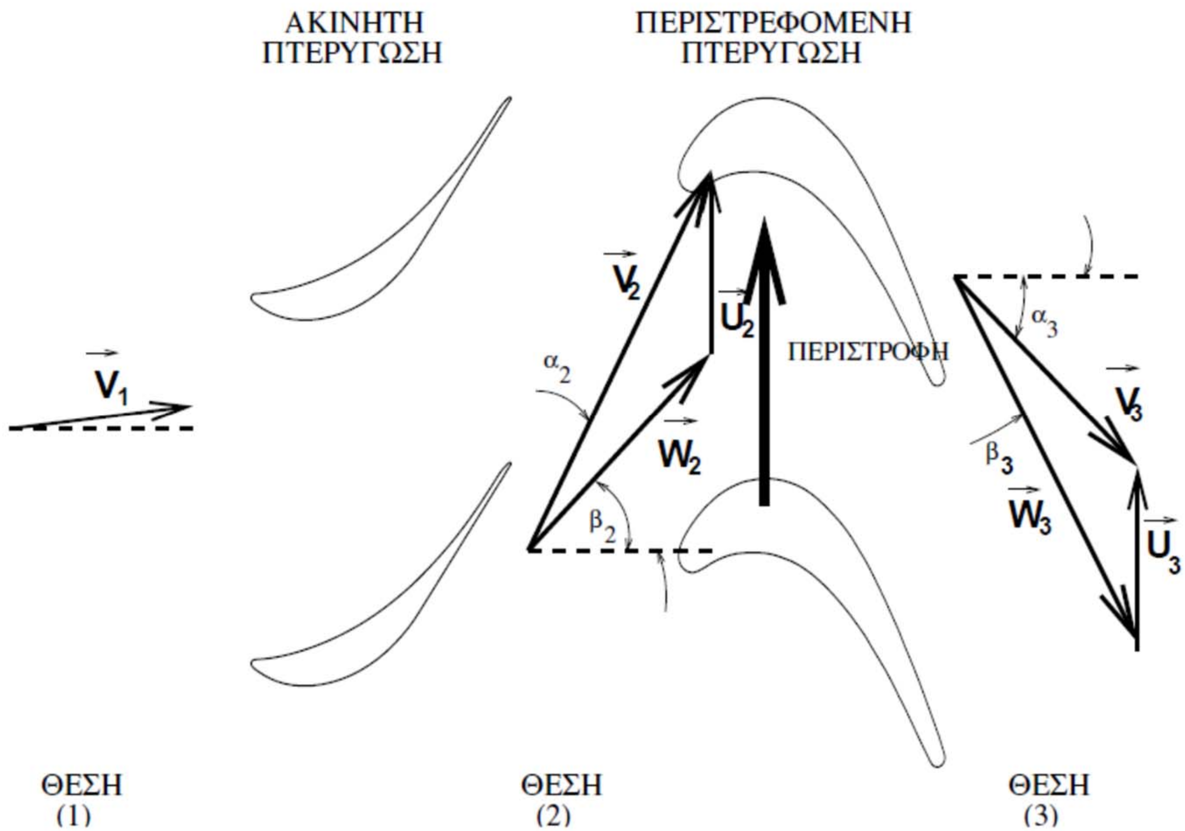
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
School of Mechanical Engineering
Lab. Of Thermal Turbomachines
Parallel CFD & Optimization Unit (PCOpt/NTUA)

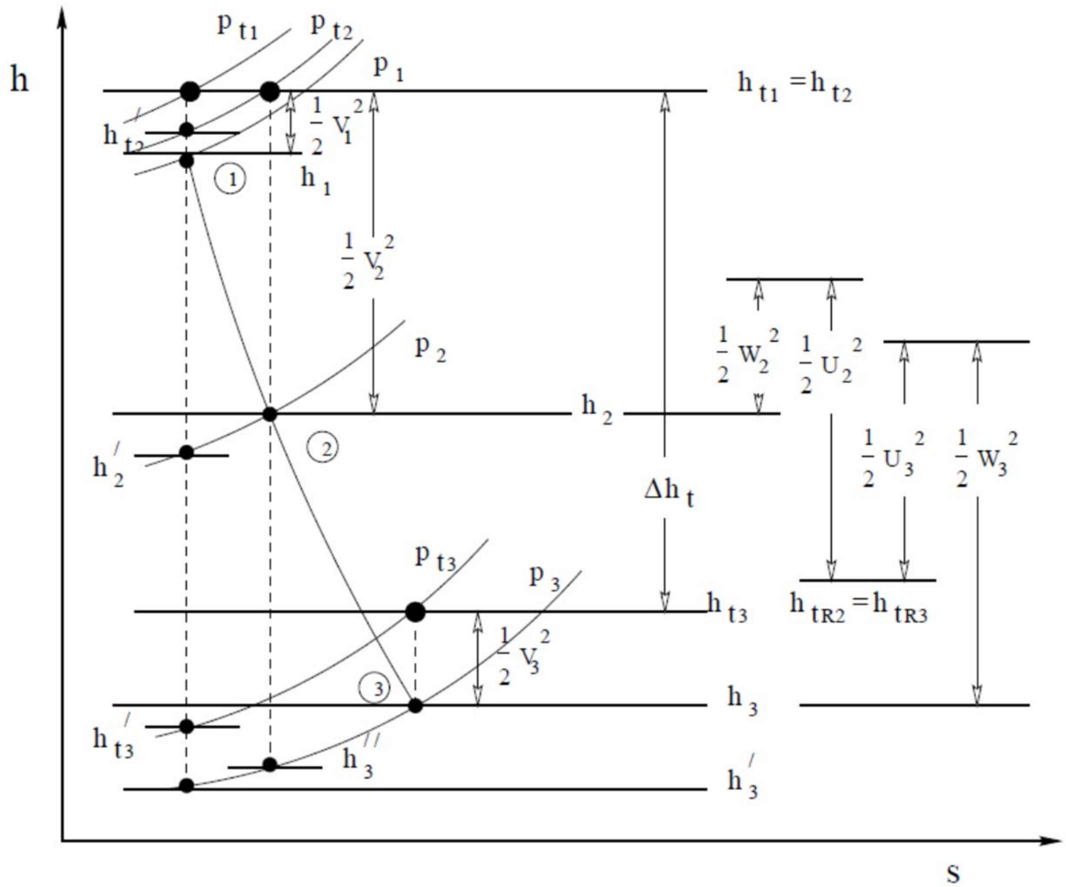
Ο Αξονικός Στρόβιλος

Kyriakos C. GIANNAKOGLOU, Professor NTUA
kgianna@mail.ntua.gr
http://velos0.ltt.mech.ntua.gr/research

Βαθμίδα Αξονικού Στροβίλου

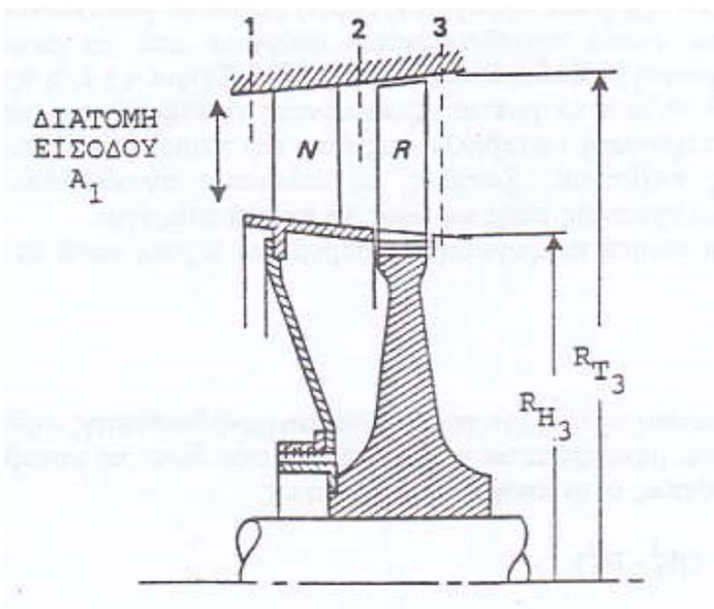


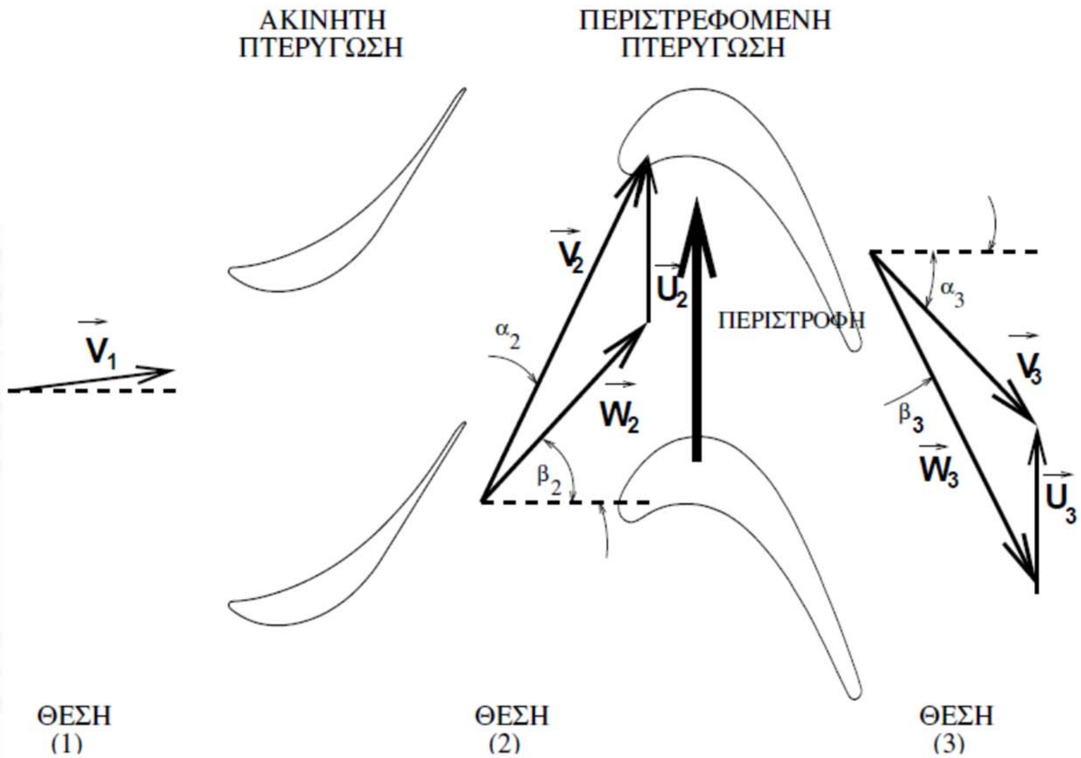
Βαθμίδα Αξονικού Στροβίλου



Αδιάστατοι Παράμετροι Λειτουργίας Βαθμίδας Στροβίλου

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

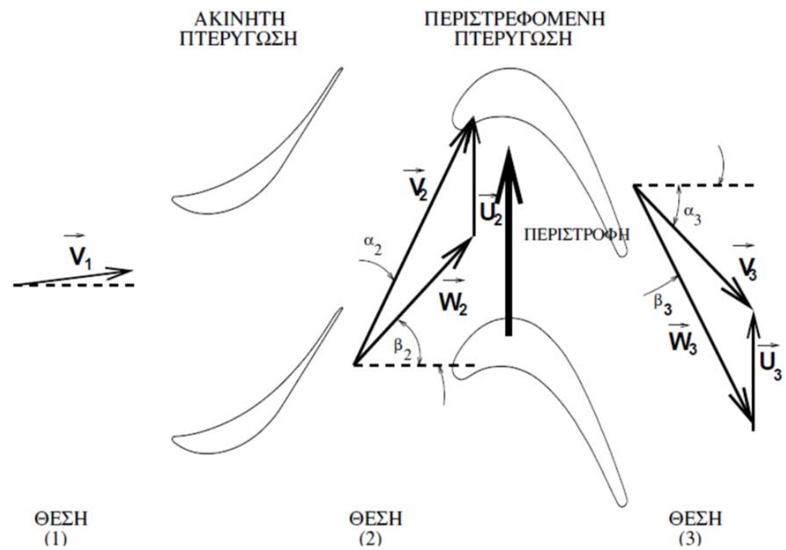




Συντελεστής Παροχής Φ

$$\phi = \frac{V_{ai}}{U_i} = \frac{V_{ai}}{V_{u_i} - W_{u_i}} = \frac{1}{\tan a_i - \tan \beta_i}$$

Συνήθως i=2

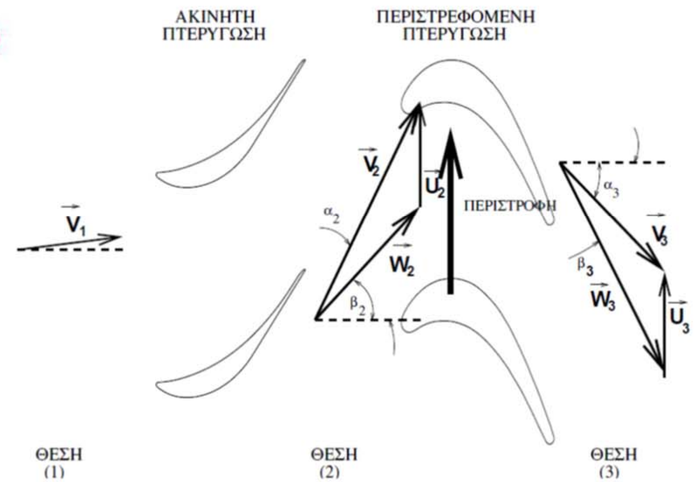


Συντελεστής Φόρτισης Ψ

$$\Psi = \frac{\Delta h_t}{U_2^2} = \frac{U_2 V_{u2} - U_3 V_{u3}}{U_2^2} \overset{U=\sigma\tau\alpha\theta.}{=}$$

$$= \frac{V_{u2} - V_{u3}}{U} \overset{V_a=\sigma\tau\alpha\theta.}{=} \frac{V_a}{U} \cdot \frac{V_{u2} - V_{u3}}{V_a} =$$

$$= \Phi \left(\tan a_2 - \tan a_3 \right)$$



Συντελεστής Φόρτισης Ψ

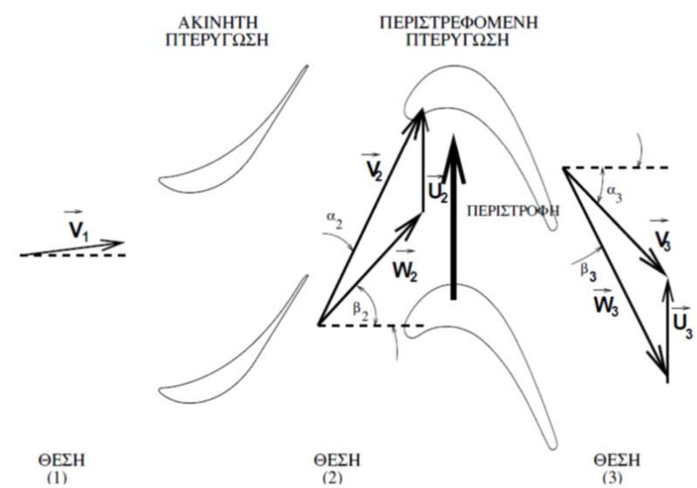
Εναλλακτικά:

Αλλά: $V_{u_2} - V_{u_3} = W_{u_2} - W_{u_3}$ (αν U=σταθ.

$\Rightarrow \psi = \phi\,(\tan\beta_2 - \tan\beta_3)$

ή $\psi = \phi\,\dfrac{V_{u_2} - U - V_{u_3}}{V_a} \Rightarrow$

$$\Rightarrow \boxed{\psi = \phi\,(\tan\alpha_2 - \tan\beta_3) - 1}$$

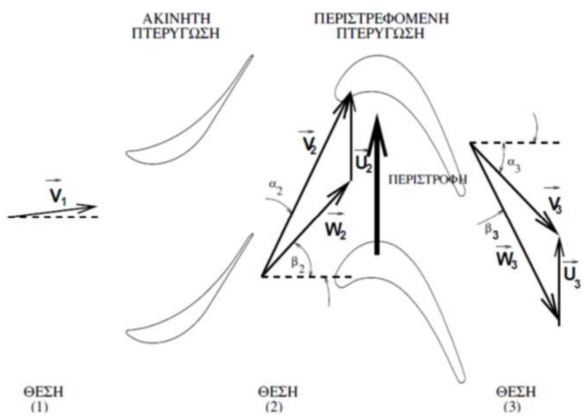


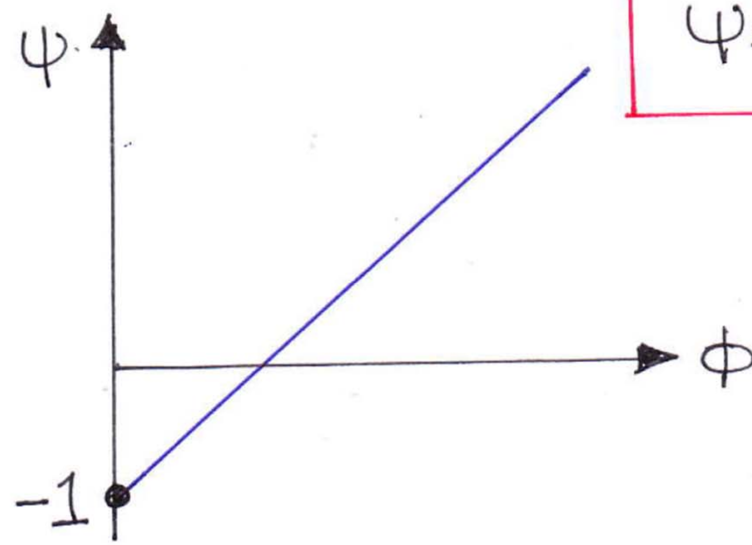
Συντελεστής Φόρτισης Ψ

$$\boxed{\psi = \phi\,(\underbrace{\tan\alpha_2}_{+} - \underbrace{\tan\beta_3}_{-}) - 1}$$

$$\underbrace{\tan\alpha_2 - \tan\beta_3}_{t>0} > 0$$

$$\boxed{\psi = \phi t - 1,\ t>0}$$





Συντελεστής Φόρτισης Ψ

Συσχέτιση με το Σημείο Σχεδιασμού (Design Point):

$$\Psi = \Phi\,(\tan\alpha_2 - \tan\beta_3) - 1$$

$$\Psi_d = \Phi_d\,\underbrace{(\tan\alpha_2 - \tan\beta_3)}_{\sim\ \text{σταθερό!}} - 1$$

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

Σχεδιάστε την!

Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- **Συντελεστής Παροχής:** $\Phi = \frac{V_a}{U}$
  (ανάπτυξη σχέσεων όπως στο συμπιεστή).

- **Συντελεστής Φόρτισης:**

$$\Psi = \frac{\Delta h_t}{U^2} = \frac{h_{t2} - h_{t3}}{U^2}$$

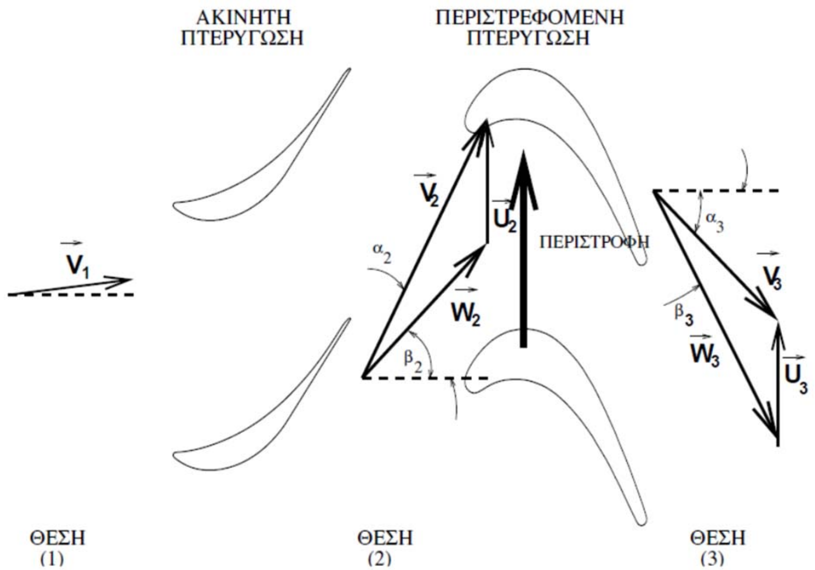
Αν U=σταθ. και V_a=σταθ. $\Rightarrow$

$$\Psi = \Phi(tan\alpha_2 - tan\beta_3) - 1$$

Βαθμός Αντίδρασης (r)

Εκφράζει την εσωτερική δομή μιας βαθμίδας

$$r = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3}$$



Βαθμός Αντίδρασης (r)

$$r = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3}$$

Ο αριθμητής:

$$h_2 - h_3 = \left(\cancel{h_{tR_2}} - \frac{1}{2}W_2^2 + \frac{1}{2}U_2^2\right) - \left(\cancel{h_{tR_3}} - \frac{1}{2}W_3^2 + \frac{1}{2}U_3^2\right) =$$

$U = \sigma\tau\alpha\theta.$

$$= \frac{1}{2}\left(W_3^2 - W_2^2\right) = \frac{1}{2}\left(W_{u_3}^2 + V_{a_3}^2 - W_{u_2}^2 - V_{a_2}^2\right) =$$

$V_a = \sigma\tau\alpha\theta.$

$$= \frac{1}{2}\left(W_{u_3}^2 - W_{u_2}^2\right) = \frac{V_a^2}{2}\left(\tan^2\beta_3 - \tan^2\beta_2\right)$$

<u>Παραδοχές</u>: Va=σταθ. U=σταθ.

Βαθμός Αντίδρασης (r)

$$r = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3}$$

Ο παρονομαστής:

$$h_1 - h_3 = \left(h_{t_1} - \frac{1}{2}V_1^2\right) - \left(h_{t_3} - \frac{1}{2}V_3^2\right) =$$

επαν.β.

$$= h_{t_1} - h_{t_3} = h_{t_2} - h_{t_3} = U\left(V_{u_2} - V_{u_3}\right)$$

<u>Παραδοχές</u>: Va=σταθ. U=σταθ.
Επαναληπτική βαθμίδα

Βαθμός Αντίδρασης (r)

$$r = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3}$$

<u>Παραδοχές</u>: Va=σταθ. U=σταθ.
Επαναληπτική βαθμίδα

Συνολικά:

$$r = \frac{1}{2} \cdot \frac{W_{u3}^2 - W_{u2}^2}{U(V_{u2} - V_{u3})} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(W_{u3} - W_{u2})(W_{u3} + W_{u2})}{U(W_{u2} - W_{u3})} =$$

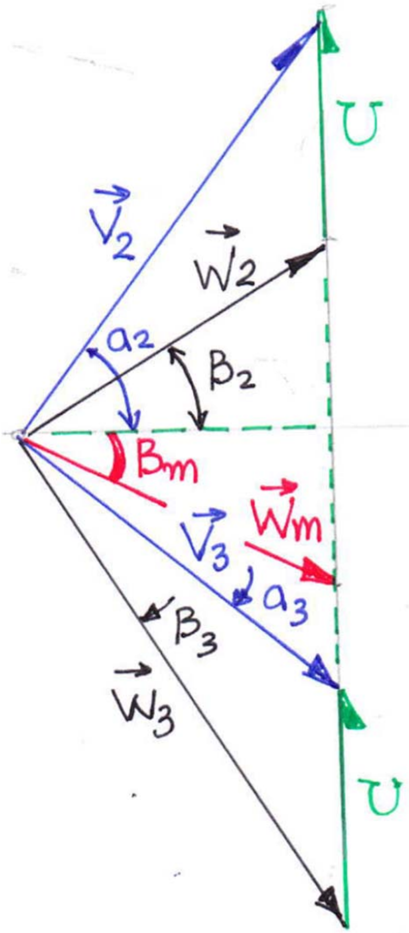
$$= -\frac{1}{2} \cdot \frac{V_a}{U} \cdot \frac{W_{u3} + W_{u2}}{V_a} \Rightarrow \boxed{r = -\frac{\Phi}{2}(\tan\beta_3 + \tan\beta_2)}$$

$$\tan\beta_2 = \frac{W_{u2}}{V_a} = \frac{V_{u2} - U}{V_a} = \tan a_2 - \frac{1}{\Phi}$$

$$\boxed{r = \frac{1}{2} - \frac{\Phi}{2}(\tan\beta_3 + \tan a_2)}$$

Βαθμός Αντίδρασης (r)

$$r = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3}$$



$$r = -\frac{\Phi}{2}(\tan\beta_3 + \tan\beta_2)$$

$$\tan\beta_m = \frac{1}{2}(\tan\beta_3 + \tan\beta_2)$$

$$\boxed{r = -\Phi \tan\beta_m}$$

<u>Παραδοχές</u>: Va=σταθ. U=σταθ.
Επαναληπτική βαθμίδα

Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- **Βαθμός Αντίδρασης:**

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

Αν U =σταθ., V_a =σταθ. και επαναληπτική βαθμίδα⇒

$$\begin{aligned} r &= -\frac{\Phi}{2}(tan\beta_3 + tan\beta_2) \\ &= \frac{1}{2} - \frac{\Phi}{2}(tan\beta_3 + tan\alpha_2) \\ &= 1 - \frac{V_{u2} + V_{u3}}{2U} \end{aligned}$$

Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- **Επίλυση Τριγώνων Ταχυτήτων Αξονικού Στρόβιλου:**

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

$$\frac{V_{u2}}{U} = 1 - r + \frac{\Psi}{2} \quad , \quad \frac{V_{u3}}{U} = 1 - r - \frac{\Psi}{2} \ ,$$

$$\frac{W_{u2}}{U} = -r + \frac{\Psi}{2} \quad , \quad \frac{W_{u3}}{U} = -r - \frac{\Psi}{2}$$

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

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

$$\frac{W_3}{U} = \sqrt{\Phi^2 + (r + \frac{\Psi}{2})^2} \ ,$$

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

<u>Παραδοχές</u>: Va=σταθ. U=σταθ.
Επαναληπτική βαθμίδα

Παραπομπή στο Τυπολόγιο

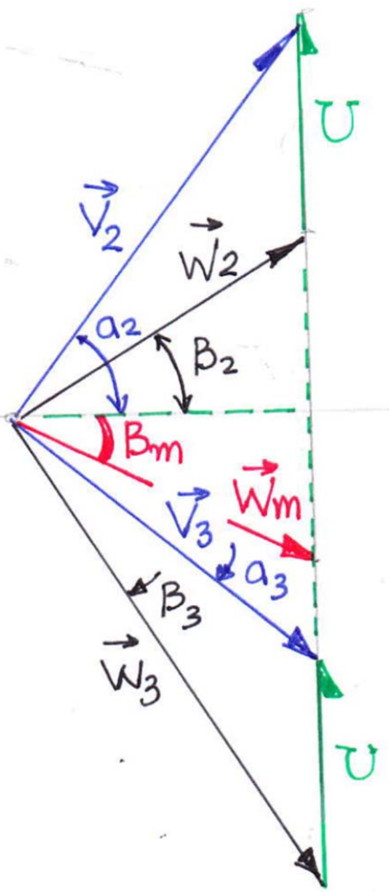
$$
\begin{aligned}
tan\alpha_1 = tan\alpha_3 &= \frac{1}{\Phi}(1 - r - \frac{\Psi}{2}) \ , \\
tan\alpha_2 &= \frac{1}{\Phi}(1 - r + \frac{\Psi}{2}) \ , \\
tan\beta_2 &= \frac{1}{\Phi}(-r + \frac{\Psi}{2}) \ , \\
tan\beta_3 &= \frac{1}{\Phi}(-r - \frac{\Psi}{2})
\end{aligned}
$$

- **Γωνίες Απόκλισης της Ροής:**

$$
\begin{aligned}
\alpha_1 - \alpha_2 &= tan^{-1}\left(\frac{-\Psi\Phi}{\Phi^2 + (1-r)^2 - \frac{\Psi^2}{4}}\right) \\
\beta_2 - \beta_3 &= tan^{-1}\left(\frac{\Psi\Phi}{\Phi^2 + r^2 - \frac{\Psi^2}{4}}\right)
\end{aligned}
$$

Παραδοχές: Va=σταθ. U=σταθ.
Επαναληπτική βαθμίδα

Βαθμίδα Δράσης – Impulse Stage (r=0)



$$r = -\frac{\Phi}{2}\left(\tan\beta_3 + \tan\beta_2\right) \Rightarrow \boxed{\beta_2 = -\beta_3}$$

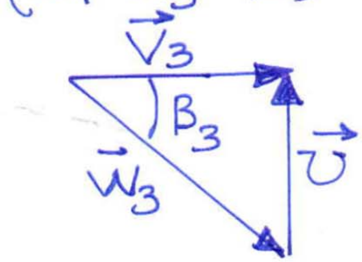
$$\Delta h_t = U\left(V_{u_2} - V_{u_3}\right) = U\left(W_{u_2} - W_{u_3}\right) =$$

$$= U V_a\left(\tan\beta_2 - \tan\beta_3\right) = 2 U V_a \tan\beta_2 =$$

$$= -2 U V_a \tan\beta_3 \Rightarrow \Psi = -2\Phi\tan\beta_3$$

Αν $a_3 = \varnothing$:

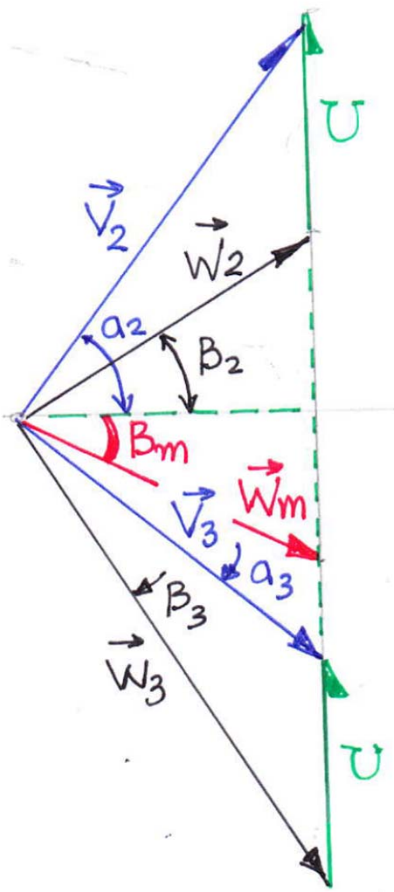
$(a_1 = a_3 = \varnothing)$

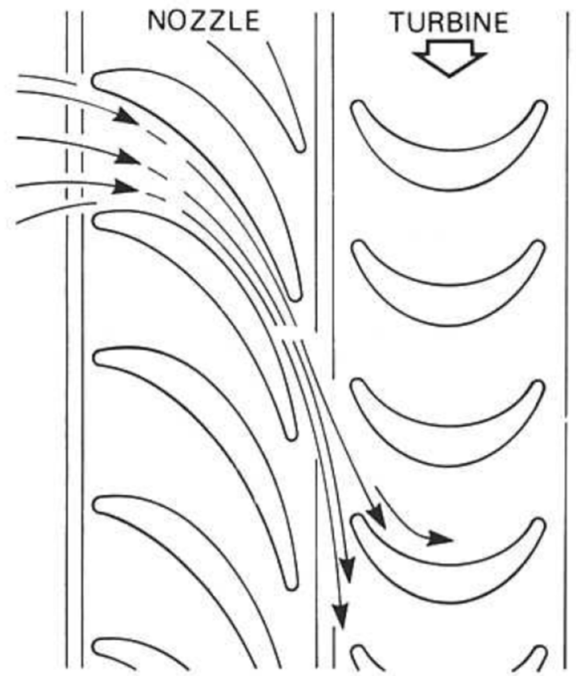


$$\tan\beta_3 = \frac{-U}{V_a} = -\frac{1}{\Phi}$$

$$\Psi = -2\Phi\cdot\left(-\frac{1}{\Phi}\right) = 2$$

Βαθμίδα Δράσης – Impulse Stage (r=0)





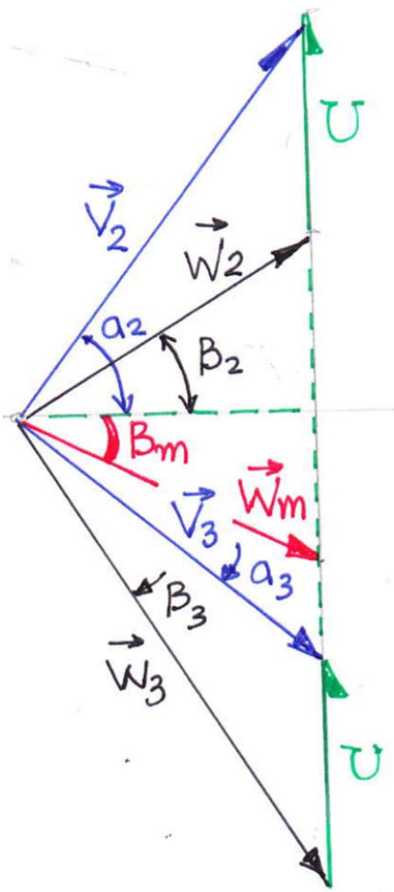
Turbine driven by the impulse of the gas flow only

$$\boxed{\beta_2=-\beta_3}$$

Ισόθλιπτη Βαθμίδα
Ή
Βαθμίδα Laval:

$$r=\frac{h_2-h_3}{h_1-h_3}$$

Βαθμίδα Αντίδρασης 50% – 50% Reaction Stage (r=0.50)



$$r = \frac{1}{2} - \frac{\Phi}{2}(\tan\beta_3 + \tan a_2) = 0 \Rightarrow$$

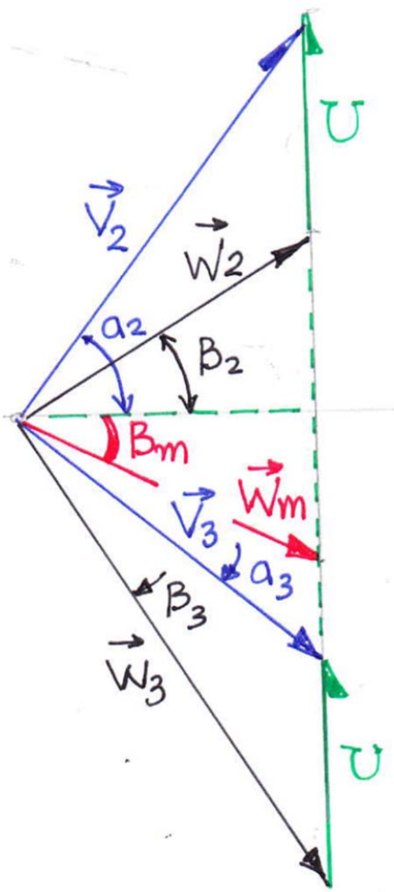
$$\Rightarrow \boxed{a_2 = -\beta_3} \quad \boxed{a_3 = -\beta_2}$$

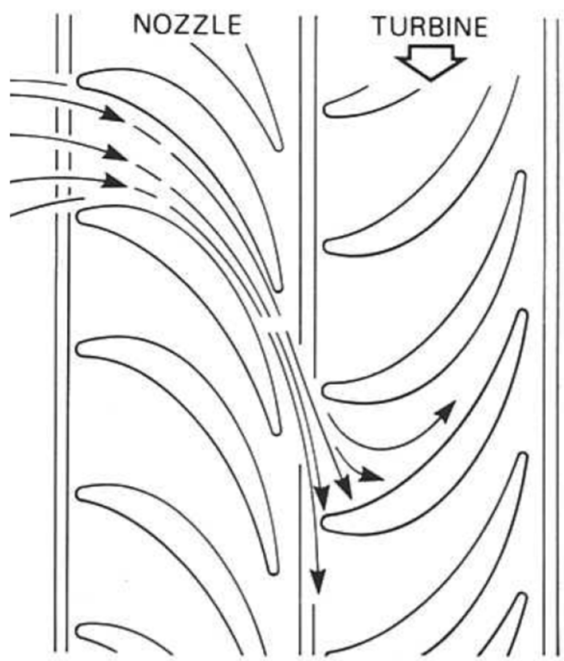
Αν $a_3 = 0$:

$$\tan\beta_3 = -\frac{1}{\Phi} \Rightarrow \tan a_2 = +\frac{1}{\Phi}$$

$$\Psi = \Phi(\tan a_2 - \tan\beta_3) - 1 = \Phi\left(\frac{1}{\Phi} + \frac{1}{\Phi}\right) - 1 = 1$$

Βαθμίδα Αντίδρασης 50% – 50% Reaction Stage (r=0.50)



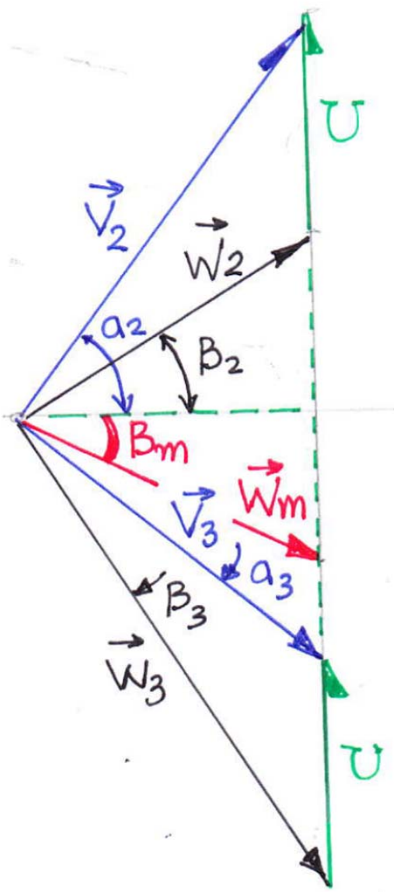


Turbine driven by the impulse of the gas flow and its subsequent reaction as it accelerates through the converging blade passage

$\boxed{a_2 = -\beta_3}$

$\boxed{a_3 = -\beta_2}$

Βαθμίδα Αντίδρασης 100% – 100% Reaction Stage (r=1.0)



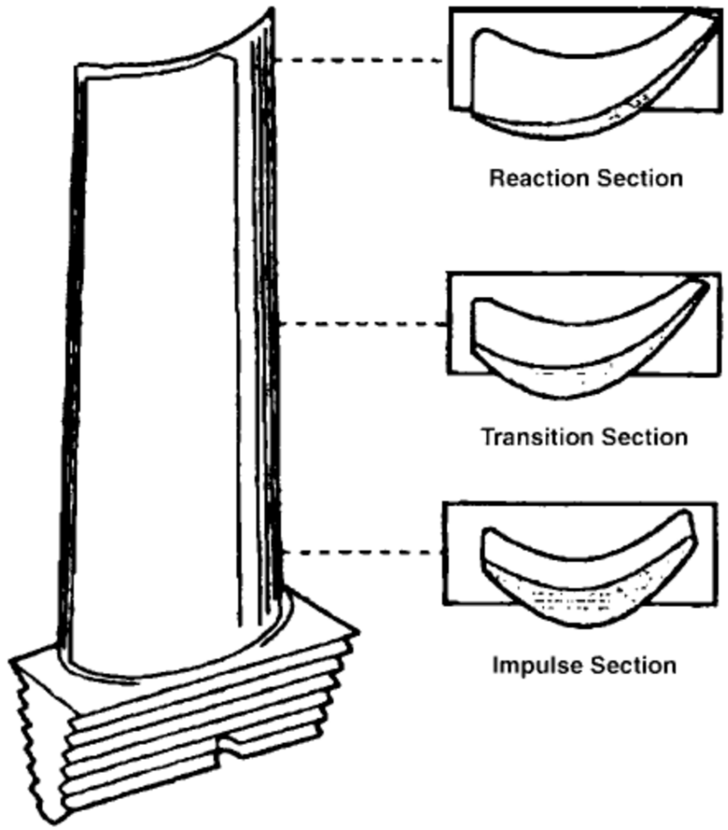
Υπάρχει και εδώ ισοσκελές τρίγωνο και ποιο είναι αυτό;

Άσκηση 22

22. Σε επαναληπτική βαθμίδα αξονικού στροβίλου, σταθερής ακτίνας μονοδιάστατου υπολογισμού και σταθερής αξονικής ταχύτητας, αποδείξτε ότι όταν ο βαθμός αντίδρασης είναι 100% τότε οι περιφερειακές συνιστώσες της απόλυτης ταχύτητας πριν και μετά την περιστρεφόμενη πτερύγωση είναι ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς. Σχεδιάστε τα τρίγωνα ταχύτητας πριν και μετά την περιστρεφόμενη πτερύγωση και ένα σκαρίφημα πτερυγίου της (ενδεχόμενα χωρίς πάχος).

Πίνακας

Typical Reaction-Impulse Turbine Blade



Άσκηση 4

4. Μελετάται βαθμίδα αξονικού στροβίλου που σχεδιάστηκε για σταθερή αξονική ταχύτητα και από την οποία η ροή εξέρχεται αξονικά. Αποδείξτε ότι για μια τέτοια βαθμίδα η σχέση των συντελεστών φόρτισης Ψ και αντίδρασης r είναι γραμμική. Σχεδιάστε το διάγραμμα Ψ=Ψ(r) και με τη βοήθειά του σχολιάστε γνωστές περιπτώσεις (λ.χ. τις περιπτώσεις r=0, r=0,5 ή r=1).

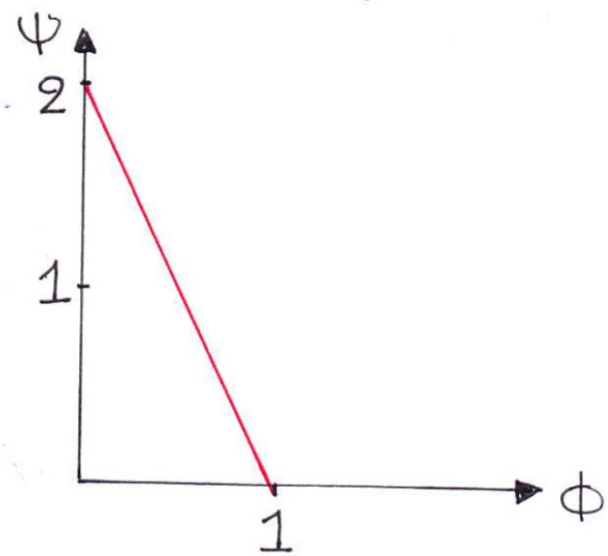
Άσκηση 4

$$\left.\begin{aligned} \Psi &= \Phi\,(\tan a_2 - \tan\beta_3) - 1 \\ r &= \frac{1}{2} - \frac{\Phi}{2}\,(\tan\beta_3 + \tan a_2) \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

$$a_3 = \emptyset \Rightarrow \tan\beta_3 = -\frac{1}{\Phi}$$

$$\Rightarrow \left\{\begin{aligned} \Psi &= \Phi \tan a_2 \\ r &= 1 - \frac{\Phi}{2}\tan a_2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

$$\boxed{\Psi = 2(1-r)}$$



Άσκηση 13

13. Πρόκειται να επιλεγεί βαθμίδα αξονικού στροβίλου, έστω επαναληπτική, για την πραγματοποίηση δεδομένης ενθαλπικής πτώσης, με τον επιπλέον περιορισμό του να έχουμε αξονική απόλυτη ταχύτητα στην έξοδο της βαθμίδας. Υπάρχει η δυνατότητα να επιλεγεί είτε μια βαθμίδα δράσης, είτε μια βαθμίδα με βαθμό αντίδρασης 50%. Να επιλεγεί μία από τις δύο και να δικαιολογηθεί η επιλογή αυτή. Για την επιλογή να χρησιμοποιηθούν οι αρχές μονοδιάστατου υπολογισμού σε σταθερή ακτίνα κατά μήκος του στροβίλου υποθέτοντας σταθερή αξονική συνιστώσα της ταχύτητας σε όλη τη βαθμίδα.

Πίνακας

Άσκηση 18

18. Εφαρμόζονται οι αρχές μονοδιάστατης ανάλυσης σε μια επαναληπτική βαθμίδα αξονικού στροβίλου, σε σταθερή ακτίνα και με σταθερή αξονική ταχύτητα διαμέσου της. Τα πτερύγια είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε, σε καθε σημείο λειτουργίας, να "οδηγούν" τη ροή στην έξοδό τους.

(α) Τι βαθμό αντίδρασης πρέπει να έχει η βαθμίδα ώστε αυτός να μην αλλάζει στα διάφορα σημεία λειτουργίας;

(β) Δώστε δύο προσεκτικά σχεδιασμένα διαγράμματα T-S για βαθμίδα δράσης στροβίλου, σύμφωνα με τούς ορισμούς συμπιεστής και ασυμπίεστης ροής και σχολιάστε τις διαφορές.

(γ) Δώστε ένα πλήρες και προσεκτικά σχεδιασμένο διάγραμμα T-S για βαθμίδα στροβίλου βαθμού αντίδρασης 50%.

(δ) Αν πρόκειται για βαθμίδα με αξονική ροή στην έξοδο, δείξτε ότι για να έχουμε Ψ>2 πρέπει να προκαλέσουμε επιβράδυνση της σχετικής ταχύτητας στο ρότορα.

(ε) Σχεδιάστε τρείς καμπύλες ($\tan a_2$-$\tan \beta_3$)=σταθ. (για τρείς "λογικές" τιμές που μόνοι σας θα διαλέξετε) σε διάγραμμα Ψ=Ψ(Φ) για βαθμίδα στροβίλου. Εξηγείστε το σχήμα που κάνατε.

Πίνακας

Πίνακας

Πίνακας

Άσκηση 15

15. Θεωρούμε τυπική βαθμίδα αξονικού στροβίλου σχεδιασμένη για σταθερή αξονική ταχύτητα διά μέσου της. Θέλουμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του βαθμού απόδοσης ολικών προς στατικές συνθήκες της βαθμίδας, για διάφορες τιμές του συντελεστή παροχής Φ, του συντελεστή φόρτισης Ψ και του βαθμού αντίδρασης r. Στην φάση αυτή της μελέτης η ροή μέσω της βαθμίδας θεωρείται ισεντροπική. Για μονοδιάστατη ανάλυση σε σταθερή ακτίνα R, ζητείται να γίνουν οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

(α) Να εκφρασθεί ο βαθμός απόδοσης ολικών προς στατικές συνθήκες της βαθμίδας ως συνάρτηση αρχικά των σχετικών και απόλυτων ταχυτήτων κατά μήκος της βαθμίδας και στη συνέχεια μόνο των σχετικών και ολικών γωνιών της ροής.

(β) Να εκφρασθεί ο ίδιος βαθμός απόδοσης συναρτήσει των παραμέτρων Φ,Ψ,r της βαθμίδας.

(γ) Αν θεωρηθούν τα Φ,Ψ δεδομένα, να υπολογισθεί ο βαθμός αντίδρασης r_{opt} για τον οποίο έχουμε το μέγιστο βαθμό απόδοσης ολικών προς στατικές συνθήκες και να βρεθεί η αντίστοιχη τιμή του βαθμού απόδοσης. Σχολιάστε το αποτέλεσμα.

Πίνακας

Πίνακας

Πίνακας

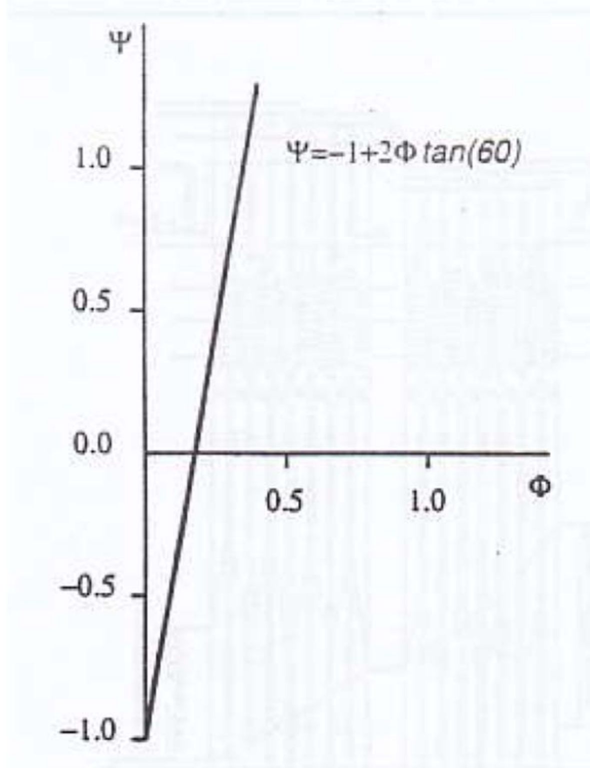
Πίνακας

Αδιάστατες Χαρακτηριστικές Βαθμίδας Αξονικού Στροβίλου

$$\boxed{\Psi = \Phi\,(\tan a_2 - \tan\beta_3) - 1}$$

$$\underbrace{\tan a_2}_{+} \quad \underbrace{\tan\beta_3}_{-}$$

$$\boxed{\Psi = \Phi t - 1\,,\ t > 0}$$



Χαρακτηριστικές Βαθμίδας Αξονικού Στροβίλου

Ανηγμένη Παράμετρος Παροχής:

$$\frac{V_a}{\sqrt{T_{t1}}} \quad \text{αντί του } \Phi$$

Ανηγμένη Παράμετρος Φόρτισης:

$$\frac{\Delta T_t}{T_{t1}} \quad \text{αντί του } \Psi$$

Περιφερειακός Αριθμός Mach:

$$M_u = \frac{\upsilon^2}{\gamma R T_{t1}}$$

Χαρακτηριστικές Βαθμίδας Αξονικού Στροβίλου

$$\Phi = \frac{V_a}{\upsilon} = \frac{V_a}{\sqrt{\gamma R T_{t1}}} \cdot \frac{\sqrt{\gamma R T_{t1}}}{\upsilon} = \frac{1}{\sqrt{\gamma R}} \cdot \frac{V_a}{\sqrt{T_{t1}}} \cdot \frac{1}{M_u}$$

$$\Psi = \frac{c_p \Delta T_t}{\upsilon^2} = \frac{\Delta T_t}{T_{t1}} \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} R \cdot \frac{\gamma R T_{t1}}{\upsilon^2} \cdot \frac{1}{\gamma R} = \frac{\Delta T_t}{T_{t1}} \cdot \frac{1}{\gamma-1} \cdot \frac{\gamma R T_{t1}}{\upsilon^2}$$

Χαρακτηριστικές Βαθμίδας Αξονικού Στροβίλου

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

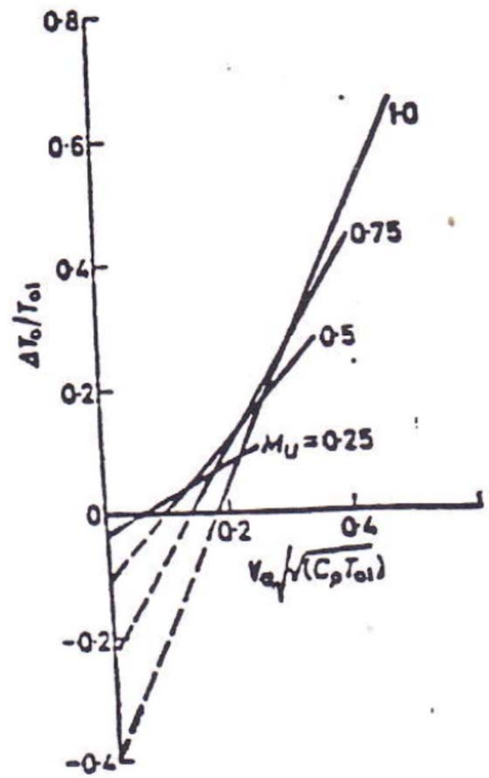
$$\Rightarrow \quad \underbrace{\frac{\Delta T_t}{T_{t1}}}_{\text{ΦΟΡΤΙΣΗ}} = \left\{\frac{\gamma-1}{\sqrt{\gamma R}} \underbrace{M_u}_{\text{ΣΤΡΟΦΕΣ}} \frac{\Psi_d}{\Phi_d}\left(1+\frac{1}{\Psi_d}\right)\right\} \underbrace{\frac{V_a}{\sqrt{T_{t1}}}}_{\text{ΠΑΡΟΧΗ}} - (\gamma-1)\underbrace{M_u^2}_{\text{ΣΤΡΟΦΕΣ}}$$

$$\frac{\Delta T_t}{T_{t1}} = A(N)\frac{V_a}{\sqrt{T_{t1}}} + B(N) \qquad\qquad \frac{\Delta T_t}{T_{t1}} = A'(N)\dot{m} + B(N)$$

Χαρακτηριστικές Βαθμίδας Αξονικού Στροβίλου

$$\frac{\Delta T_t}{T_{t1}} = A(N)\frac{V_a}{\sqrt{T_{t1}}} + B(N)$$

$$\frac{\Delta T_t}{T_{t1}} = A'(N)\dot{m} + B(N)$$



Χαρακτηριστικές Βαθμίδας Αξονικού Στροβίλου

$$\frac{\Delta T_t}{T_{t1}} = A(N)\frac{V_a}{\sqrt{T_{t1}}} + B(N) \qquad \frac{\Delta T_t}{T_{t1}} = A'(N)\dot{m} + B(N)$$

$$\frac{\Delta T_t}{T_{t1}} = \frac{\eta_{is,T}\,\Delta T_t'}{T_{t1}} \quad , \quad \frac{T_{t3}'}{T_{t1}} = \left(\frac{P_{t3}}{P_{t1}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{1}{\pi_T}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\boxed{\eta_{t-t,T} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{1}{\pi_T}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\} = A'(N)\,\dot{m} + B(N)}$$

Χαρακτηριστικές Βαθμίδας Αξονικού Στροβίλου

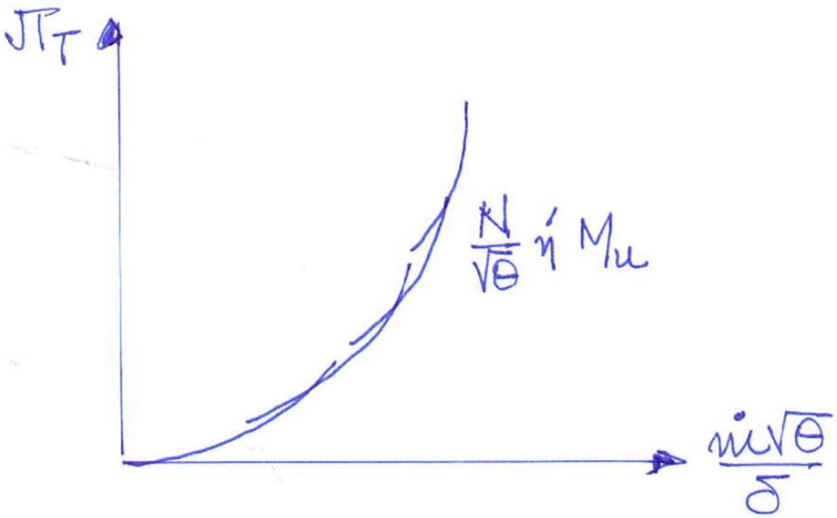
$$\sqrt{\theta} = \frac{\sqrt{\gamma R T_{t1}}}{340{,}2\ m/s}$$

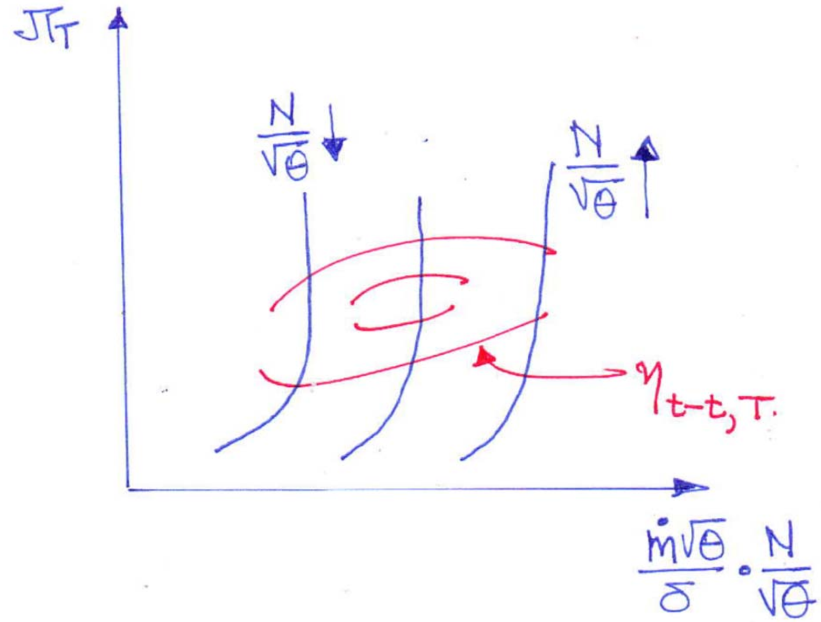
$$\delta = \frac{P_{t1}}{1{,}0332\times10^5\ Pa}$$

$$\sqrt{\theta} = \sqrt{\frac{T_{t1}}{T_{REF}}}$$

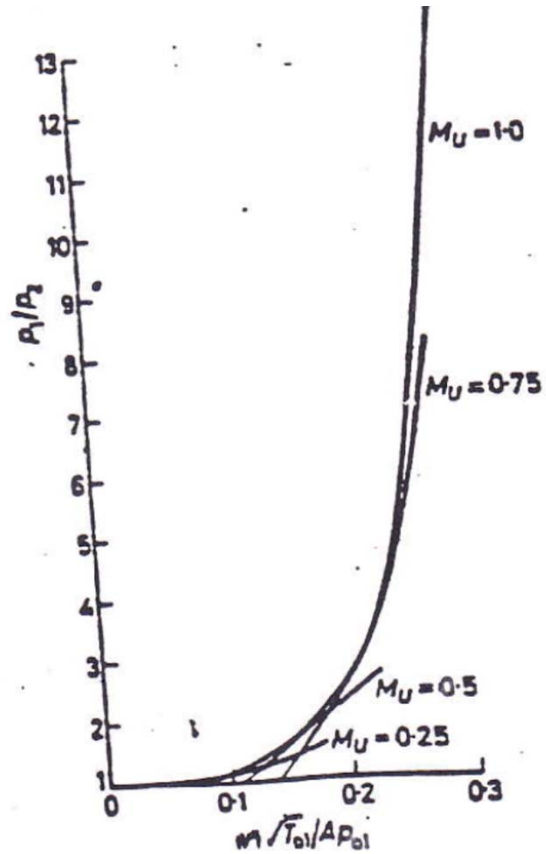
$$\delta = \frac{P_{t1}}{P_{REF}}$$

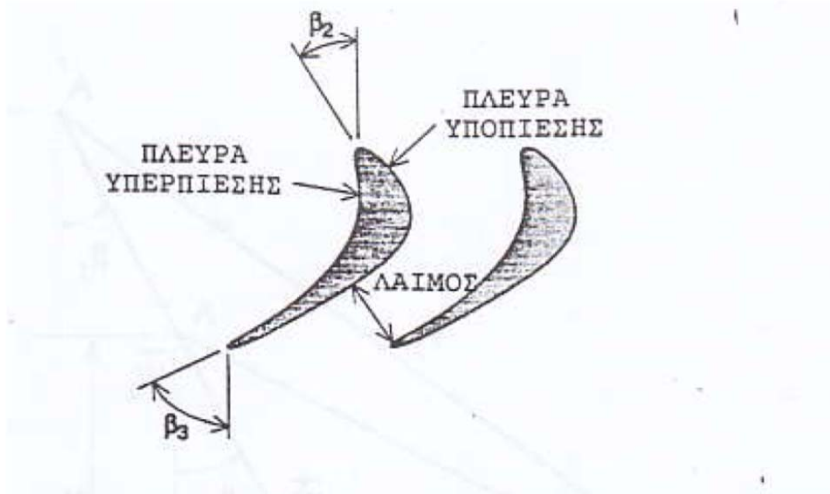
Χαρακτηριστικές Βαθμίδας Αξονικού Στροβίλου





Χαρακτηριστικές Βαθμίδας Αξονικού Στροβίλου





Δημιουργία ηχητικού λαιμού σε πτερύγωση αξονικού στροβίλου.

Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- **Θεωρητική Αδιάστατη Χαρακτηριστική Αξονικού Στρόβιλου:**

  Αν (d) συμβολίζει λειτουργία στο σημείο σχεδιασμού, ισχύει $\frac{\Psi}{\Psi_d}=\frac{\Phi}{\Phi_d}(1+\frac{1}{\Psi_d})-\frac{1}{\Psi_d}$ αν και μόνο αν $tan\alpha_2 - tan\beta_3$ = σταθερό για 'λογικές' αλλαγές του σημείου λειτουργίας.

- **Ανηγμένες Παράμετροι Παροχής και Φόρτισης:**

  Ανηγμένη Παράμετρος Παροχής $=\frac{V_\alpha}{\sqrt{T_{t1}}}$, με

  $$\Phi=\frac{1}{\sqrt{\gamma R}}\cdot\frac{V_\alpha}{\sqrt{T_{t1}}}\cdot\frac{1}{M_u}$$

  όπου $M_u^2=\frac{U^2}{\gamma R T_{t1}}$

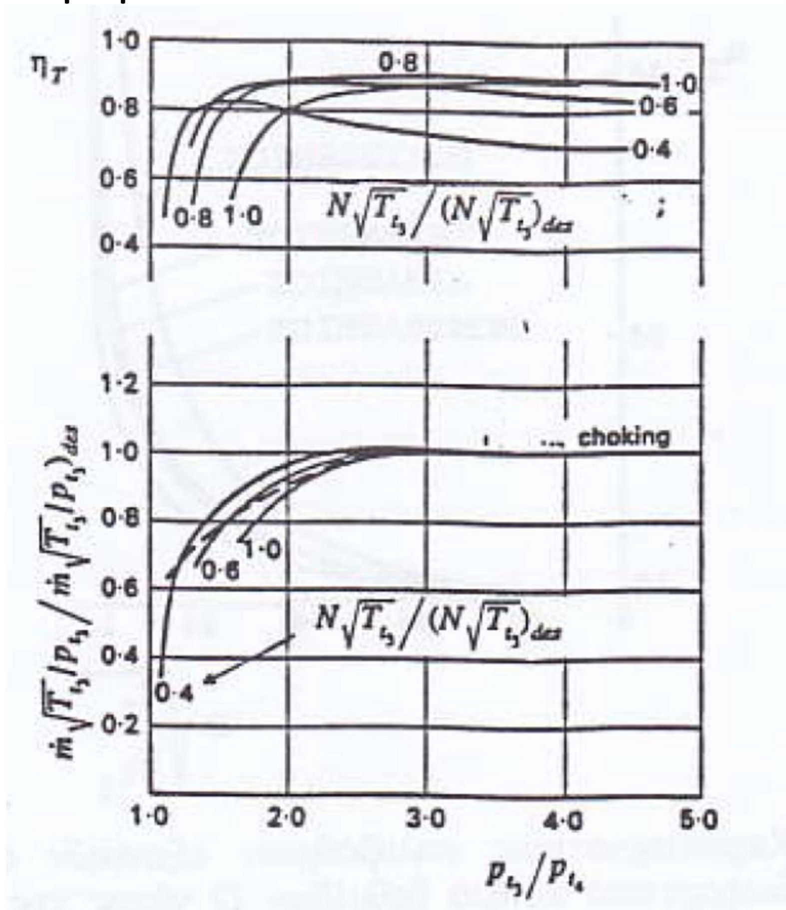
  Ανηγμένη Παράμετρος Φόρτισης $=\frac{\Delta T_t}{T_{t1}}$, με

  $$\Psi=\frac{\Delta T_t}{T_{t1}}\cdot\frac{1}{\gamma-1}\cdot\frac{\gamma R T_{t1}}{U^2}$$

Χαρακτηριστικές Πολυβάθμιου Αξονικού Στροβίλου

Η Έλλειψη του Stodola:

$$\dot{m} = K\sqrt{1-\left(\frac{P_{OUT}}{P_{IN}}\right)^2}$$



Παραπομπή στο Τυπολόγιο

- **Ανηγμένη Χαρακτηριστική:**

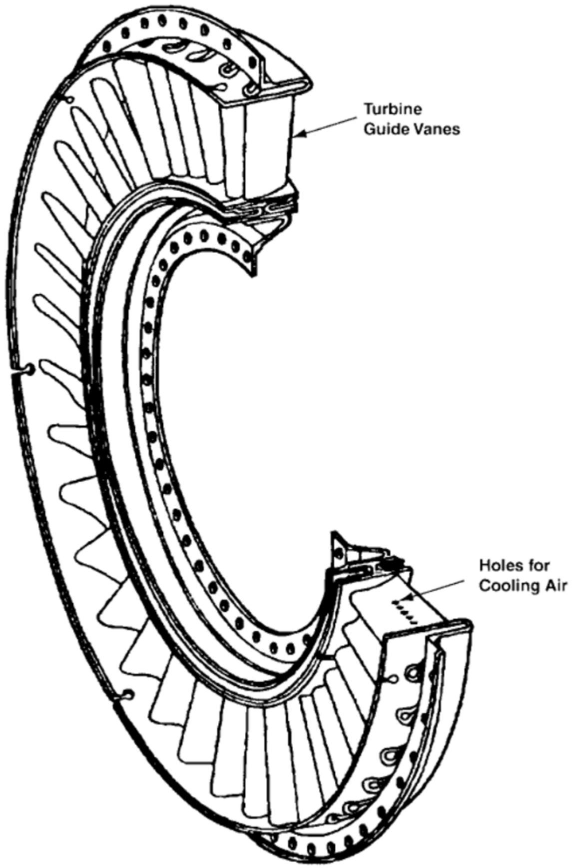
$$\frac{\Delta T_t}{T_{t1}} = \left(\frac{\gamma - 1}{\sqrt{\gamma R}} M_u \frac{\Psi_d}{\Phi_d}(1 + \frac{1}{\Psi_d})\right) \frac{V_\alpha}{\sqrt{T_{t1}}} -(\gamma - 1) M_u^2$$

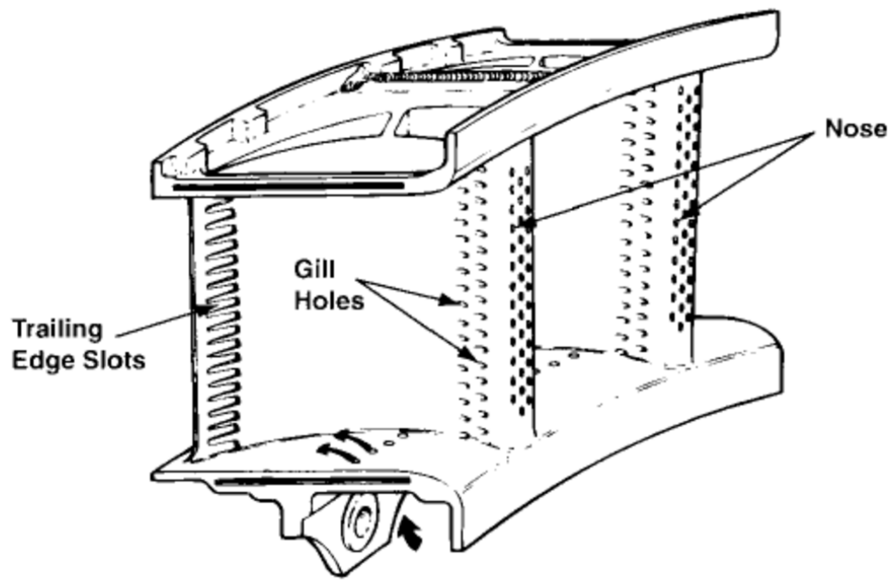
- **Χαρακτηριστική Πολυβάθμιου Στρόβιλου:**

  Η έλλειψη του Stodola:

$$\frac{\dot{m}\sqrt{T_{t1}}}{p_{t1}} = k\left(1 - \left(\frac{P_{t,out}}{P_{t,in}}\right)^2\right)^{1/2}$$

Αξονικός Στρόβιλος





Πίνακας

Άσκηση 30

30. Μελετάμε επαναληπτική βαθμίδα αξονικού στροβίλου, βαθμού αντίδρασης 50%, με σταθερή την αξονική συνιστώσα της ταχύτητας δια μέσου της και σταθερή τη γραμμική ταχύτητα περιστροφής.

(α) Γιατί όλα τα σημεία λειτουργίας (Φ,Ψ) της βαθμίδας τα οποία αντιστοιχούν σε σταθερή γωνία β_2 παριστούν μια γραμμή στο διάγραμμα Φ-Ψ;

(β) Ποιά είναι η εξίσωση αυτής της γραμμής;

(γ) Σχεδιάστε (με σχετική ακρίβεια) τρείς τέτοιες γραμμές που να αντιστοιχούν σε λογικές τιμές της γωνίας β_2. Κάθε γραμμή ας σχεδιαστεί με τρία σημεία της. Οι τρεις τιμές β_2 πρέπει να επιλεγούν στο πιθανό εύρος τιμών της β_2 για μια τέτοια βαθμίδα. Η επιλογή σας αυτή βαθμολογείται ιδιαίτερα. Για τη διευκόλυνσή σας, το διάγραμμα να έχει οριζόντιο άξονα το Φ (με όρια από 0,40 ως 1,20) και κατακόρυφο το Ψ (με όρια από 0,50 ως 3,00).

Πίνακας

Πίνακας

Πίνακας

Πίνακας

Πίνακας

Άσκηση 27

27. Μελετάται μονοδιάστατα και σε σταθερή ακτίνα (γραμμική ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων 295 m/sec) μια βαθμίδα αξονικού στροβίλου που λειτουργεί με αέρα $\left(p_{t1}=5\,\text{bar}, T_{t1}=920\,\text{K}\right)$ έχοντας σταθερή αξονική ταχύτητα 140 m/sec διαμέσου της. Η απώλεια ολικής πίεσης στη σταθερή πτερύγωση είναι 3.6% της ολικής πίεσης εισόδου. Στην έξοδο της σταθερής πτερύγωσης (θέση 2), ή στατική πίεση είναι 3.45 bar. Η στατική θερμοκρασία στην έξοδο της κινητής πτερύγωσης (θέση 3) είναι 762 K και ισχύει

$$T_{t2} - T_{t2'} = T_{t3} - T_{t3'}$$

όπου

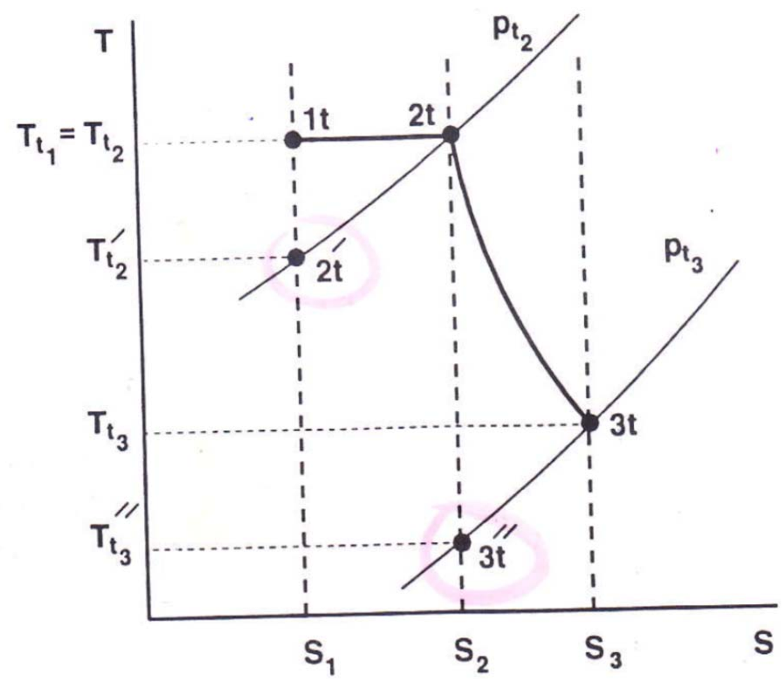
$T_{t2''}$ η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην ισόθλιπτη p_{t2} και την εντροπία της θέσης 1

$T_{t3''}$ η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην ισόθλιπτη p_{t3} και την εντροπία της θέσης 2.

(α) Σχεδιάστε το διάγραμμα $T-S$, δείχνοντας ολικά μεγέθη και τις $T_{t2'}$, $T_{t3''}$.

(β) Υπολογίστε τα υπόλοιπα θερμοδυναμικά μεγέθη (στατικές και ολικές πιέσεις και θερμοκρασίες) και τα τρίγωνα ταχυτήτων στις θέσεις 2 και 3, τα οποία και να σχεδιάσετε. (Θα χρειασθεί ενδεχομένως να αποφασίσετε μόνοι σας για το πρόσημο κάποιων γωνιών ροής. Δικαιολογήστε κάθε επιλογή σας).

Πίνακας



Πίνακας

Πίνακας

Πίνακας

Πίνακας

Άσκηση 6

6. Σε βαθμίδα αξονικού στροβίλου, μηδενικού βαθμού αντίδρασης, έχουν μετρηθεί τα παρακάτω στοιχεία:

Ολική πίεση εισόδου σταθερής πτερύγωσης	:	414 kPa
Ολική πίεση εξόδου σταθερής πτερύγωσης	:	400 kPa
Στατική πίεση εξόδου σταθερής πτερύγωσης	:	207 kPa
Στατική πίεση εξόδου κινητής πτερύγωσης	:	200 kPa

Η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων στη μέση γραμμή είναι σταθερή και ίση με 291 m/s και η ολική θερμοκρασία εισόδου στη βαθμίδα είναι 1.100 K. Η γωνία εξόδου από τα σταθερά πτερύγια είναι 70° και η βαθμίδα είναι σχεδιασμένη για σταθερή αξονική ταχύτητα. Θεωρώντας ότι οι ταχύτητες εισόδου και εξόδου από τη βαθμίδα είναι διανυσματικά ίδιες, υπολογίστε το βαθμό απόδοσης ολικών-προς-ολικές συνθήκες της βαθμίδας και τα στοιχεία των τριγώνων ταχυτήτων στην είσοδο και την έξοδο της κινητής πτερύγωσης.

Το εργαζόμενο μέσο θεωρείται τέλειο αέριο με C_p=1.148 m^2/s^2K, γ=1,333.

Πίνακας

Πίνακας

Πίνακας

Πίνακας

Πίνακας

Πίνακας

Πίνακας