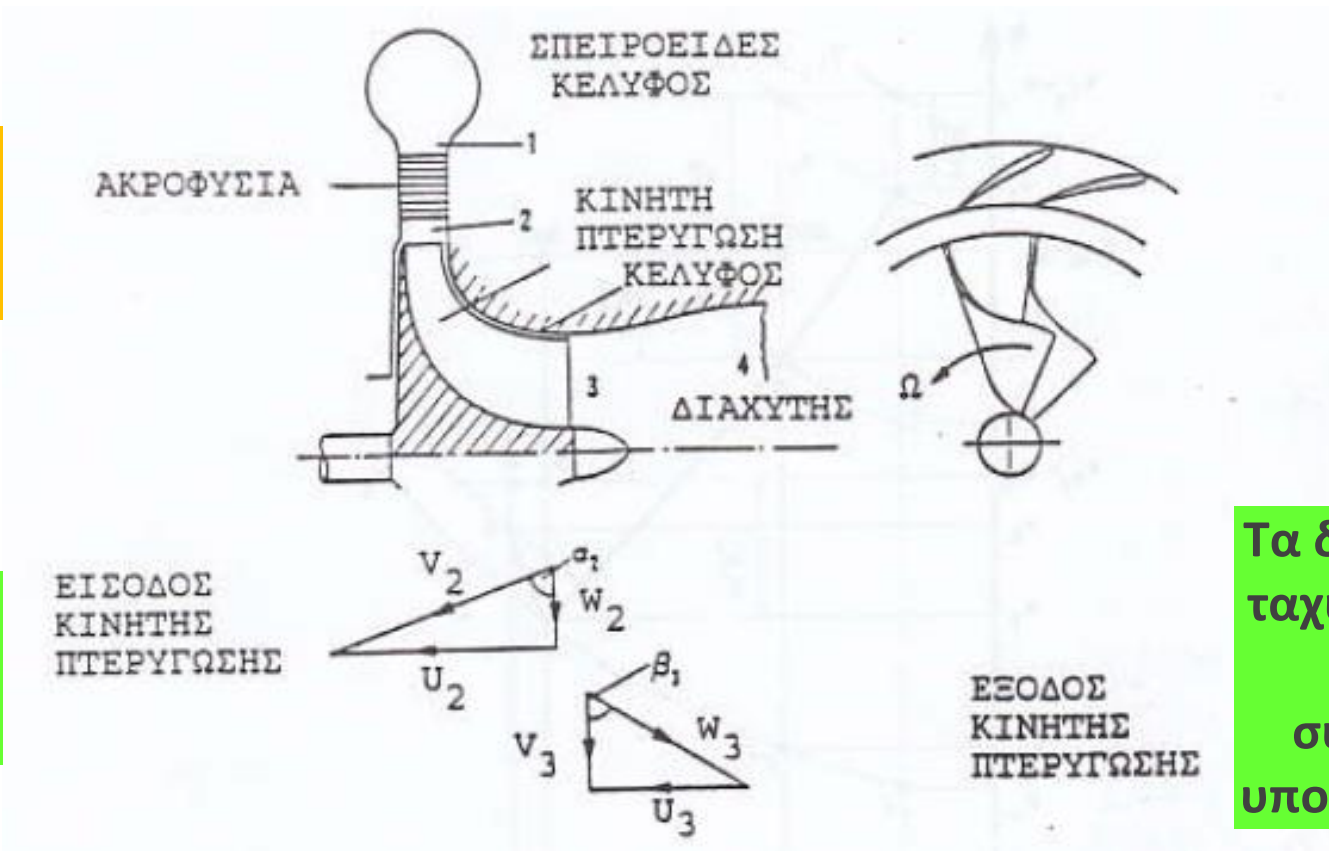
kgianna@mail.ntua.gr

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



Βαθμίδα Ακτινικού Στροβίλου

Προσέξτε που είναι η είσοδος και που η έξοδος του ρευστού!



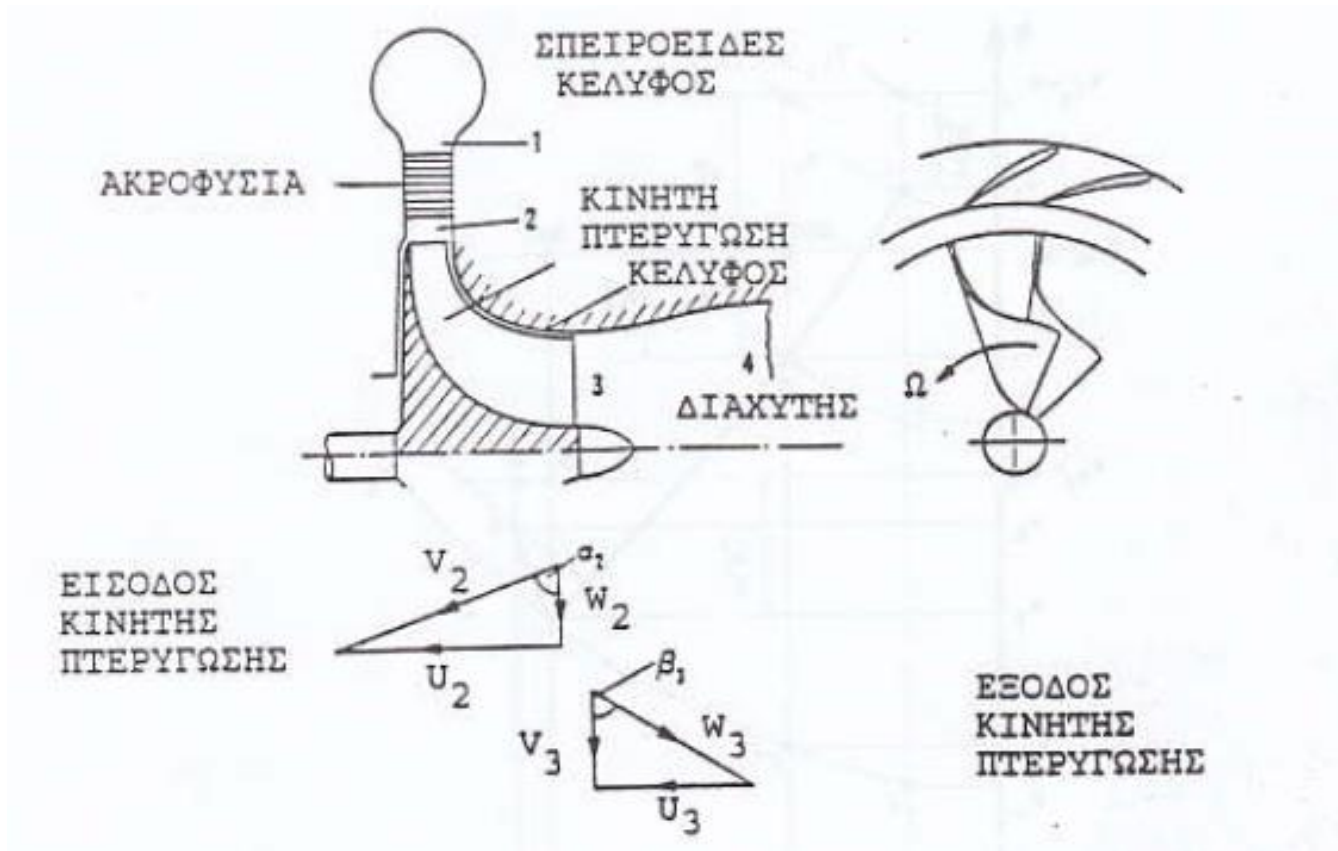
Προσοχή σε ποιο επίπεδο ανήκει κάθε τρίγωνο ταχυτήτων !!!

Τα δύο ορθογώνια τρίγωνα ταχυτήτων εκατέρωθεν της πτερωτής είναι συνηθισμένη, αλλά όχι υποχρεωτική, περίπτωση!!!

Radial Inflow Turbine

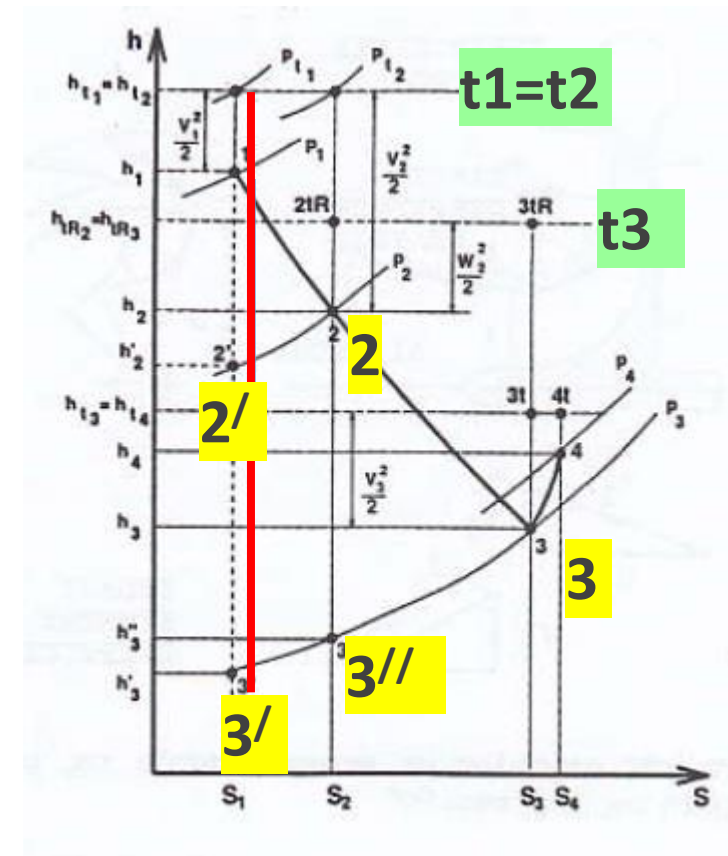


Βαθμίδα Ακτινικού Στροβίλου



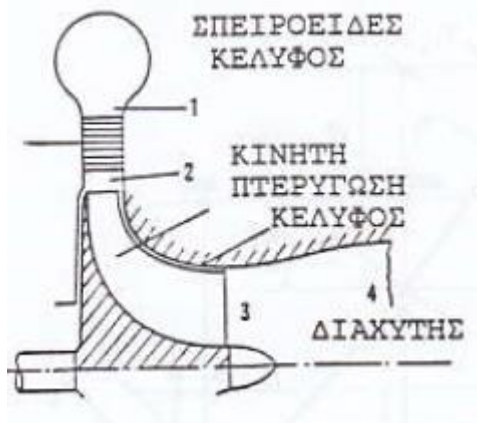
$W_2 = \text{radial}, V_3 = \text{axial}$

Αν η $V_3 = \text{axial}$, τι είναι η V_4 ?





Βαθμίδα Ακτινικού Στροβίλου



$$\Delta h_t = h_{t1} - h_{t3} = h_{t2} - h_{t3}$$

$$\Delta h_t = h_2 + \frac{1}{2} V_2^2 - h_3 - \frac{1}{2} V_3^2 = (h_2 - h_3) + \frac{1}{2} (V_2^2 - V_3^2)$$

$$h_{tR2} - h_{tR3} \rightarrow h_2 + \frac{1}{2} W_2^2 - \frac{1}{2} U_2^2 - h_3 - \frac{1}{2} W_3^2 + \frac{1}{2} U_3^2$$

$$\rightarrow h_2 - h_3 = \frac{1}{2} (W_3^2 - W_2^2) + \frac{1}{2} (U_2^2 - U_3^2)$$



$$\Delta h_t = \frac{1}{2} (W_3^2 - W_2^2) + \frac{1}{2} (U_2^2 - U_3^2) + \frac{1}{2} (V_2^2 - V_3^2)$$

Αύξηση του έργου (ανά μονάδα μάζας) του στροβίλου αν:

- 1) $R_2 \gg R_3$, πλεονέκτημα της Radial Inflow έναντι Radial Outflow
- 2) $W_3 \gg W_2$, μεγάλη **επιτάχυνση σχετικής** ροής στην πτερωτή
- 3) $V_2 \gg V_3$, μεγάλη **επιβράδυνση απόλυτης** ροής στην πτερωτή



Βαθμίδα Ακτινικού Στροβίλου



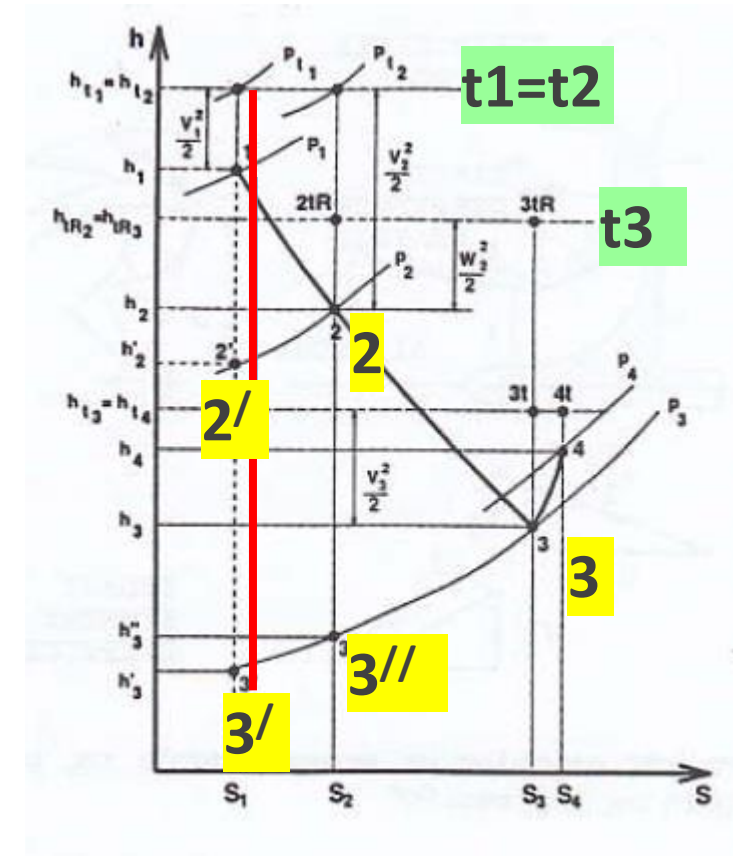
Ακτινικός (vs. Αξονικός) στρόβιλος:

- Δίνει μικρότερο Δh_t για τις ίδιες στροφές
- Όμως με υψηλότερο βαθμό απόδοσης, ειδικά στα μικρότερα μεγέθη,
- Έχει και μικρό κόστος κατασκευής.

Radial Inflow Turbine: μεγαλύτερο ειδικό έργο.

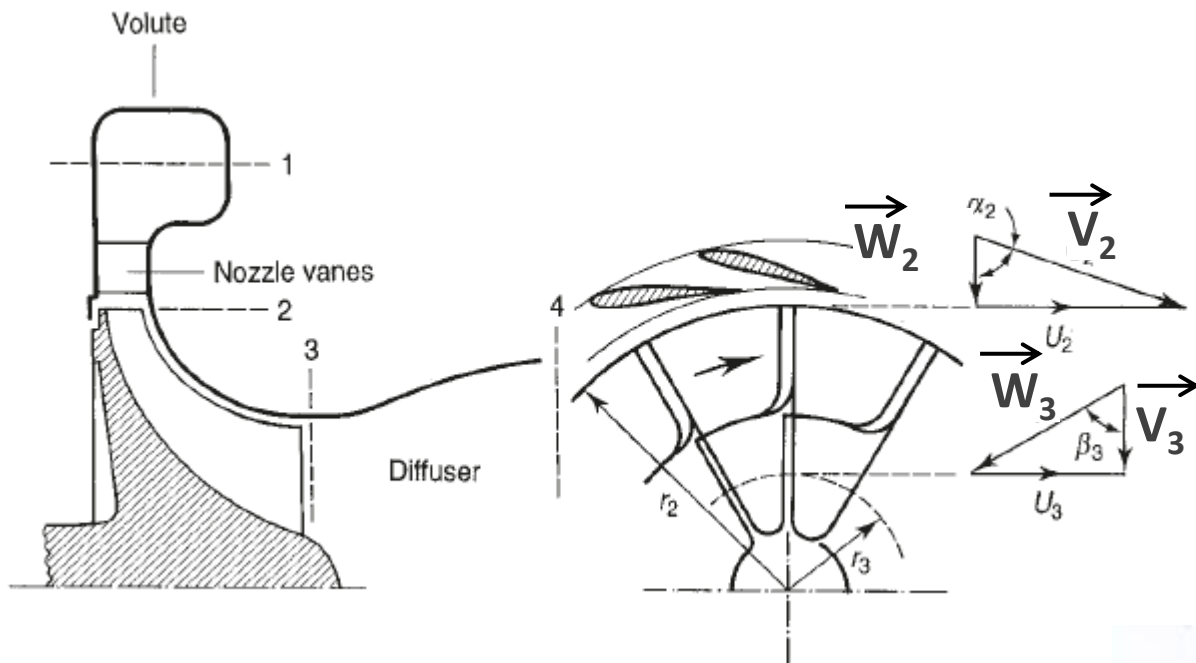
Ορισμός **ισεντροπικής** ταχύτητας:

$$\frac{1}{2}V_{is}^2 = h_{t_1} - h_{3'} = 2C_p T_{t1} (1 - T_{3'}/T_{t1}) = 2C_p T_{t1} (1 - (p_3/p_{t1})^{(\gamma-1)/\gamma})$$





Βαθμίδα Ακτινικού Στροβίλου



Για ορθογώνια τρίγωνα ταχυτήτων
εκατέρωθεν της πτερωτής.
 $\beta_2=0^\circ$ και $\alpha_3=0^\circ$

$$\Delta h_t = U_2 V_{u2} - U_3 V_{u3} = U_2^2$$

$$V_2^2 = U_2^2 + W_2^2$$

$$W_3^2 = U_3^2 + V_3^2$$

$$h_2 - h_3 = \frac{1}{2} (U_2^2 - W_2^2 + V_3^2)$$

$$\frac{U_2}{W_2} = \tan \alpha_2$$

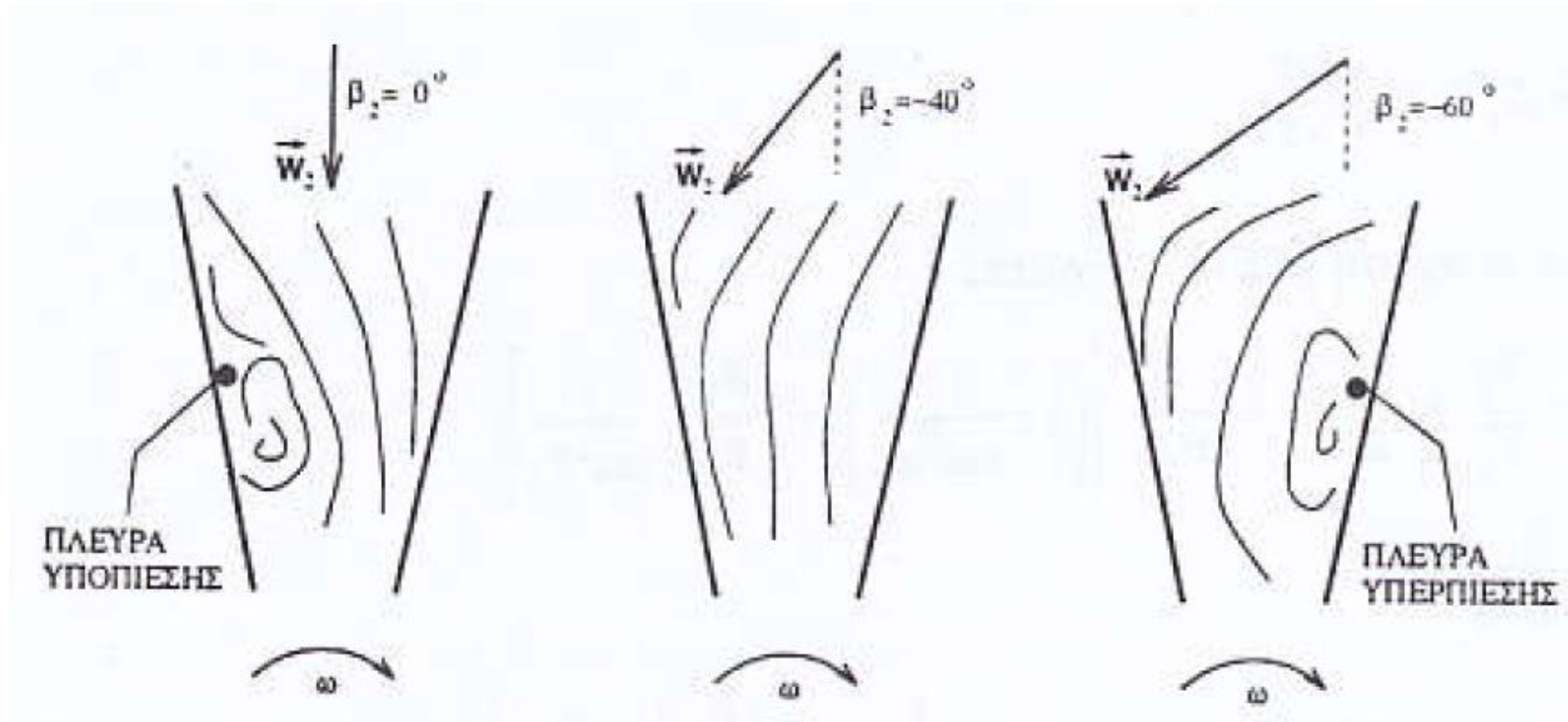
$$\frac{U_3}{V_3} = \tan \beta_3$$

$$h_2 - h_3 = \frac{1}{2} U_2^2 \left[\left(1 - \frac{1}{\tan^2 \alpha_2}\right) + \left(\frac{R_3}{R_2}\right)^2 \frac{1}{\tan^2 \beta_3} \right]$$

$$\frac{T_3}{T_2} = 1 - \frac{1}{2} (\gamma - 1) M_{u_2}^2 \left[\left(1 - \frac{1}{\tan^2 \alpha_2}\right) + \left(\frac{R_3}{R_2}\right)^2 \frac{1}{\tan^2 \beta_3} \right]$$



Βαθμίδα Ακτινικού Στροβίλου



Μορφή πεδίου ροής στην περιστρεφόμενη πτερύγωση. Βέλτιστη απόδοση για $\beta_2 = -20^\circ \dots -30^\circ$, με αποφυγή της αποκόλλησης.



Βαθμός Απόδοσης Ακτινικού Στροβίλου

$$\eta_{t-s,T} = \frac{h_{t2}^{\square} - h_{t3}^{\square}}{h_{t1}^{\square} - h_3'}$$

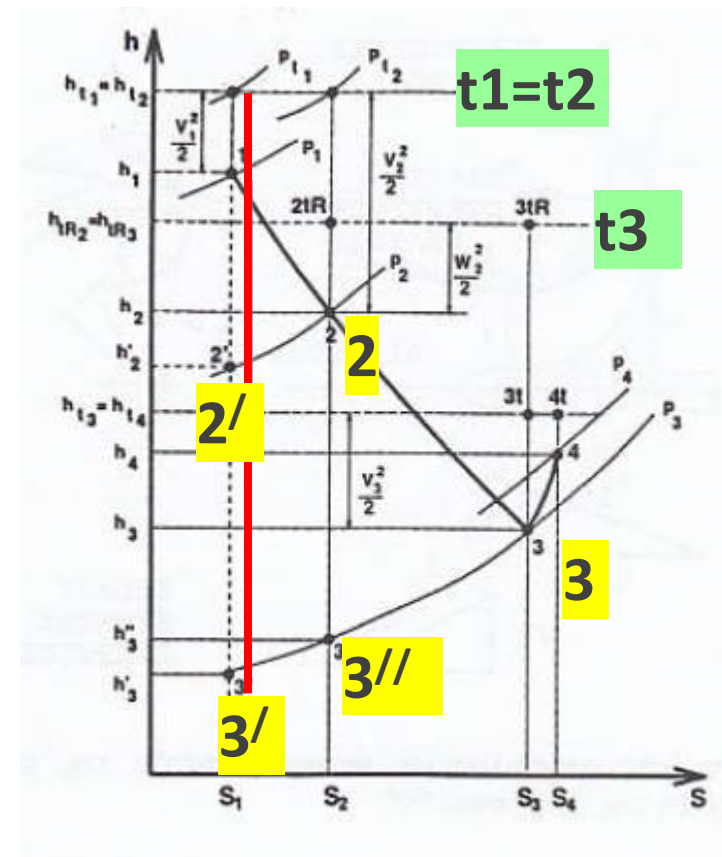
$$h_{t1} - h_3' = V_{is}^2 / 2$$

Ολικές-προς-στατικές ολόκληρου του στροβίλου (διαχύτης?)

Συντελεστές Απωλειών σε [N]ozzle & [R]otor:

$$h_2^{\square} - h_2' = \zeta_N \frac{1}{2} V_2^2$$

$$h_3^{\square} - h_3'' = \zeta_R \frac{1}{2} W_3^2$$





Βαθμός Απόδοσης Ακτινικού Στροβίλου

$$\eta_{t-s,T} = \frac{h_{t2}^{\square} - h_{t3}^{\square}}{h_{t1}^{\square} - h_3'}$$

Υπόθεση: Οι ισόθλιπτες δεν «ανοίγουν»:

$$h_{t3}^{\square} - h_3^{\square} = h_{t3}' - h_3'$$

Εξίσωση Gibbs για ισόθλιπτες μεταβολές (υπόθεση «μέση T»):

$$Tds = dh - vdp$$



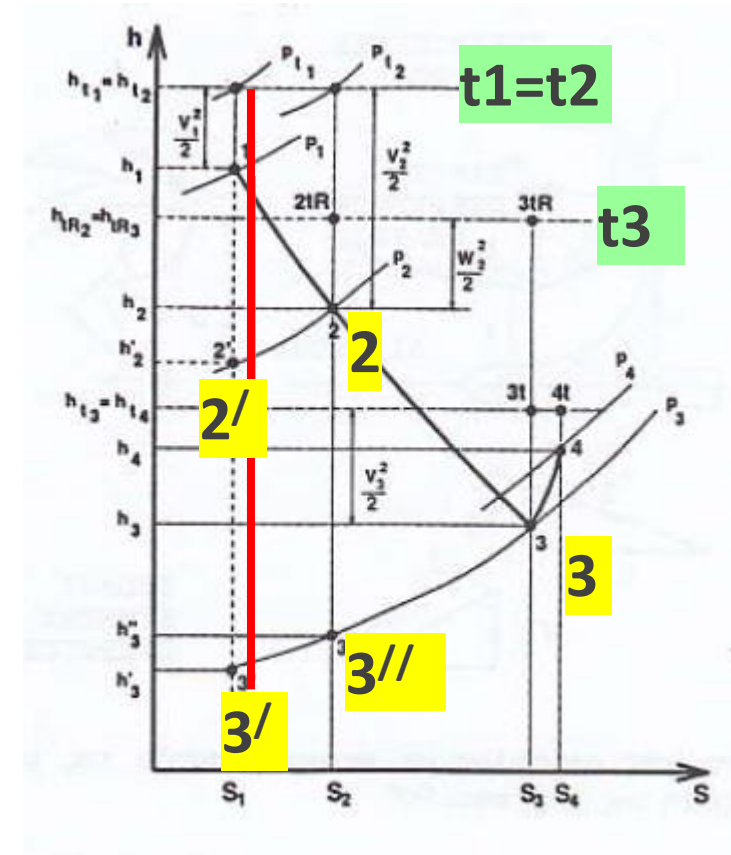
$$T\Delta S = \Delta h$$

$$h_3'' - h_3' = T_3(S_2 - S_1)$$



$$\frac{h_3'' - h_3'}{h_2^{\square} - h_2'} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$h_2^{\square} - h_2' = T_2(S_2 - S_1)$$





Βαθμός Απόδοσης Ακτινικού Στροβίλου

$$\eta_{t-s,T} = \frac{h_{t2}^{\square} - h_{t3}^{\square}}{h_{t1}^{\square} - h_3'}$$

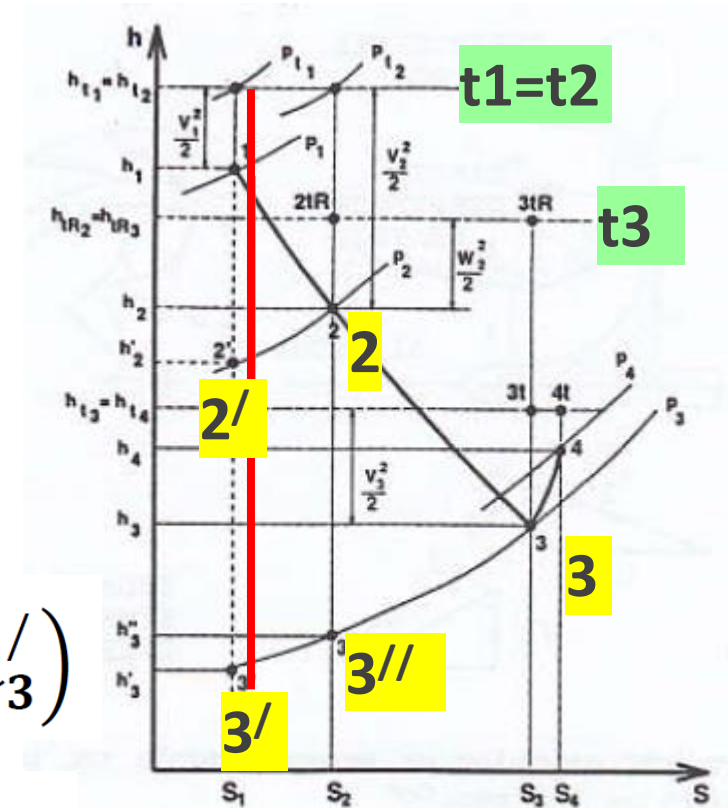
$$\frac{h_3'' - h_3'}{h_2^{\square} - h_2'} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$h_{t1}^{\square} - h_3' = ???$$

$$h_3' = \left(h_{t3} - \frac{1}{2} V_3^2 \right) - h_3^{\square} + h_3'' - h_3'' + h_3'$$

$$h_{t1} - h_3' = (h_{t1} - h_{t3}) + \frac{1}{2} V_3^2 + (h_3^{\square} - h_3'') + (h_3'' - h_3')$$

$$h_{t1} - h_3' = (h_{t1} - h_{t3}) + \frac{1}{2} V_3^2 + \zeta_R \frac{1}{2} W_3^2 + \frac{T_3}{T_2} \zeta_N \frac{1}{2} V_2^2$$



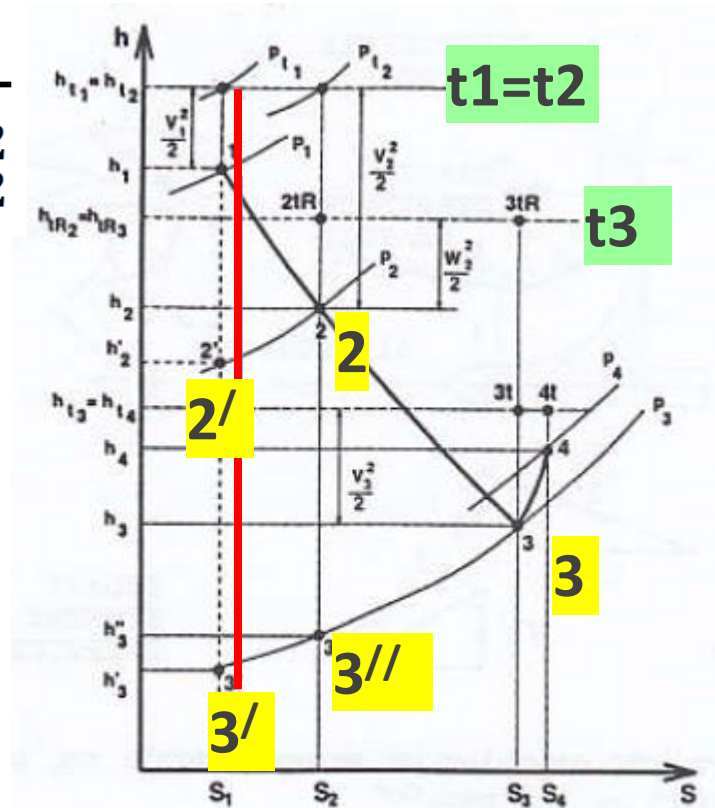
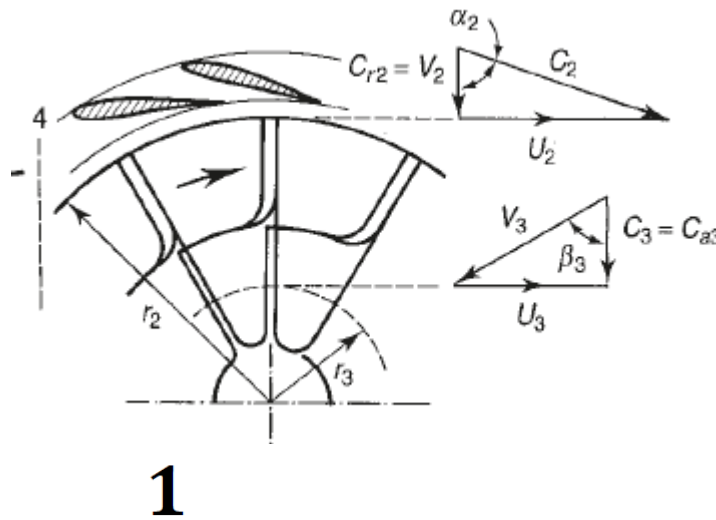


Βαθμός Απόδοσης Ακτινικού Στροβίλου

$$\eta_{t-s,T} = \frac{h_{t2}^{\square} - h_{t3}^{\square}}{h_{t1}^{\square} - h_3'} = \frac{\Delta h_t}{\Delta h_t + \frac{1}{2} V_3^2 + \zeta_R \frac{1}{2} W_3^2 + \frac{T_3}{T_2} \zeta_N \frac{1}{2} V_2^2}$$

Για ορθογώνια τρίγωνα ταχυτήτων
εκατέρωθεν της πτερωτής.
 $\beta_2=0^\circ$ και $\alpha_3=0^\circ$

$$\Delta h_t = U_2 V_{u2} - U_3 V_{u3} = U_2^2$$



$$\eta_{t-s,T} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{V_3^2}{U_2^2} + \zeta_R \frac{1}{2} \frac{W_3^2}{U_2^2} + \frac{T_3}{T_2} \zeta_N \frac{1}{2} \frac{V_2^2}{U_2^2}}$$

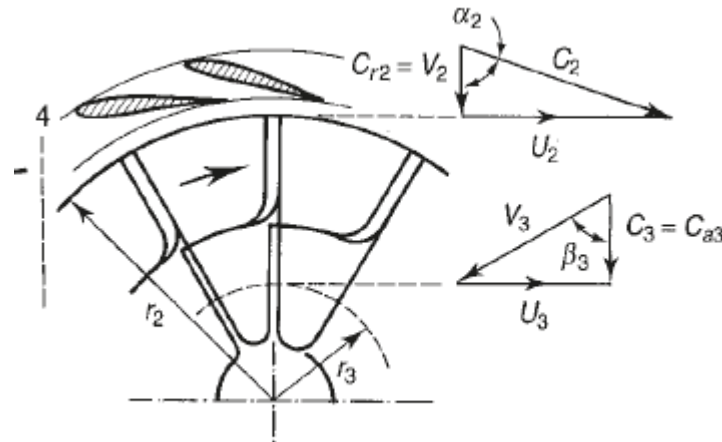


Βαθμός Απόδοσης Ακτινικού Στροβίλου

Για ορθογώνια τρίγωνα ταχυτήτων
εκατέρωθεν της πτερωτής.

$$\beta_2=0^\circ \text{ και } \alpha_3=0^\circ$$

$$\Delta h_t = U_2 V_{u2} - U_3 V_{u3} = U_2^2$$

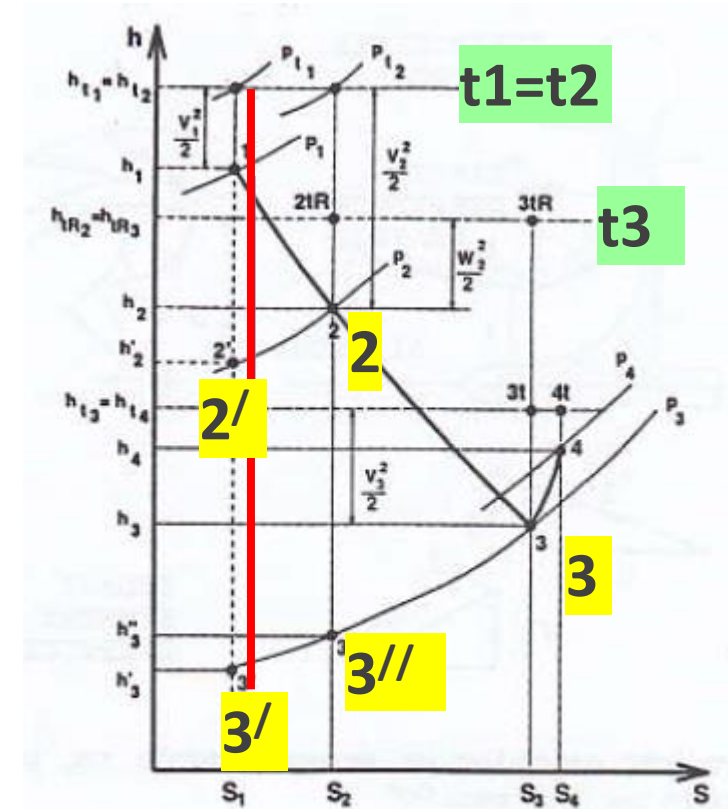


1

$$\eta_{t-s,T} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{V_3^2}{U_2^2} + \zeta_R \frac{1}{2} \frac{W_3^2}{U_2^2} + \frac{T_3}{T_2} \zeta_N \frac{1}{2} \frac{V_2^2}{U_2^2}}$$

1

$$\eta_{t-s,T} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{R_3^2}{R_2^2} \frac{1}{\tan^2 \beta_3} + \zeta_R \frac{1}{2} \frac{R_3^2}{R_2^2} \frac{1}{\sin^2 \beta_3} + \frac{T_3}{T_2} \zeta_N \frac{1}{2} \frac{1}{\sin^2 \alpha_2}}$$





Χαρακτηριστικές Λειτουργίας Ακτινικού Στροβίλου

Συντελεστής φόρτισης:

$$\Psi = \frac{\Delta h_t}{U_2^2} = \frac{h_{t_2} - h_{t_3}}{U_2^2}$$

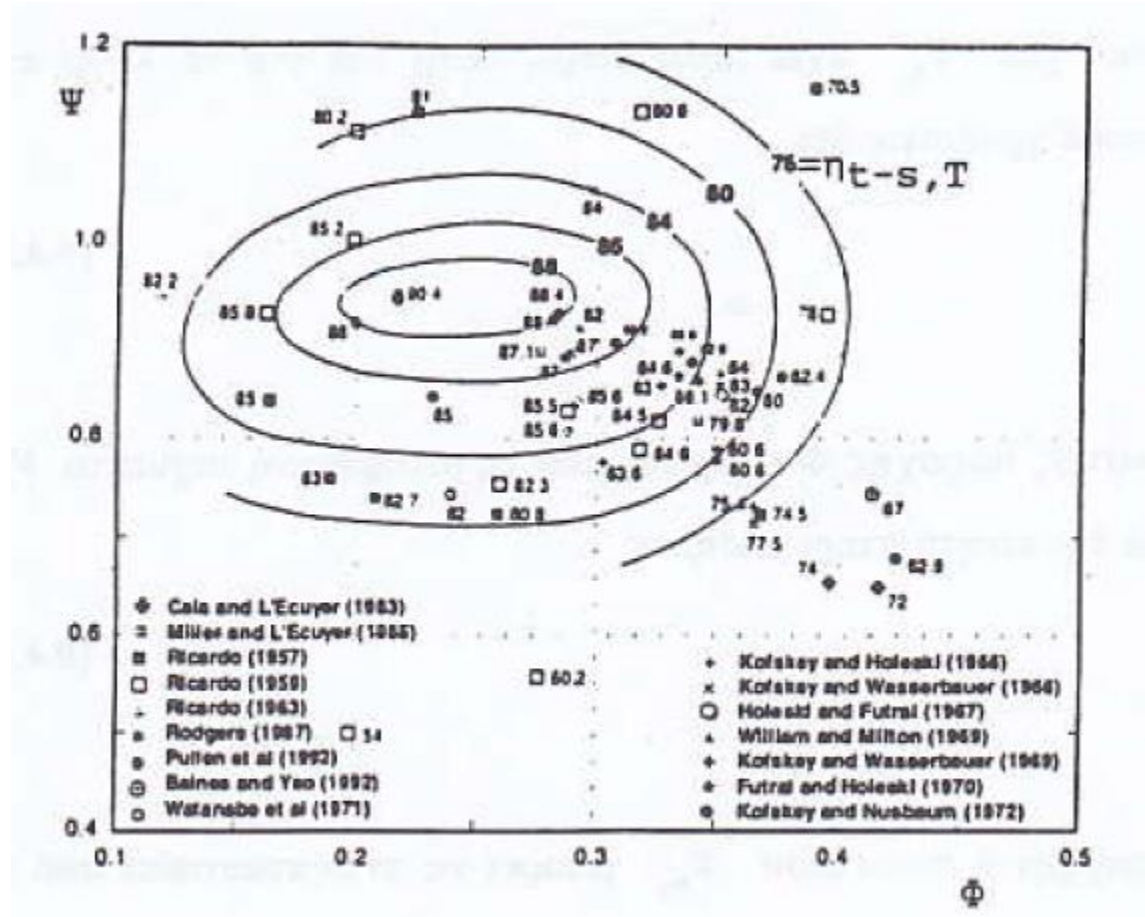
$$\Psi = \frac{V_{u_2}}{U_2} - \left(\frac{R_3}{R_2} \right) \frac{V_{u_3}}{U_2}$$

=0, αν $\alpha_3=0^\circ$

Συντελεστής παροχής:

$$\Phi = \frac{V_{m_3}}{U_2}$$

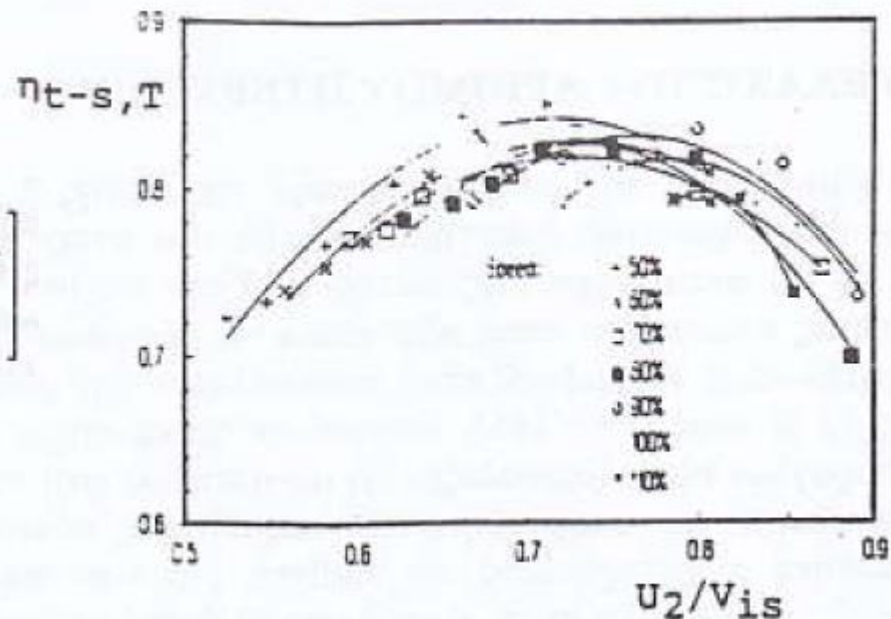
Μεσημβρινή συνιστώσα της ταχύτητας (meridional velocity) \rightarrow δείκτης m





Χαρακτηριστικές Λειτουργίας Ακτινικού Στροβίλου

$$V_{is}^2 = 2C_p T_{t1} \left[1 - \left(\frac{P_3}{P_{t1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$



Βαθμός απόδοσης ολικών-προς-στατικές συνθήκες ακτινικού στροβίλου, ως συνάρτηση του λόγου U_2/V_{is} .

Σχεδόν ενιαία καμπύλη.
Μέγιστος βαθμός απόδοσης (~0.90)
για περίπου:

$$\left(\frac{U_2}{V_{is}} \right)_{opt} = 0.7$$

Στο Βέλτιστο:

$$\eta_{t-s,T} = 0.90 = 2\Delta h_t / V_{is}^2 = 2 (\Delta h_t / U_2^2) (U_2^2 / V_{is}^2) = 2\Psi (U_2 / V_{is})^2 = 2*(0.7)^2 \Psi = \Psi$$

Άρα, στο βέλτιστο : $\eta_{t-s,T} = \Psi$