

**ΟΙ ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ
/ ΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

8	ΟΙ ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ / ΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ	8.2
8.1	ΤΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ	8.2
8.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ	8.2
8.3	ΑΠΟΔΟΣΗ ΕΚΤΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	8.5
8.4	ΣΥΜΑΒΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	8.8

ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ / ΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ

8.1 ΤΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ (Stodola (1945), Hawthorne and Olson (1960), Horlock (1973), Dixon (1978), Cohen et al (1972), Boyce (2002))

Ο στρόβιλος και ο συμπιεστής των σύγχρονων αεριοστροβίλων είναι, ως επί το πλείστον, αξονικής μορφής και τα βασικά τους εξαρτήματα φαίνονται στο σχήμα 8.1.

Τόσο ο συμπιεστής όσο και ο στρόβιλος αποτελούνται από έναν αριθμό βαθμίδων (stages). Η κάθε βαθμίδα περιλαμβάνει μια σειρά περιστρεφόμενων πτερυγίων (blades), προσδεδεμένων επάνω στο δίσκο (disc) ή το τύμπανο (drum), και μια σειρά ακίνητων πτερυγίων προσδεδεμένων στο διάφραγμα (diaphragm). Οι δίσκοι ή το τύμπανο συνδέονται με τον άξονα, ο οποίος στηρίζεται σε δυο τουλάχιστον έδρανα (bearings). Ο άξονας (shaft) είναι είτε συμπαγής είτε κοίλος. Συνήθως το τύμπανο έχει μορφή άξονα με μεγάλη διάμετρο που αποτελείται από λεπτό κέλυφος. Μεταξύ των άκρων του διαφράγματος και του τυμπάνου (δίσκων) τοποθετούνται ελαστικές ασφάλειες (παρεμβύσματα - seals), συνήθως τύπου λαβύρινθου (labyrinth).

Στη βαθμίδα του (αξονικού) συμπιεστή η σειρά είναι ρότορας (rotor)-στάτορας (stator). Επειδή δε, η πρώτη σειρά πτερυγίων είναι ακίνητη (συνήθως) αυτή αποτελεί ειδική κατηγορία πτερυγίων, τα οδηγία πτερύγια (Inlet Guide Vanes - I.G.V.).

Στη βαθμίδα του (αξονικού) στρόβιλου η σειρά είναι στάτορας (stator-S) - ρότορας (rotor-R). Σε μερικούς στρόβιλους, μετά το τελευταίο στροφείο υπάρχει σειρά ακίνητων πτερυγίων, τα πτερύγια ευθυγράμμισης ροής (flow straightening blades).

Στο συμπιεστή, κυρίως στο τμήμα υψηλής πίεσης, υπάρχει ειδικό σύστημα αναρρόφησης αέρα με βαλβίδα ελέγχου της παροχής (bleed valve). Το μεγαλύτερο ποσοστό του αέρα αυτού χρησιμοποιείται για τη ψύξη των πτερυγίων, δίσκων και τοιχωμάτων του στρόβιλου.

8.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ (Stodola (1945), Hawthorne and Olson (1960), Horlock (1973), Dixon (1978), Cohen et al (1972), Boyce (2002))

Η πιο απλή μέθοδος ανάλυσης μιας βαθμίδας στρόβιλου/συμπιεστή είναι αυτή της μέσης γραμμής (Mean Line ή Pitch Line Flow Analysis, όπως έχει προαναφερθεί στα κεφάλαια 5 και 6). Εδώ γίνεται η βασική υπόθεση ότι οι συνθήκες ροής που υπάρχουν στο μέσο ύψος, r_m , των πτερυγίων είναι όμοιες με αυτές σε όλο το μήκος της ακτίνας. Η υπόθεση αυτή προσεγγίζει βέβαια την πραγματικότητα για μικρές τιμές του λόγου (h_B/r_m), όπου h_B είναι το ύψος των πτερυγίων και r_m η ακτίνα στο μέσο ύψος των πτερυγίων. Η αρχική αυτή ανάλυση διερευνά τη μορφή των διαφόρων γωνιών, των μεγεθών των διαφόρων ταχυτήτων και το βαθμό αντίδρασης της βαθμίδας.

Τυπικές μορφές τριγώνων ταχυτήτων για βαθμίδες στρόβιλου και συμπιεστή, με τις αντίστοιχες ονοματολογίες, φαίνονται στο σχήμα 8.2. Όπως φαίνεται και στο σχήμα αυτό, στο στρόβιλο οι συνθήκες 1 και 2 αφορούν τα ακίνητα πτερύγια και οι 2-3 τα κινητά. Για το συμπιεστή, αντίθετα, οι 1-2 αφορούν τα κινητά πτερύγια και οι 2-3 τα ακίνητα. Οι γωνίες α είναι οι απόλυτες (αυτές δηλαδή μεταξύ της απόλυτης ταχύτητας \vec{C} (ή των συνιστωσών της) και της αξονικής διεύθυνσης), ενώ οι γωνίες β είναι οι σχετικές (δηλαδή μεταξύ της σχετικής ταχύτητας \vec{w} (ή των συνιστωσών της) και της αξονικής διεύθυνσης). Εδώ, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην ανάλυση της μέσης γραμμής συνηθίζεται η ταχύτητα του ρευστού να συμβολίζεται με το γράμμα C με συνιστώσες C_x , C_y στους άξονες x , y . Εν γένει, χρησιμοποιούμε τη σχέση $C_{1x} = C_{2x} = C_{3x} = w_{1x} = w_{2x} = w_{3x}$ όπου υποτίθεται ότι η αξονική συνιστώσα της ταχύτητας παραμένει σταθερή.

Η πιο σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει τη βαθμίδα είναι ο βαθμός ή λόγος ή συντελεστής αντίδρασης (degree of reaction ή reaction ratio ή reaction coefficient) R .

Για την ονοματολογία του στρόβιλου, ο βαθμός αντίδρασης ορίζεται ως εξής :

$$R = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} \quad [8.1]$$

δηλαδή είναι ο λόγος της πτώσης της στατικής ενθαλπίας στα πτερύγια του στροφείου σε σχέση με την ολική πτώση της στατικής ενθαλπίας στη βαθμίδα. Σε συνάρτηση με τις ταχύτητες και τις γωνίες έχουμε:

$$R = \frac{h_2 - h_3}{H_1 - H_3} \quad (\alpha \nu C_1 = C_3)$$

$$= \frac{w_{3rel}^2 - w_{2rel}^2}{2U_p(C_{y2} + C_{y3})} \quad (\alpha \phi \omicron \upsilon h_2 - h_3 = \frac{1}{2}(w_{3rel}^2 - w_{2rel}^2))$$
[8.2]

Αν δε, υποθέσουμε ότι η C_x είναι σταθερή και αναλύσουμε τη διαφορά των τετραγώνων έχουμε ότι:

$$R = \frac{h_2 - h_3}{h_{01} - h_{03}} = \frac{W_{3rel}^2 - W_{2rel}^2}{2U_p(C_{y2} + C_{y3})} = \frac{W_{y3} - W_{y2}}{2U_p}$$

$$= \frac{C_x}{2U_p} (\tan \beta_3 - \tan \beta_2) = \frac{\Phi}{2} (\tan \beta_3 - \tan \beta_2)$$
[8.3]

Οι αντίστοιχες σχέσεις για την ονοματολογία του συμπιεστή έχουν ως εξής:

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

$$= \frac{w_{1rel}^2 - w_{2rel}^2}{2U_p(C_{y2} - C_{y1})} \quad (\gamma \iota \alpha C_1 = C_3)$$
[8.4]

ή

$$R \approx \frac{W_{1rel}^2 - W_{2rel}^2}{2U_p(C_{y2} - C_{y1})} = \frac{(W_{y1} + W_{y2})(W_{y1} - W_{y2})}{2U_p(C_{y2} - C_{y1})} \quad \eta$$

$$R = 1 - \frac{C_x}{2U_p} (\tan \alpha_2 + \tan \alpha_1) = \frac{C_x}{2U_p} (\tan \beta_1 + \tan \beta_2)$$
[8.5]

Η επίδραση του βαθμού αντίδρασης στα περύγια συμπιεστή και στροβίλου, για $R = 0$, 0.5 και 1 φαίνεται στο σχήμα 8.3.

Όταν $R = 0$ η βαθμίδα αποκαλείται και βαθμίδα ώσης (Impulse stage). Εδώ, όλη η

πτώση σε στατική ενθαλπία εμφανίζεται στα ακίνητα πτερύγια. Στα πτερύγια του στροφείου τότε, η ολική ταχύτητα παραμένει σταθερή και απλώς μεταβάλλεται η διεύθυνσή της. Η συσχέτιση των διανυσμάτων των ταχυτήτων και η αντίστοιχη μορφή του σχετικού διαγράμματος Mollier (H-S) φαίνονται στο σχήμα 8.4. Εδώ, έχει υποτεθεί ότι $\beta_2 = \beta_3$. Τα αντίστοιχα διαγράμματα για βαθμίδα στρόβιλου με $R = 0.5$ και $R = 1.0$ φαίνονται στο σχήμα 8.5. Η τάση των μεταβολών στα τρίγωνα ταχυτήτων σε βαθμίδα συμπιεστή γύρω από την τιμή $R = 0.5$ φαίνεται στο σχήμα 8.6.

Από πλευράς εφαρμογών, η εκλογή του κατάλληλου βαθμού αντίδρασης, συνήθως μας δίνει τις παρακάτω λύσεις:

(α) Για Συμπιεστές

Σε πτερυγώσεις με υποηχητική ροή η πιο συνήθης τιμή είναι $0.5 \leq R \leq 0.6$ στην ακτίνα του μέσου ύψους. Σε πτερυγώσεις με διηχητική ή υπερηχητική ροή ο βαθμός αντίδρασης έχει κάπως μεγαλύτερη τιμή.

(β) Για Στρόβιλους

Η πιο συνήθης λύση είναι $R \approx 0.5$ στην ακτίνα του μέσου ύψους.

8.3 ΑΠΟΔΟΣΗ ΕΚΤΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η συμπεριφορά της βαθμίδας, σε συνθήκες λειτουργίας μακριά από το σημείο σχεδιασμού (design point), είναι μεγάλης σπουδαιότητας, ιδίως για τους αεροπορικούς κινητήρες που εργάζονται σε μεγάλο εύρος συνθηκών.

Η πιο απλή εκτίμηση της απόδοσης εκτός σημείου σχεδιασμού (off-design performance) έχει δοθεί από τον Horlock (1973). Η βάση της μεθόδου αυτής έγκειται στο γεγονός ότι τα πειραματικά στοιχεία των πτερυγώσεων μας λένουν ότι οι γωνίες εξόδου αυτών δεν επηρεάζονται δραστικά (τουλάχιστον για μια ευρεία περιοχή) από τις μεταβολές της γωνίας πρόσπτωσης. Στην ονοματολογία του συμπιεστή αυτό σημαίνει ότι $\tan \alpha_3 + \tan \beta_2 \approx t = \text{σταθερά}$. Τώρα, αν ονομάσουμε τους συντελεστές ροής Φ (flow coefficient) και φόρτισης βαθμίδας Ψ (stage loading coefficient) ως:

$$\Psi = \frac{h_{03} - h_{01}}{0.5 \cdot U_p^2} = \frac{c_p \Delta T_{0, \text{stage}}}{0.5 \cdot U_p^2} = \frac{C_{y2} - C_{y1}}{0.5 \cdot U_p} = \frac{2C_x}{U_p} (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1)$$

και

$$\Phi = \frac{C_x}{U_p} \tag{8.6}$$

έχουμε :

$$\Psi = 1 - \Phi (\tan \alpha_1 + \tan \beta_2) \quad [8.7]$$

Αλλά, συνήθως $\alpha_1 = \alpha_3$, οπότε:

$$\Psi = 1 - \Phi (\tan \alpha_1 + \tan \beta_2) = 1 - \Phi (\tan \alpha_3 + \tan \beta_2) = 1 - \Phi \cdot t \quad [8.8]$$

Αν ψ_d , ϕ_d είναι οι αντίστοιχες τιμές στο σημείο σχεδιασμού, τότε έχουμε:

$$\frac{\psi}{\psi_d} = \frac{1}{\psi_d} - \frac{\phi}{\phi_d} \left[\frac{1 - \psi_d}{\psi_d} \right] \quad [8.9]$$

Η σχέση αυτή φαίνεται στο σχήμα 8.7.

Για βαθμίδες, λοιπόν, με μεγάλη φόρτιση ($\psi_d \rightarrow 1$) η φόρτιση ψ μεταβάλλεται έντονα με τις μεταβολές του ϕ . Το αντίθετο συμβαίνει για ελαφρά φορτισμένες βαθμίδες. Τυπικές τιμές του ψ_d είναι γύρω στο $0.3 \leq \psi_d \leq 0.4$.

Η μέθοδος αυτή έχει επεκταθεί από τον Horlock (1973) με βάση τις ιδέες του Mellor. Στην επέκταση αυτή θεωρούμε τον συμπιεστή ότι απαρτίζεται από ένα άθροισμα μικρών επιμέρους συμπιεστών που επιφέρουν ένα μικρό ποσοστό αύξησης στην πίεση και στη θερμοκρασία του εργαζόμενου ρευστού. Αν dT είναι η αύξηση της θερμοκρασίας, τότε:

$$\begin{aligned} \frac{\psi}{\psi_d} &= \left(\frac{U_{pd}}{U_p} \right)^2 \frac{dT}{dT_d} = \frac{1}{\psi_d} - \left[\frac{1 - \psi_d}{\psi_d} \right] \frac{\phi}{\phi_d} = \\ &= \frac{1}{\psi_d} - \left[\frac{1 - \psi_d}{\psi_d} \right] \frac{C_x}{C_{xd}} \frac{U_{pd}}{U_p} \end{aligned} \quad [8.10]$$

Αν, λοιπόν, ο λόγος των περιστροφικών ταχυτήτων (U_p/U_{pd}) και των μαζικών παροχών, $\dot{m}/\dot{m}_{ad} = C_{x1}/C_{xd}$, προσδιορίζονται, (το σημείο 1 υποδηλώνει συνθήκες στην

είσοδο του συμπιεστή) έχουμε:

$$C_{x1d} A_1 \rho_{1d} = C_{xd} A \rho_d, \quad C_{x1} A_1 \rho_{1d} = C_x A \rho \quad [8.11]$$

και

$$\frac{C_x}{C_{x1}} = \frac{C_{x1}}{C_{x1d}} \cdot \frac{\rho_d}{\rho} \quad [8.12]$$

Θεωρούμε την διεργασία αδιαβατική, οπότε με χρήση του πολυτροπικού βαθμού απόδοσης (η_p) έχουμε:

$$\frac{\rho}{\rho_d} = \left(\frac{T}{T_d} \right)^\eta, \quad \eta = \frac{\gamma}{\gamma-1} \eta_p \quad [8.13]$$

και

$$\frac{C_x}{C_{xd}} = \frac{m_\alpha}{m_{\alpha d}} \left(\frac{T_d}{T} \right)^\eta \quad [8.14]$$

Τώρα, από την αρχική σχέση, έχουμε:

$$\frac{dT}{dT_d} = A + B \left(\frac{T_d}{T} \right)^{n_p} \quad [8.15]$$

όπου:

$$A = \frac{1}{\psi_d} \left(\frac{U_p}{U_{pd}} \right)^2 \quad [8.16]$$

και

$$B = \left[\frac{\psi_d - 1}{\psi_d} \right] \left(\frac{m_\alpha}{m_{cd}} \right) \left(\frac{U_p}{U_{pd}} \right) \quad [8.17]$$

Αν ο λόγος T/T_d είναι μικρός, μπορούμε να θέσουμε $T / T_d = 1 + \varepsilon$ και ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση να πάρουμε το λόγο :

$$\frac{T_2}{T_{2d}} = 1 + \varepsilon_2 \quad [8.18]$$

όπου T_2 είναι η θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή. Έχουμε τότε:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{T_2}{T_{2d}} \right) \left(\frac{T_{2d}}{T_1} \right) = \left(\frac{T_{2d}}{T_1} \right) (1 + \varepsilon_2) \quad [8.19]$$

και εφόσον η διεργασία είναι αδιαβατική μπορούμε να εκφράσουμε το νέο λόγο πιέσεων ως:

$$r_c = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{2d}}{P_1} (1 + \varepsilon_2)^{1+\eta} = r_{cd} (1 + \varepsilon_2)^{1+\eta} \quad [8.20]$$

Σύγκριση μεταξύ αποτελεσμάτων της μεθόδου και πειραματικών δεδομένων φαίνεται στο σχήμα 8.8.

8.4 ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Η συνήθης διαδικασία σχεδιασμού μιας βαθμίδας συμπιεστή ή στροβίλου περιλαμβάνει διάφορα στάδια. Τα πιο χαρακτηριστικά από αυτά είναι:

- (α) Ανάλυση θερμοδυναμικού κύκλου, για τον προσδιορισμό των τιμών ολικής πίεσης, θερμοκρασίας, μαζικής παροχής κλπ.

- (β) Ανάλυση "μέσης γραμμής", για τον υπολογισμό των ταχυτήτων στο μέσο ύψος των πτερυγίων
- (γ) Ανάλυση ροικών γραμμών (streamline analysis), για τον υπολογισμό των πεδίων ροής στο μεσημβρινό επίπεδο και στις διάφορες πτερυγώσεις
- (δ) Λεπτομερής ανάλυση για τριδιάστατα φαινόμενα ροής, αντοχή σε κόπωση, κραδασμούς, ποιότητα μηχανουργικής επεξεργασίας υλικών κλπ.

Σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις, ο σχεδιαστής, αφενός, πρέπει να ικανοποιήσει τις εξισώσεις της μηχανικής και της θερμοδυναμικής, αφετέρου όμως, είναι ελεύθερος να κάνει ανεξάρτητα την εκλογή των τιμών μερικών παραμέτρων που επηρεάζουν άμεσα τη λειτουργική απόδοση και συμπεριφορά του συστήματος. Οι πιο συνήθεις παράμετροι ελεύθερης εκλογής, και οι περιοχές των τιμών που χρησιμοποιούν σήμερα οι κατασκευαστές κινητήρων, για συμπιεστές και στρόβιλους, έχουν ως εξής :

(i) Συμπιεστής

Οι συνήθεις ελεύθερες μεταβλητές είναι:

(α) Τα χαρακτηριστικά των αεροτομών

Ο λόγος (μέγιστου πάχους)/(μήκους χορδής) είναι $0.1 \leq t/c \leq 0.15$ και αναφέρεται περίπου στο 30% του μήκους της χορδής (από το χείλος προσβολής). Για υπερηχητικές αεροτομές χρησιμοποιούνται δυο κυκλικά τόξα για την κυρτή και την κοίλη πλευρά.

Η θέση μέγιστης απόκλισης της μέσης γραμμής καμπυλότητας από τη γραμμή της χορδής λαμβάνεται μεταξύ 40% και 60% του μήκους της χορδής (από το χείλος προσβολής). Η τιμή αυτή του λόγου (a/c) επηρεάζει άμεσα τις απώλειες λόγω πάχους οριακού στρώματος. Για $a/c \approx 0.4$ τα πτερύγια υφίστανται μικρότερη επιρροή από τις μεταβολές στη γωνία πρόσπτωσης και έχουν μεγαλύτερο διάκενο στο "λαιμό" και, επομένως, επιτρέπουν να περάσει μεγαλύτερη μαζική παροχή, κάτι που ωφελεί τη ροή στις επόμενες βαθμίδες. Για $a/c \approx 0.6$ έχουμε υψηλότερο ψ και αριθμό Mach εισαγωγής, κάτι που ωφελεί τις πρώτες βαθμίδες.

(β) Ο βαθμός αντίδρασης

Είναι συνήθως γύρω στο 0.5, τουλάχιστον στη μέση γραμμή.

(γ) Ο λόγος εκπετάσματος (h_B/c)

Για να έχουμε μεγάλο λόγο άντωσης προς οπισθέλκουσα στο πτερύγιο θα πρέπει να έχουμε $h_B/c > 3$. Επειδή όμως μια μεγάλη τιμή του λόγου αυτού δημιουργεί προβλήματα με τη συστροφή των πτερυγίων κατά το ύψος (ιδίως για κατανομές ελεύθερης δίνης) και επίσης

εμφανίζει τάσεις για πτερυγισμό (flutter), στους σύγχρονους αξονικούς συμπιεστές συνήθεις τιμές του λόγου αυτού είναι $1.0 < h_B/c < 2.5$. Μόνο στα πτερύγια του ανεμιστήρα ο λόγος φτάνει το 4.0.

(δ) Ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα (r_h/r_t)

Συνήθως λαμβάνεται μεταξύ 0.4 και 0.6. Μικρές τιμές επιτρέπουν κάπως μικρότερη εξωτερική διάμετρο για δοθείσα μαζική παροχή, αλλά μας οδηγούν σε πτερύγια μεγάλου ύψους. Για πολυβάθμιους συμπιεστές, στην πρώτη βαθμίδα ο λόγος είναι περίπου 0.5 αν και σε βαθμίδες ανεμιστήρων μπορεί να μειωθεί και στο 0.3. Προς την έξοδο του συμπιεστή ο λόγος φθάνει το πολύ το 0.92 αν και 0.85 είναι πιο πρόσφορη λύση.

(ε) Ο αγωγός του συμπιεστή

Λόγω ανάπτυξης οριακών στρωμάτων και συνεχούς παραμόρφωσης του προφίλ της αξονικής ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού του συμπιεστή δεν μπορούμε να πάρουμε περισσότερο έργο μέσω αύξησης της ροής-αξονικής ταχύτητας, C_x , δηλαδή:

$$\begin{aligned} \Delta W_c &= mU_p (C_x \tan \alpha_2 - C_x \tan \alpha_1) = mU_p [(U_p - C_x \tan \alpha_1) - C_x \tan \beta_2] \Rightarrow \\ \Delta W_c &= mU_p [U_p - C_x (\tan \alpha_1 + \tan \beta_2)] \end{aligned} \quad [8.21]$$

Αυτό το λαμβάνουμε υπ' όψιν μας μέσω ενός εμπειρικού συντελεστή, λ , που ονομάζεται συντελεστής αποδιδόμενου έργου (work done factor) ως εξής:

$$\Delta W_c = c_p (T_{02} - T_{01}) = \lambda \cdot U_p \cdot C_x (\tan \beta_1 - \tan \beta_2) \quad [8.22]$$

Επίσης παρακάτω δίδεται μια γενική μεθοδολογία για τον υπολογισμό των αρχικών διαστάσεων του δακτυλιοειδούς αγωγού του συμπιεστή για π.χ. μια βαθμίδα.

Υποθέτοντας ταχύτητα εισόδου, C_1 , εκτιμούμε τον $M_1 = \frac{C_1}{\sqrt{\gamma R \left(288 - \frac{C_1^2}{2c_p} \right)}}$ εισόδου

και από τις σχέσεις της συμπιεστής ροής (Κεφ. 4), π.χ.

$$\frac{m\sqrt{RT_{01}}}{P_{01}A_1} = \sqrt{\gamma} M_1 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}}, \text{ υπολογίζουμε την επιφάνεια του αγωγού } A_1.$$

$$\text{Κατόπιν από την συνέχεια, } m = \rho_1 A_1 C_{x1} = \rho_1 \pi r_t^2 \left[1 - \left(\frac{r_h^2}{r_t^2} \right) \right] C_{x1},$$

$$\text{και με } C_1 = [\text{χωρίς οδηγία πτερύγια, IGV}] = C_{x1}, \text{ εκτιμούμε το } r_t = \sqrt{\frac{A_1}{\pi \left[1 - \left(\frac{r_h^2}{r_t^2} \right) \right]}}$$

(υποθέτοντας $r_h/r_t \gg 0.5$) και λαμβάνουμε την $U_{pt} = 2\pi r_t$, και τη μέση ακτίνα $r_m = U_{pt}/2\pi N$, υποθέτοντας δε τις στροφές, $N = r_m$, έχουμε τις διαστάσεις του αγωγού στη είσοδο.

Υποθέτοντας πολυτροπική απόδοση $\eta_{c,\infty} = 0.9$ υπολογίζουμε τα στοιχεία της

$$\text{του αγωγού στην εξόδο, π.χ., } T_{02} = T_{01} \left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{1-\gamma}{\eta_{c,\infty} \gamma}}, \text{ με } C_1 = C_x = C_{\text{exit}}$$

$$M_{\text{exit}} = \frac{C_{\text{exit}}}{\sqrt{\gamma R \left(452.5 - \frac{C_{\text{exit}}^2}{2c_p} \right)}} \Rightarrow \frac{m_{\text{exit}} \sqrt{RT_{0,\text{exit}}}}{P_{0,\text{exit}} A} = \sqrt{\gamma} M_{\text{exit}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{\text{exit}}^2 \right)^{\frac{(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}}$$

και συνεπώς λαμβάνουμε την $A_{\text{exit, διάκενο}}$. Έχουμε δε ότι:

$$A_{\text{exit, διάκενο}} = A_{\text{tot}} - A_{\text{root}} = \pi r_t^2 - \pi r_h^2 = \pi (r_t - r_h)(r_t + r_h) = 2\pi \underbrace{(r_t - r_h)}_{h_B} \underbrace{\left(\frac{r_t + r_h}{2} \right)}_{r_m} = 2\pi h_B r_m$$

λαμβάνουμε το ύψος του διακένου στη έξοδο. Συνήθως υποτίθεται σχεδιασμός με σταθερή μέση ακτίνα.

Οι πιο συνηθείς λύσεις φαίνονται στο σχήμα 8.9. Η λύση (α) επιτρέπει τη μέγιστη γωνιακή ταχύτητα αλλά έχει προβλήματα με το λόγο r_h/r_t , που με τη σειρά του δημιουργεί προβλήματα με το μέγιστο λόγο συμπίεσης. Η λύση (β) είναι αντίστροφα προβληματική από πλευράς γωνιακής ταχύτητας (μόνο στην πρώτη βαθμίδα εκμεταλλευόμαστε πλήρως τη μέγιστη αντοχή του υλικού) αλλά επιτρέπει μεγάλο r_c . Οι Denning και Jordan (Horlock (1973)) ανέλυσαν τα χαρακτηριστικά των τριών αγωγών υποθέτοντας ότι η τιμή του αξονικού αριθμού Mach μειώνεται από 0.5 σε 0.25 (λόγω αύξησης της θερμοκρασίας) και ο

λόγος $r_h / r_t = 0.92$ στην έξοδο. Για τις συνθήκες αυτές, οι μέγιστες τιμές του r_c για τις διαμορφώσεις (a), (b), (c) ήταν 14, 24 και 50 αντίστοιχα.

(στ) Αριθμός Mach

Ο μέγιστος αριθμός Mach συνήθως εμφανίζεται στο άκρο (tip) του πτερύγιου. Υποθέτωντας σταθερή αξονική ταχύτητα έχουμε για τον αριθμό Mach, $M_{rel,tip}$, στο άκρο:

$$V_t = \sqrt{C^2 + U_{pt}^2}, \quad T_t = T_{01} - \frac{C^2}{2c_p}, \quad a = \sqrt{\gamma RT_t}, \quad M_{rel,tip} = V_t / a \quad [8.23]$$

Ο αξονικός αριθμός Mach είναι γύρω στο 0.4 στους περισσότερους συμπιεστές αν και μπορεί να ανέβει στο 0.6 για turbofan με διηχητικές αεροτομές όπου η μέγιστη τιμή του σχετικού αριθμού Mach (δηλαδή ως προς τη σχετική ταχύτητα στο στροφείο) φθάνει και το μέγιστο επιτρεπόμενο 1.8. Για τυπικές (υψηλές) τιμές: $C=200\text{m/s}$, $U_{pt} = 450 \text{ m/s} \Rightarrow M_{rel,tip} = 1.5$.

(ζ) Αριθμός Βαθμίδων

Υποθέτοντας τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης όπως παραπάνω λαμβάνουμε την επιδιωκόμενη συνολική θερμοκρασιακή αύξηση, $\Delta T_{0,c}$, στο συμπιεστή. Ένας λογικός και συνήθης επιμερισμός αυτής είναι 10-30⁰C σε κάθε βαθμίδα. Υπολογίζοντας και ελέγχοντας τις γωνίες μας από τα Κεφ. 5, 6 και 7 λαμβάνουμε την θερμοκρασιακή αύξηση, $\Delta T_{0,s}$, στη βαθμίδα.

$$\Delta T_{0,s} = (T_{02} - T_{01})_s = \lambda \frac{U_p \cdot C_x}{c_p} \cdot (\tan \beta_1 - \tan \beta_2) \quad [8.24]$$

όπου, λ , είναι ο συντελεστής αποδιδόμενου έργου (work done factor) ο οποίος μειώνεται καθώς προχωρούμε στις κατάντι βαθμίδες. Συνεπώς ο αριθμός των βαθμίδων υπολογίζεται ως, $N_{stages} = \Delta T_{0,c} / \Delta T_{0,s}$. Φυσικά ο σχεδιασμός περνάει από όλα τα στάδια του επανελέγχου, γωνιών, αποκόλλησης κ.λ.π.

(ii) Στρόβιλος

Οι συνήθειες ελεύθερες μεταβλητές εδώ είναι:

(α) Ο αριθμός των βαθμίδων

Ο αριθμός αυτός εξαρτάται από τον ολικό βαθμό εκτόνωσης. Σε στροβιλοκινητήρες, η τιμή του r_t είναι αισθητά μικρότερη από την αντίστοιχη του r_c , γιατί σημαντικό ποσοστό εκτόνωσης λαμβάνεται στο ακροφύσιο που παράγει την ώση. Επίσης, στην περίπτωση που η

μηχανή έχει δυο ή τρεις άξονες ο αριθμός των βαθμίδων ρυθμίζεται ανάλογα. Πάντως, για $r_t > 3$ συνήθως χρησιμοποιούνται πάνω από δυο βαθμίδες. Μερικές φορές στην πρώτη βαθμίδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και $r_t = 4.0$ λόγω του υψηλού κόστους των πτερυγίων με εσωτερικούς αγωγούς ψύξης.

(β) Κατανομή έργου ανά βαθμίδα

Οι συνήθεις κατανομές σε στρόβιλους 2, 3 η 4 βαθμίδων είναι:

για 2 : 48% η πρώτη, 52% η δεύτερη

για 3 : 30 / 36 / 34%

για 4 : 21 / 26 / 28 / 25%.

(γ) Αγωγός στρόβιλου

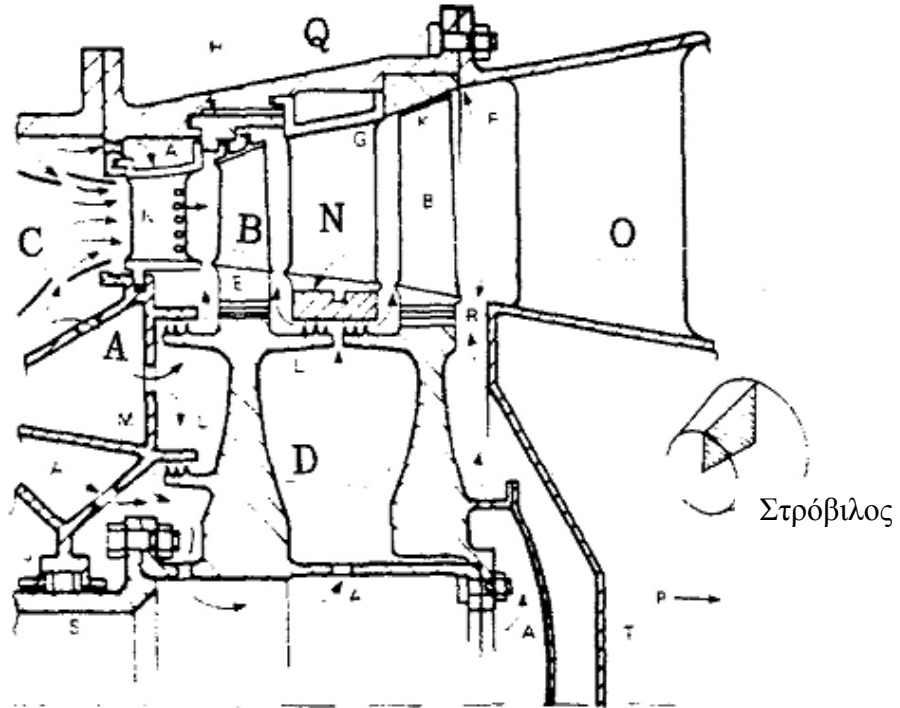
Ισχύουν τα αντίθετα με τους αγωγούς του συμπιεστή. Όσο αυξάνει το εκπέτασμα (δηλαδή το h_B) τόσο μειώνεται η αξονική ταχύτητα και ο αξονικός αριθμός Mach. Για ορισμένο έργο (ΔW_T) όμως αυξάνει η γωνία εκτροπής (ϵ). Συνήθως οι αγωγοί σχεδιάζονται έτσι ώστε η γωνία ϵ να μην υπερβεί τις 105° τουλάχιστον στη μέση γραμμή.

(δ) Βαθμός αντίδρασης

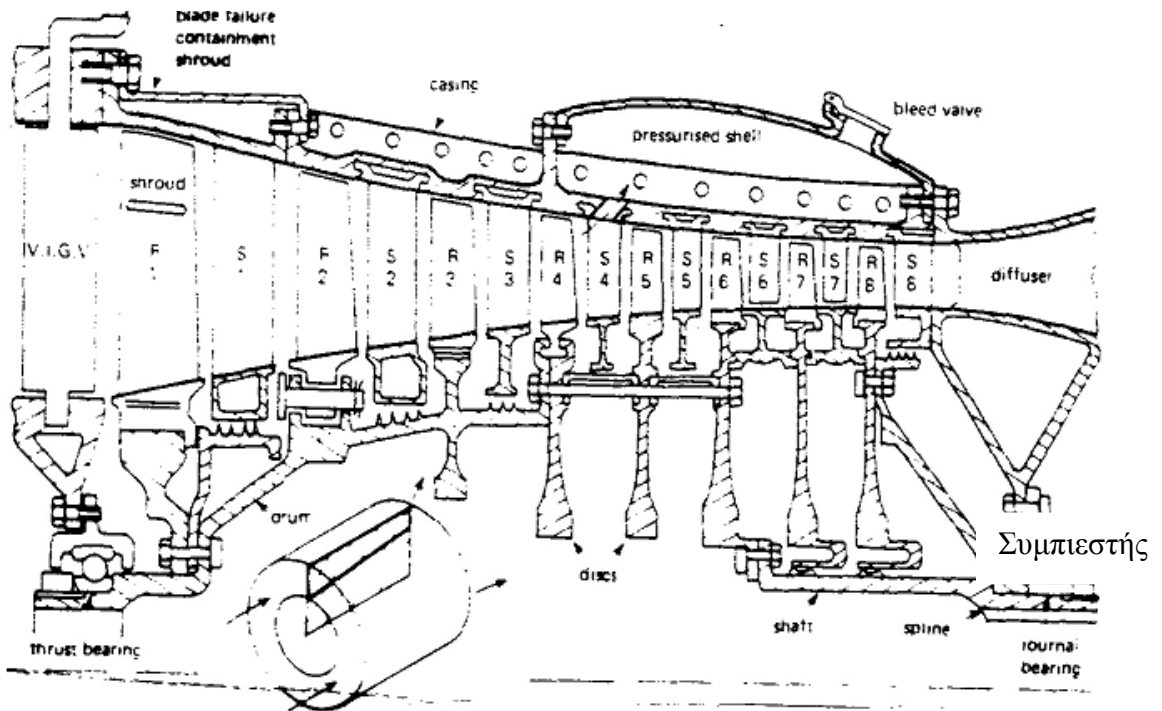
Συνήθως λαμβάνεται γύρω στο 0.5.

(ε) Μήκος χορδής

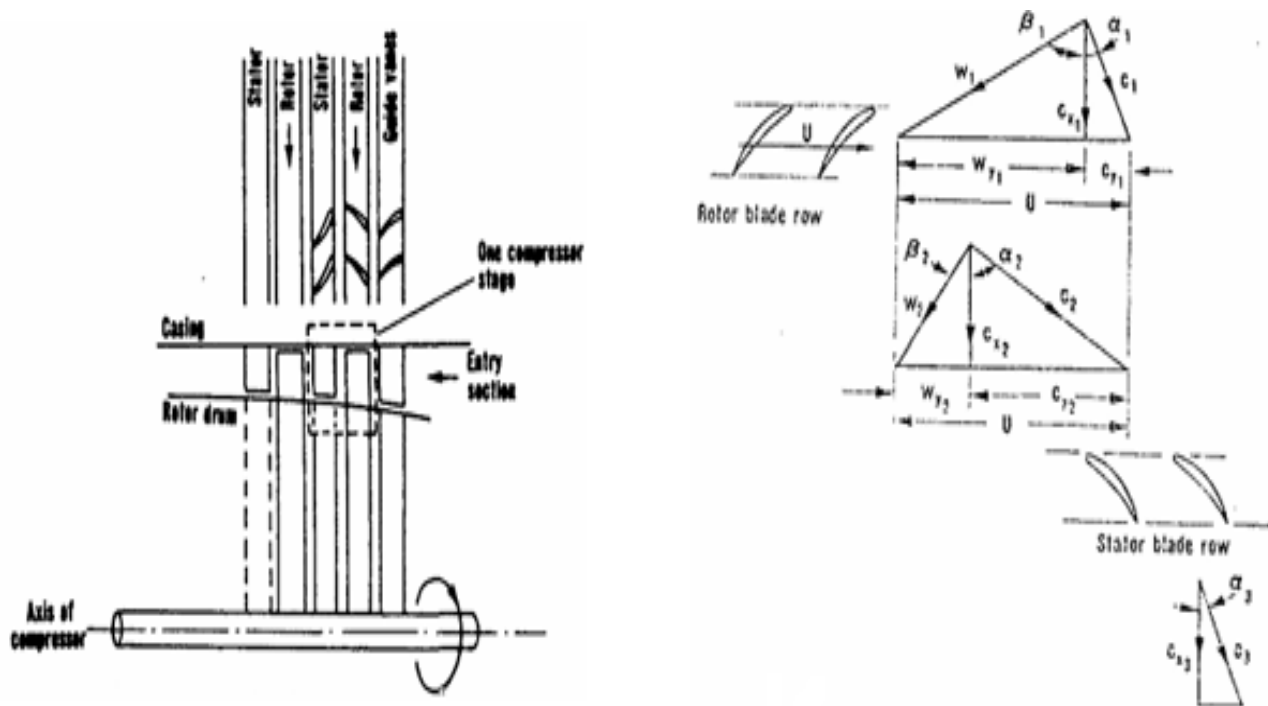
Όχι κάτω από 1cm τουλάχιστον η αξονική χορδή (b). Συνήθως είναι μεταξύ 2-5cm. Ελάχιστο πάχος χείλους εκφυγής είναι 0.5mm, για μη ψυχόμενα πτερύγια, και 1.8mm, για ψυχόμενα.



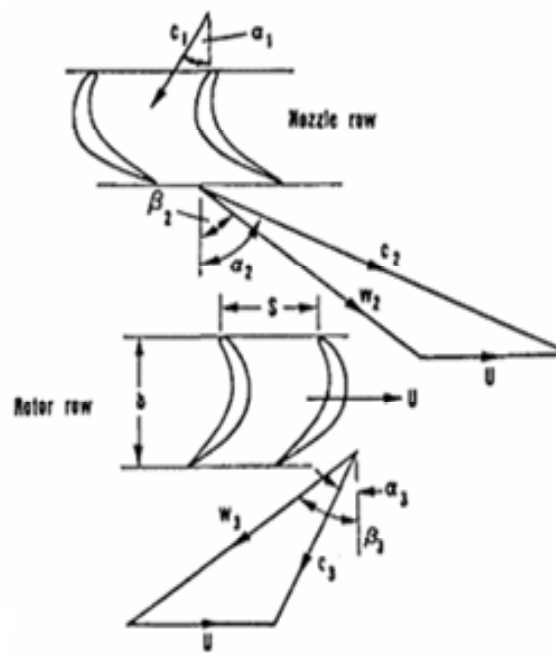
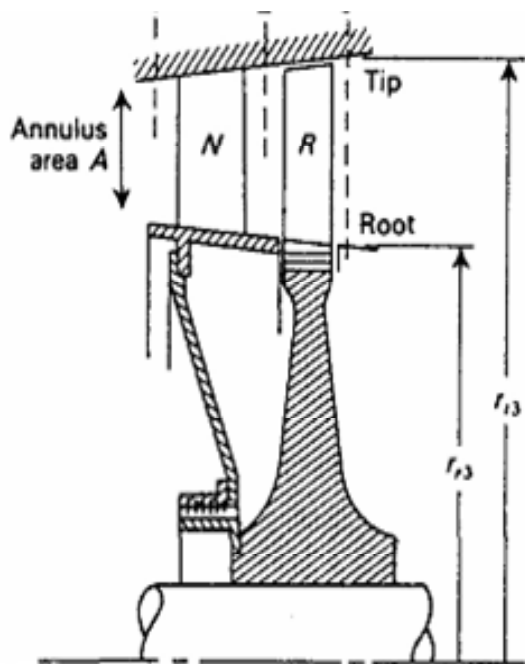
A section through a two-stage turbine, showing: A cooling air flows; B turbine blades; C combustion outlet; D turbine discs; E extended blade root; F annulus flare; G blade shrouding; H seal segment; I NGV inner shroud; J journal bearing; K tip clearance; L labyrinth seal; M nozzle diaphragm; N nozzle guide vane; O outlet straighteners; P power turbine (downstream); Q turbine casing; R fir-tree root; S shaft; T tail cone (front piece)



Σχήμα 8.1 Κύρια εξαρτήματα αξονικών στροβιλομηχανών

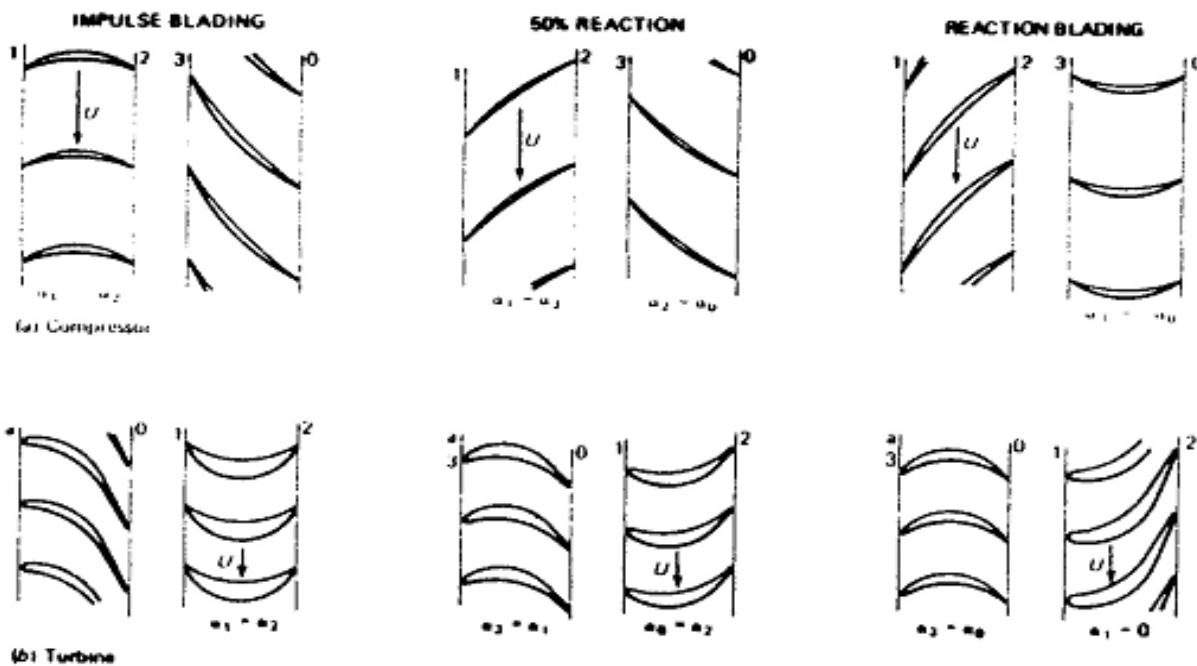


Βαθμίδα συμπίεστη

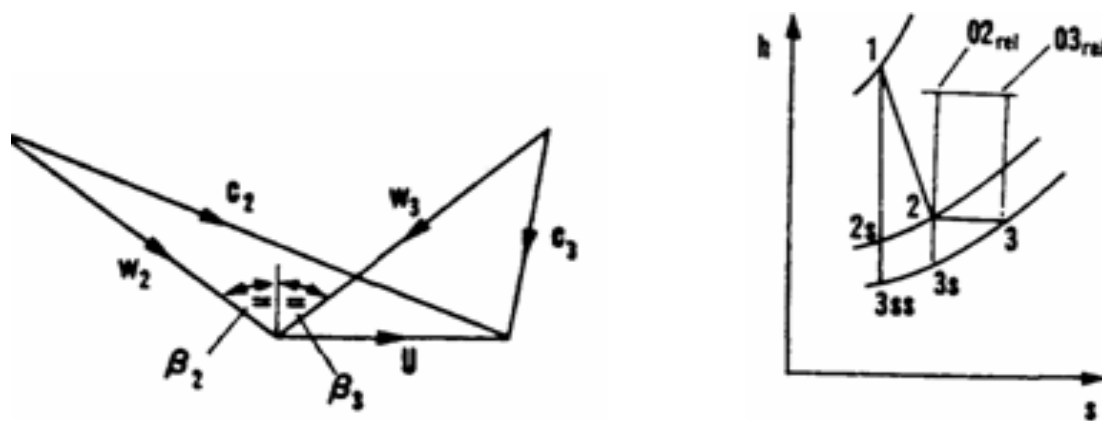


Βαθμίδα στροβίλου

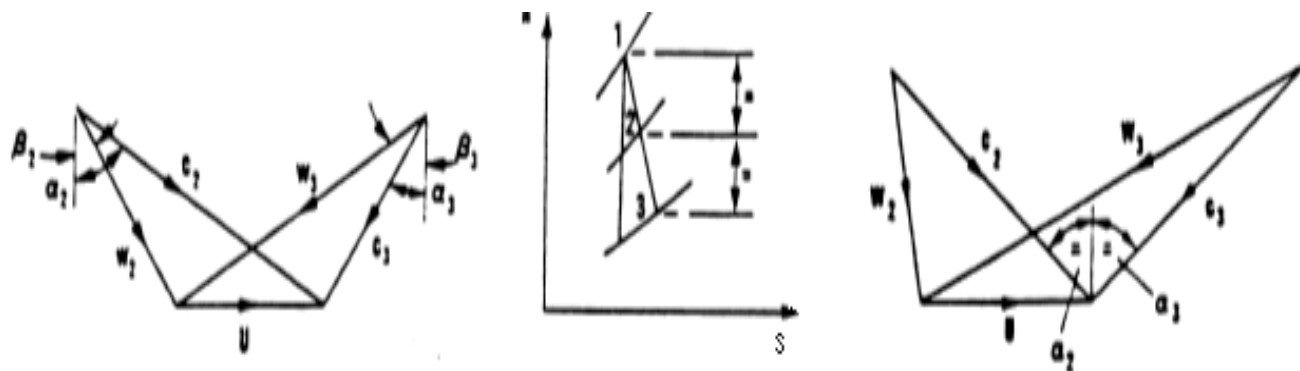
Σχήμα 8.2 Τα τρίγωνα των αξονικών βαθμίδων συμπίεστη/στροβίλου



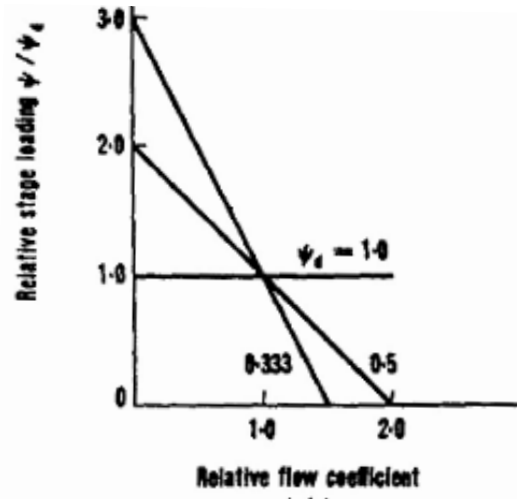
Σχήμα 8.3 Η επίδραση του βαθμού αντίδρασης στα πτερύγια συμπιεστή/τροβίλου



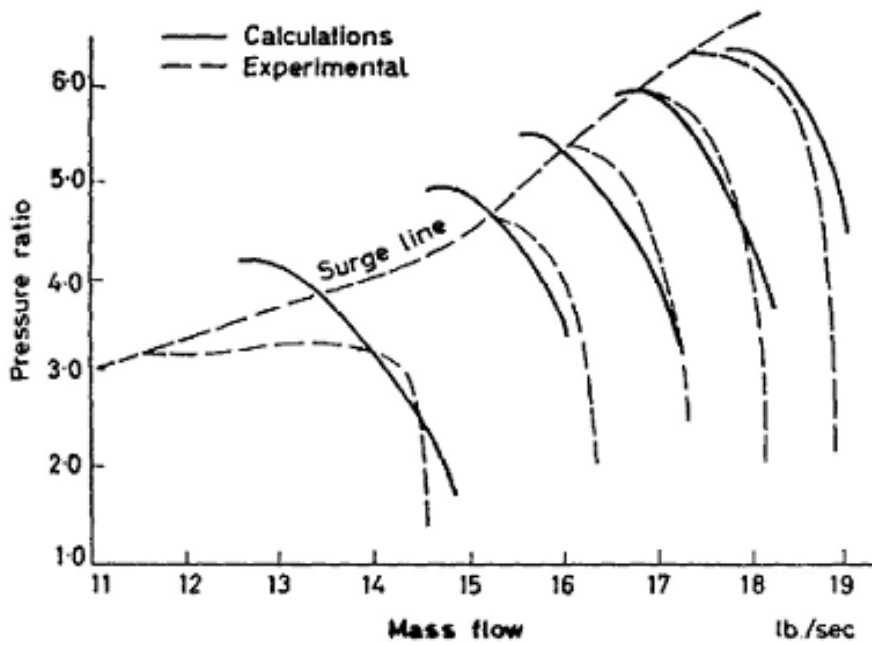
Σχήμα 8.4 Βαθμίδα στροβίλου με $R=0$



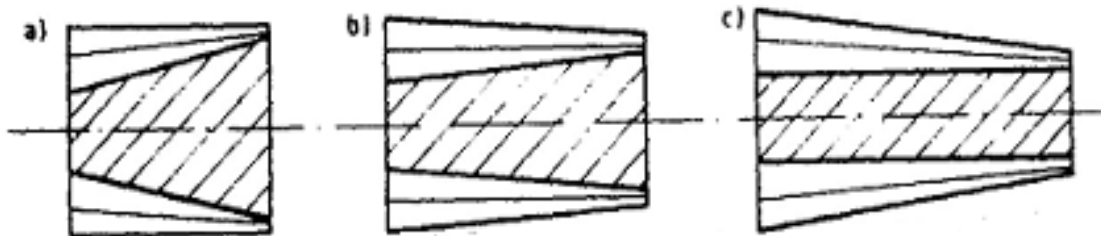
Σχήμα 8.5 Βαθμίδες στροβίλου με $R=0.5$ και $R=1.0$



Σχήμα 8.7 Η σχέση $\psi=f(\phi)$ ως προς το σημείο σχεδιασμού



Σχήμα 8.8 Τυπική σύγκριση της μεθόδου υπολογισμού λειτουργίας εκτός σημείου σχεδιασμού του Horlock με πειραματικά στοιχεία



Σχήμα 8.9 Διατάξεις αγωγών συμπίεστη