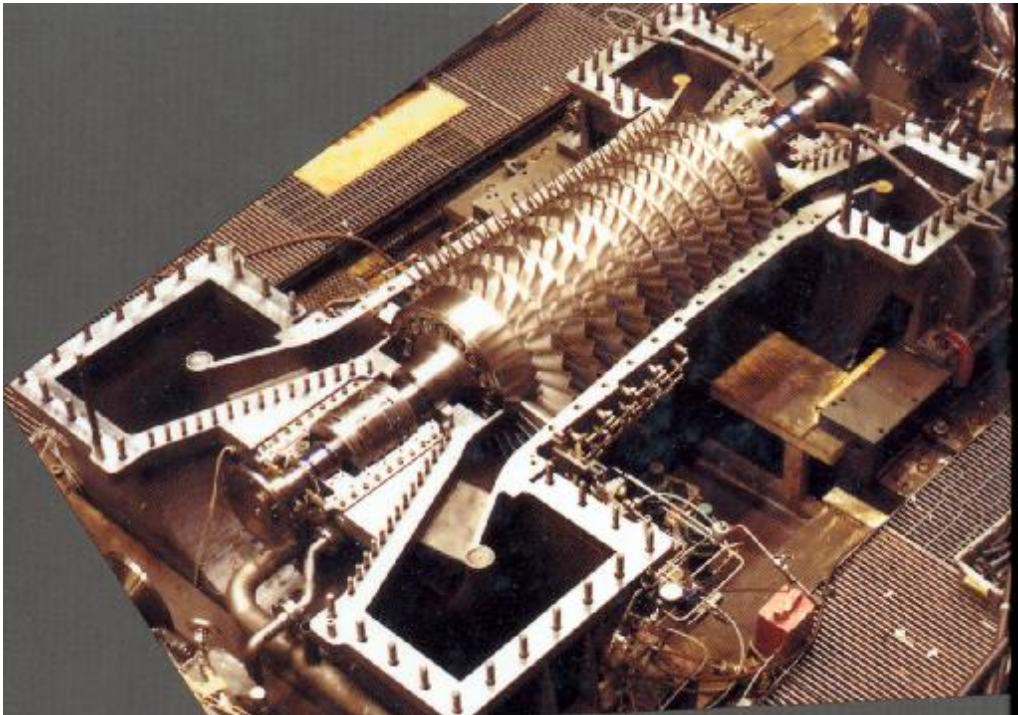


ΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΒΑΘΜΙΔΩΝ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ : 1) ΚΑΠΝΙΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, Α.Μ.=3659
2) ΜΕΡΖΙΩΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, Α.Μ. = 3363

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ : Ι. ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ

ΠΑΤΡΑ – 2006

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ	
ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΒΑΘΜΙΔΩΝ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ	6
1.1 ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	8
1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	11
1.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	13
1.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	15
1.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΤΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΔΙΝΗΣ	23
1.6 ΡΟΗ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΔΙΝΗΣ	24
1.7 ΡΟΗ ΔΙΝΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ	30
1.8 ΣΤΑΘΕΡΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΚΑΙ ΕΚΘΕΤΙΚΗ ΡΟΗ ΔΙΝΗΣ	38
1.9 ΤΡΕΙΒΩΔΕΙΣ ΡΟΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΕΝΕΙΣ ΓΩΝΙΑΣ ΡΟΗΣ	41
1.10 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΝΑ ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	42
1.11 ΒΑΘΜΙΔΑ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ ΕΝΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	50
1.12 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΑΘΜΙΔΑΣ	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ	
ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	58
2.1 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΒΑΣΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ	61
2.2 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	63
2.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	65
2.4 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ	68
2.5 ΕΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	71
2.6 Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	76
2.7 ΤΥΠΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΔΙΝΗΣ	85
2.8 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΟΦΕΛΗ	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΜΕΡΙΚΩΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΔΙΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	93
3.1 ΜΕΡΙΚΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ	97
3.2 ΟΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΠΛΗΜΝΗΣ ΠΡΟΣ ΚΕΛΥΦΟΣ	99
3.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ	103
3.4 ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ	106
3.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΠΛΗΜΝΗΣ ΠΡΟΣ ΚΕΛΥΦΟΣ	107
3.6 ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΡΟΗΣ	109
3.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	114

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός αυτού του 1^{ου} κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τις βασικές αδιάστατες παραμέτρους απόδοσης και να εξετάσει την εφαρμογή τους στη διαδικασία σχεδιασμού. Οι αντιπροσωπευτικές εφαρμογές σχεδιασμού της βαθμίδας θα χρησιμοποιηθούν για να δείξουν μερικές από τις συνέπειες των επιλογών που γίνονται. Το 2^ο κεφάλαιο επεκτείνει αυτές τις βασικές έννοιες σχεδιασμού στο σχεδιασμό των σειρών των πτερυγίων για τους πλήρεις συμπίεστες αξονικής ροής με συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας και χρησιμοποιούμενα ρευστά.

Η βασική ιδέα που παρουσιάστηκε στο 1^ο κεφάλαιο για το σχεδιασμό μιας ιδανικής βαθμίδας ενός συμπίεστη αξονικής ροής είναι εύκολο να επεκταθεί στο σχεδιασμό ενός πλήρους συμπίεστη αξονικής ροής. Όταν το συγκεκριμένο εργαζόμενο ρευστό, η γωνιακή ταχύτητα, ο λόγος της ροής μάζας και η θερμοδυναμική συνθήκη εισόδου είναι γνωστά, η διαδικασία σχεδιασμού μπορεί να συμπεριλάβει την επίδραση των απωλειών της ολικής πίεσης και των επιπέδων του αριθμού Mach. Αυτό είναι δυνατό εφ' όσον το σχέδιο περιορίζεται στη συνθήκη λειτουργίας των πτερυγίων λογικά κοντά στις γωνίες πρόσπτωσης του σχεδίου, i^* , έτσι ώστε τα πτερύγια να λειτουργούν στην περιοχή των γωνιών πρόσπτωσης με τις χαμηλότερες απώλειες όπου οι συντελεστές απωλειών είναι εύλογα σταθεροί.

Οι διαδικασίες που καθορίζονται στο 2^ο κεφάλαιο ταξινομούν το δακτύλιο του συμπίεστη για να ταιριάζει με της συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Αυτό επιβάλλει μια συγκεκριμένη μορφή επιφανειακών ρευμάτων και περιορίζει την έκταση των πτερυγίων που σχεδιάζονται με οποιοσδήποτε πρέπει για τη διατήρηση της μάζας. Η επιρροή των οριακών στρωμάτων τοίχου επίσης επηρεάζεται σημαντικά από τις συγκεκριμένες συνθήκες σχεδιασμού. Εάν αυτό το σύστημα εφαρμόζεται στο χαμηλότερο επίπεδο του αριθμού Mach που αναμένεται και στο υψηλότερο ποσοστό όγκου ροής από ότι αναμένεται για να απαιτηθεί, ένα σχέδιο βαθμίδας μπορεί να είναι ικανοποιητικό για τη γενική χρήση ως τυποποιημένο στάδιο. Αλλά αυτός μειώνει χαρακτηριστικά τη διαδικασία σχεδιασμού σε μια πιο περίπλοκη έκδοση των μεθόδων που περιγράφονται στο 1^ο κεφάλαιο, ακυρώνοντας αποτελεσματικά τα οφέλη των αυστηρότερων προτύπων που χρησιμοποιήθηκαν. Πράγματι, οι μέθοδοι σχεδιασμού του 1^{ου} κεφαλαίου είναι συχνά χρήσιμες για την έρευνα εναλλακτικών παραμέτρων βαθμίδων απόδοσης πριν επιχειρήσουν ένα σχεδιασμό που χρησιμοποιεί τις μεθόδους του 2^{ου} κεφαλαίου.

Σκοπός αυτού του 3^{ου} κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει μια ακριβέστερη ανάλυση ροής που μπορεί να εξαχθεί χρησιμοποιώντας την τεχνική της μερικής τρισδιάστατης ανάλυσης της ροής. Αυτή είναι μια πολύ αποδοτική τεχνική ανάλυσης που παρέχει μια λογική προσέγγιση στον τρισδιάστατο πεδίο ροής δια μέσω μιας σειράς πτερυγίων. Αρχικά προτεινόμενη από τον Wu (1952), αυτή η

τεχνική στηρίζεται στην επίλυση της δισδιάστατης ροής στις πτερύγιο προς πτερύγιο επιφάνειες ρευμάτων και στην επιφάνεια ρευμάτων πλήμνης προς κέλυφος, με την αλληλεπίδραση μεταξύ τους έως ότου είναι σύμφωνοι ο ένας με τον άλλον. Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει μια μερικώς τρισδιάστατη ανάλυση της ροής κατάλληλη για αυτόν τον σκοπό. Αυτή η ανάλυση αναπτύχθηκε αρχικά για τους φυγοκεντρικούς συμπιεστές (Aungier, 2000), όπου διαδραματίζει έναν ουσιαστικό ρόλο στο αεροδυναμικό σχεδιασμό των στροφείων. Επεκτάθηκε στη συνέχεια να αντιμετωπιστεί την αυθαίρετη τρισδιάστατη γεωμετρία των πτερυγίων για την πρόσθετη ευελιξία στο σχέδιο των φυγοκεντρικών στροφείων. Αυτή η επέκταση κατέστησε πιθανή τη χρησιμοποίηση της ανάλυσης απευθείας για τις σειρές των πτερυγίων των συμπιεστών αξονικής ροής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΒΑΘΜΙΔΩΝ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ

Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός των βαθμίδων ενός συμπίεστη αξονικής ροής περιλαμβάνει τον καθορισμό των τριγώνων ταχυτήτων του ρότορα και του στάτη και της γεωμετρίας των πτερυγίων, έτσι θα προκύψουν οι επιθυμητές χαρακτηριστικές των βαθμίδων απόδοσης. Όπου χρειάζεται, αυτό μπορεί να περιλάβει επίσης το σχέδιο εισόδου και εξόδου των οδηγών πτερυγίων της φτερωτής. Η σχεδίαση της βαθμίδας θα περιλάβει την επιλογή της παραγωγής των βασικών αδιάστατων παραμέτρων απόδοσης και το σχεδιασμό των κατάλληλων σειρών πτερυγίων. Καμία συγκεκριμένη αναφορά δεν γίνεται στην ακριβή εφαρμογή της βαθμίδας σε έναν πραγματικό συμπίεστη. Χωρίς γνώση των συγκεκριμένων μηχανισμών του ρευστού, τα επίπεδα του αριθμού Mach, που ταιριάζουν με τις παρακείμενες βαθμίδες, κ.λπ., ο σχεδιασμός της βαθμίδας είναι μια μάλλον εξιδανικευμένη διαδικασία. Δεν είναι δυνατό να σχεδιαστούν τα ακριβή περιγράμματα contours και να υπολογιστούν οι απώλειες σε αυτό το πλαίσιο. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τις βασικές αδιάστατες παραμέτρους απόδοσης και να εξετάσει την εφαρμογή τους στη διαδικασία σχεδιασμού. Οι αντιπροσωπευτικές εφαρμογές σχεδιασμού της βαθμίδας θα χρησιμοποιηθούν για να δείξουν μερικές από τις συνέπειες των επιλογών που γίνονται. Το 2^ο κεφάλαιο επεκτείνει αυτές τις βασικές έννοιες σχεδιασμού στο σχεδιασμό των σειρών των πτερυγίων για τους πλήρεις συμπίεστες αξονικής ροής με συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας και χρησιμοποιούμενα ρευστά.

Οι διαδικασίες σχεδιασμού διαδραματίζουν έναν βασικό ρόλο στο σχεδιασμό των βιομηχανικών συμπίεστων αξονικής ροής. Κάθε βιομηχανικός συμπίεστης αξονικής ροής έχει συνήθως ένα μοναδικό σχεδιασμό. Το κόστος ανάπτυξης και παραγωγής υπολογίζεται με αρχικές εκτιμήσεις όταν δεν υπάρχει μια πανομοιότυπη μηχανή για να γίνει σύγκριση. Είναι αρκετά κοινή πρακτική να υιοθετείται ένα τυποποιημένο σχέδιο βαθμίδας επανάληψης για αυτούς τους συμπίεστες. Η γωνία προπορείας των πτερυγίων ρυθμίζεται συνήθως για να προσαρμοστεί στις συγκεκριμένες εφαρμογές. Η κλιμάκωση των λεπίδων με την αντίστοιχη τροποποίηση του αριθμού των πτερυγίων ανά σειρά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ικανοποιήσει τις μηχανικές απαιτήσεις αντοχής. Δεδομένου ότι η ακριβής εφαρμογή δεν προκαθορίζεται και τα μοναδικά σχέδια για όλες τις βαθμίδες δεν είναι αποδεκτά, το σχέδιο μιας τυποποιημένης βαθμίδας επανάληψης θα ακολουθήσει ακριβώς τη διαδικασία που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο. Το συγκεκριμένο σχέδιο συμπίεστων αξονικής ροής θα περιλάβει την εφαρμογή αυτής τις τυποποιημένης βαθμίδας

σχεδιασμού με την κατάλληλη ταξινόμηση του δακτυλίου και των διάφορων δευτερευουσών ρυθμίσεων για να προσαρμόσει την εφαρμογή. Ένα παράδειγμα της χρήσης των διαδικασιών των βαθμίδων σχεδιασμού συμπεριλαμβάνεται στο τέλος αυτού του κεφαλαίου.

ΟΡΟΛΟΓΙΑ

C	= απόλυτη ταχύτητα
c	= χορδή
H	= ολική ενθαλπία
h	= στατική ενθαλπία
i	= γωνία πρόσπτωσης
K	= Ψ/Ψ_{lim}
m	= εκθέτης δίνης
n	= εκθέτης δίνης
P	= πίεση
P_R	= λόγος πίεσης
R	= βαθμός αντιδράσεως
R_R	= λόγος ανάκτησης
r	= ακτίνα
t_b	= μέγιστο πάχος πτερυγίου
U	= τοπική ταχύτητα πτερυγίου = ωr
W	= σχετική ταχύτητα
Z	= αριθμός πτερυγίων
z	= αξονική συντεταγμένη
β	= γωνία ροής
γ	= γωνία προπορείας
δ	= γωνία απόκλισης
η	= βαθμός απόδοσης
θ	= γωνία καμπυλότητας
κ	= γωνία καμπυλότητας του πτερυγίου
ρ	= πυκνότητα αερίων
σ	= τάση
φ	= συντελεστής ροής
ψ	= συντελεστής φόρτισης
Ψ_{lim}	= τιμή του ψ $W_2/W_1 = 0.7$
ω	= γωνιακή ταχύτητα, radians/sec

ΔΕΙΚΤΕΣ

- c = παράμετρος στην ακτίνα αναφοράς
- h = κατάσταση πλήμνης
- R = παράμετρος του ρότορα
- S = παράμετρος του στάτη
- s = κατάσταση κελύφους
- t = ολική θερμοδυναμική κατάσταση
- z = αξονική συνιστώσα
- θ = εφαπτομενική συνιστώσα
- 0 = οδηγία πτερύγια εισόδου
- 1 = κατάσταση εισόδου ρότορα
- 2 = κατάσταση εισόδου στάτη
- 3 = κατάσταση εξόδου στάτη
- 4 = κατάσταση εξόδου οδηγού αρτηρίας

ΕΚΘΕΤΕΣ

- * = κατάσταση ελαχίστων απωλειών
- ' = σχετική κατάσταση

1.1 ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Στο σχεδιασμό μιας βαθμίδας ενός συμπιεστή αξονικής ροής, ο σχεδιαστής κατά κανόνα θέλει να ελέγξει την ικανότητα ροής, η φόρτιση γίνεται ανα βαθμίδα και η κατανομή του φορτίου διάχυσης της ροής γίνεται μεταξύ του ρότορα και του στάτη. Οι προδιαγραφές πρέπει να είναι αδιάστατες για να επιτρέψουν την εφαρμογή σε οποιοσδήποτε στάδιο εισαγωγής θερμοδυναμικών όρων, ταχύτητα περιστροφής και γεωμετρική κλίμακα. Εάν ω είναι η ταχύτητα περιστροφής, η τοπική ταχύτητα των πτερυγίων δίνεται από $U = \omega r$. Η αδιάστατη ικανότητα ροής της βαθμίδας θα εξαρτάται από την αδιάστατη συνιστώσα της αξονικής ταχύτητας ή το συντελεστή ροής, καθορίζεται από

$$\varphi = C_{z1} / U \quad (1-1)$$

Ο συντελεστής ροής έχει καθοριστεί στην είσοδο του ρότορα, δεδομένου ότι στην είσοδο τα πτερύγια της φτερωτής δεν καθορίζονται απαραίτητως ως τμήμα της διαδικασίας σχεδιασμού βαθμίδας. Η αδιάστατη φόρτιση ανά βαθμίδα

προκύπτει άμεσα από την εξίσωση στροβιλομηχανικής του Euler. Ο συντελεστής φόρτισης ορίζεται ως

$$\psi = (H_2 - H_1)/U^2 = (C_{\theta 2} - C_{\theta 1})/U \quad (1-2)$$

όπου οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στην θέση εισόδου και εξόδου του ρότορα, αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας την ορολογία των βαθμίδων που παρουσιάζεται στο σχέδιο 1-1. Η κατανομή της διάχυσης της ροής μεταξύ του ρότορα και του στάτη μπορεί να εκφραστεί με το λόγο της αύξησης της στατικής ενθαλπίας που εμφανίζεται στο ρότορα, δηλ., ο βαθμός αντίδρασης ορίζεται ως

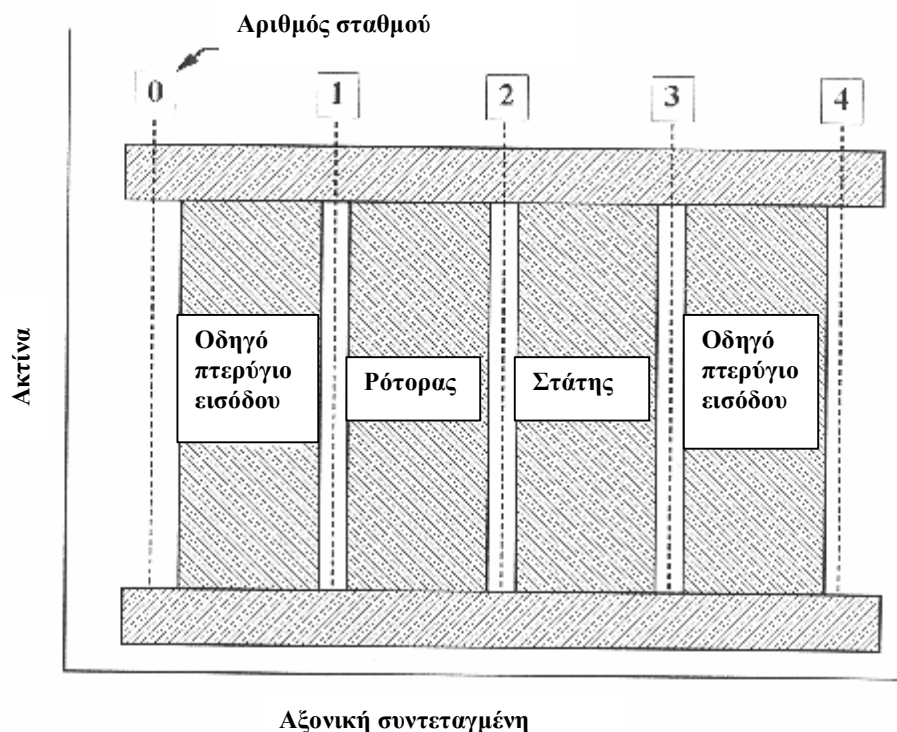
$$R = (h_2 - h_1)/(h_3 - h_4) \quad (1-3)$$

Εναλλακτικά, η αντίδραση μπορεί να καθοριστεί με τον όρο των στατικών πιέσεων, αλλά αυτή είναι λιγότερο κατάλληλη για τα προβλήματα σχεδιασμού.

Αφού $C_r = 0$ για αυτήν την περίπτωση, από την εξίσωση $h = H' - \frac{1}{2}W^2 = H - \frac{1}{2}C^2$ και τη βασική κινηματική συνιστώσα της ταχύτητας προκύπτει

$$H = h + (1/2)C^2 \quad (1-4)$$

$$C^2 = C_z^2 + C_q^2 \quad (1-5)$$



Σχήμα 1-1 Ορολογία των αριθμών βαθμίδας του σταθμού

Γνωρίζοντας ότι $H_3 = H_2$, από τους τύπους (10-2) και (10-4) προκύπτει

$$h_2 - h_1 = U(C_{\theta 2} - C_{\theta 1}) - (C_2^2 - C_1^2)/2 \quad (1-6)$$

$$h_3 - h_1 = U(C_{\theta 2} - C_{\theta 1}) - (C_3^2 - C_1^2)/2 \quad (1-7)$$

Τώρα χρησιμοποιούμε ένα σχέδιο βαθμίδας επανάληψης, δηλ., μια βαθμίδα που σχεδιάστηκε υποθέτοντας ότι θα ακολουθηθεί από μια ίδια βαθμίδα. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι συνιστώσες της ταχύτητας στην έξοδο του στάτη και στην είσοδο του ρότορα πρέπει να είναι ίδιες. Ας θέσουμε ότι $C_{z2} = C_{z1}$. Τότε από τις σχέσεις (1-3) μέχρι (1-7) προκύπτει

$$R = 1 - (C_{\theta 2} + C_{\theta 1})/(2U) \quad (1-8)$$

Ακολούθως για ένα σχέδιο βαθμίδας επανάληψης με $C_{z2} = C_{z1}$, όλα τα σχετικά τρίγωνα ταχυτήτων της βαθμίδας μπορούν να διευκρινιστούν με την ερμηνεία των αδιάστατων παραμέτρων ϕ , ψ και R . Παραδείγματος χάριν, από τις εξισώσεις ($W_{\theta} = C_{\theta} - \omega r$), (1-1), (1-2), (1-8) εύκολα προκύπτει

$$C_{\theta 1}/U = C_{\theta 3}/U = 1 - R - \psi/2 \quad (1-9)$$

$$C_{\theta 2}/U = 1 - R + \psi/2 \quad (1-10)$$

$$W_{\theta 1}/U = C_{\theta 1}/U - 1 = -R - \psi/2 \quad (1-11)$$

$$W_{\theta 2}/U = C_{\theta 2}/U - 1 = \psi/2 - R \quad (1-12)$$

$$\tan\beta_1 = (1 - R - \psi/2)/\Phi \quad (1-13)$$

$$\tan\beta_2 = (1 - R + \psi/2)/\Phi \quad (1-14)$$

$$\tan\beta'_1 = -(R + \psi/2)/\Phi \quad (1-15)$$

$$\tan\beta'_2 = (\psi/2 - R)/\Phi \quad (1-16)$$

Οι προδιαγραφές των οδηγών πτερυγίων εισόδου και εξόδου δεν έχουν συζητηθεί ακόμα. Η απλούστερη προδιαγραφή απαιτεί το C_z να είναι σταθερό κατά μήκος αυτών των πτερυγίων και τα $C_{\theta 0} = C_{\theta 4} = 0$.

1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΒΑΘΜΙΔΑΣ

Στην ανάπτυξη των αδιάστατων παραμέτρων απόδοσης στην προηγούμενη ενότητα υποθέσαμε ότι το C_z (ή φ) είναι σταθερό από την αρχή μέχρι το τέλος της βαθμίδας. Αλλά το C_z εξαρτάται επίσης από τη βασική ρευστοδυναμική. Ειδικότερα, το C_z πρέπει να ικανοποιήσει κάποια μορφή της κανονικής εξίσωσης ισορροπίας. Αυτό σημαίνει ότι η αδιάστατη απόδοση της βαθμίδα μπορεί μόνο να προσδιοριστεί σε μια ακτίνα για οποιοδήποτε αξονικό σταθμό. Η ακτίνα στην οποία η αδιάστατη απόδοση προσδιορίζεται θα υποδειχθεί ως r_c , και ο δείκτης c , θα χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει όλες τις παραμέτρους σε αυτή την ακτίνα. Ως εκ τούτου, η αδιάστατη απόδοση της βαθμίδας θα προσδιοριστεί από

$$\varphi_c = C_{zc}/U_c \quad (1-17)$$

$$\psi_c = (C_{\theta 2c} - C_{\theta 1c})/U_c \quad (1-18)$$

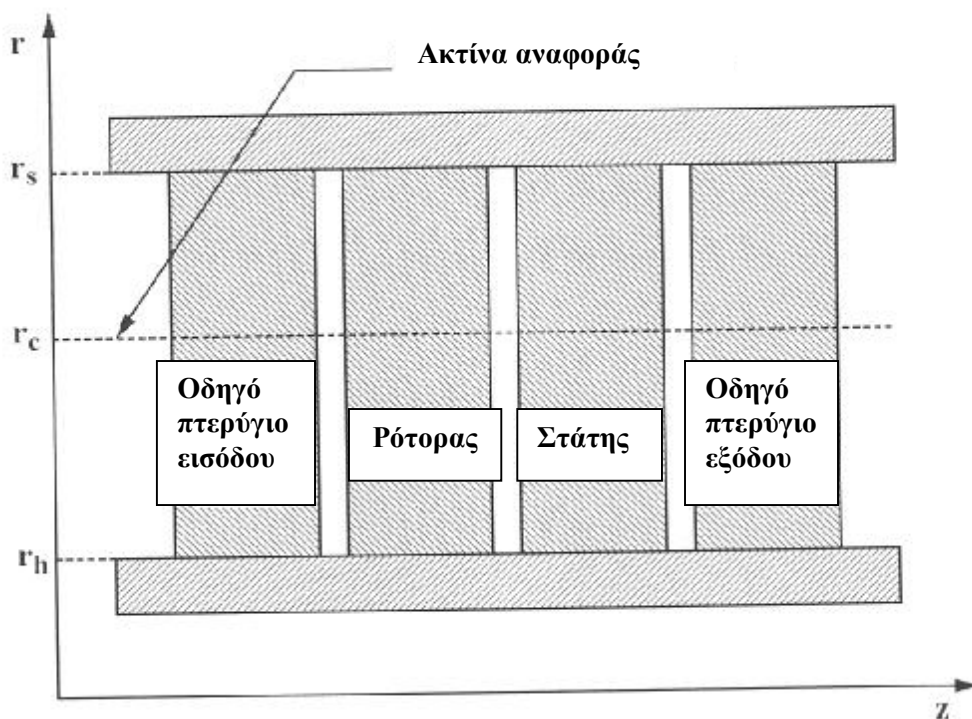
$$R_c = 1 - (C_{\theta 1c} + C_{\theta 2c})/(2U_c) \quad (1-19)$$

Επιβάλλεται, η κανονική ισορροπία και η διατήρηση της μάζας συνδυάστηκαν για να ολοκληρώσουν τη λύση. Αυτό απαιτεί ότι η βαθμίδα σχεδιασμού είναι συγκεκριμένη για το λειτουργώντας ρευστό και το επίπεδο του αριθμού Mach για το οποίο πρόκειται να εφαρμοστεί. Σε αυτό το κεφάλαιο, είναι χρήσιμο να αποφευχθούν αυτοί οι περιορισμοί για χάρη μιας γενικότερης έρευνας των εναλλασσόμενων βαθμίδων. Αυτό θα προσαρμόσει επίσης τη γενική βιομηχανική εφαρμογή του σχεδιασμού της βαθμίδας επανάληψης που αναφέρθηκε νωρίτερα σε αυτό το κεφάλαιο.

Ως εκ τούτου το πρόβλημα που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο απεικονίζεται στο σχήμα 1-2. Οι ακτίνες πλήμνης, κελύφους και αναφοράς θα κρατηθούν σταθερές μέσω της βαθμίδας. Η βαθμίδα θα σχεδιαστεί σαν μια βαθμίδα επανάληψης με σταθερό φ_c σε όλη τη βαθμίδα, δηλ., το C_{zc} είναι σταθερό στην ακτίνα αναφοράς. Η απουσία μιας εξίσωσης της εξάρτησης της κατάστασης και του αριθμού Mach αποκλείει έναν σημαντικό υπολογισμό των απωλειών έτσι η ροή θα θεωρηθεί ισεντροπική. Η κοινή πρακτική σχεδιασμού είναι να απαιτείται σταθερή ολική ενθαλπία από την πλήμνη στο κέλυφος, η οποία υποτίθεται ότι συνέβη στις μελέτες σχεδιασμού της βαθμίδας που εξετάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Θα αποδειχθεί αργότερα ότι είναι σχετικά εύκολο να περιληφθούν όροι για να μετριασθούν πολλοί από αυτούς τους περιορισμούς σε ένα πραγματικό αυτοματοποιημένο σύστημα σχεδιασμού βαθμίδας αποκτώντας μια γενικότερη δυνατότητα σχεδιασμού. Αλλά αυτό δεν προσθέτει κανένα όφελος στην ανάπτυξη των γνώσεων των ιδιοτήτων των

εναλλακτικών αδιάστατων προδιαγραφών απόδοσης. Τα σχεδιαγράμματα ροής σε άλλες ακτίνες θα παρασχεθούν με την εφαρμογή της απλής, ισεντροπικής κανονικής εξίσωσης ισορροπίας σε μια ορισμένη κατανομή ταχύτητας της εφαπτομένης. Μια γενική εξίσωση τύπου στροβίλου εφαρμόζεται στην είσοδο του ρότορα.

$$C_{\theta 1}/U_c = (1 - R_c)(r_c/r)^n - (\psi_c/2) (r_c/r)^m \quad (1-20)$$



ΣΧΗΜΑ 1-2 Εφαρμογή του σχεδιασμού βαθμίδων

οι εκθέτες n και m έχουν προσδιορισθεί. Από την εξίσωση (1-9), παρατηρείται ότι αυτή η εξίσωση στροβίλου είναι σύμφωνη με τις αδιάστατες προδιαγραφές απόδοσης για $r = r_c$. Αυτή η εξίσωση δίνης περιλαμβάνει μια ευρεία ποικιλία των μορφών σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένων των μορφών που συνηθέστερα χρησιμοποιούνται. Στην έξοδο του ρότορα, υποθέτουμε ότι ολική ενθαλπία είναι σταθερή.

$$C_{\theta 2}/U_c = C_{\theta 1}/U_c + \psi_c(r_c/r) \quad (1-21)$$

Για το πρόβλημα μας, της βαθμίδας επανάληψης, οι άλλες κατανομές ταχύτητας της εφαπτομένης δίνονται από τους τύπους

$$C_{\theta 3}/U_c = C_{\theta 1}/U_c \quad (1-22)$$

$$C_{\theta 0}/U_c = C_{\theta 4}/U_c = 0 \quad (1-23)$$

Η βασική κανονική εξίσωση ισορροπίας λαμβάνεται από την εξίσωση

$k_m W_m^2 + \frac{W_q}{r} \frac{\partial(rW_q + wr^2)}{\partial n} + W_m \frac{\partial W_m}{\partial n} = \frac{\partial I}{\partial n} - T \frac{\partial s}{\partial n}$ εκφράζοντας τη με σταθερές συντεταγμένες, παραλείποντας την βελτιστοποίηση της καμπυλότητας και την κλίση της εντροπίας. Για την παρούσα περίπτωση, η μεσημβρινή συντεταγμένη είναι z, και η κανονική συντεταγμένη είναι r. Αυτό προκύπτει

$$C_z \frac{\partial C_z}{\partial r} + \frac{C_q}{r} \frac{\partial r C_q}{\partial r} = \frac{\partial H}{\partial r} \quad (1-24)$$

Η κλίση της ολικής ενθαλπίας θα είναι επίσης μηδέν, αλλά αυτός ο όρος έχει διατηρηθεί για να προσαρμόσει την παροχή με σκοπό μια γενικευμένη κατανομή φόρτισης. Η εξίσωση (1-24) μπορεί να ολοκληρωθεί αριθμητικά, με τη σταθερά ολοκλήρωσης που παρέχεται από τη γνώση της τιμής του φ_c . Ως εκ τούτου, τα αδιάστατα τμήματα της ταχύτητας και τα τρίγωνα ταχυτήτων μπορούν να υπολογιστούν σε όλους τους αξονικούς σταθμούς στο σχέδιο 1-1 και σε όλες τις ακτίνες μόλις δοθούν οι τιμές των φ_c , ψ_c , R_c , n και m . Οι διευκρινισμένες τιμές των ακτινών πλήμνης, κελύφους και αναφοράς απαιτούνται επίσης. Ο σχεδιασμός των πτερυγίων για να παραγάγει αυτά τα τρίγωνα ταχύτητας σχολιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

Η πρακτική εφαρμογή ή η αξιολόγηση αυτών των ιδανικών σχεδίων βαθμίδας παρέχεται μέσω των διαδικασιών ανάλυσης της απόδοσης. Ο ιδανικός σχεδιασμός βαθμίδας ολοκληρώνεται πάνω από μια σειρά ακτίνων αρκετών για να περάσουν την επιθυμητή παροχή μάζας για τις προοριζόμενες εφαρμογές. Έπειτα η ανάλυση της απόδοσης επιλέγει το τμήμα των πτερυγίων που απαιτείται πραγματικά για το σχεδιασμό, χρησιμοποιώντας την ικανότητα ταξινόμησης του δακτυλίου.

1.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Μόλις υπολογιστούν η συνιστώσα της ταχύτητας και οι κατανομές των τριγώνων ταχυτήτων στους σταθμούς εισόδου και εξόδου για όλες τις σειρές των πτερυγίων που σχεδιάζονται, μπορεί να υπολογιστεί η γεωμετρία των

πτερυγίων. Μερικά βασικά γεωμετρικά στοιχεία πρέπει να διευκρινιστούν για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία σχεδιασμού των πτερυγίων. Διάφορες εναλλακτικές προδιαγραφές είναι δυνατές, οι ακόλουθες προδιαγραφές είναι αποτελεσματικές και σχετικά εύκολες να προκύψουν :

- Καθορίστε τη γραμμική καμπυλότητα των πτερυγίων και τον τύπο του προφίλ που θα χρησιμοποιηθεί.
- Καθορίστε τον αριθμό των πτερυγίων στην σειρά πτερυγίων, Z .
- Καθορίστε τη χορδή, c , στις ακτίνες πλήμνων, αναφοράς και κελύφους.
- Καθορίστε τον λόγο πάχος-χορδής, t_b/c , στην ακτίνα πλήμνης, αναφοράς και κελύφους.
- Αν είναι απαραίτητο, καθορίστε τη θέση της μέγιστης καμπυλότητας, a/c .
- Για τα πτερύγια διπλού κυκλικού τόξου διευκρινίστε τις ακτίνες μύτης του αρχικού άκρου και του πίπτουν άκρου, r_o . Η κατάλληλη προδιαγραφή είναι ο λόγος, r_o/t_b .
- Καθορίστε τη διαφορά μεταξύ της γωνίας πρόσπτωσης και της γωνίας πρόσπτωσης σχεδιασμού, $\Delta i = i - i^*$, στην ακτίνα πλήμνης, αναφοράς και κελύφους.

Οι τιμές των c , t_b/c και Δi για τις άλλες ακτίνες λαμβάνονται από τα τρία σημεία της παρεμβολής που παρέχονται. Η τοπική τάση δίνεται από τον τύπο

$$\sigma = cZ/(2\pi r) \quad (1-25)$$

Η σύμβαση προσήμου γωνίας των πτερυγίων που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία οδηγεί γενικά σε μια κρίσιμη γωνία για τον ρότορα και τα οδηγία πτερύγια. Για να εφαρμοστούν οι διαδικασίες της γεωμετρίας των πτερυγίων και τα εμπειρικά πρότυπα απόδοσης υδατόπτωσης σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι απαραίτητο να αλλάξουν τα σημεία σε όλες τις γωνίες της ροής και των πτερυγίων. Αφότου η σχεδίαση των πτερυγίων έχει ολοκληρωθεί, τα σημεία όλων των γωνιών αλλάζουν λαμβάνοντας τη γεωμετρία των πτερυγίων σύμφωνα με τη σύμβαση των σημείων που χρησιμοποιείται. Η διαδικασία σχεδιασμού των πτερυγίων θα διευκρινιστεί για τα πτερύγια του ρότορα, έχοντας κατανοήσει ότι απαιτείται ρύθμιση των σημείων. Ο σχεδιασμός άλλων σειρών πτερυγίων αντιμετωπίζεται με τον ίδιο τρόπο. Η διαδικασία είναι η ακόλουθη:

- Αρχικά θεωρήστε την γωνία των πτερυγίων στην είσοδο και τη γωνία αποφόρτισης ίση με τη σχετική γωνία ροής, δηλ. $\kappa_1 = \beta'_1$, $\kappa_2 = \beta'_2$.
- Υπολογίστε όλες της άλλες γεωμετρικές υδατόπτωσης για $\kappa_1 = \beta'_1$ και $\kappa_2 = \beta'_2$
- Υπολογίστε τα i^* και δ^* .

- Υπολογίστε ξανά την γωνία των πτερυγίων στην είσοδο και τη γωνία αποφόρτισης για $\kappa_1 = \beta'_1 - i^* - \Delta i$ και $\kappa_2 = \beta'_2 - \delta^*$.
- Επαναλάβετε τα βήματα 2 έως 4 μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση μεταξύ κ_1 και κ_2 .

Όταν τα πτερύγια σχεδιαστούν σε όλες τις ακτίνες, όλα τα στοιχεία που απαιτούνται για την ανάλυση της απόδοσης είναι διαθέσιμα.

1.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

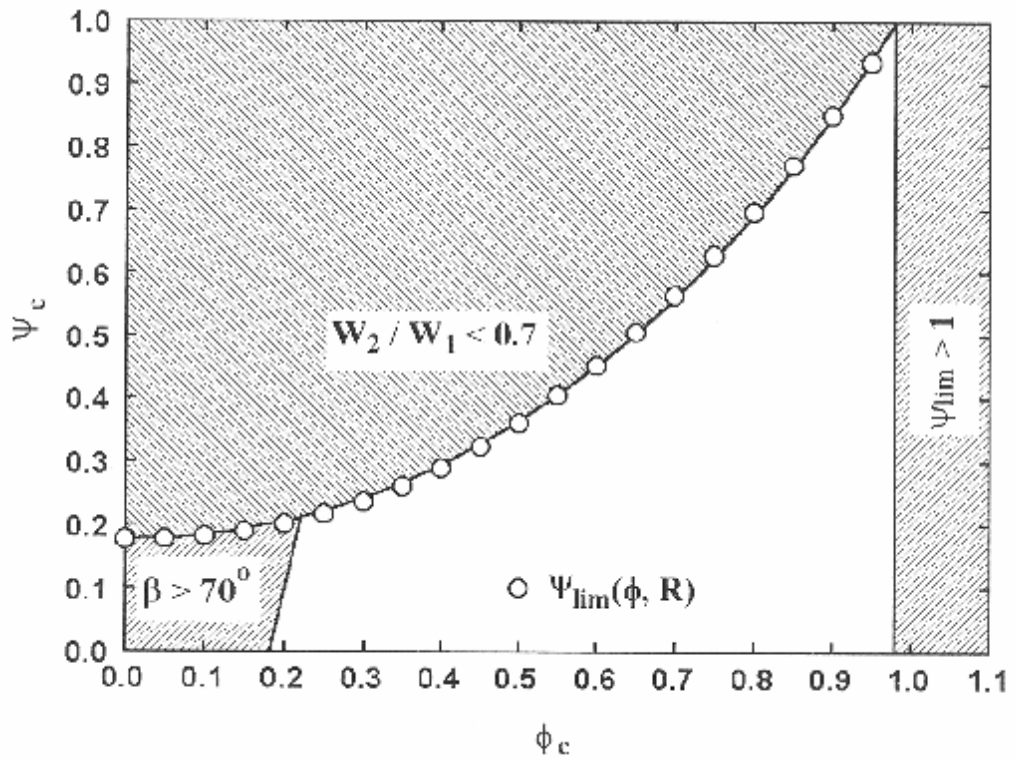
Μπορεί να φανεί ότι ο σχεδιαστής έχει μια απέραντη σειρά επιλογών για το σχεδιασμό της βαθμίδας μέσω των βασικών προδιαγραφών απόδοσης φ_c , ψ_c , του R_c , του η και του m . Αυτό ισχύει βεβαίως μέχρι ενός ορισμένου βαθμού, αλλά οι πρακτικές εκτιμήσεις μειώνουν εντυπωσιακά τις επιλογές του σχεδιαστή. Όταν οι υποδείξεις από τη βιβλιογραφία, που αποκτήθηκαν από προηγούμενη εμπειρία σχεδιασμού βαθμίδων, εξετάζονται, το πεδίο των επιλογών του σχεδιαστή γίνεται αρκετά περιορισμένο. Τα σχήματα 1-3 μέχρι 1-5 επεξηγούν τους πρακτικούς περιορισμούς. Εδώ, υποτίθεται ότι ο λόγος της σχετικής ταχύτητας πέρα από οποιαδήποτε σειρά πτερυγίων δεν πρέπει να είναι λιγότερο από 0.7. Αυτό είναι ένα ρυθμισμένο εκ του Haller όριο απώλειας στήριξης που λαμβάνεται από την εξίσωση $W_{RE} < \frac{(0.15 + 11t_b/c)/(0.25 + 10t_b/c)}{1 + 0.4[qs/[2\sin(q/2)\cos g]]^{0.65}}$

χρησιμοποιώντας το όριο που εκφράζεται στην εξίσωση $qs/[2\sin(q/2)\cos g] \geq 1.1$ και με $t_b/c = 0.1$. Σημειώνεται ότι ο ελάχιστος λόγος της σχετική ταχύτητας σχεδόν πάντα θα εμφανίζεται είτε στην ακτίνα της πλήμνης είτε του κελύφους, είναι αμφισβητήσιμο ότι ο σχεδιασμός για χαμηλότερους λόγους ταχύτητας στην ακτίνα αναφοράς θα ήταν μια σοφή επιλογή. Οι εξισώσεις (1-11) και (1-12) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκφραστεί ο λόγος της σχετικής ταχύτητας των πτερυγίων του ρότορα όπως

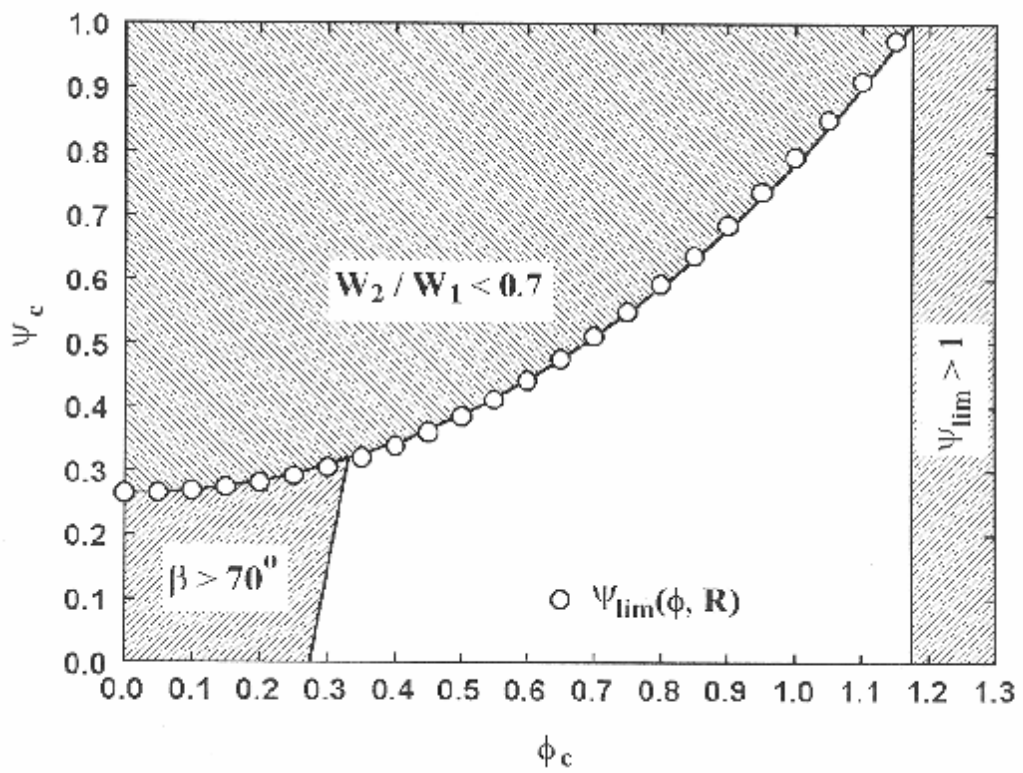
$$\frac{W_2}{W_1} = \sqrt{\frac{f_c + (y_c/2 - R_c)^2}{f_c + (y_c/2 + R_c)^2}} \quad (1-26)$$

Ομοίως, για των στάτη, από τις εξισώσεις (10-9) και (10-10) προκύπτει

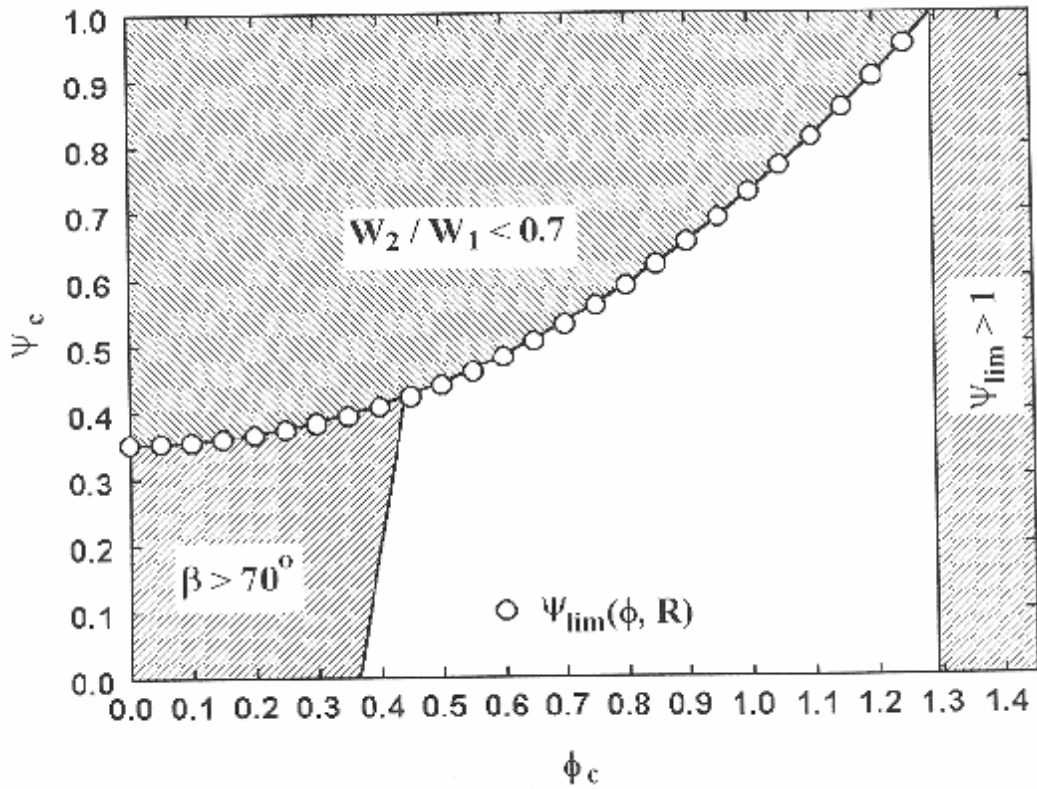
$$\frac{C_3}{C_2} = \frac{C_1}{C_2} = \sqrt{\frac{f_c + (1 - R_c - y_c/2)^2}{f_c + (1 - R_c + y_c/2)^2}} \quad (1-27)$$



ΣΧΗΜΑ 1-3 ψ - ϕ όρια για 50% αντίδραση



ΣΧΗΜΑ 1-4 ϕ - ψ όρια για 25% και 75% αντίδραση



ΣΧΗΜΑ 1-5 φ-ψ όρια για 0% και 100% αντίδραση

Από τις εξισώσεις (1-26) και (1-27) προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα για αντίδραση 50%, δηλ. τα τρίγωνα ταχυτήτων για τον ρότορα και το στάτη είναι ίδια (εκτός από τη σύμβαση προσήμου). Εάν αυτές οι εξισώσεις εφαρμόζονται για αντίδραση 25% και 75%, μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι ο λόγος της ελάχιστης ταχύτητας θα είναι ίδιος και για τις δύο περιπτώσεις. Για αυτές τις δύο περιπτώσεις το ελάχιστο εμφανίζεται για διαφορετικές σειρές πτερυγίων. Κατά συνέπεια, οι περιορισμοί που επιβάλλονται από το όριο του λόγου της ταχύτητας είναι συμμετρικοί για $R_c = 0.5$. Είναι χρήσιμο να διευκρινιστεί ο συντελεστής φόρτισης ως κλάσμα της τιμής σε αυτό το όριο του λόγου ταχύτητας για να επιλέξει ευκολότερα τις πρακτικές τιμές. Αυτό γίνεται εύκολα χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο εμπειρικό συσχετισμό για Ψ_c που αντιστοιχεί σε λόγο ταχύτητας 0.7.

$$y_{lim}(f, R) = \frac{6\hat{R}}{17} + 0.85 \left(\frac{0.5}{\hat{R}} \right)^{1.18} f^{(2+0.1/\hat{R})} \quad (1-28)$$

$$\hat{R} = 0.5 + |R - 0.5| \quad (1-29)$$

Τα αποτελέσματα από αυτήν την εμπειρική εξίσωση απεικονίζονται στα σχήματα (1-3) μέχρι (1-5). Ένας άλλος περιορισμός που χρησιμοποιείται στα σχήματα 1-3 μέχρι 1-5 είναι ότι οι απόλυτες τιμές όλων των γωνιών ροής δεν πρέπει να υπερβούν τις 70° . Μεγαλύτερες γωνίες ροής είναι πιθανό να μην είναι πρακτικές όσον αφορά τη διατήρηση μιας αποδεκτής περιοχής λαιμού. Πέρα από αυτό, πολλοί από τους εμπειρικούς συσχετισμούς απόδοσης υδατόπτωσης περιορίζονται για γωνίες ροής μικρότερες από 70° , ο οποίος είναι επαρκής λόγος για να επιβάλλουμε αυτό το όριο. Σημειώνοντας ότι $\beta_3 = \beta_1$, οι εξισώσεις (1-14) και (1-15) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκφράσουν αυτό το όριο κατά προσέγγιση

$$y_c / 2 \leq 2.75f_c - R_c \quad (1-30)$$

$$y_c / 2 \leq 2.75f_c + R_c - 1 \quad (1-31)$$

Σημειώστε ότι τα όρια που επιβάλλονται από αυτόν τον περιορισμό είναι επίσης συμμετρικά για $R_c = 0.5$. Κατά συνέπεια, αυτές οι απλές πρακτικές εκτιμήσεις έχουν μειώσει ουσιαστικά το πεδίο των επιλογών για Φ_c και Ψ_c . Μπορεί επίσης να διαπιστωθεί ότι η αντίδραση 50% επιτρέπει το σχεδιασμό για τις χαμηλότερες τιμές Φ_c και Ψ_c . Πράγματι, όπως η αντίδραση αυξάνεται ή μειώνεται από 50%, ο σημαντικότερος αντίκτυπος που παρατηρείτε στα σχήματα (1-3) μέχρι (1-5) είναι ότι το αποδεκτό πεδίο επιλογών σχεδιασμού για Φ_c κινείται προς τις υψηλότερες τιμές. Υπάρχει επίσης μια μείωση στο πεδίο των αποδεκτών τιμών του Ψ_c για μια δεδομένη τιμή του Φ_c , αλλά αυτή η επίδραση είναι σχετικά δευτερεύουσα.

Μια άλλη σημαντική εκτίμηση είναι ότι προκύπτει ένα αποδεκτό πεδίο ροής μεταξύ του λόγου ροής στο σημείο σχεδιασμού και του λόγου ροής κατά το οποίο εμφανίζεται το κύμα. Εναλλακτικά, μπορεί να εκφραστεί με τη διαφορά της πίεσης εκροής μεταξύ του σημείου σχεδιασμού και του σημείου κύματος. Είναι σαφές ότι η βελτίωση του μπορεί να προκύψει σχεδιάζοντας μια πιο απότομη κλίση στη χαρακτηριστική της σταθερής ταχύτητας πίεση ροής. Αυτό αντιστέκεται στην τάση αύξησης των απωλειών ή της απότομης απώλειας στήριξης για να αναγκάσει τη χαρακτηριστική προς μια ασταθή θετική κλίση καθώς το ποσοστό ροής μειώνεται. Ο Cumpsty (1989) σημείωσε ότι είναι χρήσιμο να προσεγγιστεί η καμπύλη φόρτισης της εισαγωγής στη μορφή

$$y = 1 - f(\tan b_1 - \tan b_2) \quad (1-32)$$

Αυτή η σχέση προκύπτει από τις εξισώσεις (1-13) και (1-16). Το πλεονέκτημα αυτής της μορφής της εξίσωσης εισαγωγής φόρτισης είναι ότι οι γωνίες ροής που περιλαμβάνονται είναι και οι δύο γωνίες αποφόρτισης σχετικά με την ανάντη σειρά πτερυγίων. Η γωνία απόκλισης είναι μια πολύ αδύναμη

λειτουργία της γωνίας πρόσπτωσης. Ως εκ τούτου, αυτές οι γωνίες ροής μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι περίπου σταθερές πάνω από μια γραμμική ταχύτητα. Όπως διευκρινίζεται στο σχήμα 10-6, αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κατά προσέγγιση στην εξίσωση (1-32)

$$y \approx 1 - (1 - y_c) f / f_c \quad (1-33)$$

Ακολουθεί ότι το πεδίο αυτό θα βελτιωθεί με την επιλογή των χαμηλότερων τιμών των Φ_c και Ψ_c . Από τις εξισώσεις (1-13), (1-16) και (1-32) εύκολα αποδεικνύεται ότι η κλίση του Ψ ως συνάρτηση του Φ θα είναι θετική εάν επιλεγεί $\Psi_c > 1$. Αυτό είναι βεβαίως ασυμβίβαστο με ένα λογικό όριο κύματος. Ως εκ τούτου, $\Psi_{lim} > 1$ αντιμετωπίζεται ως τρίτος περιορισμός στα σχήματα 1-3 μέχρι 1-5. Ο Cumpsty (1989) επίσης σημείωσε ότι η κλίση της χαρακτηριστικής φόρτισης εισαγωγής είναι σημαντικό να αντιστέκεται στην επιρροή της παραμόρφωσης των τοπικών ολικών πιέσεων, ακόμη και στους όρους λειτουργίας μακριά από την αναρρόφηση. Το επεξηγεί αυτό με το να προσεγγίσει τη ροή ως ασυμπίεστη, έτσι ώστε

$$P_t = P + \frac{1}{2} r W^2 = P + r U^2 f^2 / \cos^2 b' \quad (1-34)$$

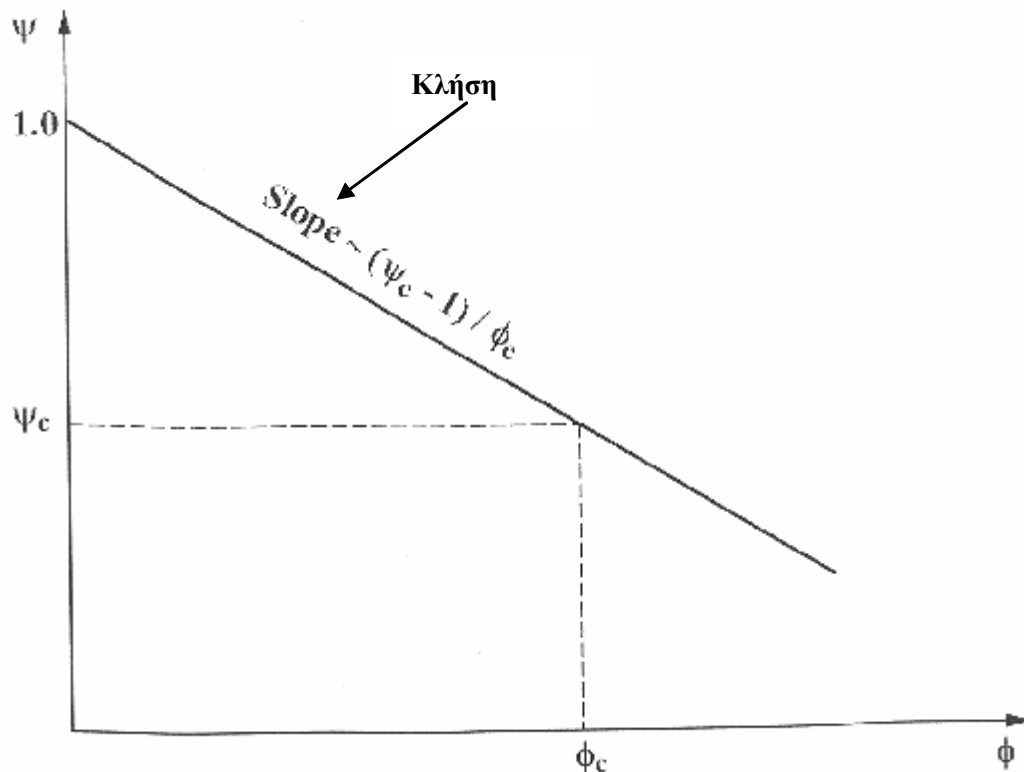
Ως εκ τούτου μια τοπική διαταραχή στην ολική πίεση, μέσα σε έναν ουσιαστικά σταθερό πεδίο ροής στατικής πίεσης, μπορεί να προσεγγιστεί από

$$dP_t = 2rU^2 f df / \cos^2 b' \quad (1-35)$$

Έπειτα ένα τοπικό έλλειμμα στη ολική πίεση θα παραγάγει ένα τοπικό έλλειμμα στον ϕ . Εάν η χαρακτηριστική της φόρτισης-εισαγωγής είναι αρκετά απότομη, η αντίστοιχη αύξηση στο Ψ θα μειωθεί, και ενδεχομένως θα εξαλείψει, το ολικό έλλειμμα πίεσης.

Ο Smith (1958) παρέχει μια πιο λεπτομερή ανάλυση της ικανότητας σχεδιασμού της βαθμίδας για να αντισταθεί στο έλλειμμα της τοπικής ολικής πίεσης και αναφέρει ότι ο NACA είχε φθάσει σχεδόν στο ακριβώς ίδιο αποτέλεσμα. Χρησιμοποιώντας τα ανάλογα επιχειρήματα με την εξίσωση (1-35), ο Smith ανέπτυξε μια εξίσωση για να εκφράσει το μέγεθος ενός ελλείμματος πίεσης, $(\delta P_t)_{out}$, στη βαθμίδα εξόδου που προκαλείται από ένα τοπικό έλλειμμα εισόδου, $(\delta P_t)_{in}$. Το εξέφρασε αυτό με μια παραμέτρο, R_R , που ονόμασε λόγο αποκατάστασης

$$R_R = 1 - \frac{(\delta P_t)_{out}}{(\delta P_t)_{in}} \quad (1-36)$$



ΣΧΗΜΑ 1-6 Χαρακτηριστική της φόρτισης εισόδου κατά προσέγγιση

Ακολουθεί ότι για $R_R = 1$, το ολικό έλλειμμα πίεσης εισόδου έχει αφαιρεθεί εντελώς στη βαθμίδα εξόδου. Για την περίπτωση που αντιστοιχεί στη παρούσα αδιάστατη παράμετρο απόδοσης για την ακτίνα αναφοράς, ο λόγος αποκατάστασης του Smith μπορεί να εκφραστεί ως εξής

$$R_R = (\cos^2 b_1 \tan b_1 - \cos^2 b_2' \tan b_2') / f + (\cos^2 b_1 \cos^2 b_2' \tan b_1 \tan b_2') / f \quad (1-37)$$

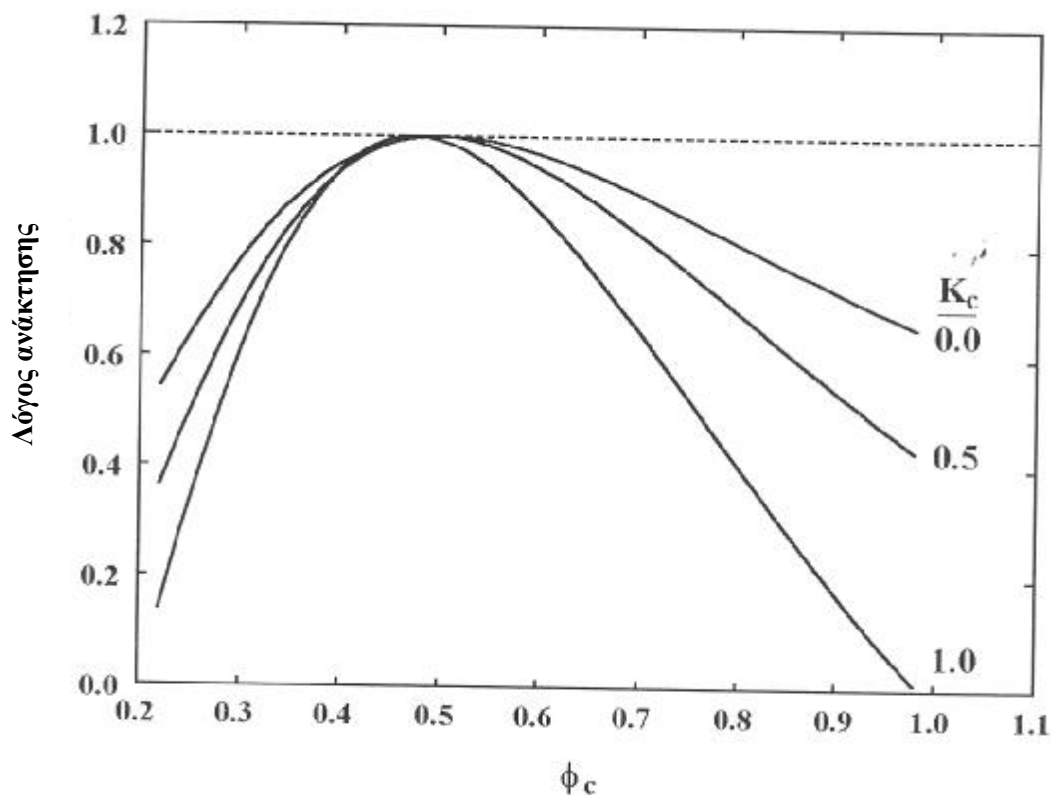
Άλλη μια φορά, μπορεί να αποδειχθεί ότι το R_R είναι συμμετρικό για $R = 0.5$. Τα σχήματα 1-7 μέχρι 10-9 δείχνουν χαρακτηριστικά αποτελέσματα για τις διάφορες τιμές της αντίδρασης. Για να διατηρήσουμε τις λογικές τιμές Ψ_c σε αυτές τις προβλέψεις, το Φ_c περιορίστηκε στα όρια που παρουσιάστηκαν στα σχήματα (1-3) μέχρι (1-5), και η εξίσωση (1-28) χρησιμοποιήθηκε στη μορφή

$$y_c = K_{\omega} y_{\lim}(f_c, R_c) \quad (1-38)$$

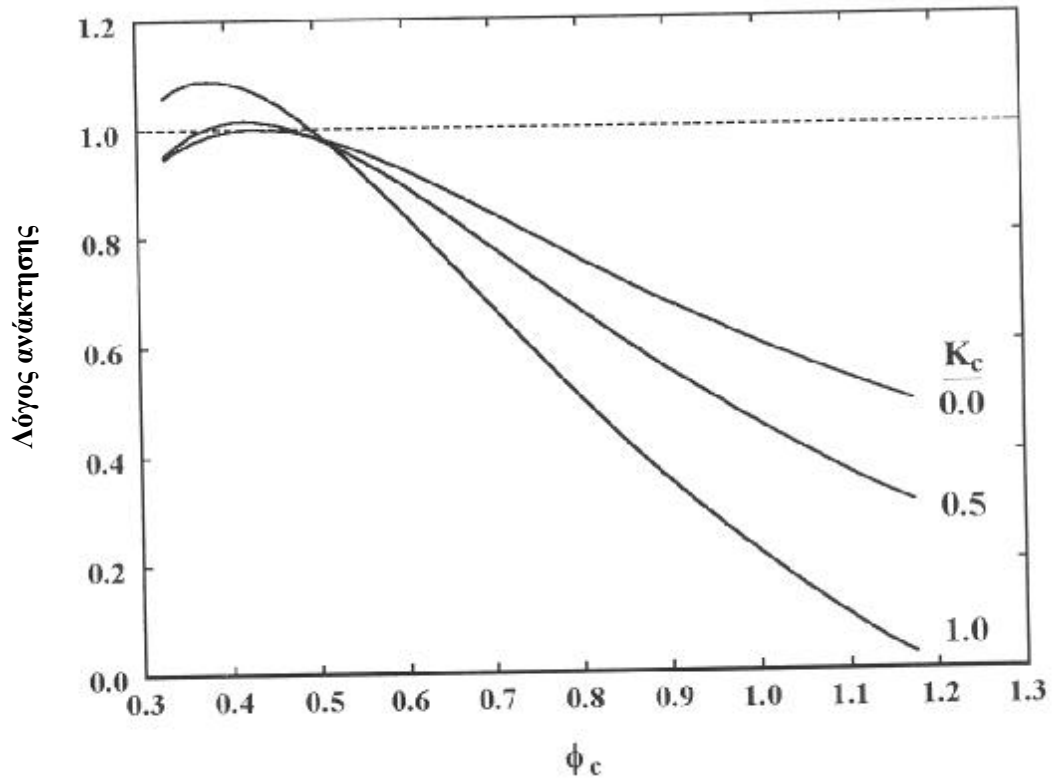
Ενώ οι τιμές του $R_R = 1$ βεβαίως δεν απαιτούνται, αναμένεται ότι οι μικρές ή αρνητικές τιμές πρέπει να αποφευχθούν όπου είναι δυνατόν. Με βάση αποτελέσματα παρόμοια με εκείνα που παρουσιάζονται στα σχήματα 1-7 μέχρι 1-9, ο Smith διαπίστωσε ότι προτιμώνται οι τιμές του $\Phi_c < 0.5$. Πράγματι, η

καλύτερη επιλογή για όλες τις ακτίνες θα ήταν $\Phi < 0.5$, ο οποίος είναι ένας πολύ ισχυρότερος περιορισμός. Σαφώς, εάν το $\Phi_c = 0.5$ τότε θα επιβαλλόταν ως ανώτερο όριο στα σχήματα 1-3 μέχρι 1-5 και το πεδίο των διαθέσιμων επιλογών του σχεδιαστή θα ήταν περιορισμένο. Αυτό δεν θεωρείται αρμόζον λαμβάνοντας υπόψη τα πολλά επιτυχή σχέδια συμπιεστών αξονικής ροής που έχουν χρησιμοποιηθεί για πολύ υψηλότερες τιμές του Φ_c . Άλλά φαίνεται να υπάρχει μια σαφής τάση προς τις χαμηλότερες τιμές του Φ_c στα πιο σύγχρονα σχέδια. Ο Smith επίσης κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο λόγος αποκατάστασης δεν είναι μια ισχυρή λειτουργία της αντίδρασης, η οποία μπορεί να είναι κάπως αμφισβητήσιμη. Είναι προφανές ότι θα ισχύει $R_R < 1$ για οποιοδήποτε πρακτικό συνδυασμό του Φ_c και του Ψ_c όταν το R_c είναι 0 ή 1.

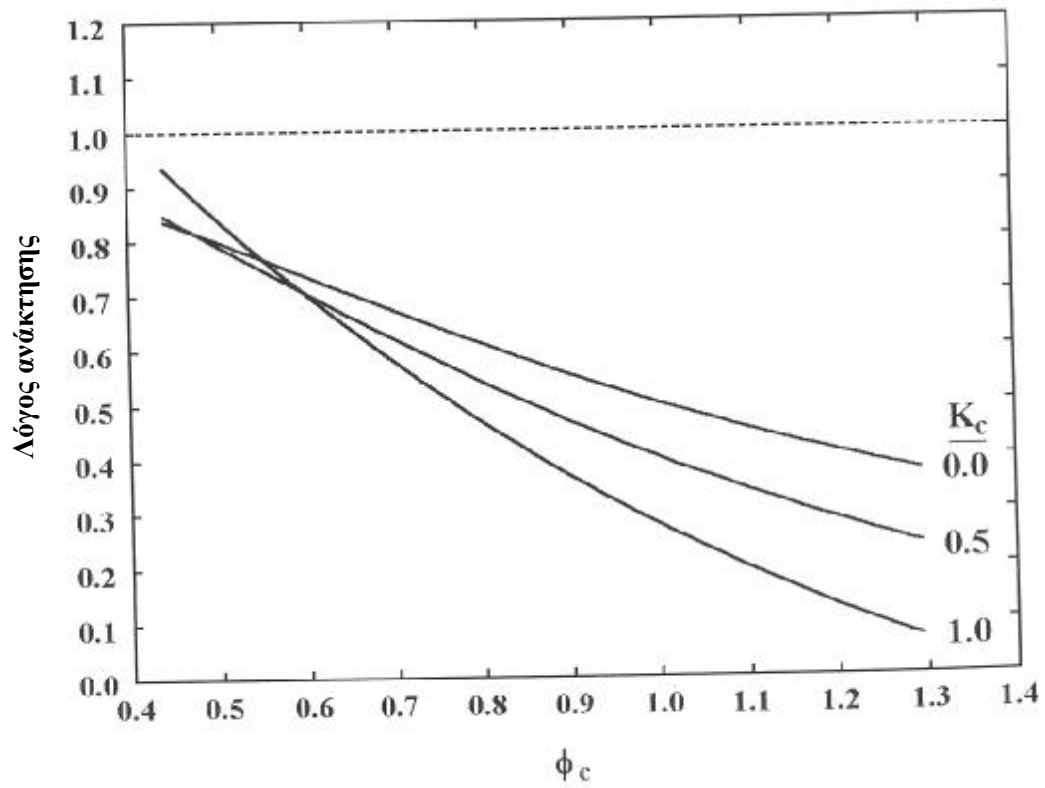
Άλλος διαθέσιμος χειρισμός για την επιλογή του Φ_c , Ψ_c και R_c είναι περισσότερο υπό τη μορφή απόψεων και εμπειροτεχνικών πρακτικών. Είναι κοινή πρακτική να ευνοηθούν τα σχέδια με 50% αντίδραση, τα οποία είναι βασισμένα στο διαισθητικό όφελος που κατανέμει το φορτίο διάχυσης της ροής εξίσου μεταξύ του ρότορα και του στάτη. Μερικές φορές συστήνεται η ελαφρώς υψηλότερη αντίδραση βασισμένη στην υπόθεση ότι οι ρότορες είναι ελαφρώς αποδοτικότεροι από τους στάτες. Ομοίως, οι σχεδιαστές φαίνονται να είναι πιο



ΣΧΗΜΑ 1-7 R_R για 50% αντίδραση



ΣΧΗΜΑ 1-8 R_R για 50% και 75% αντίδραση



ΣΧΗΜΑ 1-9 R_R για 0% και 100% αντίδραση

άνετοι επιλέγοντας $\Psi_c \leq 0.4$ στις περισσότερες περιπτώσεις. Καμία από αυτές τις απόψεις δεν έχει τεκμηριωθεί καλά είτε από πειράματα είτε από αναλύσεις. Πράγματι, τέτοιες κατευθυντήριες οδηγίες είναι κατά κάποιο βαθμό ακαδημαϊκές, δεδομένου ότι η επιλογή των Φ_c , Ψ_c και R_c εξαρτάται από πολλούς άλλους παράγοντες. Ο τύπος δινών στροβίλου που συζητείται στην επόμενη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου είναι πολύ σημαντικός. Αυτός καθορίζει τα στάδια απόδοσης σε διάφορες ακτίνες, και μπορεί να έχει μια σημαντική επιρροή στην επιλογή των ακτίνων αναφοράς των παραμέτρων απόδοσης. Επίσης, οι εξελίξεις σε αυτό το κεφάλαιο δεν εξετάζουν την επίδραση του επιπέδου του αριθμού Mach, το οποίο μπορεί να έχει σημαντικές συνέπειες και να επιβάλει σαφής περιορισμούς. Αυτός μπορεί να εμφανιστεί σε έναν κοινό στόχο σχεδίου για σχεδόν όλα τα σχέδια των συμπιεστών αξονικής ροής, δηλ., επιτυγχάνοντας τη μέγιστη ροή μάζας ανά μετωπική περιοχή μονάδων και τον ελάχιστο αριθμό σταδίων. Για τους συμπιεστές των μηχανών των αεροσκαφών αυτό επιτρέπει ουσιαστικές μειώσεις του μεγέθους και του βάρους, ενώ για τους βιομηχανικούς συμπιεστές το σημαντικό όφελος είναι το μειωμένο μέγεθος και κόστος. Σε καθεμία περίπτωση, αυτό ενθαρρύνει αμέσως την επιλογή των μεγαλύτερων τιμών Ψ_c και Φ_c , αν και οι χαμηλότερες τιμές του Φ_c προτιμώνται γενικά. Αυτό μπορεί να επιλυθεί με το απλά να σχεδιάσει για μια υψηλότερη ταχύτητα για να ικανοποιήσει και τις δύο ανάγκες. Αλλά τα αποτελέσματα του αριθμού Mach επιβάλλουν τα καθορισμένα όρια σε εκείνη την προσέγγιση καθώς επίσης και το αποτέλεσμα στις ποινές απόδοσης όταν χρησιμοποιείται η προσέγγιση.

1.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΤΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΔΙΝΗΣ

Εκτός από τις παραμέτρους αναφοράς της ακτινικής απόδοσης, είναι απαραίτητο να επιλεγεί ο τύπος δινών διευκρινίζοντας τα n και m στον τύπο (1-20) για να οριστεί στην είσοδο του ρότορα η κατανομή C_θ . Οι κατανομές C_θ σε άλλα στάδια δίνονται από τους τύπους (1-21) μέχρι (1-23) για μια σταθερή φόρτιση, βαθμίδας επανάληψης. Όταν οι κατανομές C_θ είναι γνωστές, οι κατανομές του C_z σε όλα τα στάδια λαμβάνονται με την επίλυση του τύπου (1-24). Κατόπιν τα τρίγωνα ταχυτήτων είναι γνωστά σε όλες τις ακτίνες για όλα τα στάδια. Εάν εκείνα τα τρίγωνα ταχυτήτων είναι αποδεκτά, τα πτερύγια μπορούν να σχεδιαστούν όπως περιγράφεται στην παράγραφο 1.3. Σε αυτό το σημείο της διαδικασίας σχεδιασμού, τα ρευστοδυναμικά στοιχεία είναι διαθέσιμα σε όλες τις ακτίνες και πρέπει να αξιολογηθούν. Οι ίδιες προτιμήσεις σχεδιασμού και πρακτικά όρια θεωρούνται ανάλογες στην ακτίνα αναφοράς και είναι βεβαίως σχετικές σε άλλες ακτίνες επίσης. Θα παρατηρηθεί ότι τα προβλήματα συνδέονται με την υπερβολική διάχυση ροής ή με τα αναμενόμενα όρια του αριθμού Mach που σχεδόν πάντα εμφανίζονται πρώτα στα ακριανά τοιχώματα, συνήθως στις θέσεις του κελύφους του ρότορα και της πλήμνης του στάτη. Δεν

είναι ασυνήθιστο για μια προφανώς πολύ συντηρητική επιλογή των Φ_c , Ψ_c και R_c να παραχθούν μη αποδεκτές παράμετροι απόδοσης σε άλλες ακτίνες. Στις ακόλουθες παραγράφους, μερικοί ευρύτερα χρησιμοποιημένοι τύποι στροβίλων θα αναθεωρηθούν για να διευκρινιστούν μερικές σημαντικές μελέτες στην επιλογή του τύπου των δινών. Για να επιτραπεί η σύγκριση των διάφορων τύπων δινών, θα εξεταστεί ένα κοινό πρόβλημα σχεδιασμού. Όλα τα παραδείγματα θα είναι σταθερής φόρτισης, σχέδια βαθμίδας επανάληψης. Ο λόγος πλήμνης – ακροπτερυγίου $r_h/r = 0.5$ θα εξεταστεί, ο οποίος είναι χαρακτηριστικός των μπροστινών βαθμίδων σε έναν συμπιεστή αξονικής ροής. Η ακτίνα αναφοράς θα τεθεί για $r_c/r = 0.8$, το οποίο διαιρεί περίπου το δακτύλιο σε δύο ίσες μεταβατικές περιοχές. Σε γενικές γραμμές, η ακτίνα αναφοράς είναι μια αυθαίρετη παράμετρος σχεδιασμού, αλλά, στην πράξη η χρήση μιας χαρακτηριστικής μέσης ακτίνας είναι συνήθως απαραίτητη. Δεδομένου ότι το C_Z είναι σταθερό στο r_c , η χρήση μιας μέσης ακτίνας εξασφαλίζει κατά προσέγγιση τη διατήρηση της μάζας, η οποία θα απαιτηθεί όταν η βαθμίδα εφαρμόζεται σε έναν συμπιεστή. Εάν η βαθμίδα σχεδιασμού παρεκκλίνει πάρα πολύ μακριά από αυτό, τα τρίγωνα ταχυτήτων που παράγονται μετά από την ταξινόμηση της περιοχής δακτυλίων των συμπιεστών μπορούν να είναι πολύ διαφορετικά από τα επιδιωκόμενα.

1.6 ΡΟΗ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΔΙΝΗΣ

Είναι διδακτικό να αρχίσουμε με το δημοφιλές στιλ σχεδιασμού της ελεύθερης δίνης, το οποίο προκύπτει θέτοντας $n = m = 1$. Από τις εξισώσεις (1-20) μέσω (1-23) μπορεί να αποδειχθεί ότι αυτή παράγει τα σταθερά σχεδιαγράμματα γωνιακής ορμής (rC_θ) σε όλα τα στάδια. Εάν rC_θ και H είναι σταθερά, από την εξίσωση (1-24) επίσης προκύπτουν σταθερά σχεδιαγράμματα του C_Z . Πράγματι, δεδομένου ότι το C_Z είναι σταθερό στην ακτίνα αναφοράς, αυτό σημαίνει ότι το C_Z είναι σταθερό παντού. Ας σχεδιάσουμε μια βαθμίδα ελεύθερων δινών χρησιμοποιώντας πολύ συντηρητικά τις αδιάστατες παραμέτρους απόδοσης. Μετά ο Smith, (1958) καθόρισε το $\Phi_c = 0.5$. Για να παρέχει σημαντικό περιθώριο από το όριο φόρτισης, καθόρισε $k_c = 0.8$. Επέλεξε $R_c = 0.5$ για να κατανείμει τη φόρτιση εξίσου μεταξύ του ρότορα και του στάτη. Θα αναμενόταν ότι τέτοιες συντηρητικές προδιαγραφές σχεδιασμού και ένας τέτοιος απλός τύπος δίνης θα οδηγούσαν βεβαίως σε ένα αποδεκτό σχέδιο. Τα σχήματα 1-10 και 1-11 παρουσιάζουν μερικά από τα σημαντικά αποτελέσματα που επιτυγχάνονται με αυτές τις προδιαγραφές σχεδιασμού. Είναι προφανές από τις κατανομές της γωνίας ροής ότι αυτό το σχέδιο θα απαιτήσει ένα ιδιαίτερα συστραμένο πτερύγιο ρότορα, το οποίο μπορεί να δημιουργήσει δομικά και κατασκευαστικά προβλήματα. Το πτερύγιο του στάτη θα είναι ιδιαίτερα ελαστικό για να ταιριάζει με τις γωνίες ροής κοντά στο όριο 70° που προτείνεται νωρίτερα σε αυτό το κεφάλαιο. Αλλά σοβαρότερο είναι το γεγονός

ότι από το σχέδιο προκύπτει μια ουσιαστική περιοχή αρνητικής αντίδρασης κοντά στην πλήμνη. Αυτό οδηγεί στη σημαντική επιτάχυνση της ροής δια μέσω του ρότορα και τη σημαντική επιβράδυνση δια μέσω του στάτη. Ο στάτης είναι υπερφορτωμένος κοντά στην πλήμνη, και πιθανώς θα πέσει σε απώλεια στήριξης. Εφόσον $\Psi_h > 1$, η σταθερότητα είναι ένα ζήτημα, όπως σχολιάστηκε στην παράγραφο 1.4. Τα μη αποδεκτά χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυτού του παραδείγματος ήταν αναμενόμενα. Δεδομένου ότι το Φ είναι σταθερό σε όλες τις ακτίνες των σειρών των πτερυγίων, η εξίσωση (1-8) μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε ακτίνα για να προβλέψει την αντίδραση. Από την εξίσωση (1-20), προκύπτει ροή ελεύθερης δίνης

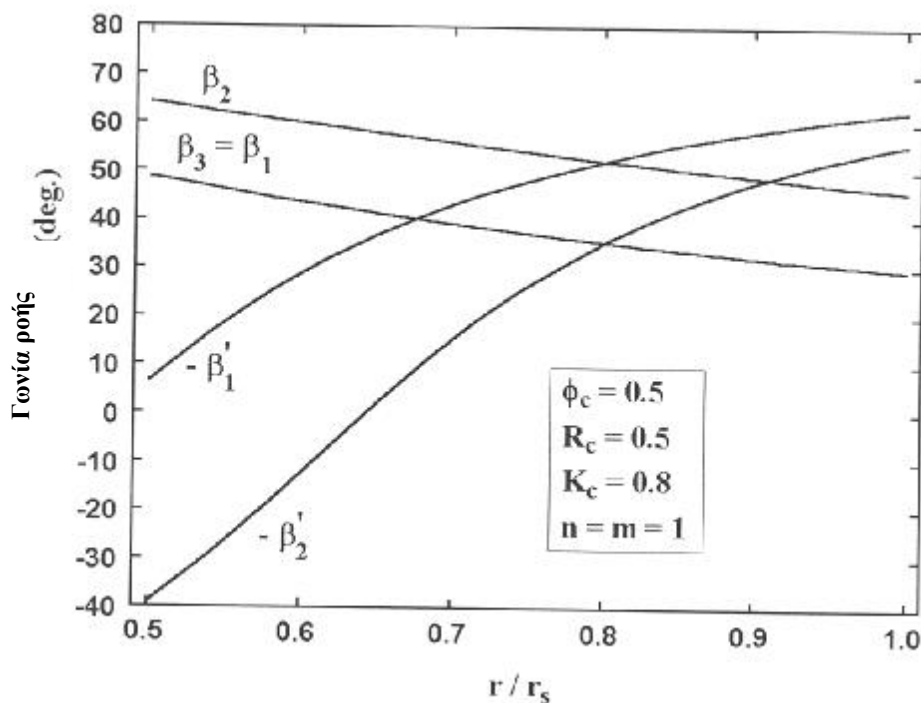
$$C_{q1}/U = (1 - R_c - y_c/2)(r_c/r)^2 \quad (1-39)$$

Η εξίσωση (1-21) προϋποθέτει

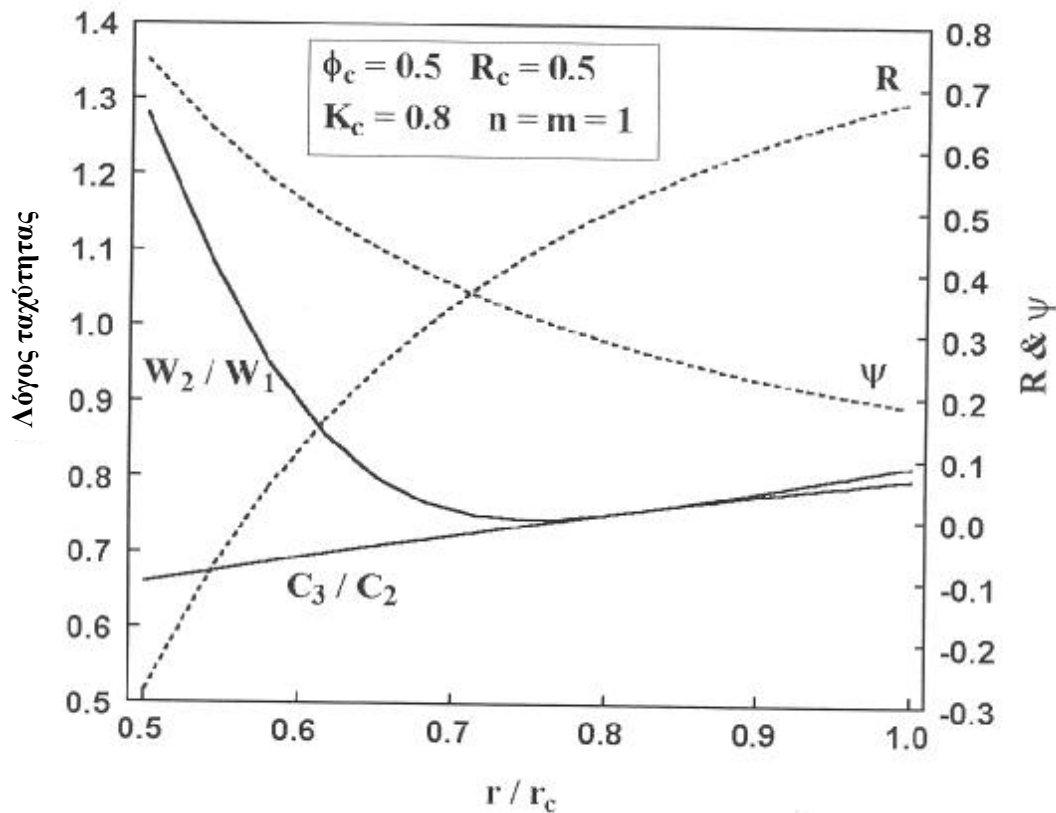
$$C_{q2}/U = C_{q1}/U + y_c(r_c/r)^2 \quad (1-40)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (1-39) και (1-40) στην εξίσωση (1-8) προκύπτει

$$R = 1 + (R_c - 1)(r_c/r)^2 \quad (1-41)$$



ΣΧΗΜΑ 1-10 Κατανομή της γωνίας ροής



ΣΧΗΜΑ 1-11 Κατανομή του φορτίου των πτερυγίων

Ως εκ τούτου ο όρος για να αποφευχθεί η αρνητική αντίδραση στην πλήμνη για την ροή ελεύθερης δίνης είναι

$$R_c \geq 1 - (r_h/r_c)^2 \quad (1-42)$$

Για το παράδειγμα αυτό απαιτείται $R_c \geq 0.609$. $R_c = 0.5$ μπορεί να διατηρηθεί με την απαίτηση $r_h/r_c \geq 0.7071$. Δεδομένου ότι το C_Z είναι σταθερό παντού, η επιλογή του r_c είναι αρκετά αυθαίρετη για την ροή ελεύθερης δίνης. Η πιθανότητα το R_h να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το μηδέν θα ήταν προτιμότερη, η οποία μπορεί να ληφθεί εύκολα χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1-41). Αυτό το απλό παράδειγμα διευκρινίζει ότι η επιλογή των αδιάστατων παραμέτρων της βαθμίδας απόδοσης επηρεάζεται έντονα από τον τύπο των δινών που χρησιμοποιείται και το διάστημα του λόγου ακτίνας που απαιτείται.

Αντί της βελτίωση του προηγούμενου παραδείγματος, είναι πιά χρήσιμο να συνεχιστεί η μελέτη της ροής ελεύθερης δίνης με μια συχνότερα χρησιμοποιημένη μορφή που λαμβάνεται με την προσθήκη της προϋπόθεσης ότι $C_{\theta 1} = C_{\theta 3} = 0$. Το πλεονέκτημα αυτής της μορφής είναι ότι δεν απαιτούνται οδηγία πτερύγια εισόδου ή εξόδου. Από την εξίσωση (1-9) απαιτεί

$$y_c = 2(1 - R_c) \quad (1-43)$$

Για να διατηρηθεί μια αρνητική κλίση στην χαρακτηριστική φόρτισης – εισαγωγής, απαιτείται $\Psi_c < 1$. Αυτό απαιτεί $R_c > 0.5$, το οποίο σημαίνει ότι ο ρότορας δέχεται πιο μεγάλο φορτίο από το στάτη. Για να διατηρηθεί ένα λογικό επίπεδο φορτίου στο ρότορα, είναι επιθυμητό να διευκρινιστεί επίσης ο λόγος ταχύτητας, W_{2c}/W_{1c} . Από τις εξισώσεις (1-26) και (1-43) προκύπτει

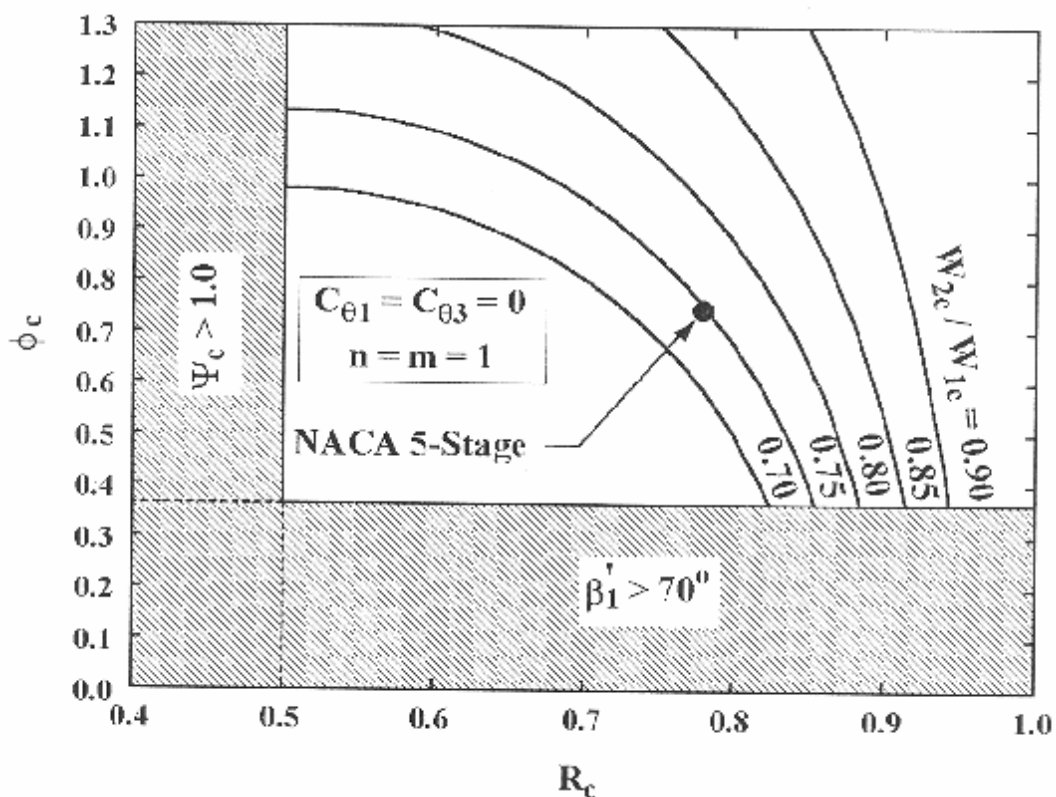
$$f_c^2 = \frac{(W_{2c}/W_{1c})^2 - (1 - 2R_c)^2}{1 - (W_{2c}/W_{1c})^2} \quad (1-44)$$

Το σχήμα 1-12 είναι ένα διάγραμμα (R_c , Φ_c) με W_{2c}/W_{1c} ως παράμετρος, με τα συνηθισμένα πρακτικά όρια που επιβάλλονται. Σαφώς, η σύσταση του Smith ότι $\Phi_c \leq 0.5$ απαιτεί αρκετά υψηλή αντίδραση. Από την εξίσωση (1-43) η οποία απαιτεί επίσης τις πολύ χαμηλές τιμές του Ψ_c . Έτσι, μπορεί να είναι δύσκολο να ακολουθηθεί η σύσταση του Smith διατηρώντας έναν λογικό συντελεστή φόρτισης εισαγωγής της βαθμίδας. Παραδείγματος χάριν, το σχήμα 1-12 (R_c , Φ_c) περιλαμβάνει το σημείο σχεδιασμού της μέσης-ακτίνας για την πρώτη βαθμίδα ενός συμπίεστη αξονικής ροής NACA 5-βαθμίδων (Sandercock et al., 1954). Αυτό είναι ένα πραγματικό παράδειγμα ενός σχεδίου ελευθέρων δινών με $C_{\theta 1} = 0$, το οποίο επεξηγεί τον τύπο συμβιβασμού που μπορεί να απαιτηθεί σε ένα πρακτικό στάδιο σχεδιασμού.

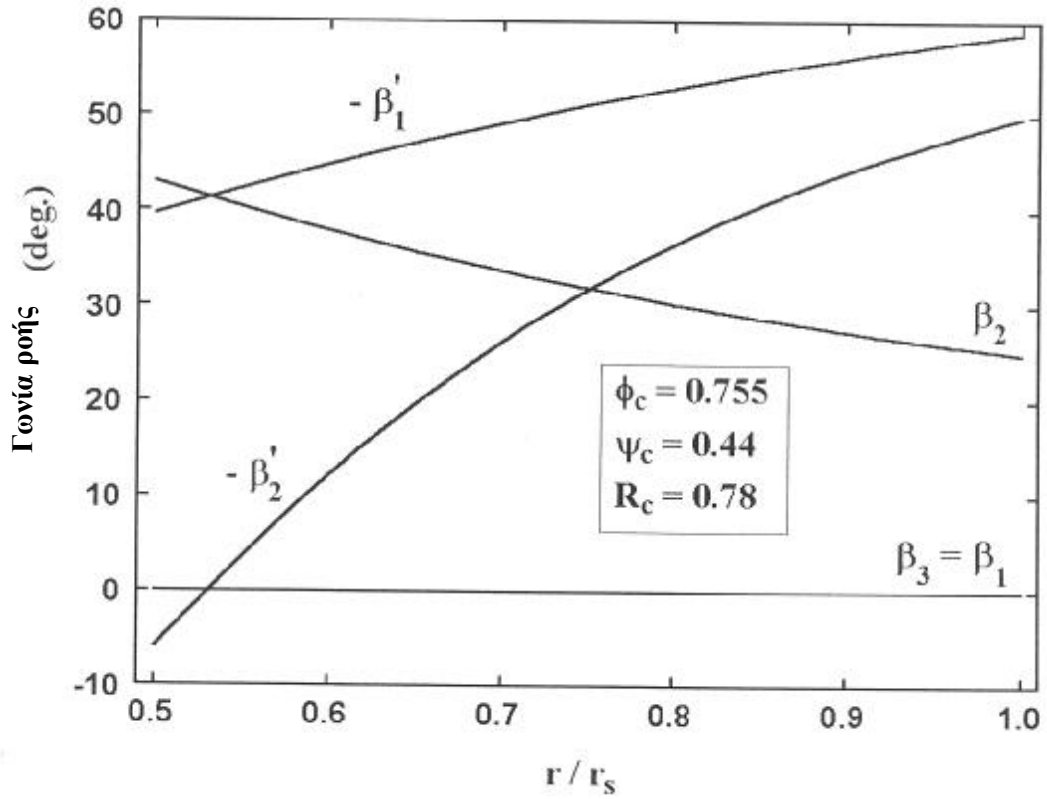
Για να επεξηγήσουν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του σχεδίου ελεύθερης-δίνης, οι βασικές προδιαγραφές για την πρώτη βαθμίδα ενός συμπίεστη αξονικής ροής NACA 5-βαθμίδων χρησιμοποιήθηκαν για να παραγάγουν μια βαθμίδα σχεδιασμού χρησιμοποιώντας τις διαδικασίες που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Το σχήμα 1-13 παρουσιάζει τις σχετικές γωνίες ροής για αυτό το σχέδιο. Μια μεταβλητή καμπυλότητα, ιδιαίτερα συστραμένου πτερυγίου ρότορα θα απαιτηθεί, αν και όχι τόσο ακραίο όσο στο προηγούμενο παράδειγμα. Το σχήμα 1-14 δείχνει ότι η σχετική ταχύτητα στο ακροπτερύγιο εισόδου του ρότορα είναι κατά η πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα στη βαθμίδα και θα είναι η τιμή θ_a που αξιολογηθεί σε αντιστοιχία προς τα επίπεδα του αριθμού Mach. Κανένα γενικό συμπέρασμα δεν μπορεί να συναχθεί χωρίς να διευκρινιστούν οι συνθήκες στη βαθμίδα εισόδου και η ταχύτητα περιστροφής, αλλά το ακροπτερύγιο του ρότορα θα είναι η κρίσιμη θέση. Πράγματι, η πρώτη βαθμίδα του συμπίεστη NACA 5-βαθμίδων είναι ένα μεταβατικό σχέδιο. Τα επίπεδα της ταχύτητας στην είσοδο και στην εξόδου του στάτη είναι αρκετά μέτρια συγκρίνοντας τα, έτσι τα επίπεδα του αριθμού Mach δεν πρέπει να μας απασχολούν. Το σχήμα 1-15 δείχνει ότι ο λόγος ταχύτητας κατά πλάτος των λεπίδων είναι σχετικά κοντά στο όριο Haller και στον ρότορα και στον στάτη. Όπως παρατηρείται στο σχήμα 1-12, οι προδιαγραφές σχεδιασμού αντιστοιχούν σε ένα λόγο σχετικής ταχύτητας στον ρότορα για

ακτίνα αναφοράς μόνο 0.75. Η αντίδραση είναι θετική στην πλήμνη, η οποία έχει αποφύγει τα προβλήματα του λόγου ταχύτητας που παρατηρήθηκαν στο σχήμα 1-11 για το παράδειγμα που εξετάστηκε προηγούμενος. Μια μικρότερη τιμή του Ψ_c πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να αποφευχθεί η συνθήκη $\Psi_h > 1$ και για να βελτιωθεί ο λόγος ταχύτητας στις σειρές των πτερυγίων.

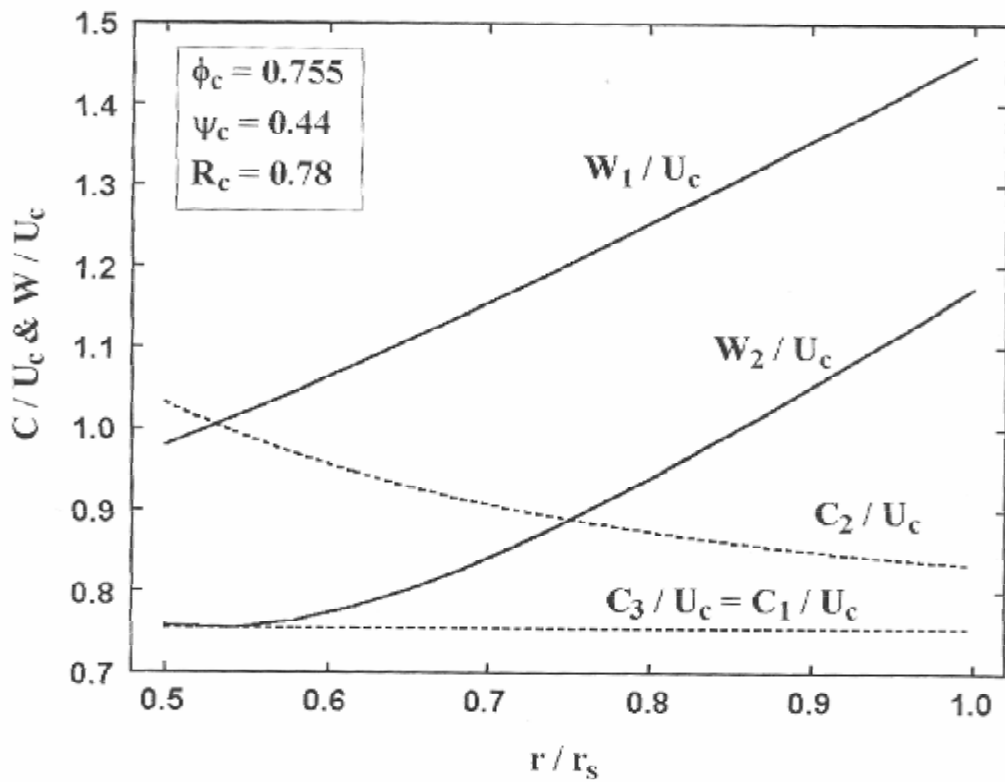
Οι διαδικασίες σχεδιασμού των πτερυγίων που περιγράφηκαν νωρίτερα σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν για να σχεδιάσουν πτερύγια διπλού κυκλικού τόξου για να ταιριάξουν με τα τρίγωνα ταχυτήτων. Τα πτερύγια σχεδιάστηκαν με σταθερή χορδή, και με $t_b/c = 0.1$. Ο αριθμός των πτερυγίων σε κάθε σειρά έχει θέσει ως στόχος να παραγάγει $\sigma = 1$ στην ακτίνα αναφοράς. Το σχήμα 1-16 παρουσιάζει τις κατανομές στο κύρτωμα και της γωνίας προπορείας για το ρότορα και το στάτη. Όπως αναμένεται, ένα ιδιαίτερα συστραμένο, μεταβλητού κυρτώματος πτερύγιο ρότορα απαιτείται. Οι διακύμανσης του κυρτώματος και της γωνίας προπορείας με την ακτίνα στο στάτη είναι σχετικά μέτριες. Εντούτοις, η ακτινική διακύμανση στο β_2 , όπως παρατηρείτε στο σχήμα 1-13, είναι πιθανώς πάρα πολύ μεγάλη για να θεωρηθεί σοβαρή η χρησιμοποιήσει ενός σταθερού κυρτώματος, σταθερό πτερύγιο προπορείας του στάτη για αυτή τη βαθμίδα.



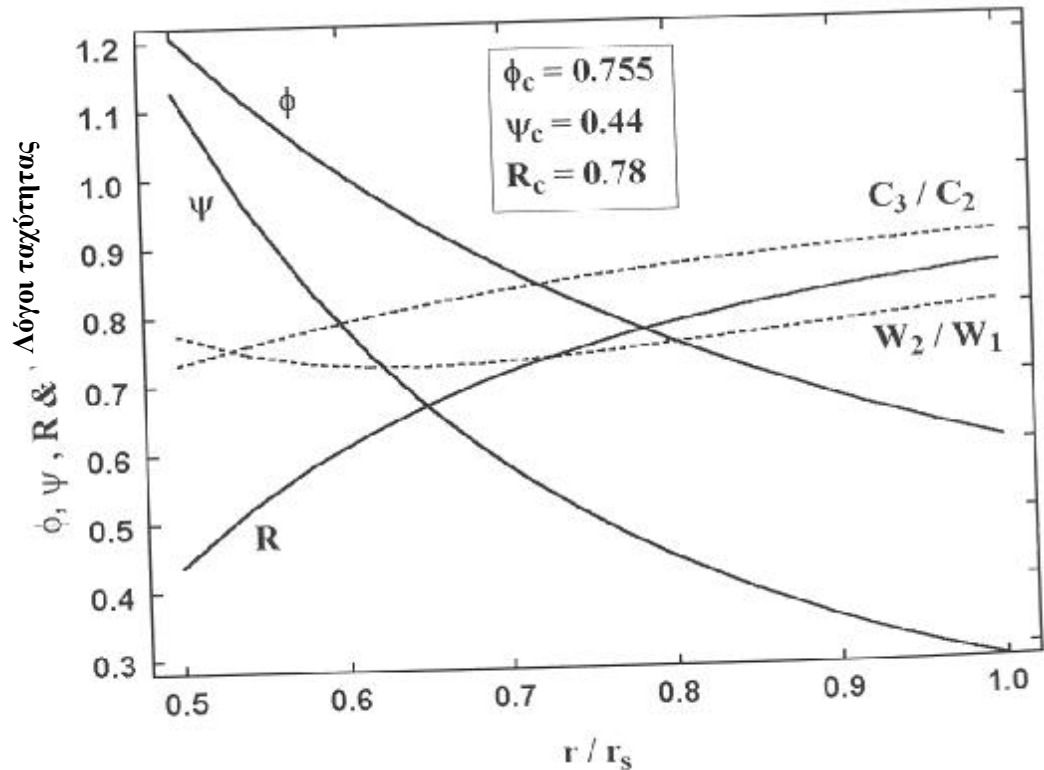
ΣΧΗΜΑ 1-12 Διάγραμμα σχεδιασμού ελεύθερης δίνης



ΣΧΗΜΑ 1-13 Γωνία ροής ελεύθερης δίνης



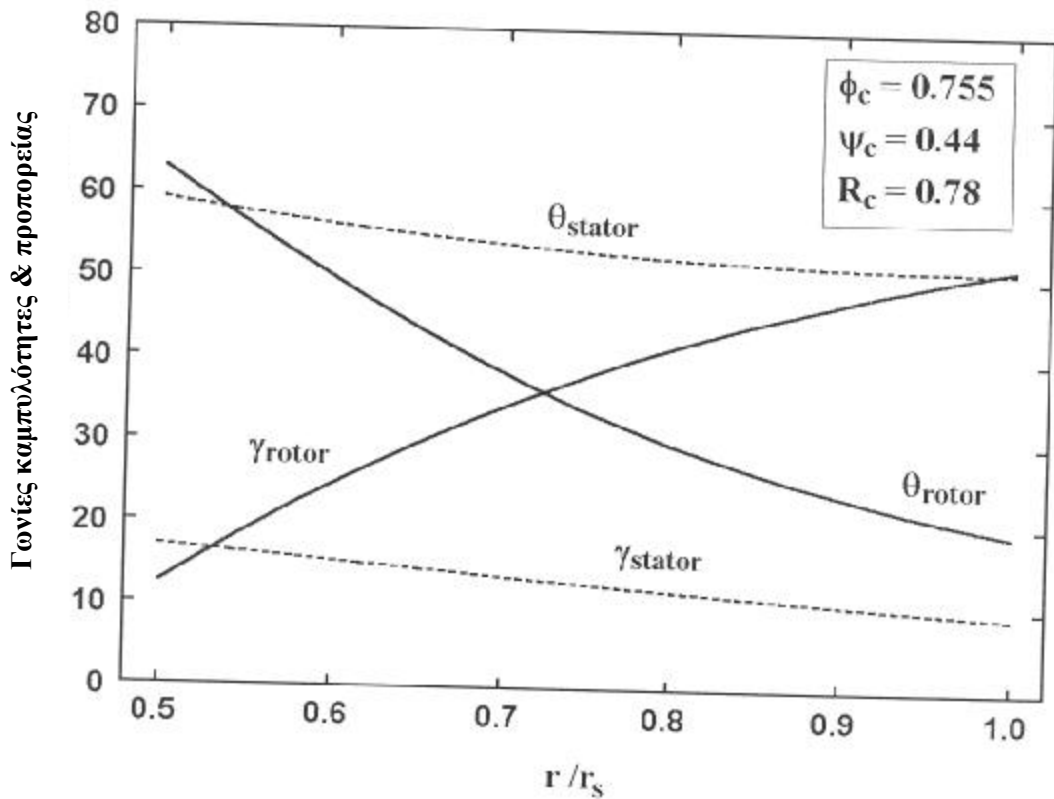
ΣΧΗΜΑ 1-14 Ταχύτητες ελεύθερης δίνης



ΣΧΗΜΑ 1-15 Παράμετροι απόδοσης ελεύθερης δίνης

1.7 ΡΟΗ ΔΙΝΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

Ένας άλλος τύπος δινών προτεινόμενος περιστασιακά λαμβάνεται θέτοντας $n = -1$ και $m = 1$. Εισάγοντας αυτές τις τιμές στις εξισώσεις (1-20) και (1-21) και αντικαθιστώντας στη εξίσωση (1-8) εμφανίζεται να προκύπτει ένα σχέδιο σταθερής αντίδρασης, το οποίο είναι ο τίτλος που εφαρμόζεται συνήθως σε αυτόν τον τύπο δινών. Πρέπει να αναγνωριστεί ότι, κανονικά, η σταθερή αντίδραση δεν θα επιτευχθεί, δεδομένου ότι το Φ δεν είναι γενικά σταθερό κατά πλάτος του ρότορα όπως υποτίθεται από την εξίσωση (1-8). Αυτό διευκρινίζεται εύκολα με την επανάληψη του "συντηρητικού" σχεδίου που χρησιμοποιείται ως παράδειγμα της ροής ελεύθερης δίνης στην προηγούμενη παράγραφο. Τα σχήματα (1-17) και (1-18) παρουσιάζουν αποτελέσματα από εκείνο το σχέδιο με τύπο δίνης σταθερής αντίδρασης. Παρατηρείτε ότι το σχέδιο με κανένα τρόπο δεν είναι αυτό της σταθερής αντίδρασης. Πράγματι, η αντίδραση είναι κοντά στο μηδέν στην ακτίνα της πλήμνης. Οι λόγοι ταχύτητας κατά πλάτος και του ρότορα και του στάτη είναι αρκετά κάτω από το όριο Haller, το οποίο δεν είναι πολύ ενθαρρυντικό για τη λειτουργία στο σημείο σχεδιασμού των βαθμίδων. Αλλά το σημαντικότερο πρόβλημα είναι ότι η αξονική ταχύτητα στην αποφόρτιση του ρότορα πέφτει στο μηδέν κάτω από την

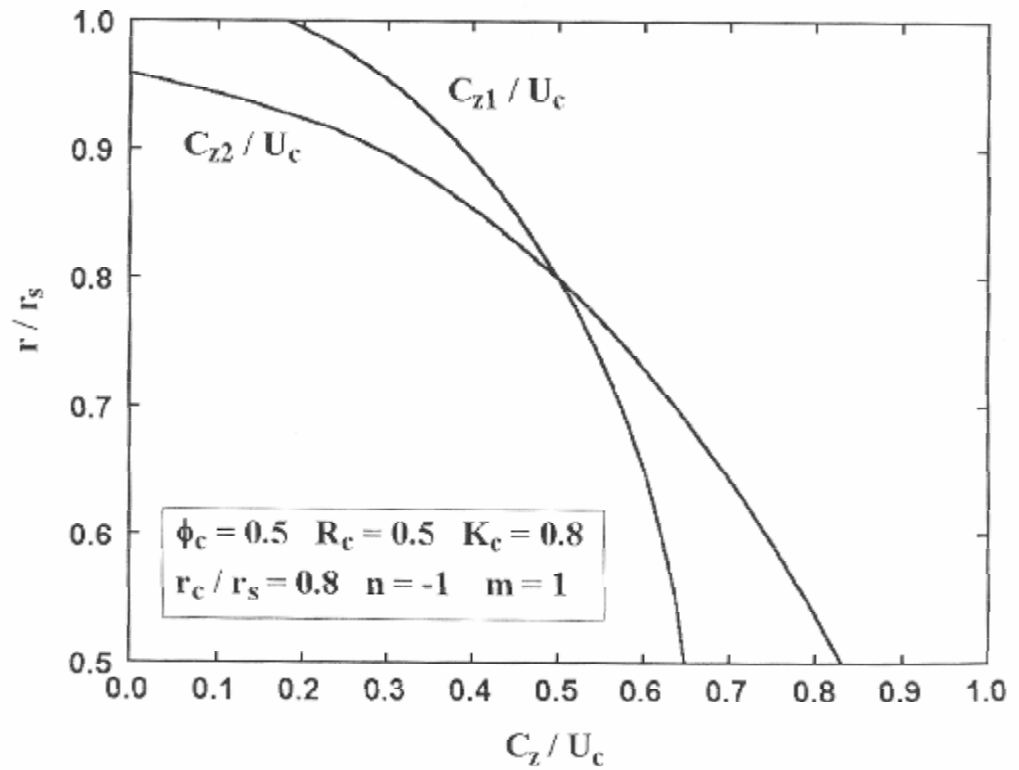


ΣΧΗΜΑ 1-16 Σχεδιασμός πτερυγίων ελεύθερης δίνης

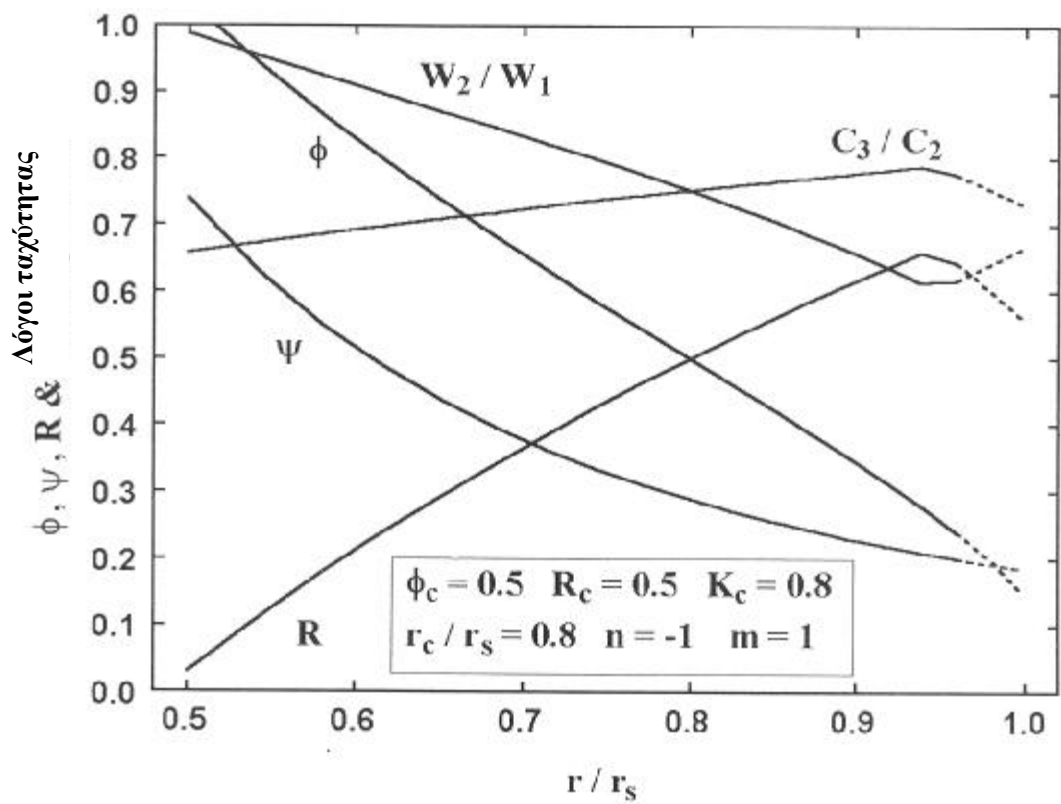
ακτίνα των ακρών. Το λογισμικό του σχεδιασμού βαθμίδας χρησιμοποιείται για να περιορίσει την αξονική ταχύτητα από το να γίνει αρνητική αποτρέποντας έτσι τα μοιραία λάθη στην ανάλυση. Έτσι η ζώνη της μηδενικής αξονικής ταχύτητας είναι πραγματικά μια ζώνη αντίστροφης της ροής. Τα στοιχεία που προβλέπονται σε αυτήν την ζώνη δεν είναι ακριβή, όπως υποδεικνύονται από τις διακεκομμένες γραμμές κοντά στην ακτίνα του κελύφους. Άλλη μια φορά, παρατηρείται ότι το συγκεκριμένο ύψος δινών μπορεί να παραγάγει ένα μη αποδεκτό σχέδιο, ακόμα κι αν οι αδιάστατοι παράμετροι απόδοσης εμφανίζονται να είναι μάλλον συντηρητικοί. Είναι αρκετά εμφανές ότι η μεγάλη διακύμανση στην αξονική ταχύτητα μεταξύ των σταδίων εξόδου και εισόδου του ρότορα έχει εντελώς ακυρώσει την πρόθεση να επιτευχθεί μια ουσιαστικά σταθερή αντίδραση.

Η ακτινική κλίση της αντίδρασης για οποιαδήποτε σταθερή φόρτηση, βαθμίδας επανάληψης δίνεται από

$$r_c \frac{\partial R}{\partial r} = 2(1 - R_c)(r_c / r)^{(2+n)} + y_c [(r_c / r)^3 - (r_c / r)^{(2+m)}] \quad (1-45)$$



ΣΧΗΜΑ 1-17 Κατανομή της αξονικής ταχύτητας



ΣΧΗΜΑ 1-18 Κατανομή των παραμέτρων απόδοσης

Με $n = -1$ και $m = 1$, αυτό παράγει

$$r_c \frac{\partial R}{\partial r} = 2(1 - R_c)(r_c / r) \quad (1-46)$$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (1-45) προκύπτει

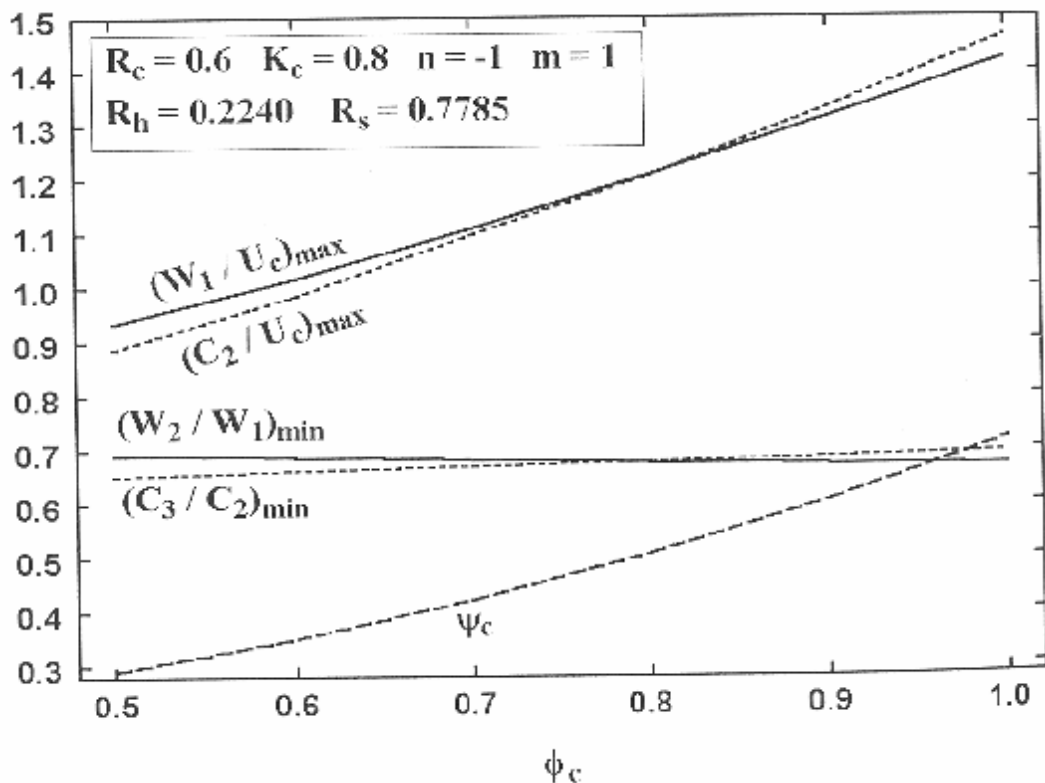
$$R = R_c + 2(1 - R_c) \ln(r / r_c) \quad (1-47)$$

Σαφώς, η μόνη περίπτωση για την οποία από αυτόν τον τύπο δινών θα προκύψει σταθερή αντίδραση είναι όταν $R_c = 1$. Για άλλες τιμές του R_c , η εξίσωση (1-47) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει μια τιμή του R_c που θα παραγάγει μια επιθυμητή τιμή της αντίδρασης στην πλήμνη. Είναι σαφές ότι η αντίδραση είναι απολύτως ανεξάρτητη από το Φ_c και το Ψ_c . Εντούτοις, θα είναι δυνατό να εξουδετερωθεί η ζώνη αντίστροφης της ροής με το να αυξηθεί το Φ_c . Πράγματι, μια άλλη άσκηση στο τέλος αυτού του κεφαλαίου θα δείξει ότι ο όρος για να αποφευχθεί η αντίστροφη της ροή στην έξοδο του ρότορα για οποιαδήποτε ακτίνα, r , για ύψος δινών σταθερής αντίδρασης είναι

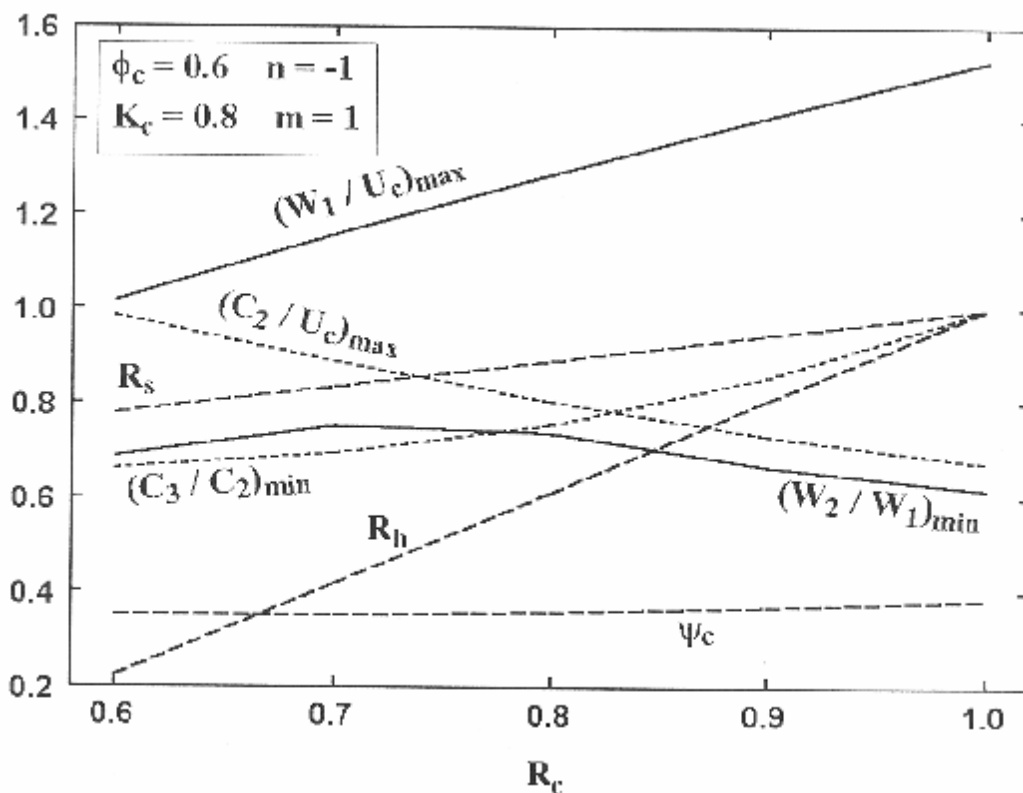
$$f_c \geq 2(1 - R_c)^2 [(r / r_c)^2 - 1] + 2(1 - R_c) \Psi_c \ln(r / r_c) \quad (1-48)$$

Η αντιστροφή της ροής θα εμφανιστεί αρχικά στην έξοδο του ρότορα στο κέλυφος. Ως εκ τούτου η εξίσωση (1-48) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η ελάχιστη αποδεκτή τιμή του Φ_c για οποιαδήποτε τιμή R_c χρησιμοποιώντας $r = r_s$. Εναλλακτικά, η τιμή του R_c που απαιτείται για να αποφευχθεί η αντίστροφη της ροή για οποιοδήποτε Φ_c μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (1-48) με εμπειροτεχνική μέθοδο. Κατ' αυτό τον τρόπο, μπορεί να αποδειχθεί ότι τιμές του Φ_c κάτω από 0.5 θα είναι επιτεύξιμες για αυτήν την περίπτωση χωρίς την αντίστροφη της ροή εάν $R_c \geq 0.6$. Αυτό το όριο χρησιμοποιήθηκε για να ερευνηθεί την επιρροή των Φ_c και R_c στο σχεδιασμό βαθμίδων για αυτόν τον τύπο δινών. Η επιρροή του Φ_c παρουσιάζεται στο σχήμα 1-19. Παρατηρείται ότι το Φ_c έχει μικρή επιρροή στο λόγο ταχύτητας κατά πλάτος των λεπίδων. Αυξάνοντας το Φ_c αυξάνει η ταχύτητα εισόδου και για τις δύο σειρές πτερυγίων. Δεδομένου ότι η απώλεια είναι ανάλογη προς την κινητική ενέργεια στην είσοδο, αυτό αναμένεται να αυξήσει τις απώλειες. Μπορεί επίσης να οδηγήσει σε άλλα προβλήματα λόγω των αυξημένων επιπέδων του αριθμού Mach. Το μόνο πραγματικό όφελος από τις μεγαλύτερες τιμές του Φ_c είναι οι υψηλότερες τιμές του Ψ_c που αποκτήθηκαν για την ίδια τιμή του K_c . Η επιρροή R_c παρουσιάζεται στο σχήμα 1-20. Αυξάνοντας το R_c θα αυξηθεί η κινητική ενέργεια στην είσοδο του ρότορα, αυξάνοντας τις ανησυχίες για τις απώλειες και τα επίπεδα του αριθμού Mach που είναι παρόμοιες με τις ανησυχίες σχετικά με το σχήμα 1-19. Η μείωση της κινητικής ενέργειας στην είσοδο του στάτη είναι κάποια αντιστάθμιση για αυτές τις ανησυχίες. Ο

συντελεστής φόρτισης είναι σχεδόν ανεξάρτητος από R_c για ένα συγκεκριμένο K_c . Η αντίδραση των πλημνών και ο ελάχιστος λόγος ταχύτητας κατά πλάτος του στάτη έχουν σημαντικά οφέλη από την αυξημένη τιμή του R_c . Ο ελάχιστος λόγος ταχύτητας κατά πλάτος του ρότορα εμφανίζεται λίγο ακανόνιστα, το οποίο προκαλείται από τη θέση της ελάχιστης τιμής η οποία αλλάζει από την ακτίνα πλημνών στην ακτίνα κελύφους. Πιθανώς η πιο ξεχωριστή παρατήρηση είναι ότι υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του R_c περίπου 0.79 που παράγει τον υψηλότερο ελάχιστο λόγο ταχύτητας κατά πλάτος καθεμίας σειράς πτερυγίων. Αυτό θα αναμενόταν να προσφέρει το καλύτερο βαθμό απώλειας στήριξης, υποθέτοντας ότι τα αυξανόμενα επίπεδα του αριθμού Mach στην είσοδο του ρότορα δεν είναι ο περιοριστικός παράγοντας. Για να ερευνηθεί αυτό περισσότερο, μια βαθμίδα δίνης σταθερής αντίδρασης σχεδιάστηκε βασισμένη στο βέλτιστο. Για λόγους σύγκρισης, μια βαθμίδα ελεύθερης δίνης σχεδιάστηκε για το ίδιο σύνολο αδιάστατων παραμέτρων απόδοσης. Τα σχήματα 1-21 μέχρι 1-23 συγκρίνουν μερικά από τα σημαντικότερα αποτελέσματα. Παρατηρείται ότι η ροή δίνης σταθερής αντίδρασης παράγει τη χαμηλότερη μέγιστη ταχύτητα εισόδου στο ρότορα και προσφέρει το μεγαλύτερο περιθώριο απώλειας στήριξης όπως υποδεικνύεται από τους λόγους ταχύτητας στις σειρές των πτερυγίων. Και οι δύο τύποι δινών απαιτούν συστραμένα, πτερύγια ρότορα μεταβλητού κυρτώματος, αλλά οι διακυμάνσεις είναι λιγότερο ακραίες για τους



ΣΧΗΜΑ 1-19 Επίδραση του συντελεστή ροής



ΣΧΗΜΑ 1-20 Επίδραση της αντίδρασης

τύπους δίνης σταθερής αντίδρασης. Τα συστραμένα πτερύγια μεταβλητού κυρτώματος του ρότορα απαιτούνται και για τους δύο τύπους των δινών, με ελαφρώς περισσότερες ακραίες διακυμάνσεις για τον τύπο δινών σταθερής αντίδρασης. Οι κατανομές του συντελεστή φόρτισης στην είσοδο και για τους δύο τύπους δινών είναι ίδιες, με $\Psi_h = 0.913$, έτσι τα χαρακτηριστικά φόρτισης εισόδου σε όλες τις ακτίνες πρέπει να έχουν την επιθυμητή αρνητική κλίση. Μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι δίνες σταθερής αντίδρασης προσφέρουν μερικά πλεονεκτήματα πέρα από το ελεύθερο ύφος δινών για αυτό το συγκεκριμένο σύνολο αδιάστατων παραμέτρων απόδοσης, ιδιαίτερα όσον αφορά το αυξανόμενο βαθμό απώλειας στήριξης.

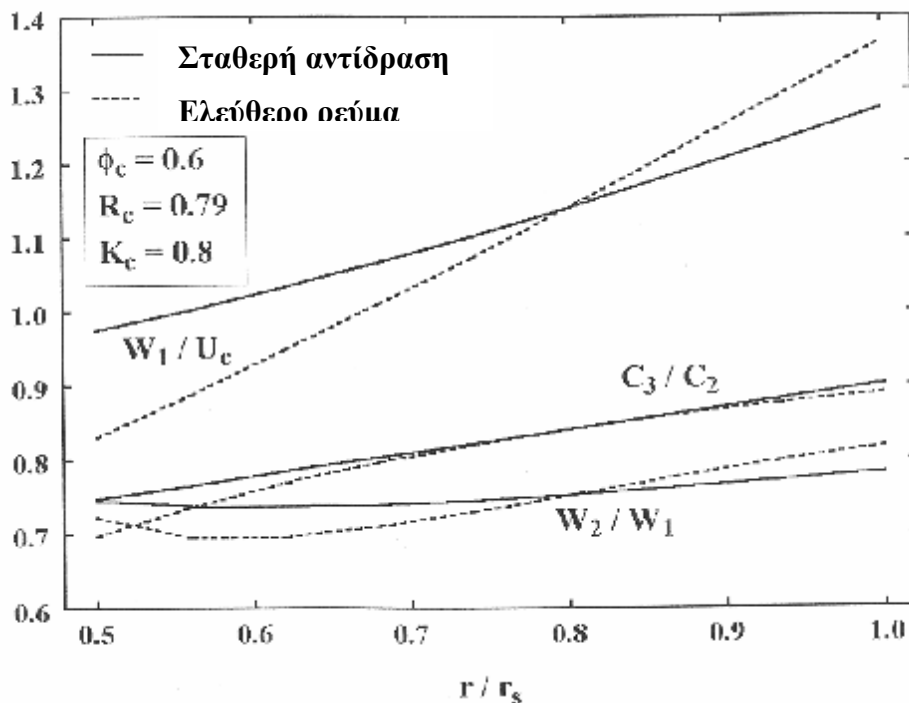
Το σημαντικότερο συμπέρασμα όσον αφορά το ύφος δινών σταθερής αντίδρασης είναι ότι ο συνηθισμένος ισχυρισμός που παράγει πτερύγια σχεδόν σταθερής αντίδρασης δεν είναι σωστός, εκτός αν χρησιμοποιηθούν οι τιμές του R_c που είναι πολύ κοντά στο 1.0. Σε άλλες περιπτώσεις, είναι απαραίτητο να επιλεγεί μια αντίδραση στην ακτίνα αναφοράς που θα παραγάγει μια αποδεκτή αντίδραση στην πλήμνη, σαν την περίπτωση των ελευθέρων δινών. Αυτό είναι εύκολο να ολοκληρωθεί με την βοήθεια της εξίσωσης (1-47), έτσι η αποτελεσματική χρήση του ύφους δινών σταθερής αντίδρασης δεν είναι πάρα πολύ δύσκολη. Αξίζει λαμβάνοντας υπόψη κατά πόσο αυτό το ύφος δινών μπορεί να τροποποιηθεί έτσι ώστε να προσεγγίσει περισσότερο μια βαθμίδα

σταθερής αντίδρασης. Από την εξίσωση (1-45) είναι σαφές ότι δεν υπάρχει πραγματικά καμία εναλλακτική επιλογή για τα m και n που θα παραγάγουν σταθερή αντίδραση. Μια από τις ασκήσεις στο τέλος του κεφαλαίου θα είναι να δειχτεί ότι το μόνο πιθανό σχέδιο σταθερής αντίδρασης είναι η περίπτωση αντίδρασης 100%. Μια πολύ μέτρια μείωση της ακτινικής κλίσης της αντίδρασης μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας $n = -2$ και $m = 1$, το οποίο παράγει

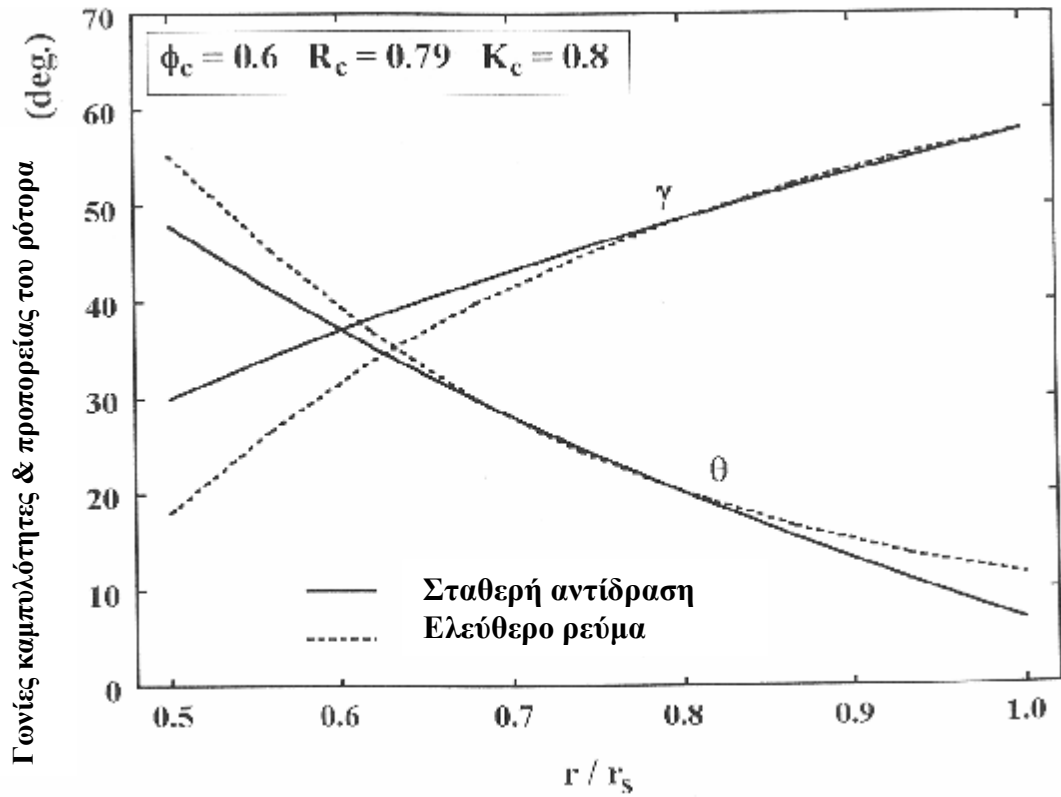
$$r_c \frac{\partial R}{\partial r} = 2(1 - R_c) \quad (1-49)$$

$$R = R_c + 2(1 - R_c)(r/r_c - 1) \quad (1-50)$$

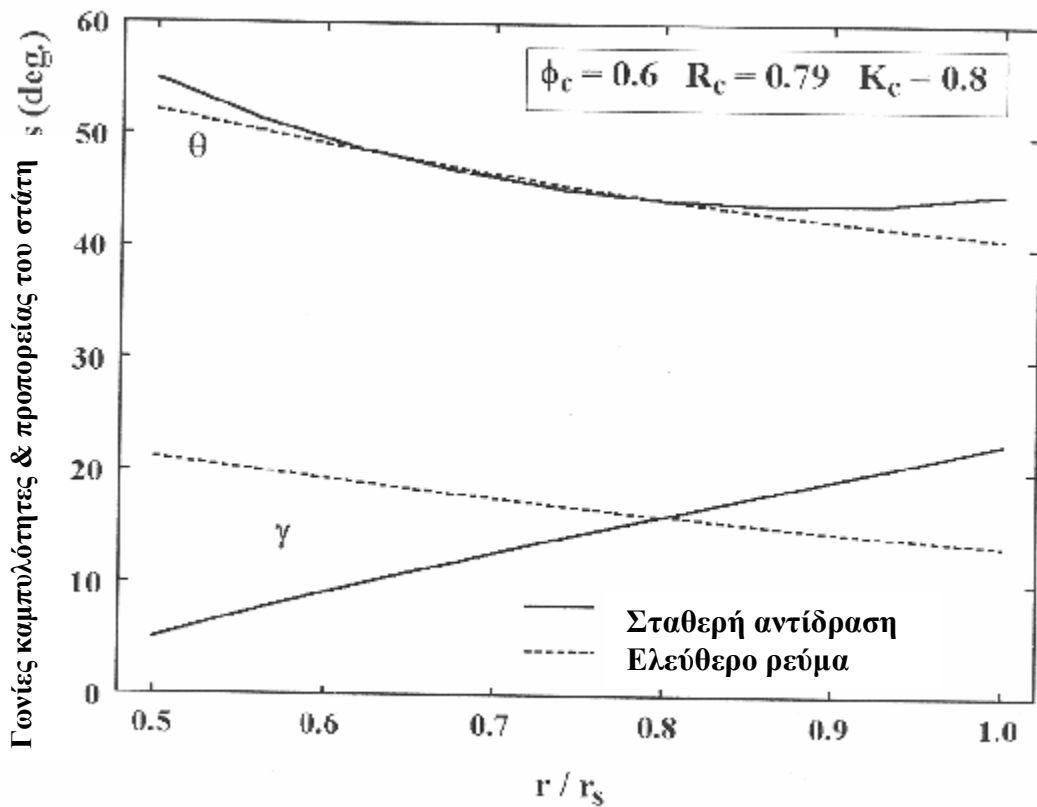
Αυτό έχει το ανεπιθύμητο αποτέλεσμα της παραγωγής των πιο απότομων κλίσεων κοντά στην ακτίνα του κελύφους, για να επιβάλει τους πρόσθετους περιορισμούς αποφεύγοντας την αντίστροφη ροή. Είναι πιθανή μια περισσότερο προσεκτική προσέγγιση της σταθερής αντίδρασης με την επιλογή $n = -1$ ή -2 και την επιλογή $m > 1$. Από την εξίσωση (1-45) μπορεί να παρατηρηθεί ότι αυτή εισάγει μια αρνητική συμβολή στην ακτινική κλίση του R όταν $r < r_c$ για να ισορροπήσει μερικώς τη συνηθισμένη θετική κλίση. Όμως, έχει αντίστροφη και δυσμενή επίδραση όταν $r > r_c$. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι γενικά πάρα πολύ αποτελεσματική, αλλά θα μπορούσε να εξεταστεί για πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές.



ΣΧΗΜΑ 1-21 Σύγκριση του λόγου ταχύτητας



ΣΧΗΜΑ 1-22 Σύγκριση της γεωμετρίας των πτερυγίων του ρότορα



ΣΧΗΜΑ 1-23 Σύγκριση της γεωμετρίας των πτερυγίων του στάτη

1.8 ΣΤΑΘΕΡΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΚΑΙ ΕΚΘΕΤΙΚΗ ΡΟΗ ΔΙΝΗΣ

Ο Horlock (1958) προτείνει ότι το εκθετικό μοντέλο δινών είναι συχνά μια καλή επιλογή, και λαμβάνεται θέτοντας $n = 0$ και $m = -1$. Μια παρόμοια εναλλακτική λύση λαμβάνεται θέτοντας $n = m = 0$, το οποίο θα ονομαστεί μοντέλο δίνης σταθερού στροβίλου. Όπως παρατηρείται από την εξίσωση (1-20), το μοντέλο δίνης σταθερού στροβίλου παράγει σταθερό C_{th} . Με την κατάλληλη επιλογή των Φ_c , Ψ_c , και R_c , αυτοί οι δύο τύποι δινών μπορούν να παραγάγουν μια πτέρυγα στάτη σταθερού κυρτώματος, ενδεχομένως με μια σταθερή γωνία προπορείας επίσης. Αυτό είναι βεβαίως δελεαστικό για τη μείωση του κόστους παραγωγής και μπορεί να προσφέρει άλλα πλεονεκτήματα, όπως τα βελτιωμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Από την εξίσωση (1-45) εύκολα αποδεικνύεται ότι η αντίδραση σε οποιαδήποτε ακτίνα για την εκθετική ροή δίνης δίνεται από

$$R = R_c - 2(1 - R_c)(r_c / r - 1) \quad (1-51)$$

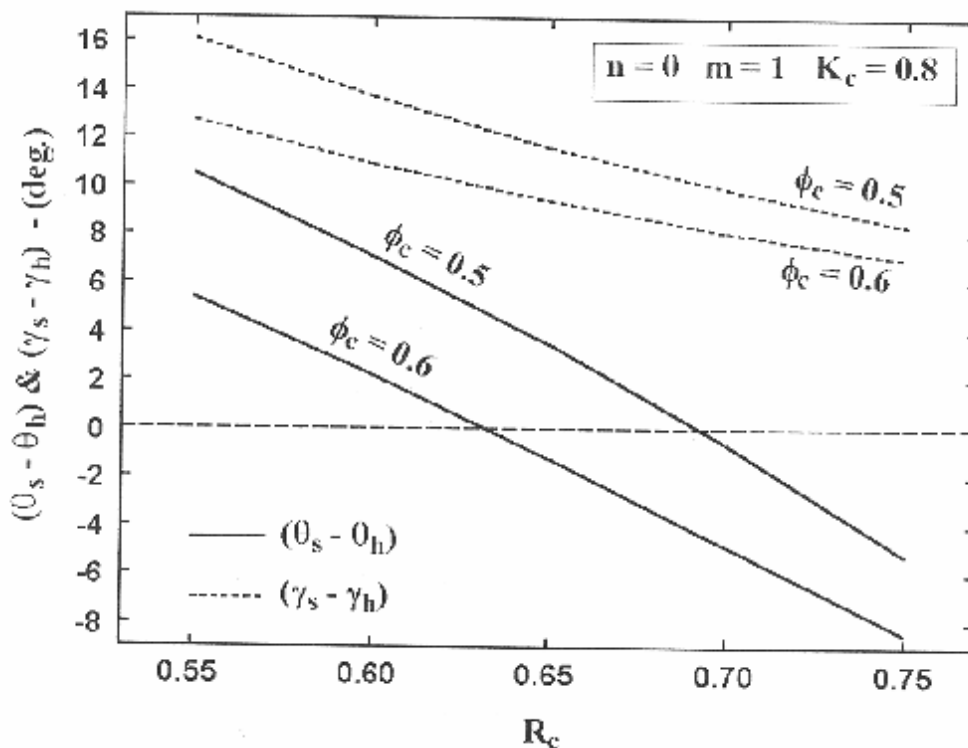
ενώ για ροή δίνης σταθερού στροβίλου

$$R = R_c - [2(1 - R_c) + y_c(r_c / r - 1)/2](r_c / r - 1) \quad (1-52)$$

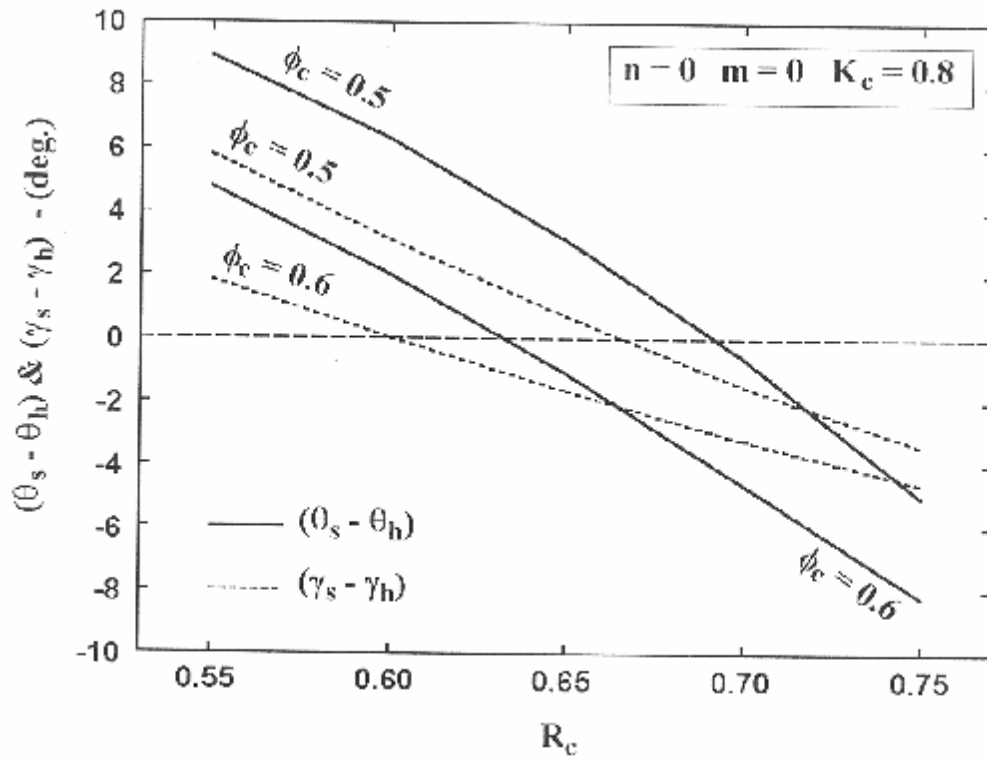
Ως εκ τούτου το εκθετικό μοντέλο δινών έχει το πλεονέκτημα ότι η τιμή του R_c που απαιτείται για να επιτευχθεί οποιαδήποτε επιθυμητή αντίδραση πλημνών καθορίζεται εύκολα. Είναι επίσης σαφές ότι η εκθετική ροή δίνης θα παραγάγει την υψηλότερη αντίδραση πλημνών για οποιαδήποτε τιμή του R_c . Ενώ αυτά τα πλεονεκτήματα τείνουν να ευνοήσουν το εκθετικό μοντέλο δινών, η ροή δίνης σταθερού στροβίλου έχει επίσης ένα καθορισμένο πλεονέκτημα, όπως εμφανίζεται στα σχήματα 1-24 και 1-25. Αυτά τα διαγράμματα παρουσιάζουν τη διαφορά στη γωνία κυρτώματος και της γωνία προπορείας του στάτη μεταξύ της πλήμνης και του κελύφους για βαθμίδες που σχεδιάζονται με αυτούς τους δύο τύπους δινών. Εάν η διαφορά στη γωνία κυρτώματος είναι αρκετά μικρή, ένα πτερύγιο στάτη σταθερού κυρτώματος μπορεί πιθανώς να χρησιμοποιηθεί. Ομοίως, εάν η διαφορά στη γωνία προπορείας είναι αρκετά μικρή, ένα πτερύγιο στάτη σταθερής προπορείας μπορεί πιθανώς να χρησιμοποιηθεί. Είναι σαφές ότι και οι δύο μορφές δινών μπορούν να παραγάγουν ένα πτερύγιο στάτη σταθερού κυρτώματος εάν μια κατάλληλη τιμή του R_c επιλεγεί. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η ακριβής τιμή του R_c που απαιτείται ποικίλλει με το Φ_c . Πράγματι, θα εξαρτηθεί επίσης από το K_c μέχρι ενός ορισμένου βαθμού. Σαφώς, οι προοπτικές για την επίτευξη ενός πτερυγίου στάτη με σταθερό κύρτωμα και με σταθερή γωνία προπορείας είναι ουσιαστικά καλύτερες εάν η ροή δίνης σταθερού στροβίλου υιοθετηθεί.

Για να επεξηγηθούν τα πλεονεκτήματα της ροή δίνης σταθερού στροβίλου, σχεδιάστηκε μια βαθμίδα συγκεκριμένα για να επιτύχει ένα

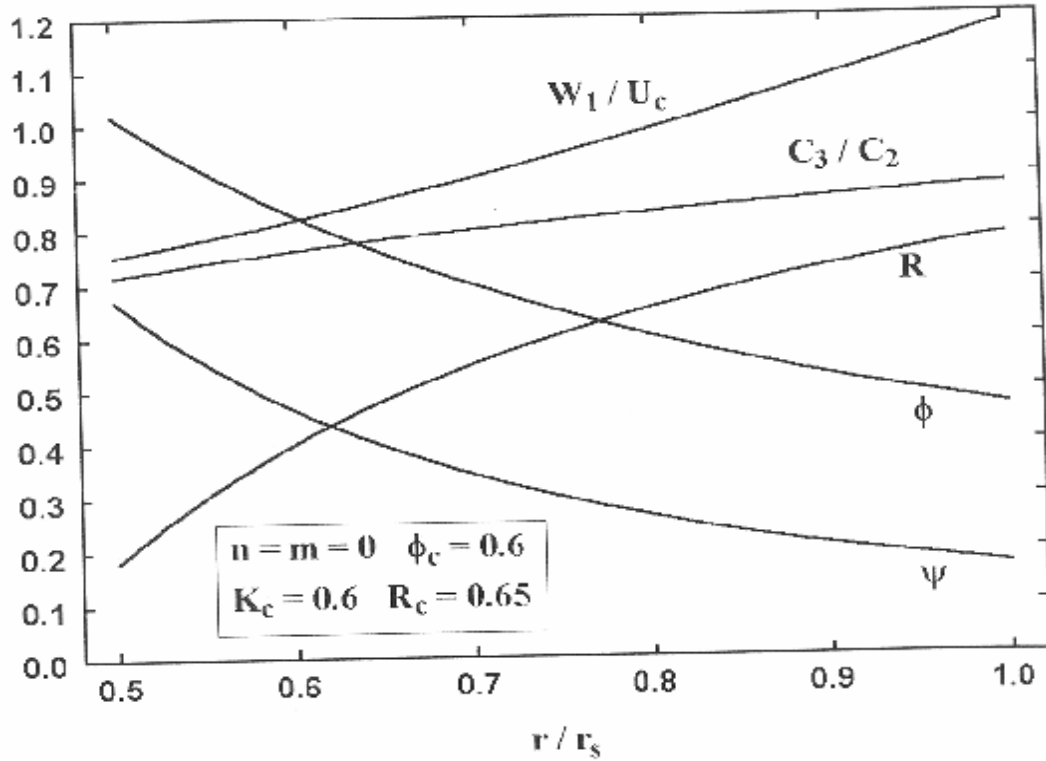
σταθερού κυρτώματος, σταθερής προπορείας πτερύγιο στάτη. Τα σημαντικά στοιχεία της βαθμίδας απόδοσης για αυτό το σχέδιο παρουσιάζονται στο σχήμα 1-26. Θα παρατηρηθεί ότι αυτό το σχέδιο χρησιμοποίησε μια χαμηλότερη τιμή του K_c από ότι είχε χρησιμοποιηθεί στα προηγούμενα παραδείγματα. Αυτό ήταν απαραίτητο για να διατηρήσει ένα λογικό λόγο ταχύτητας κατά πλάτος του στάτη στην πλήμνη, η οποία είναι τυπικά ο πιο αδύνατος τομέας ενός σταθερού στροβίλου ή ενός εκθετικού σχεδίου δινών. Η μειωμένη ικανότητα φόρτισης στην εισοδο δεν είναι τόσο έντονη όπως πρώτα. Πράγματι, το σχήμα 1-21 δείχνει ότι, για παρόμοιους λόγους, μια παρόμοια μείωση του K_c θα ήταν ευεργετική για το σχεδιασμό ελευθέρων δινών. Συγκρίνοντας την ελεύθερη δίνη και τα σχέδια δινών σταθερής αντίδρασης στο σχήμα 1-21, παρατηρείται ότι έχουν επιτευχθεί οι χαμηλότερες τιμές της σχετικής ταχύτητας στην εισοδο του ρότορα. Οι βασικοί περιορισμοί για αυτό το ύφος δινών συνδέονται με τις χαμηλές τιμές του R_c και C_3/C_2 κοντά στην πλήμνη. Το σχήμα 10-27 παρουσιάζει τις γωνίες κυρτώματος και προπορείας του ρότορα και του στάτη που αποκτήθηκαν χρησιμοποιώντας τις διαδικασίες σχεδιασμού πτερυγίων της παραγράφου 1.3. Σε αυτήν την περίπτωση, τα πτερύγια NACA 65-σειρών σχεδιάστηκαν με $t_b/c = 0.1$ και $\sigma = 1$ όταν $r = r_c$. Οι γωνίες κυρτώματος στο σχέδιο 1-27 είναι οι ισοδύναμες γωνίες κυρτώματος κυκλικών τόξων. Σημειώστε ότι το αποτέλεσμα είναι βασικά ένα σταθερού κυρτώματος, σταθερής προπορείας πτερύγιο στάτη. Αυτό δεν είναι συνήθως πάρα πολύ δύσκολο να επιτευχθεί. Το μοντέλο δίνης σταθερού στροβίλου αποφέρει γωνίες



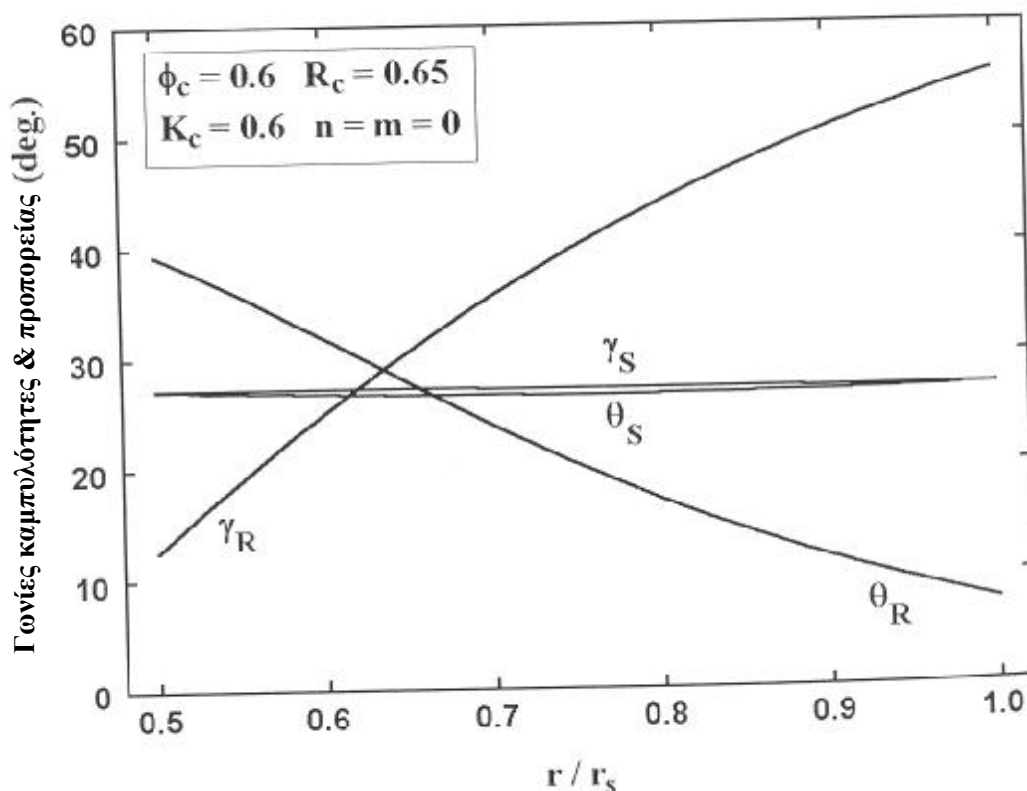
ΣΧΗΜΑ 1-24 Εκθετική δίνη στάτη



ΣΧΗΜΑ 1-25 Σταθερή δίνη στροβίλου του στάτη



ΣΧΗΜΑ 1-26 Δεδομένα σχεδίασης στροβίλου σταθερής δίνης



ΣΧΗΜΑ 1-27 Γωνία περυγίων στροβίλου σταθερής δίνης

ροής που παράγουν ουσιαστικά μια γραμμική διακύμανση του κυρτώματος και της γωνία προπορείας από την πλήμη στο κέλυφος. Για οποιεσδήποτε βασικές παραμέτρους σχεδιασμού, το σταθερό κύρτωμα είναι επιτεύξιμο με την επιλογή της κατάλληλης τιμής του R_c , όπως διευκρινίζεται στο σχήμα 1-25. Ρυθμίζοντας τις άλλες αδιάστατες παραμέτρους απόδοσης, η διακύμανση της γωνία προπορείας μπορεί συνήθως να μειωθεί σε ένα σημείο όπου η σταθερή γωνία προπορείας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί χωρίς σημαντικό συμβιβασμό της απόδοσης. Αυτό θα ήταν ένα πολύ οικονομικό-αποδοτικό σχέδιο για τη χρήση ως τυποποιημένης βαθμίδας επανάληψης για τους βιομηχανικούς συμπιεστές αξονικής ροής.

1.9 ΤΡΥΒΩΔΕΙΣ ΡΟΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΕΝΕΙΣ ΓΩΝΙΑΣ ΡΟΗΣ

Περιστασιακά, είναι χρήσιμο να οριστεί η απόλυτη κατανομή της γωνίας ροής στην είσοδο του ρότορα ή η αποφόρτιση παρά η κατανομή της ταχύτητας του στροβίλου. Σημειώνοντας ότι $C_\theta = C_Z \tan\beta$, εύκολα παρατηρείται ότι η εξίσωση (1-24) μπορεί να αντικατασταθεί από

$$\frac{1}{C_z} \frac{\partial C_z}{\partial r} = -\frac{\cos^2 b}{2r^2} \frac{\partial (r \tan b)^2}{\partial r} + \frac{\cos^2 b}{C_z^2} \frac{\partial H}{\partial r} \quad (1-53)$$

Ο προσδιορισμός των Φ_c , Ψ_c και R_c καθορίζεται από τα β_{1c} και β_{2c} . Εάν υποθεθεί ότι το β αλλάζει γραμμικά με το r , και η διαφορά μεταξύ της πλήμνης και του κελύφους, $\beta_s - \beta_h$, καθορίζεται είτε στην είσοδο του ρότορα είτε στο στάδιο αποφόρτισης, η εξίσωση (1-53) μπορεί να λυθεί για την αντίστοιχη κατανομή του C_z . Δεδομένου ότι $C_\theta = C_z \tan \beta$, καθορίζεται επίσης η κατανομή ταχύτητας του στροβίλου. Για τις σταθερές βαθμίδες φόρτισης, η εξίσωση (1-21) καθορίζει τη κατανομή του στροβίλου στο άλλο στάδιο. Αυτή η προδιαγραφή δινών είναι μια χρήσιμη παραλλαγή του τύπου δίνης σταθερού στροβίλου που συζητείται στην προηγούμενη παράγραφο. Μερικές φορές είναι ευκολότερο να καθορισθεί με ακρίβεια η κατανομή της γωνίας των πτερυγίων με τον καθαρισμό της κατανομής της γωνίας ροής παρά με την κατανομή της ταχύτητας του στροβίλου. Συνήθως, είναι αποτελεσματικότερο να διευκρινιστεί η κατανομή της γωνίας ροής στην έξοδο του ρότορα για αυτόν το λόγο. Αυτός ο τύπος δινών μπορεί να είναι αρκετά χρήσιμος, και ενσωματώνεται εύκολα σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα σχεδιασμού βαθμίδας.

1.10 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΝΑ ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΒΑΘΜΙΔΑΣ

Τα παραδείγματα σχεδιασμού βαθμίδας που παρέχονται στις προηγούμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου είναι μάλλον αυθαίρετα στην επεξήγηση μερικών εκ των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των διάφορων τύπων μορφών της ροής δίνης. Στην πράξη, ο σχεδιασμός βαθμίδας εστιάζεται πολύ περισσότερο στα συγκεκριμένα υπαρκτά σχέδια και περιορισμούς. Συνήθως υπάρχει ουσιαστική σύγκρουση μεταξύ των διάφορων επιθυμητών υπαρκτών σχεδίων αναφορικά με την καθιέρωση των συγκεκριμένων παραμέτρων σχεδιασμού βαθμίδας.

Σχεδόν σε οποιοδήποτε σχέδιο συμπιεστών αξονικής ροής, ελάχιστου μεγέθους, το βάρος και το κόστος θα είναι σημαντική επιδίωξη. Σαφώς, αυτοί οι στόχοι είναι καλύτεροι με την επίτευξη μιας μεγάλης ροής μάζας ανά μονάδα μετωπικής περιοχής, ευνοώντας κατά συνέπεια μια βαθμίδα υψηλού συντελεστή ροής. Ομοίως, η μείωση του αριθμού των βαθμίδων που απαιτούνται θα είναι απαραίτητη, ευνοώντας κατά συνέπεια ένα σχέδιο υψηλού συντελεστή φόρτισης στην εισαγωγή. Όπως παρατηρείται στα σχήματα 1-3 μέχρι 1-5, ένας υψηλός συντελεστής φόρτισης εισαγωγής απαιτεί έναν υψηλό συντελεστή ροής για να αποφύγει τα πρακτικά όρια φόρτωσης των πτερυγίων. Έτσι οι εκτιμήσεις μεγέθους, βάρους και δαπανών είναι καθορισμένα κίνητρα για τις βαθμίδες υψηλού συντελεστή ροής και συντελεστή φόρτισης στην εισαγωγή.

Η καλή αεροδυναμική συμπεριφορά θα είναι επίσης ένας σημαντικός στόχος για οποιοδήποτε σχέδιο συμπιεστών αξονικής ροής. Συνήθως αυτό

εκφράζεται σε αντιστοιχία προς τις απαιτήσεις του βαθμού απόδοσης και του περιθωρίου κύματος. Το περιθώριο κύματος μπορεί να εκφραστεί σε αντιστοιχία προς το πεδίο ροής ή του πεδίου ανόδου της πίεσης μεταξύ του σημείου σχεδιασμού και του ορίου κύματος. Το περιθώριο και η αποδοτικότητα κύματος δεν είναι πραγματικά ανεξάρτητες έννοιες, αν και οι συγκεκριμένες εφαρμογές μπορούν να επιβάλουν ειδικές απαιτήσεις περιθωρίου κύματος. Κανονικά, το σημείο σχεδιασμού βαθμίδας αναμένεται να είναι περίπου η καλύτερη συνθήκη λειτουργίας. Είναι προφανές ότι η επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης πολύ κοντά στο όριο κύματος είναι μικρής αξίας, όπου η βαθμίδα δεν θα λειτουργήσει σχεδόν ποτέ σε έναν πραγματικό συμπιεστή. Στην παράγραφο 1.2 αποδείχθηκε ότι το βελτιωμένο περιθώριο κύματος μπορεί να αναμένεται για να ευνοήσει τους χαμηλούς συντελεστές ροής και τους χαμηλούς συντελεστές φόρτισης στην εισαγωγή. Στα σχήματα 1-7 μέχρι 1-9, η παράμετρος του λόγου αποκατάστασης του Smith (1958) έχει έντονα προτείνει ότι οι συντελεστές ροής με τιμή περίπου 0.5 προτιμούνται. Ο Smith (1958) φαίνεται να ευνοεί το συντελεστή ροής που δεν υπερβαίνει το 0.5 σε οποιαδήποτε ακτίνα, αν και σημειώνει ότι μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Πράγματι, αυτό φαίνεται λίγο μη πρακτικό και ίσως όχι ακόμα εφικτό. Ανάλογα με το λόγο ακτίνας πλήμνης – κελύφους, επιτυγχάνεται ένας συντελεστής ροής πλήμνων με τιμή 0.5 που μπορεί να απαιτήσει πολύ χαμηλούς συντελεστές ροής κελύφους. Αυτός μπορεί να είναι τόσο επιβλαβής σαν να χρησιμοποιούνταν συντελεστές ροής που είναι πάρα πολύ υψηλοί, όπως παρατηρείται στο σχήμα 1-7. Τα σχήματα 1-7 μέχρι 1-9 επίσης δείχνουν ότι ο χαμηλός συντελεστής φόρτισης (ή K) είναι επιθυμητός και επιδρά στη μείωση της σημασίας της επιλογής συντελεστή ροής.

Ο ρόλος της αποδοτικότητας της βαθμίδας στον καθορισμό των παραμέτρων σχεδιασμού βαθμίδας είναι λιγότερο σημαντικός από εάν το περιθώριο κύματος είναι επαρκές να χρησιμοποιήσει τον βαθμό απόδοσης που επιτεύχθηκε. Πράγματι, εάν ο μέγιστος βαθμός απόδοσης χρησιμοποιείται ως σημαντικότερο κριτήριο σχεδιασμού, το σημείο σχεδιασμού είναι πολύ πιθανό να είναι πολύ κοντά στο όριο κύματος. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι ο σχεδιασμός με υψηλή φόρτιση εισαγωγής μπορεί να είναι ο καλύτερος τρόπος για να μειωθούν οι επιπτώσεις των απωλειών του βαθμού απόδοσης. Οι άριστες αποδοτικότητες της βαθμίδας έχουν επιτευχθεί για ένα ευρύ φάσμα των παραμέτρων απόδοσης της βαθμίδας και των τύπων δίνης. Υπάρχουν ελάχιστα αξιόπιστα στοιχεία για να συνδέσουν οποιοσδήποτε σύνολο των παραμέτρων απόδοσης ή του τύπου δίνης στο βέλτιστο και πιο πρακτικό επίπεδο βαθμού απόδοσης του σημείου σχεδιασμού. Μερικές φορές προτείνεται ότι ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης συνδέεται με σχέδια αντίδρασης 50%, αν και αυτό είναι αμφισβητήσιμης ισχύος και έχει πρακτικά πολύ λίγη σημασία. Η βαθμίδα αντίδρασης, αναφορικά με το R_c , θα καθιερωθεί συνήθως από τις μελέτες του περιθωρίου κύματος. Συγκεκριμένα, επιτυγχάνοντας ικανοποιητική αντίδραση στην πλήμνη και λόγο ταχύτητας κατά πλάτος των πτερυγίων στην πλήμνη και

το κέλυφος θα είναι συνήθως οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του R_c . Οι προσεγγίσεις σχεδίου που κατευθύνονται συγκεκριμένα προς την αύξηση της απόδοσης στο σημείο σχεδιασμού βαθμίδας είναι γενικά πέρα από το πεδίο των μεθόδων που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο. Παραδείγματος χάριν, τα ειδικά σχέδια πτερυγίων όπως οι ελεγχόμενες αεροτομές διάχυσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Μερικοί σχεδιαστές ευνοούν τα ειδικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα στις περιοχές του ακριανού τοιχώματος του οριακού στρώματος, όπως η αυξανόμενη φόρτιση των ακριανών τοιχωμάτων. Με τους σύγχρονους υπολογιστικούς ρευστοδυναμικούς κώδικες του ιξώδους, μπορούν να εξεταστούν ειδικά σχέδια για να ελαχιστοποιήσουν τα δευτερεύοντα αποτελέσματα της ροής.

Σαφώς ο σχεδιαστής βρίσκεται αντιμέτωπος με τις αντικρουόμενες προτεραιότητες συνδυάζοντας την απόδοση ενάντια στο μέγεθος, το βάρος και το κόστος. Συνήθως μια μελέτη των παραμέτρων θα απαιτηθεί για να επιλεγεί ο καλύτερος συμβιβασμός, συμπεριλαμβανομένης της αξιολόγησης της απόδοσης. Εκτός και αν είναι προσεκτικά δομημένη, μια τέτοια μελέτη των παραμέτρων μπορεί να είναι πολύ μπερδεμένη και χρονοβόρα. Συνήθως η αποδοτικότερη προσέγγιση είναι να ερευνηθούν οι εναλλασσόμενες τιμές του Φ_c , διευκρινίζοντας τις ελάχιστες αποδεκτές τιμές των λόγων ταχύτητας των σειρών πτερυγίων, W_2/W_1 και C_3/C_2 . Γενικά, ο σχεδιαστής θα είναι σε θέση να επιλέξει ένα αποδεκτό πεδίο τιμών για το Φ_c , ενώ οι ελάχιστοι λόγοι ταχύτητας εξασφαλίζουν λογικές φορτίσεις των πτερυγίων και την ικανότητα περιθωρίου κύματος. Άλλοι περιορισμοί θα διευκρινιστούν και θα ελεγχθούν. Παραδείγματος χάριν, θα απαιτηθούν κανονικά τα λογικά όρια στη γωνία ροής, ο συντελεστής ροής και ο συντελεστής φόρτισης σε όλες τις ακτίνες. Για να επεξηγηθεί η διαδικασία, έχει πραγματοποιηθεί μια απλή μελέτη βελτιστοποίησης για τους ακόλουθους περιορισμούς:

- $f_c = 0.5$
- W_2/W_1 και $C_3/C_2 \geq 0.73$
- β και $|b'| < 70^\circ$
- $y < 1$
- $f \leq 1$

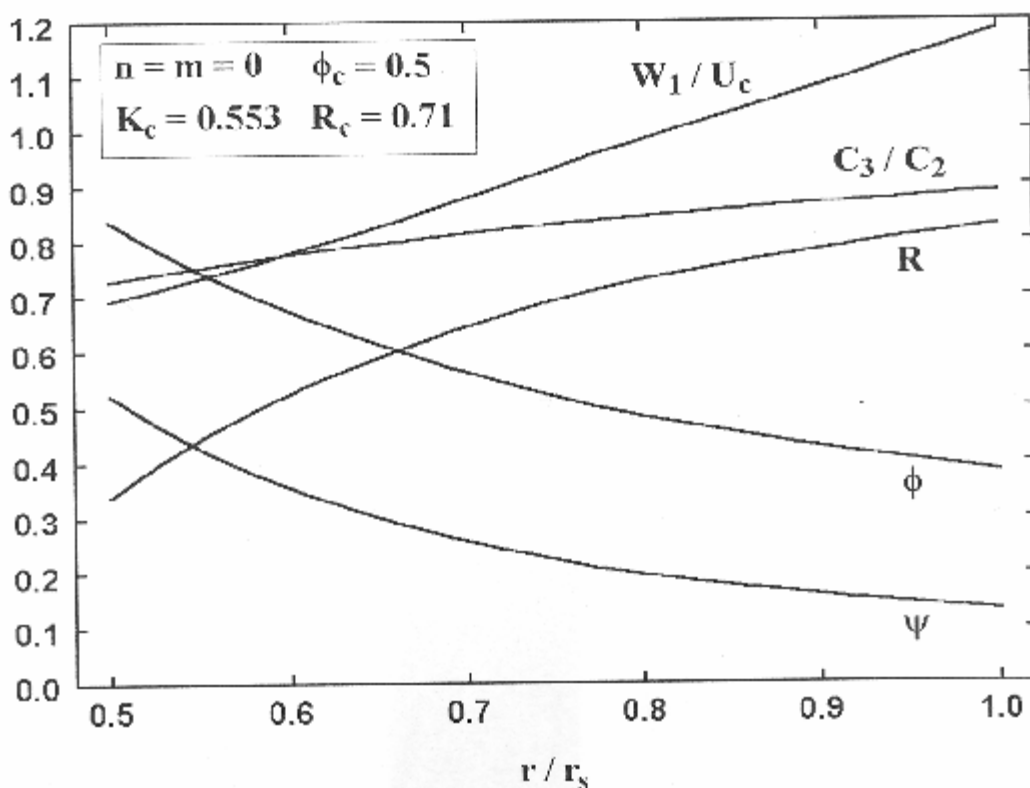
Τα σχέδια παρήχθησαν για τις βαθμίδες δίνης σταθερού στροβίλου, ελεύθερης δίνης και δινών σταθερής αντίδρασης. Η βαθμίδα ελευθέρων δινών δεν απαιτεί να έχει το $C_\theta = 0$ για αυτό το σχέδιο. Η ακτίνα σχεδιασμού επιλέχθηκε καθώς η αληθινή μέση επιφάνεια ρευμάτων, δηλ., χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος της ρίζας μέσου τετραγώνου των ακτίνων πλήμνης και κελύφους. Οι μόνες διαθέσιμες παράμετροι για να επιλεγτούν είναι R_c και K_c (ή Ψ_c), οι οποίες επιλέχθηκαν για να ικανοποιήσουν καλύτερα τους περιορισμούς. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο λόγος ταχύτητας κατά πλάτος του στάτη αποδείχθηκε ότι

είναι περιορισμός ελέγχου, αν και ο περιορισμός της γωνίας ροής ήταν ένας σημαντικός παράγοντας για τη δίνη σταθερής αντίδρασης. Τα σχήματα 1-28 μέχρι 1-30 παρουσιάζουν τις σημαντικότερες παραμέτρους απόδοσης για να συγκρίνουν τους τρεις τύπους δινών. Παρατηρείται ότι ο σχεδιασμός των ελευθέρων δινών οδήγησε στις υψηλότερες σχετικές ταχύτητες εισόδου στον ρότορα, που τον καθιστούν τον πιο ευαίσθητο στα αποτελέσματα του αριθμού Mach. Η βαθμίδα δίνης σταθερής αντίδρασης θα εμφανιζόταν να είναι η καλύτερη επιλογή για τις εφαρμογές με υψηλό αριθμό Mach, αλλά αυτό είναι λίγο παραπλανητικό. Αυτό το σχέδιο είναι πολύ κοντά στον περιορισμό της γωνίας ροής κοντά στο κέλυφος. Θα ήταν δύσκολο να επιτευχθούν πτερύγια με επαρκή πλάτος διόδου λαιμού χρησιμοποιώντας τα πρακτικά πάχη πτερυγίων, έτσι η έμφραξη της διόδου των πτερυγίων θα μπορούσε εύκολα να είναι ένα πρόβλημα κοντά στο κέλυφος. Η βαθμίδα σταθερής αντίδρασης έχει το μεγαλύτερο συντελεστή ροής στην πλήμνη, αλλά είναι εντός των ορίων για αυτά τα δείγματα σχεδίων. Κατά τα λοιπά, οι κατανομές των παραμέτρων απόδοσης των τριών σχεδίων είναι εύλογα παρόμοιες. Εκτός από τις μάλλον μεγάλες γωνίες ροής που παράγονται από τη βαθμίδα δίνης σταθερής αντίδρασης, τα βασικά στοιχεία της αδιάστατης απόδοσης και των τριγώνων ταχύτητας παρέχουν ένα μικρό λόγο για την προτίμηση ενός σχεδίου αντί των άλλων.

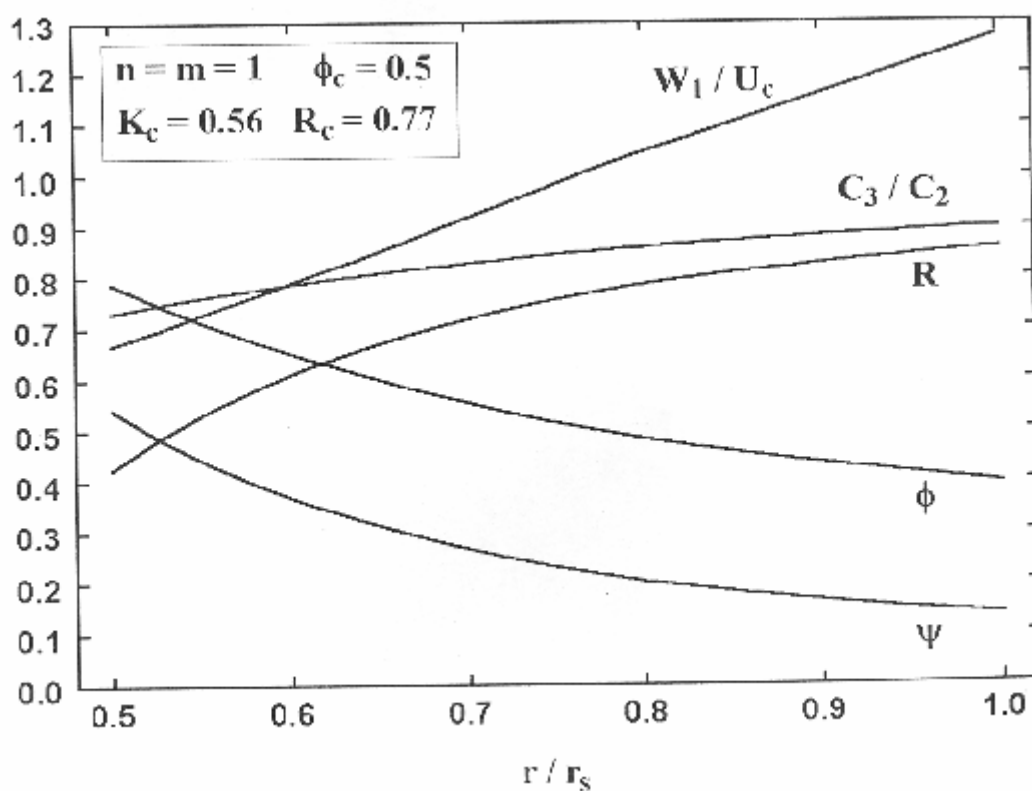
Οι σημαντικότερες διαφορές σε αυτά τα τρία σχέδια που παρατηρούνται στα σχήματα 1-31 και 1-32, τα οποία συγκρίνουν τη γεωμετρία των πτερυγίων που απαιτείται για τα σχέδια των τριών βαθμίδων. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα πτερύγια 65-σειρών NACA σχεδιάστηκαν με σταθερή χορδή, σταθερό $t_b/c = 0.1$ και $\sigma = 1$ για $r = r_c$. Όλα τα πτερύγια του ρότορα είναι μεταβλητού κυρτώματος, συστραμένα πτερύγια, αλλά η βαθμίδα δίνης σταθερής αντίδρασης απαιτεί τις πιο ακραίες διακυμάνσεις. Πράγματι, μια αρνητική γωνία κυρτώματος απαιτείται στο κέλυφος για αυτό το σχέδιο, με μια πολύ υψηλή γωνία προπορείας στην ίδια θέση. Το σχέδιο δίνης σταθερού στροβίλου οδηγεί σε μια πολύ απλή γεωμετρία στατών, η οποία προσεγγίζεται εύκολα με τη χρησιμοποίηση πτερυγίων σταθερού κυρτώματος και γωνία προπορείας. Η βαθμίδα ελεύθερης δίνης απαιτεί μεταβλητού κυρτώματος, συστραμένα πτερύγια στατών, αλλά με πολύ λογικές διακυμάνσεις. Η βαθμίδα δίνης σταθερής αντίδρασης απαιτεί ιδιαίτερα συστραμένα πτερύγια στατών με μια μεγάλη διακύμανση στη γωνία κυρτώματος. Τα πτερύγια βαθμίδας σταθερής αντίδρασης θα χρειάζονταν προσεκτική αξιολόγηση σχετικά με την κατασκευαστική ακεραιότητα και την πρακτικότητά τους για την κατασκευή. Είναι πιθανό ότι η εφαρμογή αυτού του ύφους δινών πρέπει να περιοριστεί στους υψηλότερους λόγους ακτίνας πλήμνης προς κελύφους από εκείνους σε αυτήν την περίπτωση.

Η ανάλυση της απόδοσης εφαρμόστηκε σε αυτά τα τρία σχέδια βαθμίδας για να αξιολογήσει την αναμενόμενη απόδοσή τους. Η γεωμετρία των δακτυλίων για όλες τις βαθμίδες λήφθηκε υποθέτοντας μια σταθερή ακτίνα

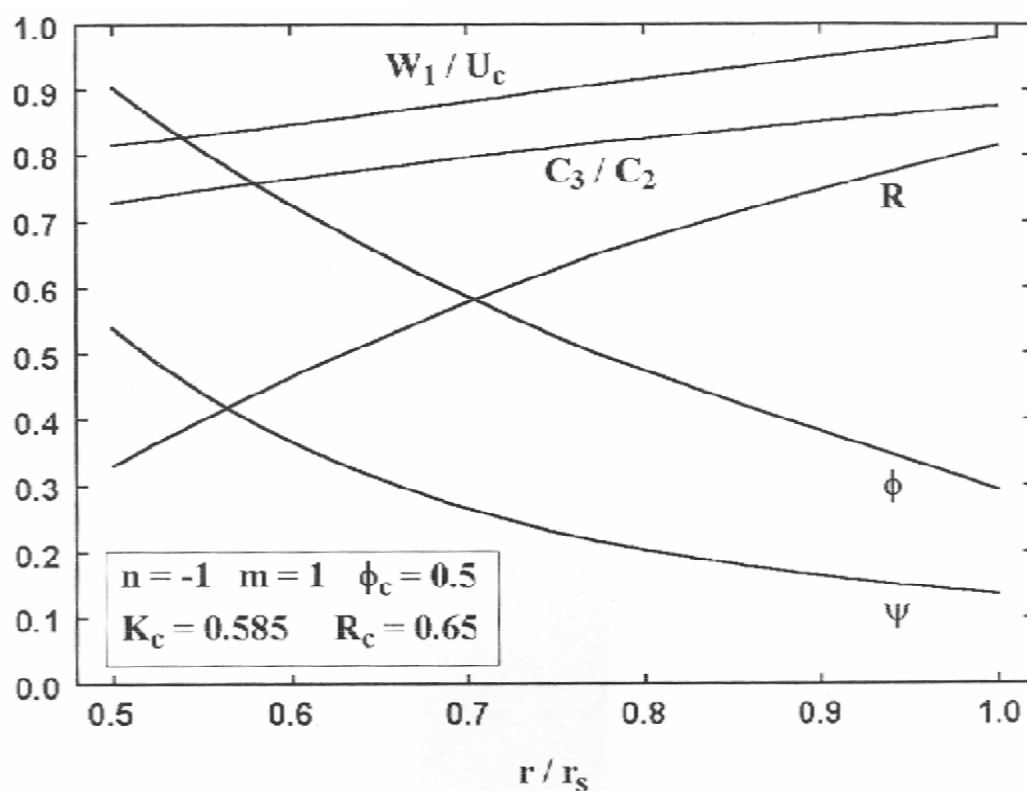
πλημνών και ταξινομώντας την ακτίνα του κελύφους βασιζόμενοι στο ίδιο λόγο όγκου ροής και την ίδια ταχύτητα περιστροφής. Αυτό ο λόγος όγκου ροής υπολογίζεται εύκολα από την ταχύτητα περιστροφής και τα τρίγωνα ταχύτητας ελεύθερης δίνης, όπου το C_z είναι σταθερό. Η ταχύτητα περιστροφής και οι θερμοδυναμικοί όροι εισόδου επιλέχθηκαν για να περιορίσουν τη μέγιστη είσοδο στο ρότορα, αναλόγως με τον αριθμό Mach, περίπου σε 0.78 για να αποφύγουν τη σύγκριση με τα αποτελέσματα του αριθμού Mach. Μόλις ολοκληρώθηκε η κατά προσέγγιση ταξινόμηση των δακτυλίων, οι ακτίνες του κελύφους ρυθμίστηκαν να παραγάγουν έναν κωνικό τοίχωμα κελύφους για να αποφύγουν τα αποτελέσματα που είναι προκατειλημμένα από τις διακυμάνσεις της γωνίας της τοπικής εξωτερικής καμπύλης που δεν είναι αντιπροσωπευτικές μιας αληθινής απόδοσης των βαθμίδων όταν χρησιμοποιείται ως βαθμίδα επανάληψης σε έναν πολυβάθμιο συμπιεστή. Ομοίως, τα αποτελέσματα της παρεμπόδισης του οριακού στρώματος των ακραίων τοιχωμάτων και η κυρτότητα της επιφάνειας των ρευμάτων αγνοήθηκαν για να λάβουν μια όσο το δυνατόν δικαιότερη σύγκριση. Αυτή η διαδικασία παρήγαγε την αναμενόμενη βαθμίδα επανάληψης για τον σχεδιασμό βαθμίδας της ελεύθερης δίνης και της δίνης σταθερού στροβίλου. Αυτή δεν ήταν η περίπτωση για το σχεδιασμό δίνης σταθερής



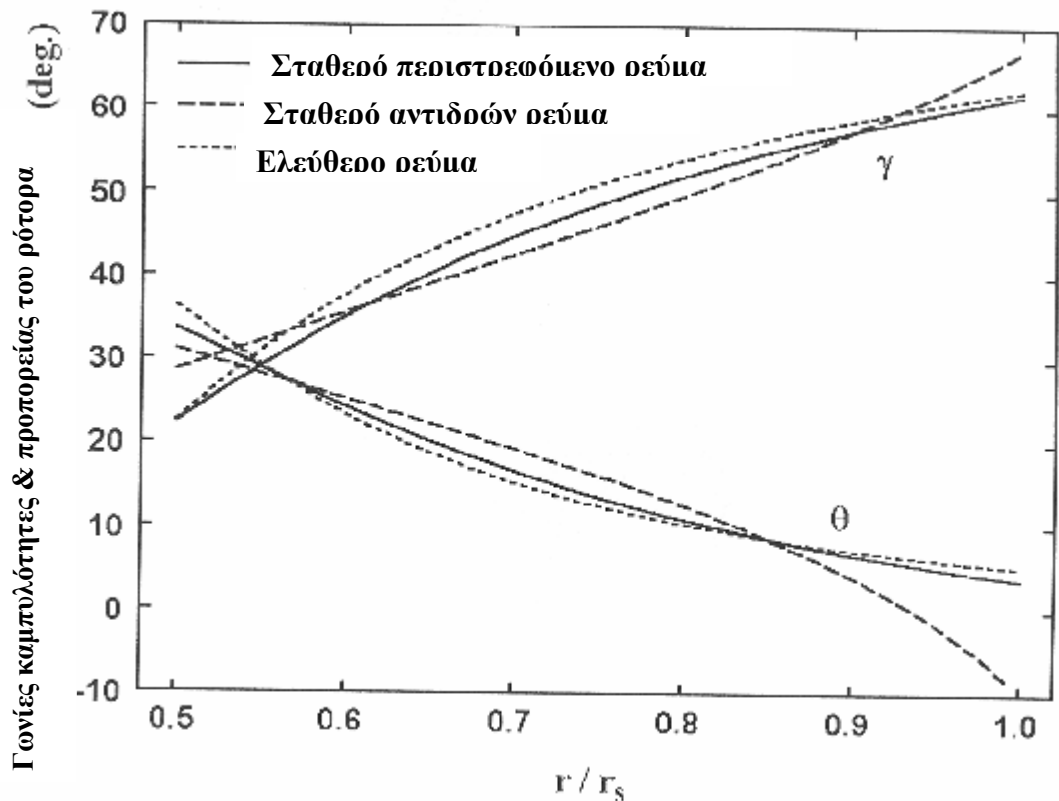
ΣΧΗΜΑ 1-28 Βαθμίδα στροβίλου σταθερής δίνης



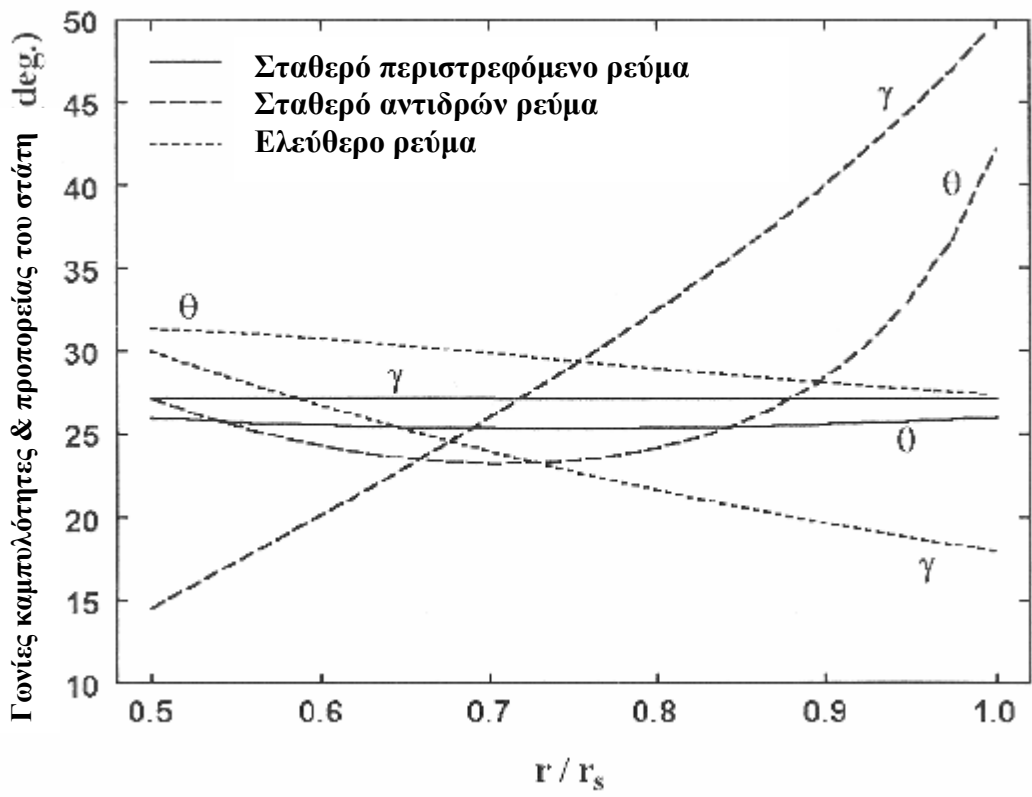
ΣΧΗΜΑ 1-29 Βαθμίδα ελεύθερης δίνης



ΣΧΗΜΑ 1-30 Βαθμίδα στροβίλου σταθερής αντίδρασης



ΣΧΗΜΑ 1-31 Γεωμετρία πτερυγίων του ρότορα



ΣΧΗΜΑ 1-32 Γεωμετρία πτερυγίων του στάτη

αντίδρασης, όπου η διαμόρφωση της βαθμίδας επανάληψης δεν μπόρεσε να επιτευχθεί στην πράξη. Η ταξινόμηση του δακτυλίου για να ταιριάζει με το σχέδιο του τριγώνου ταχύτητας για εκείνη την περίπτωση παρήγαγε μια αύξηση στην ακτίνα κελύφους κατά πλάτος του ρότορα, που ακολουθήθηκε από μια μεγάλη μείωση κατά πλάτος του στάτη. Η λογικότερη προσέγγιση στον προγραμματισμό της περιοχής των δακτυλίων που απαιτήθηκε επρόκειτο να ορίσει απλά μια σταθερή ακτίνα κελύφους. Η πηγή του προβλήματος είναι οι λόγοι της αξονικής ταχύτητας στις σειρές των πτερυγίων, οι οποίοι αλλάζουν τις προβλεφθείσες γωνίες απόκλισης. Όπως παρατηρείται στο σχέδιο 1-17, οι λόγοι αξονικής ταχύτητας μπορούν να είναι αρκετά σημαντικοί για αυτό το ύψος δινών. Το αυτοματοποιημένο σύστημα σχεδιασμού βαθμίδας που χρησιμοποιείται για να παραγάγει αυτά τα σχέδια δεν διορθώνει τις γωνίες απόκλισης από τις επιδράσεις του λόγου αξονικής ταχύτητας. Είναι συνήθως παραπλανητικό, δεδομένου ότι οι λόγοι αξονικής ταχύτητας σε μια πραγματική εφαρμογή μπορούν να είναι αρκετά διαφορετικοί από εκείνους που παράγονται στους υπολογισμούς σχεδιασμού της ιδανικής βαθμίδας. Η εφαρμογή της βαθμίδας επανάληψης σε ένα τυποποιημένο βιομηχανικό συμπιεστή περιλαμβάνει τη χρήση των διάφορων τμημάτων της χορδής των πτερυγίων σε διαφορετικές βαθμίδες για να διατηρηθεί όπως απαιτείται το ποσοστό της ροής μάζας. Οι ρυθμίσεις των γωνία προπορείας και των επιπέδων της αξονικής ταχύτητας μέσω του πολυβάθμιου συμπιεστή είναι συνήθως απαραίτητες για να παραγάγουν την απαιτούμενη απόδοση με έναν συγκεκριμένο αριθμό βαθμίδων. Εάν δεν είναι δυνατό να παραμεληθεί η επίδραση του λόγου της αξονικής ταχύτητας στη γωνία απόκλισης στο σχεδιασμό της βασικής βαθμίδας, η βαθμίδα δεν είναι καλός υποψήφιος για μια τυποποιημένη βαθμίδα επανάληψης. Αυτή είναι πραγματικά η περίπτωση για αυτή τη βαθμίδα δίνης σταθερής αντίδρασης. Ο λόγος πλήμνης προς κέλυφος που χρησιμοποιείται σε αυτό το παράδειγμα είναι απλά πάρα πολύ χαμηλός για μια δίνη σταθερής αντίδρασης για να παραγάγει μια βιώσιμη βαθμίδα επανάληψης. Φυσικά, είναι πιθανό ότι αυτή η βαθμίδα θα χρησιμοποιηθεί σε μια μοναδική, συγκεκριμένη εφαρμογή. Σε αυτή την περίπτωση, η επακριβής εφαρμογή της διαδικασίας σχεδιασμού που συζητείται στο επόμενο κεφάλαιο πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να σχεδιαστούν οι πτέρυγες για τη βαθμίδα.

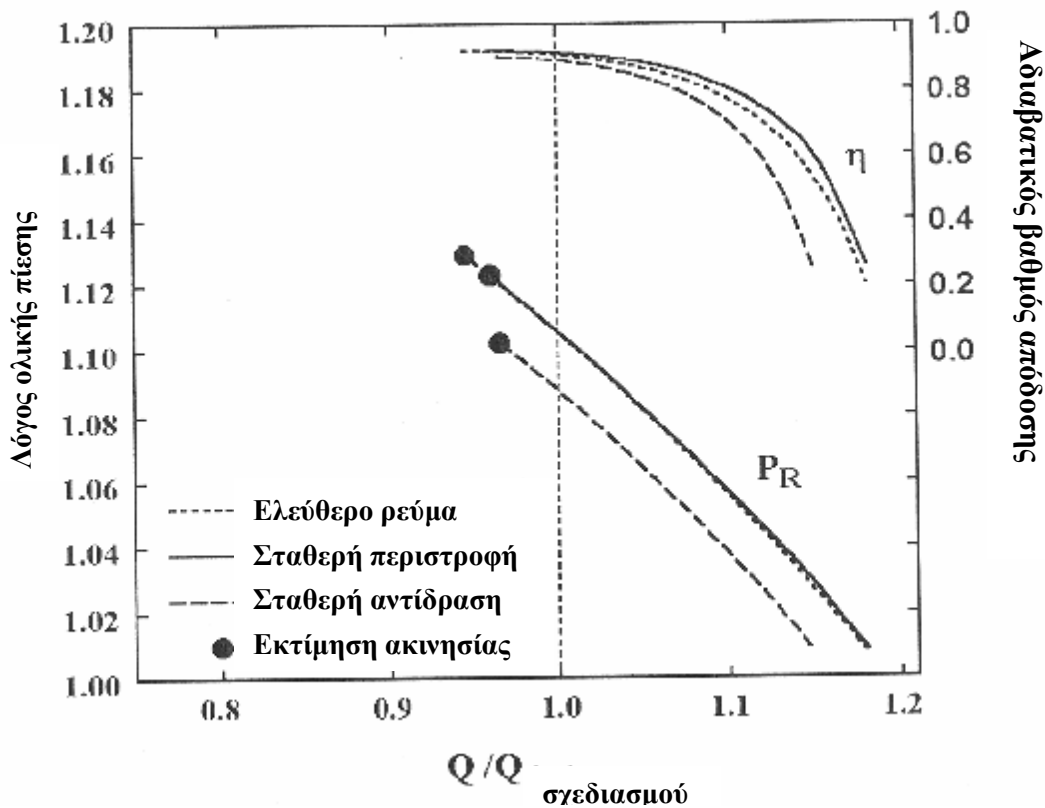
Το σχήμα 1-33 παρουσιάζει μια σύγκριση των προβλέψεων απόδοσης για τα σχέδια τριών βαθμίδων. Το χαμηλότερο όριο του ποσοστού του όγκου ροής για κάθε βαθμίδα αντιστοιχεί στο προβλεπόμενο όριο κύματος βασισμένο στο κριτήριο κύματος. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι βαθμίδες ελεύθερης δίνης και δίνης σταθερού στροβίλου παράγουν ουσιαστικά τα ίδια χαρακτηριστικά απόδοσης. Η βαθμίδα ελεύθερης δίνης έχει ένα μικρό πλεονέκτημα στο σταθερό πεδίο λειτουργίας, ενώ η βαθμίδα δίνης σταθερού στροβίλου έχει ένα μικρό πλεονέκτημα στην αποδοτικότητα. Καμία από αυτές τις διαφορές δεν μπορεί να θεωρηθεί σημαντική μέσα στην αβεβαιότητα των διαδικασιών ανάλυσης της απόδοσης. Ο σχεδιασμός δίνης σταθερής αντίδρασης παράγει χαμηλότερους

λόγους πίεσης και αποδοτικότητας από τις άλλες δύο βαθμίδες, ακόμα κι αν είχε τον υψηλότερο συντελεστή φόρτισης εισαγωγής σχεδιασμού, Ψ_c . Βασισμένα στην αναμενόμενη απόδοση της βαθμίδας, θα μπορούσε να επιλεχτεί είτε το σχέδιο ελεύθερης δίνης είτε το σχέδιο δίνης σταθερού στροβίλου. Η απλούστερη γεωμετρία στατών της βαθμίδας δίνης σταθερού στροβίλου και το υψηλότερο επίπεδο του σχετικού αριθμού Mach στην εισαγωγή του ρότορα του σχεδίου ελεύθερης δίνης θα ευνοούσαν την επιλογή του σχεδίου δίνης σταθερού στροβίλου.

1.11 ΒΑΘΜΙΔΑ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ ΕΝΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

Όπως αναφέρεται στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, ένα σχέδιο βαθμίδας επανάληψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τυποποιημένη βαθμίδα στους βιομηχανικούς συμπιεστές αξονικής ροής. Κάθε βιομηχανικός συμπιεστής αξονικής ροής έχει συνήθως ένα μοναδικό σχέδιο. Οι δαπάνες σχεδίων, σχεδίασης και ανάπτυξης είναι κρίσιμα ζητήματα, δεδομένου ότι σπάνια υπάρχει κάποια πανομοιότυπη μηχανή για να μοιραστούν αυτές τις δαπάνες. Ομοίως, η πειραματική επιβεβαίωση της απόδοσης του ολοκληρωμένου συμπιεστή θα ληφθεί προτού να σταλεί στον πελάτη. Η αποτυχία να επιτευχθεί η εγγυημένη απόδοση μπορεί να απαιτήσει την πολύ ακριβή αναδιαμόρφωση του συμπιεστή. Η χρήση μιας τυποποιημένης βαθμίδας επανάληψης μπορεί να μετριάσει αυτά τα προβλήματα. Τώρα οι δαπάνες σχεδίων και σχεδίασης μπορούν να μοιραστούν μεταξύ πολλών βιομηχανικών συμπιεστών, ακόμα κι αν καθένας έχει ένα μοναδικό σχέδιο. Έτσι ο κίνδυνος ανεπάρκειας απόδοσης μειώνεται αρκετά, δεδομένου ότι η εμπειρία από τους προηγούμενους συμπιεστές μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν οδηγός.

Η εφαρμογή μιας τυποποιημένης βαθμίδας σε έναν πολυβάθμιο συμπιεστή είναι εύλογα σαφής χρησιμοποιώντας μια ανάλυση αεροδυναμικής απόδοσης που είναι σε θέση να ταξινομήσει το δακτύλιο. Για να επεξηγηθεί η διαδικασία, ένας συμπιεστής αξονικής ροής δέκα βαθμίδων θα διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας τη βαθμίδα επανάληψης της δίνης σταθερού στροβίλου που σχεδιάζεται στην προηγούμενη παράγραφο. Ο συμπιεστής θα σχεδιαστεί με μια σταθερή ακτίνα πλημνών, έτσι ώστε το ίδιο πτερύγιο ρότορα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σ' όλους, απλά τοποθετώντας τα πτερύγια στο κατάλληλο περίγραμμα κελύφους. Από τα πτερύγια σταθερού κυρτώματος, σταθερής προπορείας του στάτη που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βασική βαθμίδα, ένα κοινό πτερύγιο στάτη είναι επίσης χρησιμοποιήσιμο. Κάτω από αυτούς τους περιορισμούς, εύκολα παρατηρείται ότι η γεωμετρία του βασικού πτερυγίου είναι ίδια για όλες τις βαθμίδες. Ο απλούστερος τρόπος να διαμορφωθεί ο βασικός συμπιεστής είναι να οριστεί η μεσημβρινή ταχύτητα της



ΣΧΗΜΑ 1-33 Σύγκριση της προβλεπόμενης απόδοσης

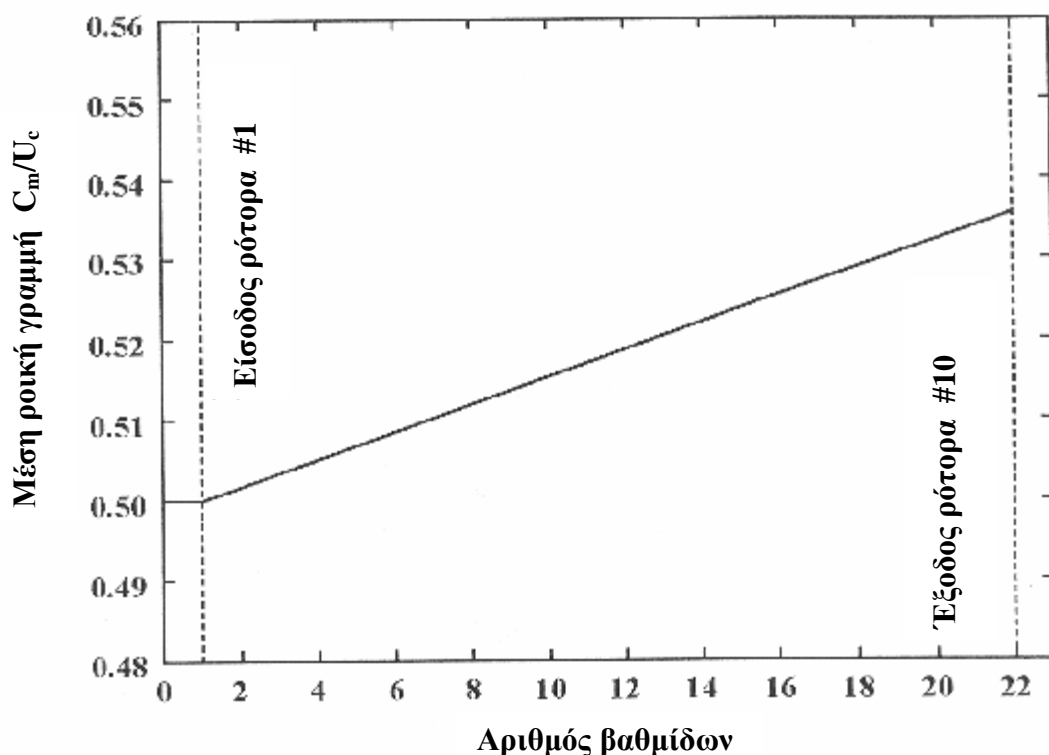
μέσης επιφάνειας ρευμάτων μέσω του συμπιεστή και να ταξινομηθεί ο δακτύλιος για να καθοριστεί το κατά προσέγγιση περίγραμμα του κελύφους. Για να απλοποιηθεί αυτή η διαδικασία, η ανάλυση της απόδοσης οργανώνεται με έναν στάδιο υπολογισμού μεταξύ των διαδοχικών σειρών πτερυγίων. Κατόπιν η μεσημβρινή ταχύτητα στη μέση επιφάνεια ρευμάτων ορίζεται στους συγκεκριμένους σταθμούς υπολογισμού και λαμβάνεται σε άλλους σταθμούς από τη γραμμική παρεμβολή με τον αριθμό των σταδίων. Για αυτό το παράδειγμα, θα υποθεθεί ότι η ορισμένη μεσημβρινή ταχύτητα πρέπει να ποικίλει γραμμικά με τον αριθμό των σταδίων από την είσοδο στον πρώτο ρότορα στην έξοδο του τελευταίου ρότορα. Ο συμπιεστής θα ταξινομηθεί για να χρησιμοποιήσει την πλήρη ικανότητα ροής της τυποποιημένης βαθμίδας, με την ίδια ταχύτητα περιστροφής όπως αυτή που χρησιμοποιείται στο σχήμα 1-33. Έτσι η μεσημβρινή ταχύτητα στην είσοδο του πρώτου ρότορα μπορεί να οριστεί αμέσως από τα στοιχεία σχεδιασμού της βαθμίδας. Κάποιος ακριβής καθορισμός απαιτείται για να ταιριάζει την γνωστή ακτίνα κελύφους σε αυτό το σημείο που οφείλεται στην επίδραση της διακύμανσης της πυκνότητας του αερίου κατά πλάτος του οδηγού πτερυγίου και στην παρεμπόδιση του οριακού στρώματος των ακριανών τοιχωμάτων που υποτίθεται στην είσοδο του συμπιεστή. Αυτό απαιτεί μια δευτερεύουσα ρύθμιση στο σχεδιασμό της ροής μάζας εισόδου έως ότου λαμβάνεται η σωστή ακτίνα κελύφους. Η ταξινόμηση

του δακτυλίου για την είσοδο του οδηγού πτερυγίου εισόδου και η έξοδος στον τελευταίο στάτη και η έξοδος του οδηγού πτερυγίου μπορούν να είναι μάλλον αυθαίρετα σε αυτό το σημείο. Εφ' όσον οι μεσημβρινές ταχύτητες που ορίζονται σε αυτούς τους σταθμούς δεν είναι αδικαιολόγητες, έχουν λίγη επιρροή στην απόδοση. Η χειροκίνητη ταξινόμηση του δακτυλίου σε εκείνους τους σταθμούς είναι μάλλον τετριμμένη μόλις καθοριστεί το περίγραμμα του κελύφους στους άλλους σταθμούς. Έτσι ο στόχος που ολοκληρώνεται σε αυτό το απλό παράδειγμα είναι η επιλογή της μεσημβρινής ταχύτητας που ορίζεται στην τελευταία έξοδο του ρότορα. Πρώτη προτεραιότητα είναι να ληφθεί ένα λογικό περίγραμμα κελύφους. Παραδείγματος χάριν, ορίζοντας τη μεσημβρινή ταχύτητα στη μέση επιφάνεια ρευμάτων σταθερή μέσω του συμπιεστή οδήγησε στην ακτίνα κελύφους που αυξάνεται με την αξονική απόσταση στις οπίσθιες βαθμίδες. Αυτό θα μπορούσε να προβλεφθεί δεδομένου ότι η ακτίνα της μέσης επιφάνειας ρευμάτων μειώνεται μέσω της μηχανής. Δεδομένου ότι η αξονική ταχύτητα για τη δίνη σταθερού στροβίλου αυξάνεται καθώς η ακτίνα μειώνεται, θα μπορούσε να αναμένεται ότι η ορισμένη μεσημβρινή ταχύτητα θα αυξηθεί μέσω του συμπιεστή. Η ορισμένη μεσημβρινή ταχύτητα που χρησιμοποιείται στην τελευταία αποφόρτιση του ρότορα καθορίστηκε εύκολα από τη δοκιμή και το λάθος, χρησιμοποιώντας την ανάλυση της απόδοσης. Το σχήμα 1-34 παρουσιάζει την κατανομή C_m που χρησιμοποιήθηκε και το σχήμα 1-35 παρουσιάζει τα περιγράμματα πλήμνης και κελύφους που αναπτύσσονται από την ταξινόμηση του δακτυλίου για αυτή την κατανομή C_m . Το σχήμα 1-36 παρουσιάζει την προβλεφθείσα απόδοση. Το κατ' εκτίμηση όριο κύματος παρουσιάζεται επίσης, συμπεριλαμβανομένου του κριτηρίου απώλειας στήριξης το οποίο πρώτα αντιμετωπίστηκε για κάθε γραμμική ταχύτητα. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι μια τυποποιημένη βαθμίδα επανάληψης που σχεδιάζεται με τις μεθόδους αυτού του κεφαλαίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε έναν πολυβάθμιο συμπιεστή.

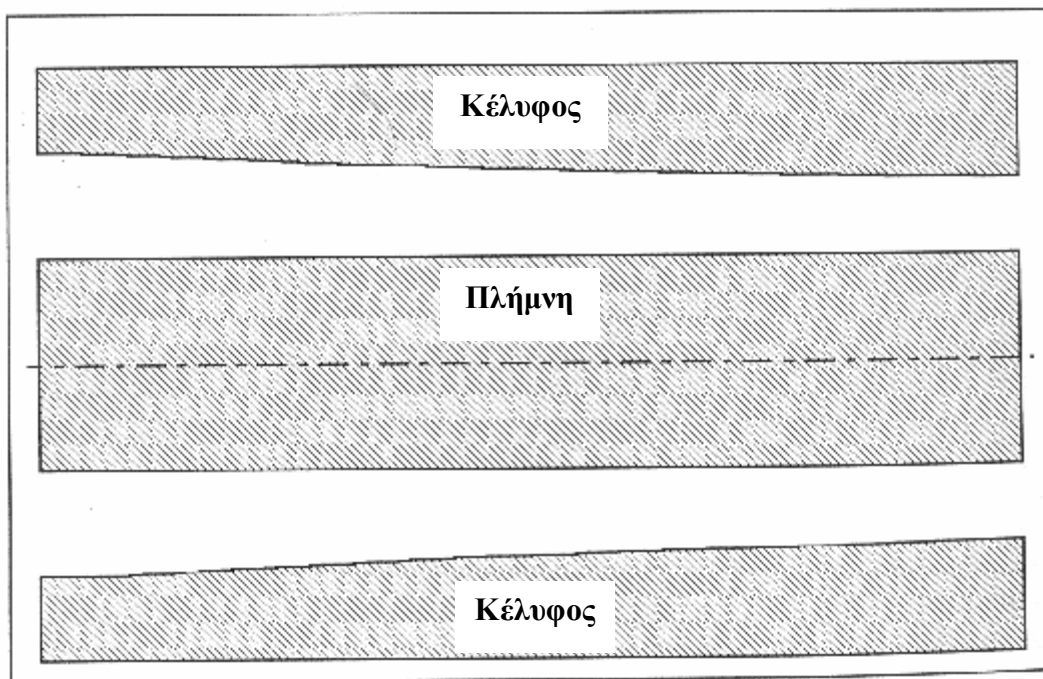
Αυτή η εφαρμογή μιας τυποποιημένης βαθμίδας σε έναν πολυβάθμιο συμπιεστή επεξηγεί τις αντικρουόμενες προτεραιότητες που ο σχεδιαστής αντιμετωπίζει τακτικά. Ο σχεδιασμός βαθμίδας στην παράγραφο 1.10 ακολούθησε τις πρακτικές που αναμένονται για να ευνοήσουν την καλή απόδοση και το σταθερό πεδίο λειτουργίας. Αυτό ήταν εύλογα επιτυχές, αλλά η οικονομική αποτελεσματικότητα ενός συμπιεστή δέκα-βαθμίδων που επιτυγχάνει ένα λόγο πίεσης σχεδίου περίπου 2.2 είναι πολύ αμφισβητήσιμη. Οι περιορισμοί σχεδίου που επιλέγονται στην παράγραφο 1.10 δεν επιτρέπουν στην αύξηση του συντελεστή φόρτισης για να αυξήσουν τον λόγο πίεσης. Ο συμπιεστής μπορεί να λειτουργήσει με μια υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής για να αυξήσει τον λόγο πίεσης, αλλά μόνο με την υπέρβαση του ορίου που επιβλήθηκε στο ακροπερύγιο του ρότορα του σχετικού αριθμού Mach. Μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι ένα τυποποιημένο σχέδιο βαθμίδας επανάληψης είναι απλά μη πρακτικό για αυτούς τους περιορισμούς σχεδιασμού. Αλλά αυτή δεν είναι πραγματικά η περίπτωση. Μάλλον, ο λόγος ακτίνας πλήμνης προς

κέλυφος της βαθμίδας 0.5 που χρησιμοποιείται δεν είναι μια καλή επιλογή για έναν βιομηχανικό συμπιεστή αξονικής ροής που το χρησιμοποιεί αυτό ως τυποποιημένη βαθμίδα επανάληψης.

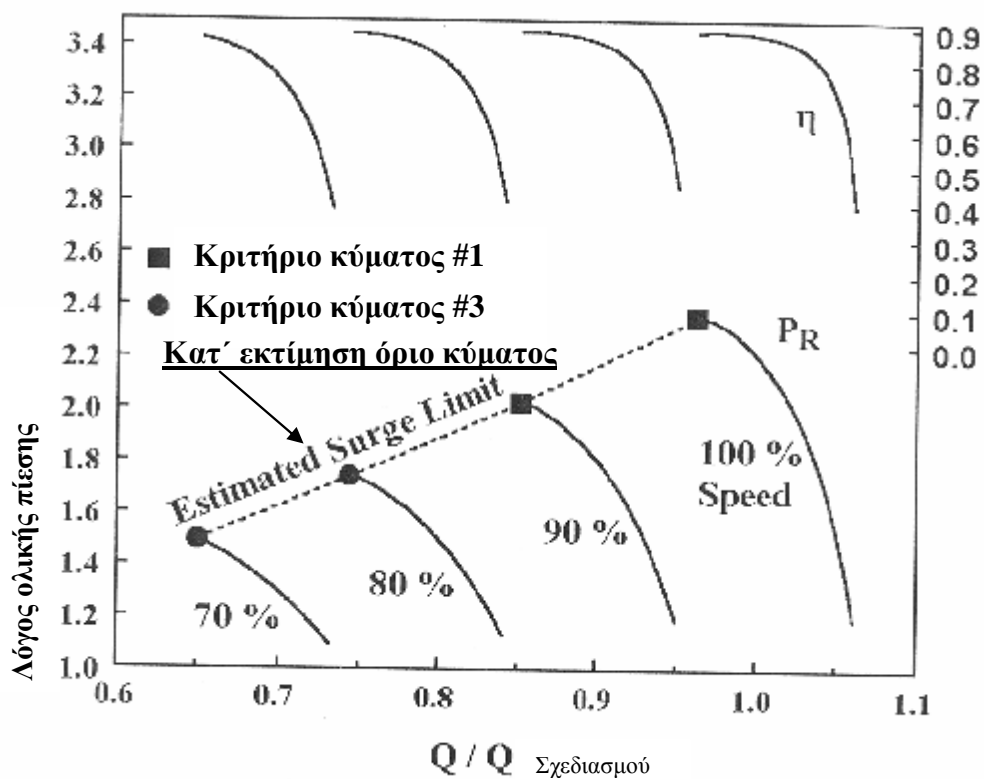
Το σχήμα 1-37 παρουσιάζει τις σημαντικές παραμέτρους απόδοσης για μια βαθμίδα δίνης σταθερού στροβίλου που σχεδιάζεται στους ίδιους περιορισμούς όπως για το σχέδιο του σχήματος 1-28, αλλά με λόγο ακτίνας πλήμνης προς κέλυφος 0.7. Σημειώνεται ότι μια ουσιαστική αύξηση του συντελεστή φόρτισης επιτυγχάνεται ικανοποιώντας τους ίδιους περιορισμούς σχεδιασμού. Ένας εναλλακτικός συμπιεστής αξονικής ροής 10-βαθμίδων διαμορφώθηκε χρησιμοποιώντας αυτή την εναλλακτική βαθμίδα σχεδιασμού ως τυποποιημένη βαθμίδα επανάληψης. Αυτό οδηγεί στην προβλεφθείσα απεικόνιση απόδοσης που παρουσιάζεται στο σχήμα 1-38. Αυτός ο συμπιεστής επιτυγχάνει ένα λόγο πίεσης περίπου 3.9 στο λόγο ροής μάζας σχεδίου. Ο μεγαλύτερος λόγος ακτίνας πλήμνη προς κέλυφος οδηγεί επίσης σε υψηλότερη αποδοτικότητα και για τον συμπιεστή μιας βαθμίδας και για τον συμπιεστή δέκα-βαθμίδων. Φυσικά, ο λόγος ροής μάζας που επιτυγχάνεται μειώνεται συγκριτικά με το σχήμα 1-36 λόγω του μεγαλύτερου λόγου ακτίνας πλήμνης προς κέλυφος. Αλλά αλλάζοντας την κλίμακα της γεωμετρίας σε μια μεγαλύτερη ακτίνα πλημνών και μειώνοντας την ταχύτητα περιστροφής για να



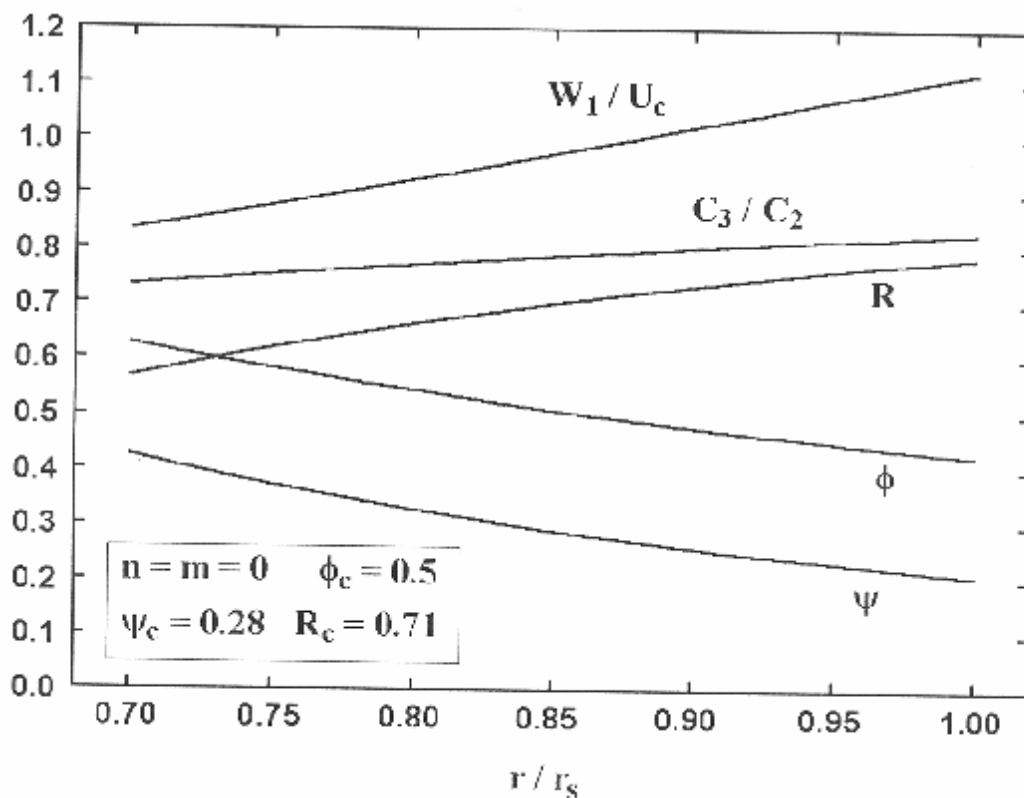
ΣΧΗΜΑ 1-34 Ορισμένη κατανομή C_m



ΣΧΗΜΑ 1-35 Περιγράμματα πλήμνης και κελύφους



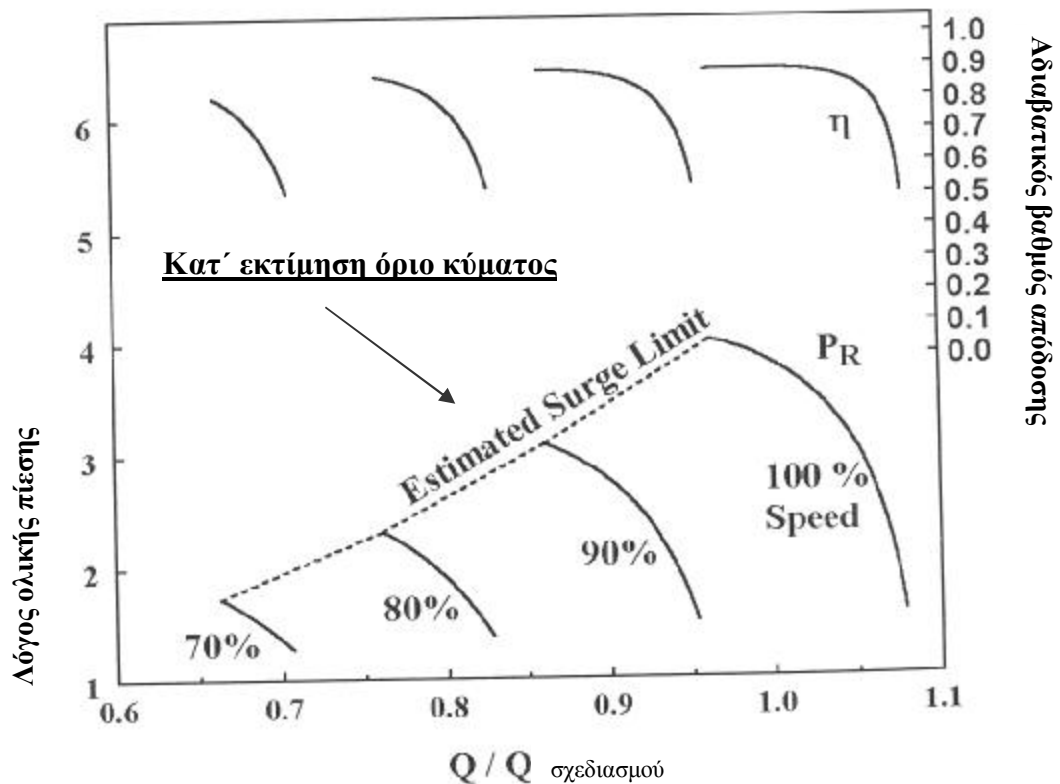
ΣΧΗΜΑ 1-36 Πρόβλεψη της αεροδυναμικής απόδοσης



ΣΧΗΜΑ 1-37 Βαθμίδα εναλλασσόμενου στροβίλου σταθερής δίνης

επιτευχθεί ο επιθυμητός λόγος ροής μάζας, διατηρώντας τις ίδιες αδιάστατες παραμέτρους απόδοσης και τα ίδια επίπεδα του αριθμού Mach, θα μπορούσαν εύκολα να το διορθώσουν.

Στην πράξη, η εφαρμογή μιας τυποποιημένης βαθμίδας είναι πιο περίπλοκη από αυτήν την απλή απεικόνιση. Είναι απίθανο ότι μια άμεση εφαρμογή της βαθμίδας επανάληψης θα παραγάγει το σημείο ροής σχεδιασμού και το λόγο πίεσης που απαιτείται. Παραδείγματος χάριν, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η εφαρμογή απαιτεί έναν συμπιεστή 9½ - βαθμίδας με αυτή την διαμόρφωση. Σε αυτή την περίπτωση, θα είναι απαραίτητο να τροποποιηθεί το σχέδιο για να επιτύχει την απαραίτητη απόδοση σε ένα συμπιεστή είτε 9-βαθμίδων είτε 10-βαθμίδων. Αυτό μπορεί να απαιτήσει τη ρύθμιση μερικών από τις γωνίες προπορείας των πτερυγίων και τροποποίηση της κατανομής C_m . Η ρύθμιση τις γωνίας προπορείας τροποποιεί τα τρίγωνα ταχύτητας, ενώ η κατανομή C_m μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τα διαστείλει ή να τα συστείλει. Και οι δύο προσεγγίσεις μπορούν να αλλάξουν την φόρτιση εισαγωγής ανά βαθμίδα για να καθαρίσουν τον ολικό λόγο πίεσης σε μια πιο κατάλληλη τιμή. Και οι δύο προσεγγίσεις θα απαιτηθούν πιθανώς για να τροποποιήσουν την απόδοση διατηρώντας μια καλή αντιστοιχία μεταξύ των βαθμίδων. Μετά από κάποια εμπειρία με μια συγκεκριμένη τυποποιημένη βαθμίδα, ο σχεδιαστής αναπτύσσει συνήθως μια αρκετά συστηματική προσέγγιση για την επίτευξη των



ΣΧΗΜΑ 1-38 Απόδοση εναλλασσόμενου συμπιεστή

επιθυμητών τροποποιήσεων. Οι ίδιες μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν το περιθώριο κύματος, για να βελτιστοποιήσουν την αποδοτικότητα σε ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας ειδικού ενδιαφέροντος, ή ακόμα και για να επιτύχουν μια ικανότητα ροής κάπως μεγαλύτερη από την τιμή για την οποία η βαθμίδα σχεδιάστηκε. Ως εκ τούτου, υπάρχει ιδιαίτερη ευελιξία κατά την εφαρμογή μιας τυποποιημένης βαθμίδας, ακόμα κι αν είχε σχεδιαστεί να είναι μια απλή βαθμίδα επανάληψης.

1.12 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΑΘΜΙΔΑΣ

Είναι σχετικά απλή η αυτοματοποίηση των διαδικασιών που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο σε ένα συστηματικό διαλογικό σύστημα σχεδιασμού. Η προφανέστερη χρήση αυτού του τύπου συστήματος είναι ο σχεδιασμός των βαθμίδων του τυποποιημένου βιομηχανικού συμπιεστή όπως εκείνη που διευκρινίζεται στην προηγούμενη παράγραφο. Για αυτή την εφαρμογή, είναι λογικό να αγνοηθούν οι επιδράσεις και οι απώλειες του αριθμού Mach, δεδομένου ότι θα ποικίλουν με τη συγκεκριμένη εφαρμογή και τη θέση της βαθμίδας στον πολυβάθμιο συμπιεστή. Στο κεφάλαιο 2, μια

γενικότερη προσέγγιση περιγράφεται όπου τα πτερύγια σχεδιάζονται συγκεκριμένα για κάθε βαθμίδα σε έναν πολυβάθμιο συμπίεστη, συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων του αριθμού Mach και των απωλειών. Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα σχεδιασμού της βαθμίδας βασισμένο στις μεθόδους από αυτό το κεφάλαιο μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο για να υποστηρίξει επίσης αυτή την προσέγγιση. Μπορεί να παρέχει μια κατάλληλη μέθοδο για να ερευνησει τις εναλλασσόμενες βαθμίδες των παραμέτρων απόδοσης και των τύπων δινών που χρησιμοποιούνται στη γενικότερη προσέγγιση σχεδιασμού. Μπορεί να είναι σχετικά άβολο και αβέβαιο να επιχειρούνται αυτές οι έρευνες στα πλαίσια ενός σχεδίου πολυβάθμιου συμπίεστη. Μια άλλη εφαρμογή ενός συστήματος σχεδιασμού βαθμίδων είναι για τις επιδιορθώσεις του τομέα συντήρησης όπου ένα νέο σχέδιο βαθμίδας απαιτείται. Αυτό μπορεί να εμφανιστεί εάν μια βαθμίδα είναι πάρα πολύ χαλασμένη για να καθορίσει την αρχική γεωμετρία του μέσω της αντίστροφης εφαρμοσμένης μηχανικής. Όταν ένα σύστημα σχεδιασμού βαθμίδων είναι διαθέσιμο, μπορεί συχνά να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για ποικίλες απλές και γρήγορες έρευνες για να υποστηρίξει μια άλλη δραστηριότητα σχεδιασμού. Η προσπάθεια που απαιτείται για να αναπτύξει ένα αυτοματοποιημένο σύστημα είναι τόσο μέτρια που μπορεί να δικαιολογηθεί εύκολα. Είναι ενδεδαιγμένο να περιληφθεί κάποια πρόσθετη ευελιξία, η οποία δεν καλύπτεται σε αυτό το κεφάλαιο, κατά τη δημιουργία του αυτοματοποιημένου συστήματος. Ειδικότερα, είναι αρκετά απλό να προνοηθεί μια διακύμανση του C_{ZC} μέσω της βαθμίδας. Ομοίως, η παροχή για μια ακτινική διακύμανση στην φόρτιση εισαγωγής συμπεριλαμβάνεται εύκολα για τις περιπτώσεις όπου η πρόσθετη φόρτιση των ακριανών τοιχωμάτων ή οι επιβληθείσες ακτινικές ενεργειακές κλίσεις θεωρούνται εφικτές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

Η βασική ιδέα που παρουσιάστηκε στο 1^ο κεφάλαιο για το σχεδιασμό μιας ιδανικής βαθμίδας ενός συμπιεστή αξονικής ροής είναι εύκολο να επεκταθεί στο σχεδιασμό ενός πλήρους συμπιεστή αξονικής ροής. Όταν το συγκεκριμένο εργαζόμενο ρευστό, η γωνιακή ταχύτητα, ο λόγος της ροής μάζας και η θερμοδυναμική συνθήκη εισόδου είναι γνωστά, η διαδικασία σχεδιασμού μπορεί να συμπεριλάβει την επίδραση των απωλειών της ολικής πίεσης και των επιπέδων του αριθμού Mach. Αυτό είναι δυνατό εφ' όσον το σχέδιο περιορίζεται στη συνθήκη λειτουργίας των πτερυγίων λογικά κοντά στις γωνίες πρόσπτωσης του σχεδίου, i^* , έτσι ώστε τα πτερύγια να λειτουργούν στην περιοχή των γωνιών πρόσπτωσης με τις χαμηλότερες απώλειες όπου οι συντελεστές απωλειών είναι εύλογα σταθεροί. Αυτή είναι φυσιολογική πρακτική στο σημείο σχεδιασμού του συμπιεστή, δηλ., για τον λόγο της ροής μάζας και τη συνθήκη της ταχύτητας στα οποία η βαθμίδα πρόκειται καλά να ταιριάξει κατά πλάτος του συμπιεστή. Ένα σύστημα σχεδιασμού συμπιεστή αξονικής ροής αυτού του τύπου είναι απίθανο να παράγει όλα τα αεροδυναμικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού που απαιτούνται και όλα τα εκτός σχεδιασμού χαρακτηριστικά λειτουργίας που απαιτούνται. Αλλά μπορεί να παράγει μια άριστη προκαταρκτική διαμόρφωση που καθορίζεται με ακρίβεια χρησιμοποιώντας την ανάλυση απόδοσης.

Οι ίδιες διαδικασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχεδιάσουν μεμονωμένες βαθμίδες ή σειρές λεπίδων που προορίζονται για τις συγκεκριμένες εφαρμογές. Παραδείγματος χάριν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό αντικαταστατών για τις σειρές πτερυγίων που είναι πάρα πολύ άσχημα χαλασμένες για αντίστροφη ανάλυση. Όταν αυτός ο τύπος συστήματος σχεδιασμού είναι διαθέσιμος, τα οφέλη του ιδανικού συστήματος σχεδιασμού βαθμίδων του 1^{ου} κεφαλαίου μπορούν να φανούν αμφισβητήσιμα. Πράγματι, εάν λαμβάνεται αρκετή προσοχή, αυτή η αυστηρότερη προσέγγιση σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του ιδανικού συστήματος σχεδιασμού βαθμίδων για να παράγει ένα τυποποιημένο βιομηχανικό σχέδιο βαθμίδας συμπιεστή. Είναι απαραίτητο να αποφευχθούν οι περιορισμοί που μπορούν να αποκλείσουν τη χρησιμοποίηση της τυποποιημένης βαθμίδας για τις επιδιωκόμενες εφαρμογές που είναι διαφορετικές από τους όρους σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται. Οι διαδικασίες που καθορίζονται σε αυτό το κεφάλαιο

ταξινομούν το δακτύλιο του συμπιεστή για να ταιριάζει με της συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Αυτό επιβάλλει μια συγκεκριμένη μορφή επιφανειακών ρευμάτων και περιορίζει την έκταση των πτερυγίων που σχεδιάζονται με οποιοσδήποτε πρέπει για τη διατήρηση της μάζας. Η επιρροή των οριακών στρωμάτων τοίχου επίσης επηρεάζεται σημαντικά από τις συγκεκριμένες συνθήκες σχεδιασμού. Εάν αυτό το σύστημα εφαρμόζεται στο χαμηλότερο επίπεδο του αριθμού Mach που αναμένεται και στο υψηλότερο ποσοστό όγκου ροής από ότι αναμένεται για να απαιτηθεί, ένα σχέδιο βαθμίδας μπορεί να είναι ικανοποιητικό για τη γενική χρήση ως τυποποιημένο στάδιο. Αλλά αυτός μειώνει χαρακτηριστικά τη διαδικασία σχεδιασμού σε μια πιο περίπλοκη έκδοση των μεθόδων που περιγράφονται στο 1^ο κεφάλαιο, ακυρώνοντας αποτελεσματικά τα οφέλη των αυστηρότερων προτύπων που χρησιμοποιήθηκαν. Πράγματι, οι μέθοδοι σχεδιασμού του 1^{ου} κεφαλαίου είναι συχνά χρήσιμες για την έρευνα εναλλακτικών παραμέτρων βαθμίδων απόδοσης πριν επιχειρήσουν ένα σχεδιασμό που χρησιμοποιεί τις μεθόδους αυτού του κεφαλαίου.

ΟΡΟΛΟΓΙΑ

C	=	απόλυτη ταχύτητα
c	=	χορδή
F _g	=	κλασματικό αξονικό κενό μεταξύ των πτερυγίων
F _{sh}	=	λόγος χορδής πλήμνης προς κέλυφος
g	=	αξονικό διάκενο μεταξύ των σειρών του πτερυγίου
H	=	ολική ενθαλπία
h	=	ύψος πτερυγίου
i	=	γωνία πρόσπτωσης
i*	=	ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης απωλειών
m	=	εκθέτης δίνης
n	=	εκθέτης δίνης
P _R	=	λόγος πίεσης
R	=	αντίδραση
r	=	ακτίνα
U	=	ταχύτητα πτερυγίων = ωr
W	=	σχετική ταχύτητα
W _{RE}	=	λόγος ισοδύναμης ταχύτητας
Z	=	αριθμός πτερυγίων
z	=	αξονική συντεταγμένη
γ	=	γωνία προπορείας
η	=	βαθμός απόδοσης
θ	=	γωνία καμπυλότητας
σ	=	τάση
φ	=	συντελεστής ροής και γωνία κλίσης επιφανειακών ρευμάτων
ψ	=	συντελεστής φόρτισης
ω	=	γωνιακή ταχύτητα, radians/sec

ΔΕΙΚΤΕΣ

c	=	παράμετρος στην μέση ρευματική επιφάνεια
h	=	παράμετρος στο περίγραμμα της πλήμνης
i	=	αριθμός βαθμίδων
m	=	μεσημβρινή συνιστώσα
s	=	παράμετρος στο περίγραμμα του κελύφους
θ	=	εφαπτομενική συνιστώσα
1	=	συνθήκη εισόδου ρότορα
2	=	συνθήκη εξόδου ρότορα
3	=	συνθήκη εξόδου στάτη

2.1 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΒΑΣΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ

Το σχήμα 2-1 επεξηγεί τη λύση του προβλήματος του βασικού σχεδιασμού συμπιεστή. Η γεωμετρία των περιγραμμάτων και όλων των σειρών των πτερυγίων πρόκειται να παραχθεί, βασισμένη στους διευκρινισμένους τύπους δινών στροβίλου και στις αδιάστατες παραμέτρους απόδοσης στη μέση επιφάνεια ροής για όλες τις βαθμίδες. Όπως συνηθίζεται, η μέση επιφάνεια ροής καθορίζεται από την προϋπόθεση ότι και στις δύο πλευρές της επιτυγχάνονται ίδιο ποσοστό ροής μάζας. Για την ολοκλήρωση του σχεδίου, ένα από τα περιγράμματα καθορίζεται, ενώ τα άλλα υπολογίζονται από τη διαδικασία ταξινόμησης των δακτυλίων. Η περίπτωση που διευκρινίζεται στο σχήμα 2-1 είναι χαρακτηριστική ενός ορισμένου σχεδίου περιγράμματος κελύφους. Δεδομένου ότι όλοι οι όροι λειτουργίας είναι γνωστοί, το περίγραμμα πλημνών μπορεί να υπολογιστεί ως τμήμα της λύσης σχεδιασμού απλά από την διατήρηση της μάζας.

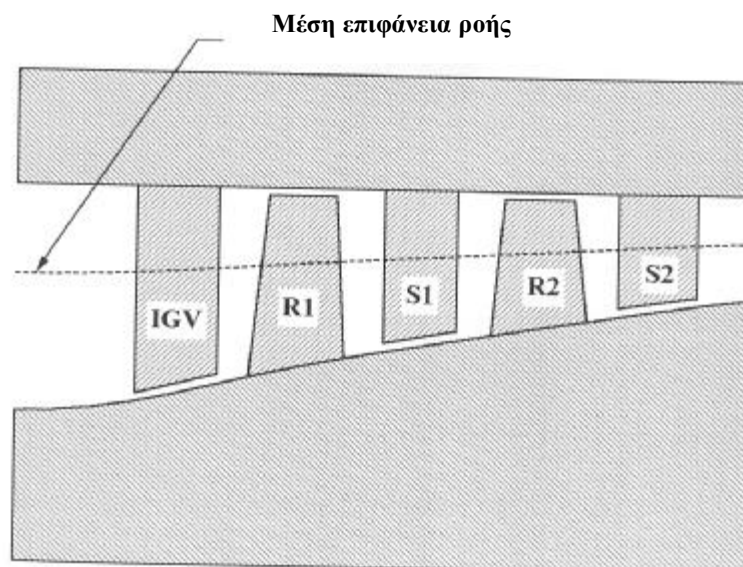
Η διαδικασία σχεδιασμού που χρησιμοποιείται είναι ένας συνδυασμός της μεθόδου σχεδιασμού βαθμίδων και μια απλουστευμένη έκδοση της ανάλυσης απόδοσης. Η ανάλυση απόδοσης απλοποιείται υποθέτοντας ότι οι συντελεστές απωλειών δίνονται από τα μοντέλα σχεδιασμού του συντελεστή απωλειών. Αυτό είναι μια λογική προσέγγιση εφ' όσον η γωνία πρόσπτωσης δεν είναι πάρα πολύ διαφορετική από τη γωνία πρόσπτωσης του σχεδίου. Ο συντελεστής απωλειών του σχεδίου είναι κατά κύριο λόγο μια λειτουργία των αεροδυναμικών στοιχείων. Πράγματι, από τις εξισώσεις

$$\left(\frac{W_{\max}}{W_1}\right)^* = 1.12 + 0.61 \frac{\cos^2 b_1^*}{s} [\tan b_1^* - \tan b_2^*] \quad (2-1)$$

$$D_{eq}^* = \left(\frac{W_{\max}}{W_1}\right)^* \frac{W_1^*}{W_2^*} = \left(\frac{W_{\max}}{W_1}\right)^* \frac{\cos b_2^* W_{m1}}{\cos b_1^* W_{m2}} \quad (2-2)$$

$$\frac{\bar{w}^* \cos b_2^*}{2s} \left(\frac{W_1^*}{W_2^*}\right) = 0.004 \left[1 + 3.1(D_{eq}^* - 1)^2 + 0.4(D_{eq}^* - 1)^8 \right] \quad (2-3)$$

προκύπτει ότι η μόνη γεωμετρική παράμετρος που απαιτείται είναι η τάση. Το πεδίο ροής σε όλο το συμπιεστή θα παραχθεί χρησιμοποιώντας τους διευκρινισμένους τύπους δινών στροβίλου και τις αδιάστατες παραμέτρους απόδοσης των βαθμίδων, παρόμοιους με την προσέγγιση που χρησιμοποιείται στο 1^ο κεφάλαιο. Η απλή κανονική εξίσωση ισορροπίας, εξίσωση (1-24), αντικαθίσταται από τη μεσημβρινή ανάλυση της ροής, χρησιμοποιώντας την επιλογή ταξινόμησης δακτυλίων. Εξετάζοντας τον υπολογισμό της τάσης ως τμήμα των υπολογισμών του σχεδίου, η επιρροή των απωλειών της ολικής πίεσης μπορεί να περιληφθεί στους υπολογισμούς του πεδίου ροής.



ΣΧΗΜΑ 2-1 Γεωμετρία συμπιεστή

Τα αποτελέσματα παρεμπόδισης του οριακού στρώματος τοίχου συμπεριλαμβάνονται χρησιμοποιώντας την ανάλυση του οριακού στρώματος. Εφ' όσον τα μοντέλα σχεδιασμού του συντελεστή απωλειών ισχύουν, αυτό παρέχει μια μάλλον ακριβής και πλήρη πρόβλεψη του πεδίου ροής κατά μήκος του συμπιεστή. Η σημαντικότερη προσέγγιση που απαιτείται είναι ότι τα αποτελέσματα της βελτίωσης της κυρτότητας πρέπει να παραμεληθούν για την ταξινόμηση του δακτυλίου. Αλλά μόλις ταξινομηθεί ο δακτύλιος, η διαδικασία σχεδιασμού μπορεί να επαναληφθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της σταθερής γεωμετρίας των ακριανών τοιχωμάτων της ανάλυσης της μεσημβρινής κίνησης για να επιτρέψει να περιληφθούν τα αποτελέσματα της κυρτότητας.

Η ανάπτυξη αυτού του τύπου συστήματος αεροδυναμικού σχεδίου συμπιεστών είναι πολύ απλούστερη από ότι μπορεί να εμφανιστεί. Το σύστημα σχεδιασμού που χρησιμοποιείται για να παραγάγει τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αργότερα σε αυτό το κεφάλαιο είναι ένα καλό παράδειγμα. Μάλλον εύκολα διατυπώθηκε άμεσα από την αεροδυναμική ανάλυση της απόδοσης. Όλα αυτά που απαιτήθηκαν ήταν απλοποίηση των μοντέλων απόδοσης των πτερυγίων και αναθεώρηση της λογικής της μεσημβρινής κίνησης για να περιλάβουν τις προδιαγραφές των βαθμίδων απόδοσης και τη λογική σχεδιασμού αεροτομών του 1^{ου} κεφαλαίου. Πράγματι, σχεδόν όλοι οι κώδικες υπολογιστών που απαιτήθηκαν για αυτό το σύστημα σχεδιασμού υπήρχαν ήδη στην αεροδυναμική ανάλυση της απόδοσης και το ιδανικό σύστημα αεροδυναμικού σχεδιασμού βαθμίδων.

2.2 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Οι προδιαγραφές αεροδυναμικής απόδοσης που χρησιμοποιούνται είναι παρόμοιες με εκείνους που υιοθετούνται στο 1^ο κεφάλαιο για το σχεδιασμό μιας βαθμίδας. Για κάθε βαθμίδα στο συμπιεστή, ο συντελεστής ροής, ο συντελεστής φόρτισης και η αντίδραση στη μέση επιφάνεια ρευμάτων θα δοθούν. Οι παράμετροι στη μέση ρευματική επιφάνεια θα καθοριστούν από έναν δείκτη, και οι δείκτες 1 μέχρι 3 θα υποδείξουν τους διαδοχικούς σταθμούς στη βαθμίδα από την είσοδο του ρότορα στην έξοδο του στάτη. Κατόπιν τα στοιχεία απόδοσης για τον αριθμό των βαθμίδων δίνονται από

$$f_{ci} = (C_{mci} / U_{ci})_i \quad (2-4)$$

$$y_{ci} = (H_{c2} - H_{c1}) / U_{c1}^2 = (r_{c2} C_{qc2} / r_{c1} - C_{qc1}) / U_{c1} \quad (2-5)$$

$$R_{ci} = 1 - (C_{qc1} + C_{qc2} r_{c2} / r_{c1}) / (2U_{c1}) \quad (2-6)$$

Οι ορισμοί του συντελεστή ροής και του συντελεστή φόρτισης είναι άμεσες γενικεύσεις των ορισμών που χρησιμοποιούνται στο 1^ο κεφάλαιο. Ο καθορισμός της αντίδρασης επιλέγεται για την ευκολία. Θα είναι η πραγματική βαθμίδα αντίδρασης μόνο στην περίπτωση μιας βαθμίδας επανάληψης με μια μέση ρευματική επιφάνεια σταθερής ακτίνας. Οι εκθέτες δινών, n_i και m_i , διευκρινίζονται επίσης για κάθε βαθμίδα. Κατόπιν η κατανομή της ταχύτητας στροβίλου στην είσοδο του ρότορα για οποιοδήποτε βαθμίδα δίνεται από

$$C_{q1} = U_{c1} \left[(1 - R_{c1}) (r_{c1} / r_1)^{n_1} - (y_{c1} / 2) (r_{c1} / r_1)^{m_1} \right] \quad (2-7)$$

Η κατανομή της ταχύτητας του στροβίλου στην έξοδο του ρότορα ή στην είσοδο του στάτη προκύπτει από την υπόθεση ότι η φόρτιση εισαγωγής είναι σταθερή από την πλήμνη στο κέλυφος. Από την εξίσωση (2-5) απαιτεί

$$C_{q2} = [r_1 C_{q1} + y_{c1} U_{c1} r_{c1}] / r_2 \quad (2-8)$$

Εάν υπάρχει μια άλλη βαθμίδα που ακολουθεί αυτό, η κατανομή της ταχύτητας του στροβίλου στην έξοδο του στάτη δίνεται από την εξίσωση (2-7), χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους απόδοσης για την επόμενη βαθμίδα, δηλ.,

$$C_{q3} = U_{c3} \left[(1 - R_{c,i+1}) (r_{c3} / r_3)^{n_{i+1}} - (y_{c,i+1} / 2) (r_{c3} / r_3)^{m_{i+1}} \right] \quad (2-9)$$

Για τον τελευταίο στάτη, μια ειδική προδιαγραφή απαιτείται. Η κατάλληλη επιλογή είναι να οριστεί ο λόγος της ταχύτητα του στροβίλου από την είσοδο στην έξοδο ως σταθερός για τον τελευταίο στάτη, δηλ.,

$$C_{q3} / C_{q2} = \text{σταθερο} \quad (2-10)$$

Η μεσημβρινή ταχύτητα στη μέση επιφάνεια ρευμάτων πρέπει επίσης να οριστεί ως σταθερά της ολοκλήρωσης για την κανονική εξίσωση ορμής. Οι προδιαγραφές που χρησιμοποιούνται είναι

$$C_{mc1} = U_{c1} f_{ci} \quad (2-11)$$

$$C_{mc3} = U_{c3} f_{c,i+1} \quad (2-12)$$

$$C_{mc2} = (C_{mc1} + C_{mc3}) / 2 \quad (2-13)$$

Εάν χρησιμοποιηθεί ένα πτερύγιο οδηγός εισόδου, οι όροι αποφόρτισης του είναι ίδιοι με τους όρους εισόδου για τον πρώτο ρότορα. Ομοίως, οι όροι εισόδου για ένα πτερύγιο οδηγό εξόδου είναι ίδιοι με τους όρους αποφόρτισης για τον τελευταίο στάτη. Στους σταθμούς πριν από το πτερύγιο οδηγό εισόδου και μετά από το πτερύγιο οδηγό εξόδου, η ταχύτητα του στροβίλου τίθεται μηδέν και υποτίθεται ότι η μεσημβρινή ταχύτητα είναι σταθερή κατά πλάτος της παρακείμενης σειράς πτερυγίων. Εάν πρόσθετοι σταθμοί υπολογισμού παρεμβάλλονται μεταξύ των σειρών πτερυγίων, η διατήρηση της γωνιακής ορμής παρέχει την απαραίτητη κατανομή ταχύτητας του στροβίλου από τον παρακείμενο σταθμό όπου το στοιχείο έχει οριστεί, και η μεσημβρινή ταχύτητα παίρνει την ίδια τιμή με εκείνη του παρακείμενου σταθμού. Μια χρήσιμη παραλλαγή στις ανωτέρω εξισώσεις είναι να αντικατασταθούν τα U_c και r_c στις εξισώσεις (2-7) μέχρι (2-12) από τις τιμές τους στην είσοδο στον πρώτο ρότορα. Αυτό το καθιστά συχνά ευκολότερο να επιλεγούν οι κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους απόδοσης με την αφαίρεση της επιρροής της άγνωστης διακύμανσης της ακτίνας της μέσης επιφάνειας ρευμάτων δια μέσου του συμπιεστή. Αυτό συμπεριλαμβάνεται εύκολα ως επιλογή στο αυτοματοποιημένο σύστημα σχεδιασμού.

Ως εκ τούτου για οποιαδήποτε υποτιθέμενη γεωμετρία των δακτυλίων και του στρώματος των ρευμάτων, η κανονική εξίσωση ορμής

$$W_m \frac{\partial W_m}{\partial y} + k_m W_m^2 \cos e - W_m \sin e \frac{\partial W_m}{\partial m} + \frac{W_q}{r} \frac{\partial(rC_q)}{\partial y} = \frac{\partial I}{\partial y} - T \frac{\partial s}{\partial y} \quad (2-14)$$

μπορεί να ενσωματωθεί εάν οι κατανομές της εντροπίας είναι γνωστές. Συνήθως οι όροι καμπυλότητας της επιφάνειας των ρευμάτων παραμελούνται κατά την

ταξινόμηση του δακτυλίου. Κατά συνέπεια η λύση σχεδιασμού των συμπιεστών είναι μια απλή πορεία της διαδικασίας όπου η λύση σε κάθε αξονικό σταθμό υπολογισμού ολοκληρώνεται πριν προχωρήσει στον επόμενο σταθμό. Οι κατανομές της εντροπίας υπολογίζονται ως τμήμα της λύσης με τον υπολογισμό των συντελεστών των ολικών απωλειών του σχεδίου. Όπως αναφέρεται, αυτό απαιτεί τη γνώση της τάσεις των σειρών των πτερυγίων, η οποία θα συζητηθεί στην επόμενη παράγραφο. Κατόπιν η περιοχή των δακτυλίων ρυθμίζεται όπως απαιτείται για να ισορροπήσει ο γνωστός λόγος της ροής μάζας. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το σχήμα του στρώματος των ρευμάτων αλλάζει συνεχώς. Οι εξισώσεις (2-7) μέχρι (2-13) εφαρμόζονται συνεχώς για να εισάγονται νεότερα στοιχεία της απόδοσης καθώς η γεωμετρία του στρώματος των ρευμάτων αλλάζει.

2.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Η βασική διαδικασία που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό των πτερυγίων έχει περιγραφεί στο 1^ο κεφάλαιο, παράγραφος 1.3. Μερικές δευτερεύουσες παραλλαγές σε εκείνη την διαδικασία είναι πίο κατάλληλες για το παρόν πρόβλημα σχεδιασμού. Οι ακόλουθες υποθέσεις και προδιαγραφές έχουν βρεθεί για να είναι αποτελεσματικές και σχετικά απλές να εφαρμοστούν:

- Οι βασικοί τύποι καμπυλότητας και σχεδιαγράμματος αεροτομών προσδιορίζονται.
- Αν είναι απαραίτητο, διευκρινίστε τη θέση του σημείου του μέγιστου κυρτώματος, a/c .
- Διευκρινίστε τον λόγο της χορδής στο κέλυφος στην τιμή του στην πλήμνη και απαιτήστε μια γραμμική διακύμανση από την πλήμνη στο κέλυφος.
- Διευκρινίστε τον λόγο πάχος-χορδής στην πλήμνη και το κέλυφος και απαιτήστε μια γραμμική διακύμανση από την πλήμνη στο κέλυφος.
- Διευκρινίστε την τάση στη μέση επιφάνεια ρευμάτων.
- Διευκρινίστε το μέρος του αξονικού διαστήματος μεταξύ των σταθμών υπολογισμού, F_g , το οποίο έχει διατηρηθεί για το αξονικό χάσμα, g , μεταξύ των σειρών των πτερυγίων.
- Διευκρινίστε τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής γωνίας πρόσπτωσης και της γωνίας πρόσπτωσης σχεδιασμού, $(i - i^*)$, στην πλήμνη και το κέλυφος και απαιτήστε μια γραμμική διακύμανση από την πλήμνη στο κέλυφος.
- Διευκρινίστε την ανοχή των ακρών των πτερυγίων ως μέρος της ακτίνας του κελύφους της πρώτης σειράς του ρότορα.

Η διαδικασία σχεδιασμού πτερυγίων είναι ουσιαστικά η ίδια με αυτήν που περιγράφεται στο 1^ο κεφάλαιο, παράγραφος 1.3. Η σημαντικότερη διαφορά είναι ότι τα πτερύγια πρέπει να παρεμβληθούν μέσα σε μια προκαθορισμένη αξονική απόσταση, δεδομένου ότι οι συντεταγμένες για έναν από τα ακριανά τοιχώματα έχουν διευκρινιστεί. Εδώ είναι απαραίτητο να επιλεχτεί ο αριθμός των πτερυγίων στη σειρά των πτερυγίων και οι χορδές έτσι ώστε το επιθυμητό αξονικό χάσμα να διατηρείται μεταξύ των σειρών των πτερυγίων. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2-2, η χορδή στην πλήμνη, που προϋποθέτει το ορισμένο αξονικό χάσμα, είναι

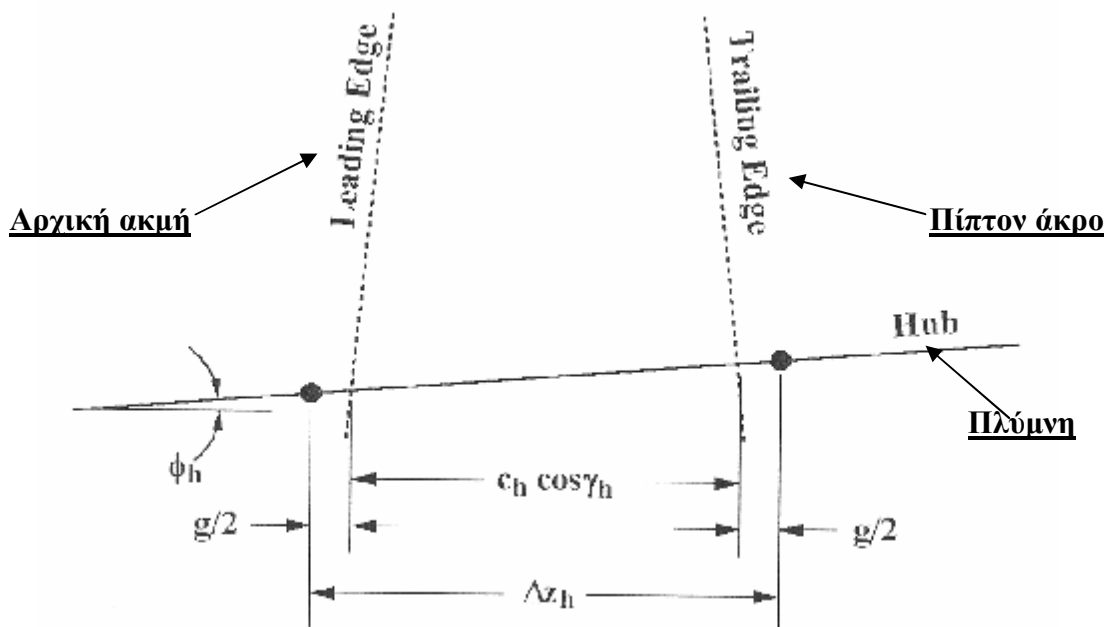
$$c_h = \Delta z_h (1 - F_g) / \cos g_h \quad (2-14)$$

Ένας παρόμοιος υπολογισμός για το περίγραμμα του κελύφους αποδίδει

$$c_z = \Delta z_s (1 - F_g) \cos g_s \quad (2-15)$$

Αλλά αυτές οι δύο τιμές περιορίζονται επίσης από τον ορισμένο λόγο κελύφους πλήμνης, $F_{sh} = c_s/c_h$. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει ποια εκ των δύο προηγούμενων εξισώσεων διευκρινίζει μια χορδή απαραίτητη για να επιτευχθεί το αξονικό χάσμα. Κατόπιν η άλλη χορδή υπολογίζεται από το F_{sh} . Μόλις είναι γνωστή η σωστή χορδή στην πλήμνη, η χορδή σε οποιαδήποτε ακτίνα δίνεται από

$$c = c_h [1 + (r - r_h)(F_{sh} - 1)/(r_s - r_h)] \quad (2-16)$$



ΣΧΗΜΑ 2-2 Αξονικό χάσμα της σειράς του πτερυγίου

Εάν Z είναι ο αριθμός των πτερυγίων στη σειρά των πτερυγίων, η τάση δίνεται από τη σχέση

$$s = [c_h Z / (2pr)] \cdot [1 + (r - r_h)(F_{sh} - 1)/(r_s - r_h)] \quad (2-17)$$

Λύνοντας την εξίσωση (2-17) στη μέση επιφάνεια ροής, και τυποποιώντας τη με τα αποτελέσματα, προκύπτει

$$s = s_c \frac{\bar{r}[1 + (r - r_h)(F_{sh} - 1)/(r_s - r_h)]}{r[1 + (\bar{r} - r_h)(F_{sh} - 1)/(r_s - r_h)]} \quad (2-18)$$

Ως εκ τούτου η τάση σε οποιαδήποτε ακτίνα μπορεί να υπολογιστεί από την ορισμένη τάση στη μέση επιφάνεια ρευμάτων προτού να σχεδιαστούν τα πτερύγια. Δεδομένου ότι αυτή είναι η μόνη γεωμετρική παράμετρος των πτερυγίων που απαιτείται για να υπολογίσει ο συντελεστής απωλειών του σχεδίου, η ανάλυση του πεδίου ροής του σχεδίου μπορεί να διεξαχθεί πριν από το σχεδιασμό των πτερυγίων. Κατόπιν οι ακριβείς χορδές και ο αριθμός των λεπίδων μπορούν να επιλεγούν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2-11) μέχρι (2-14) και τη γνωστή τάση στη μέση επιφάνεια ρευμάτων. Οι μεγαλύτερες χορδές και ο μικρότερος αριθμός των λεπίδων που επιτρέπονται από το ορισμένο αξονικό χάσμα επιλέγονται.

Εάν οι απώλειες ανοχής των ακρών συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση, υπάρχει μια αδύνατη εξάρτηση στη χορδή και στη γωνία προπορείας, όπως παρατηρείται από την εξίσωση

$$\Delta P = t / (Z r_{ip} d_c c \cos g) \quad (2-19)$$

Η ανάλυση του οριακού στρώματος του ακραίου τοιχώματος εξαρτάται επίσης από τη γωνία προπορείας, όπως παρατηρείται από τις εξισώσεις

$$n_0 = \frac{(0.12g + d_c / 2)(8\bar{q}_{11} / g)^3}{1 + (8\bar{q}_{11} / g)^3} \quad (2-20)$$

και

$$F = \frac{1}{2} \frac{(8\bar{q}_{11} / g)^3}{1 + (8\bar{q}_{11} / g)^3} \quad (2-21)$$

Ως εκ τούτου, οι αρχικές υποθέσεις γίνονται για τον αριθμό των λεπίδων και της χορδής στη μέση επιφάνεια ρευμάτων που θα παράγει την επιθυμητή τάση. Η γωνία προπορείας στα περιγράμματα του ακριανού τοιχώματος προσεγγίζεται από τις τοπικές γωνίες ροής έως ότου ολοκληρώνεται ο πρώτος σχεδιασμός των

περυγίων. Η ανάλυση ροής και ο σχεδιασμός των λεπίδων επαναλαμβάνονται έως ότου επιτυγχάνεται η σύγκλιση στη χορδή (ή τον αριθμό των περυγίων). Μια επανάληψη είναι σχεδόν πάντα επαρκής. Τουλάχιστον μια επανάληψη είναι απαραίτητη για να εξουδετερωθεί επαρκώς η επίδραση της γωνίας προπορείας στα οριακά στρώματα του ακριανού τοιχώματος.

Μια άλλη δευτερεύουσα διαφορά σχετική με τη διαδικασία του 1^{ου} κεφαλαίου είναι ότι οι επιφάνειες ρευμάτων δεν είναι κανονικά κυλινδρικές επιφάνειες. Η γεωμετρία των περυγίων που χρησιμοποιείται στην ανάλυση του πεδίου ροής πρέπει να ρυθμιστεί για βελτιστοποίηση της κλίσης, χρησιμοποιώντας τη γωνία, ϕ , που παρουσιάζεται στο σχήμα 2-2 για το περίγραμμα πλημνών. Οι απαραίτητες διορθώσεις έχουν παρουσιαστεί στις εξισώσεις

$$\tan f = \frac{r_2 - r_1}{z_2 - z_1} \quad (2-22)$$

$$c \rightarrow c / \cos f \quad (2-23)$$

$$t_b / c \rightarrow \cos f t_b / c \quad (2-24)$$

$$\tan k_1 \rightarrow \cos f \tan k_1 \quad (2-25)$$

$$\tan k_2 \rightarrow \cos f \tan k_2 \quad (2-26)$$

$$s = p(r_1 + r_2) / Z \quad (2-27)$$

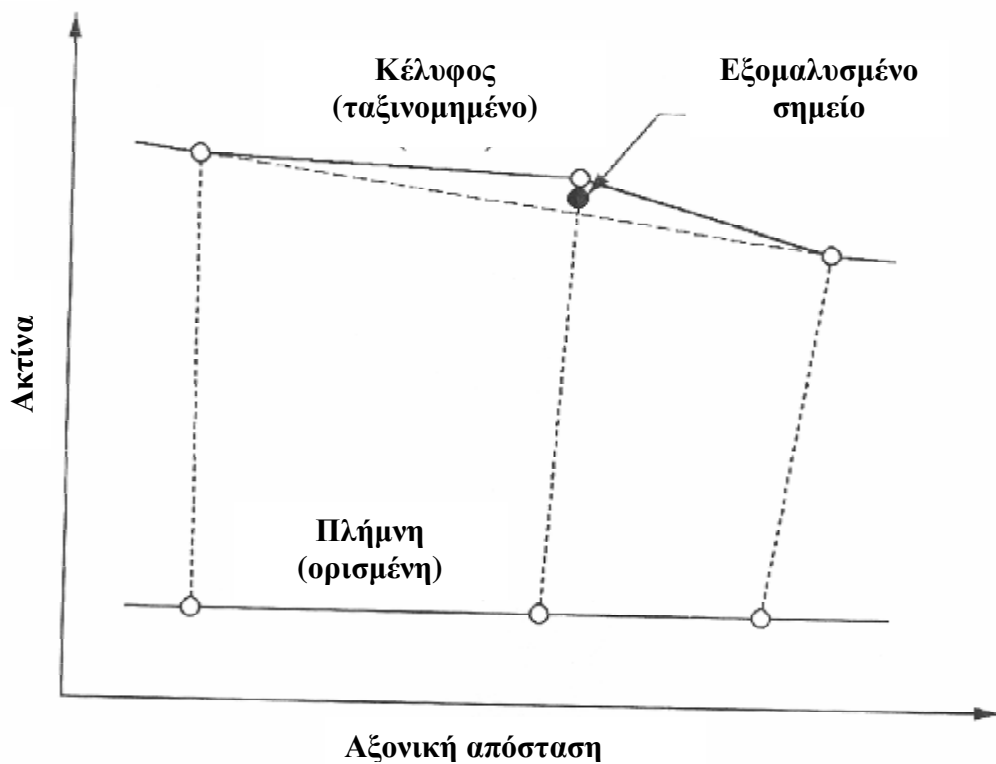
2.4 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ

Γενικά, ο σχεδιασμός ενός συμπιεστή αξονικής ροής που ολοκληρώνεται από τις διαδικασίες που περιγράφονται ανωτέρω θα αποδείξει μια μικρή απογοήτευση όταν αναλύεται στην ανάλυση απόδοσης. Ακόμα και όταν άμεσα προερχόμενη από την ανάλυση απόδοσης, αυτή η διαδικασία σχεδιασμού δεν οδηγεί κανονικά σε ένα σχέδιο που επιβεβαιώνεται απλά από αυτό. Από τις εργασίες ανάλυσης απόδοσης με τα ορισμένα περιγράμματα, μπορεί άμεσα να υπολογίσει τις κλίσεις και τις κυρτότητες της επιφάνειας ρευμάτων. Σε αντίθεση, η διαδικασία σχεδιασμού που περιγράφεται ανωτέρω έχει μόνο μια ανεπεξέργαστη εκτίμηση του μεγέθους της κλίσης του περιγράμματος και αγνοεί τα αποτελέσματα της κυρτότητας εξ ολοκλήρου. Υπάρχουν διάφορα απλά βήματα που μπορούν να ενσωματωθούν στη διαδικασία σχεδιασμού για να ελαχιστοποιήσουν τις διαφορές που παρατηρούνται όταν μια ανάλυση απόδοσης διεξάγεται στο σχέδιο που προκύπτει.

Κατ' αρχάς, είναι πολύ απλό να περιλάβει την ικανότητα να επαναληφθεί το σχέδιο χρησιμοποιώντας το μέγεθος του περιγράμματος στην προηγούμενη προσπάθεια ως βάση για τον υπολογισμό της κλίσεως του περιγράμματος. Αυτό μπορεί να επαναληφθεί έως ότου οι κλίσεις του περιγράμματος δεν παρουσιάζουν πλέον σημαντική αλλαγή μεταξύ των διαδοχικών προσπαθειών. Όταν αυτό επιτευχθεί, είναι πολύ χρήσιμο να είναι σε θέση να ξανασχεδιάσει τον συμπίεστη με το προκύπτον μέγεθος περίγραμμα να χρησιμοποιείται άμεσα, αντί της ταξινόμησης του δακτυλίου. Αυτό θα επιτρέψει επίσης το συνυπολογισμό των αποτελεσμάτων της καμπυλότητας στην επιφάνεια των ρευμάτων, όσο ακόμη παράγεται ένα πεδίο ροής σύμφωνα με τις επιθυμητές παραμέτρους απόδοσης και η γεωμετρία των πτερυγίων σύμφωνα με εκείνο το πεδίο ροής. Είναι επίσης χρήσιμο να περιοριστεί η διαδικασία ταξινόμησης του δακτυλίου για να απαγορεύσει μια αύξηση στην περιοχή δακτυλίων στην κατεύθυνση ροής. Όταν απαιτείται μια αύξηση της μεταβατικής περιοχής, η περιοχή δακτυλίων μπορεί να καθορίσει την τιμή στον ανάντη σταθμό και τη διατήρηση της μάζας που χρησιμοποιείται για να αγνοήσει τον προσδιορισμό της τοπικής μεσημβρινής ταχύτητας.

Η επίλυση των ασταθειών με την ανάλυση της απόδοσης δεν είναι συνήθως εντελώς ικανοποιητική. Όταν ένα περίγραμμα του ακριανού τοιχώματος υπολογίζεται από τη διαδικασία ταξινόμησης των δακτυλίων, το περίγραμμα που προκύπτει είναι πιθανό να μην είναι ρεαλιστικό, συχνά με συνέπεια τις ακανόνιστες διακυμάνσεις στις συντεταγμένες, τις κλίσεις και τις καμπυλότητες. Ο καθαρισμός των αδιάστατων παραμέτρων απόδοσης μπορεί να μειώσει αυτήν την ακανόνιστη συμπεριφορά. Αλλά αυτή είναι μια μάλλον κουραστική διαδικασία, και περιλαμβάνει αλλαγές στις παραμέτρους απόδοσης που είναι πραγματικά φυσικά ασημαντες. Είναι αποτελεσματικότερο να περιλάβει τις διαδικασίες για να επιτρέψει την εξομάλυνση και την έκδοση των συντεταγμένων του περιγράμματος. Κατόπιν η διαδικασία σχεδιασμού μπορεί πάλι να επαναληφθεί με το αναθεωρημένο περίγραμμα για να παραγάγει την επιθυμητή απόδοση. Η απλή διαδικασία εξομάλυνσης που έχει βρεθεί αποτελεσματική απεικονίζεται στο σχήμα 2-3. Σε αυτήν την περίπτωση, το κέλυφος έχει ταξινομηθεί με κάπως ακανόνιστα αποτελέσματα.

Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται είναι η απόδοση μιας απλής γραμμικής παρεμβολής μεταξύ των παρακείμενων αξονικών σταθμών υπολογισμού για να καθορίσει μια εναλλακτική ακτίνα στον μερικός-ομαλά ενδιαφέροντος. Κατόπιν ένα εξομαλυσμένο σημείο ορίζεται ως ένας μέσος όρος των πραγματικών και παρεμβαλλόμενων σημείων. Τα εξομαλυσμένα σημεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για όλα τα εσωτερικά μερικός-κανονικά. Εναλλακτικά, η εξομάλυνση μπορεί να παραλειφθεί σε ορισμένα μερικός-κανονικά, χαρακτηριστικά είτε τα μερικός-κανονικά στην είσοδο του ρότορα είτε στην αποφόρτιση του ρότορα. Αυτό μπορεί να είναι εφικτό για να διατηρηθούν τα βασικά στοιχεία της διαδικασίας ταξινόμησης. Είναι καλύτερο να εφαρμοστεί αυτό το περίγραμμα εξομάλυνσης ως μια διαλογική διαδικασία



ΣΧΗΜΑ 2-3 Εξομάλυνση περιγράμματος

όπου το εξομαλυσμένο περίγραμμα παρουσιάζεται γραφικά, με τα αρχικά σημεία περιγράμματος στο φόντο. Κατόπιν ο σχεδιαστής μπορεί να δοκιμάσει εναλλακτικές στρατηγικές εξομάλυνσης για να επιλέξει την πιο ελπιδοφόρα μέθοδο. Αυτό μπορεί επίσης να περιλάβει τον όρο να επεξεργαστούν άμεσα μερικές συντεταγμένες που δεν αποκρίνονται επαρκώς στις διαδικασίες εξομάλυνσης μόνο. Αυτό είναι αρκετά κοινό για τα μερικώς-κανονικά ανάντη του πρώτου ρότορα και κατόπιν του τελευταίου στάτη. Οι ίδιες διαδικασίες εξομάλυνσης του περιγράμματος μπορούν να είναι πολύ χρήσιμες στην ανάλυση απόδοσης, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται η διαδικασία ταξινόμησης των δακτυλίων. Πράγματι, αυτές οι διαδικασίες εξομάλυνσης χρησιμοποιήθηκαν για τα σχέδια των δύο τυποποιημένων βαθμίδων επανάληψης συμπιεστών που περιγράφηκαν στην παράγραφο 1.11

Εάν εφαρμόζονται κατάλληλα, όλες αυτές οι διαδικασίες για τη βελτίωση του σχεδίου μπορούν να υιοθετηθούν με πολύ μικρή προσπάθεια εκ μέρους του σχεδιαστή. Εάν δεν ολοκληρώνονται εδώ, θα πρέπει σχεδόν σίγουρα να ολοκληρωθούν χειροκίνητα στην ανάλυση απόδοσης. Αυτό προϋποθέτει πολύ περισσότερη προσπάθεια, ιδιαίτερα δεδομένου ότι τα σχέδια των πτερυγίων θα απαιτήσουν τροποποίηση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και οι επιθυμητές παράμετροι απόδοσης θα συμβιβαστούν. Με την ενσωμάτωσή τους στο αεροδυναμικό σύστημα σχεδιασμού συμπιεστών, οι στόχοι απόδοσης και το

σχέδιο των πτερυγίων αντιμετωπίζονται αυτόματα. Αυτό οδηγεί σε μια δραματική μείωση του ακριβούς καθορισμού του σχεδίου χρησιμοποιώντας την ανάλυση απόδοσης.

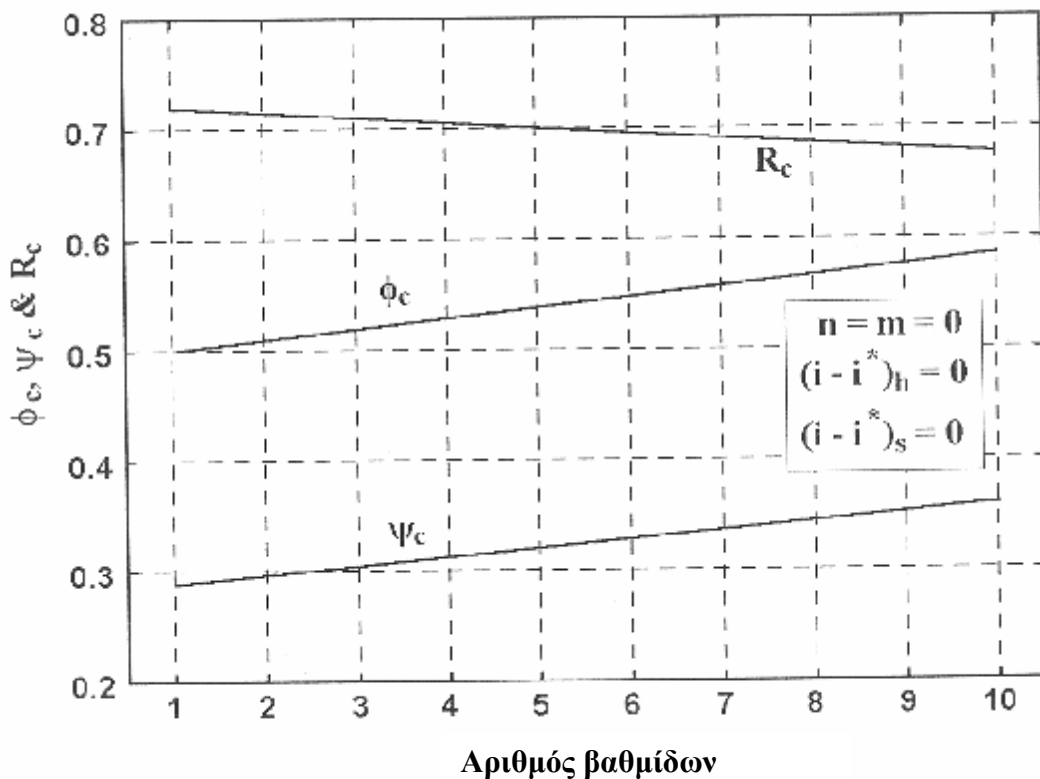
2.5 ΕΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

Η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας αεροδυναμικού σχεδιασμού συμπίεστη αξονικής ροής θα διευκρινιστεί με την ανάπτυξη των διάφορων εναλλακτικών σχεδίων για το δεύτερο συμπίεστη δέκα-βαθμίδων που σχεδιάζεται στο 1^ο κεφάλαιο χρησιμοποιώντας μια τυποποιημένη βαθμίδα επανάληψης. Οι διαδικασίες σε αυτό το κεφάλαιο θα υιοθετηθούν για να σχεδιάσουν τα περιγράμματα του ακριανού τοιχώματος και τη γεωμετρία των 22 σειρών πτερυγίων που απαιτούνται. Θα χρησιμοποιηθεί ο NACA 63-σειρών οδηγών πτερυγίων ενώ τα πτερύγια 65-σειρών NACA θα χρησιμοποιηθούν για όλες τις άλλες σειρές πτερυγίων. Όλα τα σχέδια θα περιορίσουν το ακροπτερύγιο του ρότορα ανάλογα με τους αριθμούς Mach σε μια μέγιστη τιμή 0.8. Όλα τα σχέδια συμπίεστων θα ταξινομηθούν στις συγκεκριμένες παραμέτρους απόδοσης με μια σταθερή ακτίνα περιγράμματος πλήμνης. Τα περιγράμματα κελύφους θα εξομαλυνθούν και θα καθαριστούν όπως περιγράφονται στην προηγούμενη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου.

Το πρώτο παράδειγμα ορίστηκε ως συμπίεστης Α. Είναι βασισμένο στις παραμέτρους βαθμίδων απόδοσης παρόμοιες με εκείνους που επιτυγχάνονται στο 1^ο κεφάλαιο με την τυποποιημένη βαθμίδα επανάληψης. Το σχήμα 2-4 παρουσιάζει τη βαθμίδα μέσης επιφάνειας ρευμάτων των παραμέτρων απόδοσης που διευκρινίζονται. Χρησιμοποιήθηκε μια απλή γραμμική αυξομείωση με τον αριθμό βαθμίδων, όπου τα στοιχεία για την πρώτη και τελευταία βαθμίδα λήφθηκαν από την ανάλυση απόδοσης συμπίεστων των τυποποιημένων-βαθμίδων που παρουσιάστηκε στο σχήμα 1-38. Κατόπιν ο συντελεστής φόρτισης για την τελευταία βαθμίδα ρυθμίστηκε με δοκιμή και σφάλμα για να παράγει κατά προσέγγιση σταθερό-κύρτωμα, ανεστραμμένων πτερυγίων στάτη σε όλο το συμπίεστη. Μετά από τη ταξινόμηση του δακτυλίου, το περίγραμμα του κελύφους εξομαλύνθηκε δύο φορές, κάθε φορά κρατώντας τις ακτίνες του κελύφους στην είσοδο του ρότορα σταθερές. Το σχήμα 2-5 δείχνει τα περιγράμματα του ακριανού τοιχώματος που λαμβάνονται από αυτή τη διαδικασία. Κατόπιν το πεδίο ροής προβλέφθηκε για αυτά τα περιγράμματα του ακριανού τοιχώματος χρησιμοποιώντας το κατά προσέγγιση μοντέλο κανονικής ισορροπίας για την ανάλυση της μεσημβρινή κίνησης για να λάβει τα τελικά σχέδια των σειρών πτερυγίων. Όλα τα πτερύγια σχεδιάστηκαν για να λειτουργήσουν στις γωνίες πρόσπτωσης σχεδιασμού, ταιριάζοντας με το προβλεπόμενο πεδίο ροής. Το αυτοματοποιημένο σύστημα σχεδιασμού

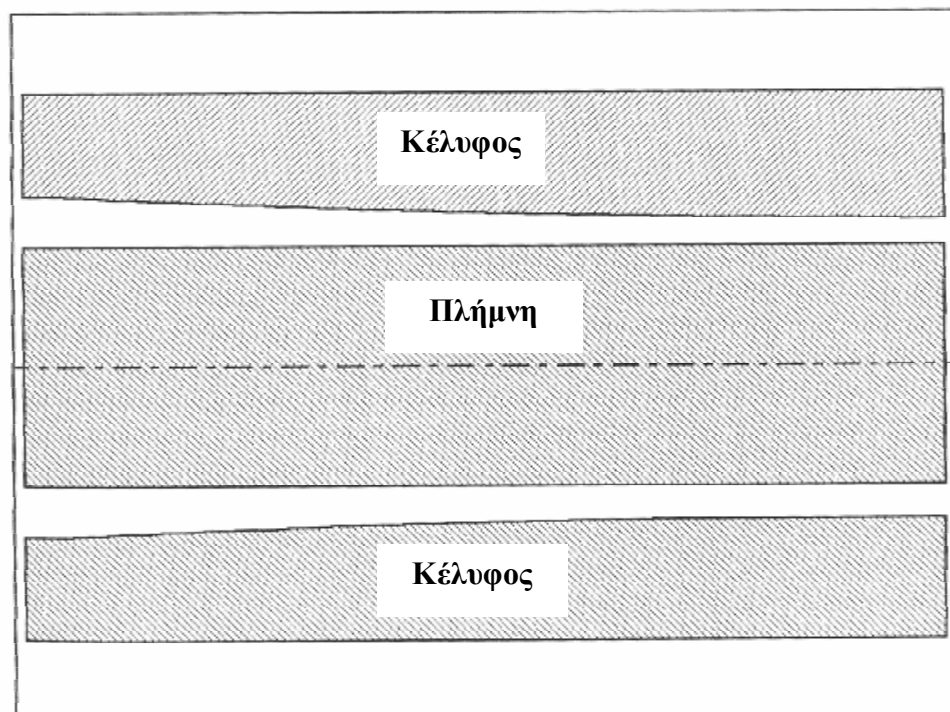
χρησιμοποιούμενο το κάνει αυτό μια μάλλον απλή διαδικασία. Μόλις οι αρχικές προδιαγραφές σχεδιασμού εισήχθησαν, ολόκληρη η διαδικασία σχεδιασμού για το συμπιεστή Α ολοκληρώθηκε σύντομα.

Κατόπιν ο συμπιεστής Α αναλύθηκε χρησιμοποιώντας τις μεθόδους πρόβλεψης της απόδοσης. Σύμφωνα με την μέθοδο αεροδυναμικού σχεδιασμού, το κατά προσέγγιση μοντέλο κανονικής ισορροπίας χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της απόδοσης. Η προβλεπόμενη διαφορά μεταξύ των γωνιών πρόσπτωσης και των γωνιών πρόσπτωσης σχεδιασμού στα περιγράμματα πλήμνης και κελύφους παρουσιάζονται στο σχήμα 2-6. Η ανάλυση της απόδοσης προμηθεύει με γωνίες πρόσπτωσης στρογγυλοποιημένες μακριά από το κοντινότερο 0.1° . Ως εκ τούτου, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η απόκλιση από την επιδιωκόμενη αντιστοιχία της γωνίας πρόσπτωσης ήταν λιγότερο από 0.15° σε όλες τις περιπτώσεις. Η σύγκριση της επιδιωκόμενης αντιστοιχίας της γωνίας επίπτωσης με τις προδιαγραφές σχεδιασμού είναι ο καλύτερος τρόπος να επικυρωθεί το σύστημα αεροδυναμικού σχεδιασμού. Ακόμη και οι δευτερεύουσες διαφορές μεταξύ του συστήματος σχεδιασμού και της ανάλυσης της απόδοσης θα παραγάγουν σημαντικές διαφορές στις γωνίες πρόσπτωσης που πέφτουν απότομα στις μάλλον μεγάλες τιμές στις πίσω βαθμίδες ενός πολυβάθμιου συμπιεστή. Τα αποτελέσματα στο σχήμα 11-6 είναι αρκετά χαρακτηριστικά για το τι μπορεί να επιτευχθεί από ένα κατάλληλα διατυπωμένο σύστημα αεροδυναμικού σχεδιασμού.

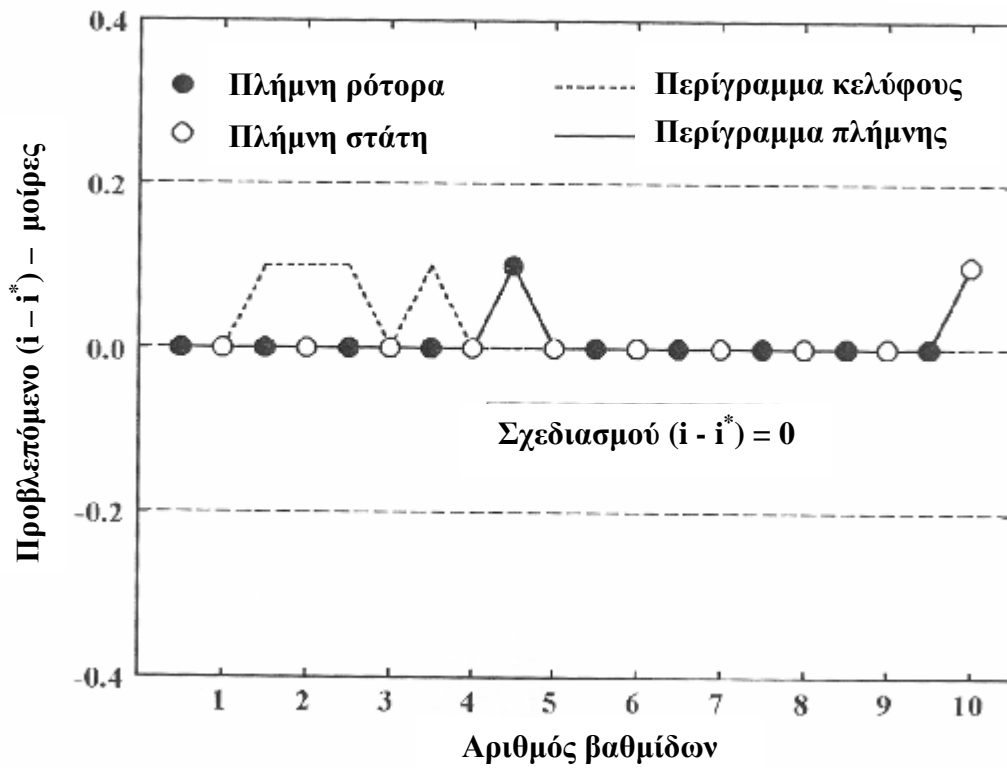


ΣΧΗΜΑ 2-4 Στοιχεία σχεδιασμού της βαθμίδας για τον συμπιεστή Α

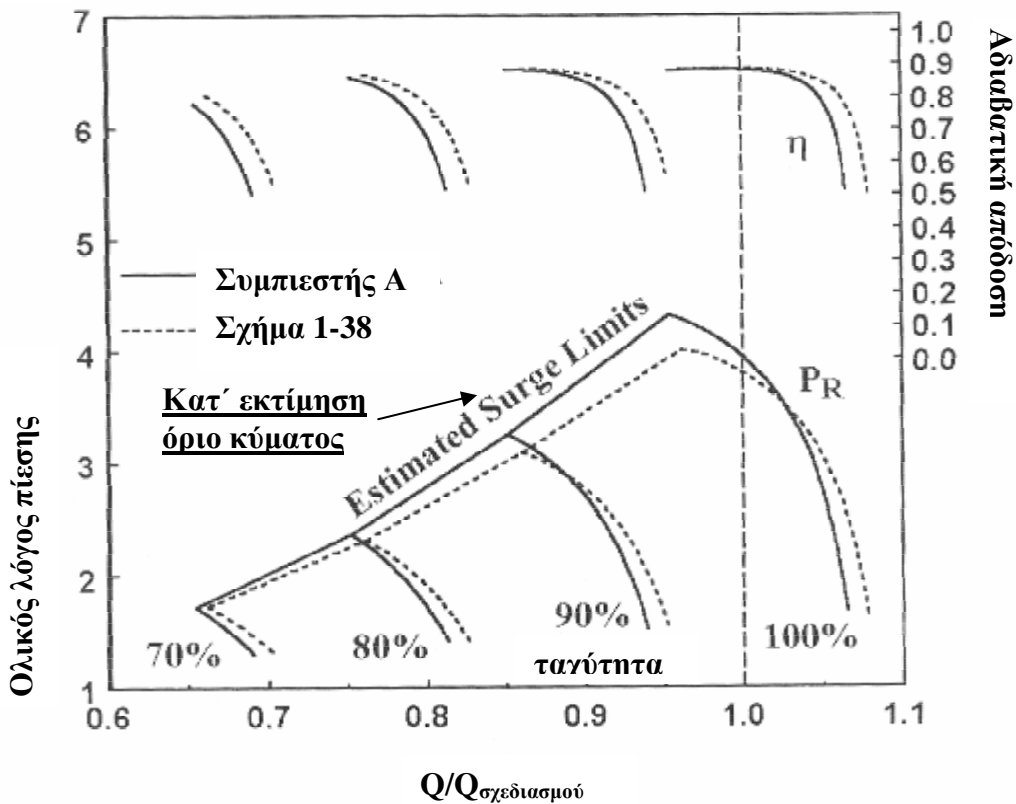
Το σχήμα 2-7 παρουσιάζει προβλεπόμενο χάρτη απόδοσης για το συμπιεστή Α, μαζί με τα αποτελέσματα από το σχήμα 1-38 για την τυποποιημένη-βαθμίδα σχεδιασμού. Τα δύο σχέδια είναι αρκετά παρόμοια. Το παρόν σχέδιο επιτυγχάνει ένα μεγαλύτερο λόγο πίεσης και ένα βελτιωμένο όριο κύματος στην ταχύτητα σχεδιασμού, αλλά εις βάρος μιας μειωμένης της μέγιστης ικανότητας ροής. Η προσεκτική αναθεώρηση της ανάλυσης απόδοσης της τυποποιημένης βαθμίδας του συμπιεστή έδειξε ότι οι βαθμίδες εμφανίζουν τις ελαφρώς θετικές τιμές ($i - i^*$) στις μπροστινές βαθμίδες, εκτιμώντας ότι η σχεδόν ιδανική ταύτιση που παρουσιάζεται στο σχήμα 2-6 επιτεύχθηκε για το συμπιεστή Α. Ως εκ τούτου οι διαφορές στην απόδοση δεν είναι απροσδόκητες ούτε είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Ένα δευτερεύον ξαναταίριασμα των βαθμίδων σε καθένα από αυτά τα σχέδια θα μπορούσε εύκολα να οδηγήσει σε απόδοση σχεδόν ίδια με αυτήν του άλλου σχεδίου. Σαφώς, το σημαντικό πλεονέκτημα του κόστους που προσφέρεται από την τυποποιημένη βαθμίδα επανάληψης του συμπιεστή με το σταθερό κύρωμά του, το μη συστραμένο πτερύγιο του στάτη επιτυγχάνεται με λίγο συμβιβασμό. Η σχεδόν ιδανική βαθμίδα που ταιριάζει με την απολύτως αυθαίρετη γεωμετρία των πτερυγίων χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό του συμπιεστή Α χωρίς να οδηγεί σε καμία σημαντική βελτίωση της απόδοσης. Σε αυτό το συγκεκριμένο παράδειγμα, το σημαντικότερο όφελος που λαμβάνεται από το παρόν σύστημα αεροδυναμικού σχεδιασμού είναι ότι ο σχεδιασμός του συμπιεστή Α ήταν πολύ ευκολότερος να ολοκληρωθεί αντί του σχεδιασμού της τυποποιημένης βαθμίδας επανάληψης του συμπιεστή.



ΣΧΗΜΑ 2-5 Περιγράμματα ακριανού τοιχώματος συμπιεστή Α

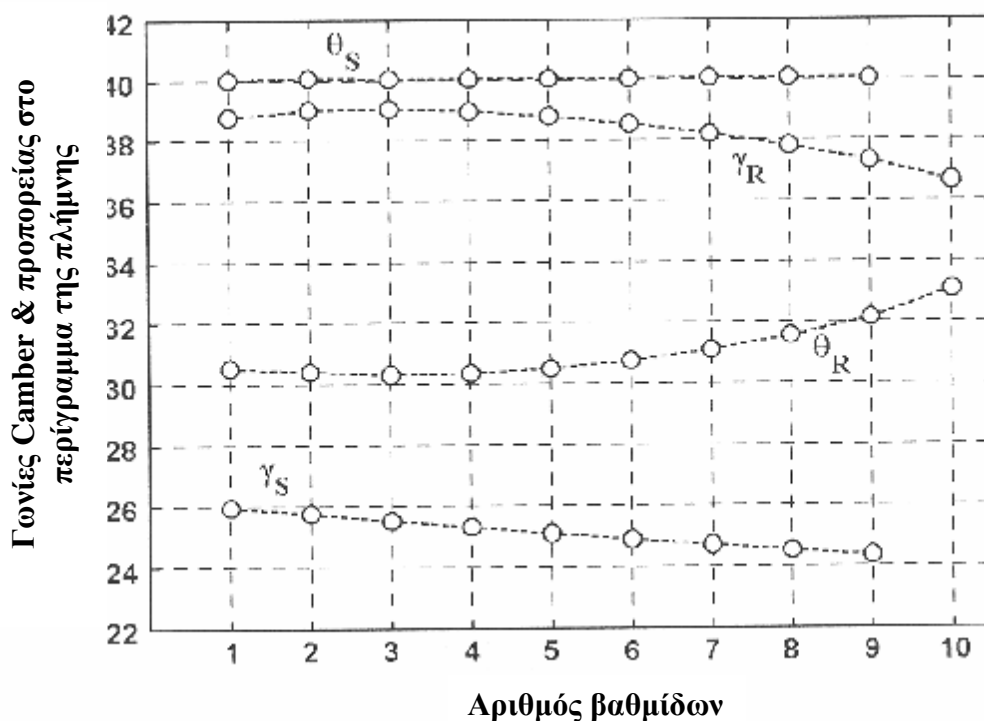


ΣΧΗΜΑ 2-6 Προβλεπόμενη γωνία πρόσπτωσης



ΣΧΗΜΑ 2-7 Απόδοση του συμπιεστή Α

Δεν πρέπει να συναχθεί το συμπέρασμα ότι αυτή η γενικότερη διαδικασία αεροδυναμικού σχεδιασμού δεν προσφέρει τη δυνατότητα για βελτιωμένη απόδοση πέρα από ένα τυποποιημένο σχέδιο βαθμίδας συμπιεστή. Δεδομένου ότι το σχέδιο του συμπιεστή A είναι βασισμένο στις προδιαγραφές που λαμβάνονται από την ανάλυση της απόδοσης μιας βαθμίδας επανάληψης συμπιεστή, κάποια ομοιότητα σε μια βαθμίδα επανάληψης συμπιεστή πρέπει να αναμένεται. Το σχήμα 2-8 παρουσιάζει τη βασική γεωμετρία των πτερυγίων στο περίγραμμα της πλήμνης, όπου η ακτίνα είναι σταθερή. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το σχέδιο προσεγγίζει τη διαμόρφωση μιας βαθμίδας επανάληψης. Η γεωμετρία για τον τελευταίο στάτη έχει παραλειφθεί, δεδομένου ότι είναι μάλλον αυθαίρετο, να εξαρτηθεί άμεσα από την προδιαγραφή για το πώς η αφαίρεση του στροβίλου από τον τελευταίο ρότορα πρόκειται να χωριστεί μεταξύ του τελευταίου στάτη και του οδηγού εξόδου των πτερυγίων της φτερωτής. Αν και μη προφανής από το σχήμα 2-8, απλά δηλώνεται ότι ένα τυποποιημένο σταθερό κύρτωμα, το ανεστραμμένο πτερύγιο θα μπορούσε εύκολα να αντικαταστήσει τα πτερύγια στατών που σχεδιάστηκαν για το συμπιεστή A, αλλά με γωνίες προπορείας που ποικίλλουν δια μέσου της μηχανής. Εντούτοις, η γεωμετρία των πτερυγίων του ρότορα ποικίλλει πάρα πολύ δια μέσου της μηχανής για να επιτρέψει την αντικατάσταση ενός τυποποιημένου πτερυγίου ρότορα. Ως εκ τούτου το σχέδιο του συμπιεστή A περιορίστηκε πραγματικά για να προσεγγιστεί ο σχεδιασμός βαθμίδας επανάληψης του 1^{ου} κεφαλαίου. Αν και η γεωμετρία των πτερυγίων δεν περιορίστηκε, αυτή η προστιθέμενη ευελιξία δεν χρησιμοποιήθηκε σαν μεγάλο πλεονέκτημα.



ΣΧΗΜΑ 2-8 Γεωμετρία του περιγράμματος της πλήμνης του πτερυγίου

2.6 Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Η αποτελεσματικότερη χρήση της διαδικασίας γενικής αεροδυναμικής σχεδίασης είναι δυνατή εφαρμόζοντας απλά μια κατανομή των παραμέτρων της βαθμίδας απόδοσης δια μέσου του συμπιεστή. Η διακύμανση στις παραμέτρους της βαθμίδας απόδοσης που παρουσιάζεται στο σχήμα 2-4 για το συμπιεστή A είναι κάπως παραπλανητική, δεδομένου ότι πραγματικά διορθώνει μόνο τις παραμέτρους της βαθμίδας απόδοσης για την διακύμανση στη ακτίνα της μέσης επιφάνειας ρευμάτων. Ένα σχέδιο συμπιεστών καθιερώνει την κατανομή στην περιοχή των δακτυλίων και τη γεωμετρία των πτερυγίων κατάλληλα για την γωνιακή ταχύτητα σχεδιασμού. Όταν ο συμπιεστής λειτουργεί με ταχύτητες μικρότερες από την ταχύτητα σχεδιασμού, η φόρτιση ανά βαθμίδα μειώνεται, έτσι ώστε η αύξηση στην πυκνότητα του αερίου να μην είναι πλέον επαρκής για να παραμείνουν οι βαθμίδες αντιστοιχισμένες. Οι οπίσθιες βαθμίδες θα λειτουργούν για συντελεστές ροής υψηλότερους από ότι οι τιμές τους στον σχεδιασμό, με μια αντίστοιχη μείωση στην φόρτιση ανά βαθμίδα. Οι μπροστινές βαθμίδες θα έχουν την υψηλότερη φόρτιση ανά βαθμίδα και θα είναι οι πρώτες βαθμίδες σε απώλεια στήριξης. Οι οπίσθιες βαθμίδες συνεισφέρουν την λιγότερη φόρτιση και περιορίζουν την ικανότητα ροής του συμπιεστή. Όταν ο συμπιεστής λειτουργεί σε ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα σχεδιασμού, θα εμφανιστεί αντίθετη ροπή. Οι μπροστινές βαθμίδες παράγουν περισσότερη φόρτιση και μια μεγαλύτερη αύξηση στην πυκνότητα του αερίου από ότι επιδιώκεται. Οι κατάντη βαθμίδες τείνουν να λειτουργούν για συντελεστές ροής μικρότερους από ότι οι τιμές σχεδιασμού τους, με μια αντίστοιχη αύξηση στο συντελεστή φόρτισης. Γενικά, οι οπίσθιες βαθμίδες έχουν την υψηλότερη φόρτιση ανά βαθμίδα και θα είναι οι πρώτες βαθμίδες σε απώλεια στήριξης. Οι μπροστινές βαθμίδες συνεισφέρουν τη λιγότερη φόρτιση εισαγωγής και περιορίζουν την ικανότητα ροής του συμπιεστή. Στην πραγματικότητα, η κατανομή της περιοχής των δακτυλίων είναι πάρα πολύ μικρή για να λειτουργεί σε χαμηλές ταχύτητες και πάρα πολύ μεγάλη για να λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες.

Έπεται ότι οι βαθμίδες που επηρεάζονται ελάχιστα από τις διακυμάνσεις στην γωνιακή ταχύτητα είναι οι μέσες-βαθμίδες. Σε έναν κατάλληλα σχεδιασμένο συμπιεστή, οι μέσες-βαθμίδες θα λειτουργούν κανονικά κοντά στη συνθήκη λειτουργίας σχεδιασμού τους είτε από τις μπροστινές ή οπίσθιες βαθμίδες, και είναι λιγότερο πιθανό να είναι υπεύθυνες για τα όρια σταθερότητας του συμπιεστή ή τις ικανότητες ροής. Ως εκ τούτου είναι λογικό να χρησιμοποιηθούν οι πιο ιδιαίτερα φορτισμένες μέσες-βαθμίδες, με πιο συντηρητική φόρτιση των μπροστινών και οπίσθιων βαθμίδων. Η βαθμίδα φόρτισης δεν είναι ένας καθορισμένος με σαφήνεια όρος. Μερικοί ερευνητές το χρησιμοποιούν για να αναφερθούν στο συντελεστή φόρτισης της βαθμίδας;

άλλοι το χρησιμοποιούν για να αναφερθούν στη διάχυση της ροής στις σειρές των πτερυγίων. Στο παρόν πλαίσιο, και οι δύο πτυχές πρέπει να εξεταστούν. Οι υψηλότεροι συντελεστές φόρτισης θα χρησιμοποιηθούν για τις μέσες-βαθμίδες. Κάπως μεγαλύτερη διάχυση της ροής μπορεί να επιχειρηθεί, δεδομένου ότι οι μέσες-βαθμίδες αναμένονται να λειτουργούν πάνω από ένα στενότερο πεδίο του συντελεστή ροής είτε από τα μπροστινά είτε οπίσθια στάδια. Εντούτοις, η υπερβολική διάχυση της ροής πρέπει ακόμα να αποφευχθεί. Η αξιολόγηση της διάχυσης της ροής που χρησιμοποιείτε εδώ θα είναι ο λόγος της σχετικής ταχύτητας στις σειρές των πτερυγίων, W_2/W_1 , ή ο λόγος της πραγματικής ταχύτητας, W_{RE} , που προσδιορίζεται από την εξίσωση

$$V_R \rightarrow W_{RE} = \sqrt{\frac{P'_{i2} - P_2}{P'_{i1} - P_1}} \quad (2-28)$$

Οι δύο παράμετροι είναι περίπου ίδιοι, αλλά η τελευταία έχει χρησιμοποιηθεί ως βάση του κριτηρίου απώλειας στήριξης των πτερυγίων. Στο 1^ο κεφάλαιο, αποδείχθηκε ότι ο συντελεστής φόρτισης μπορεί να αυξηθεί χωρίς να αυξηθεί η διάχυση της ροής εάν ο συντελεστής ροής αυξάνεται επίσης. Αυτό θα απαιτήσει μια παρέκκλιση από τη χρησιμοποίηση του συντελεστή ροής Smith (1958) που συνιστάται 0.5 βασισμένος στον λόγο ανάκτησης της εξίσωσης (1-36). Από τα σχήματα 1-7 μέχρι 1-9, είναι προφανές ότι οι μεγάλες θετικές τιμές του λόγου ανάκτησης επιτυγχάνονται για ένα αρκετά ευρύ φάσμα των συντελεστών ροής. Επίσης, ο κίνδυνος για χαμηλότερους λόγους ανάκτησης πρέπει να είναι πολύ μικρότερος στις μέσες-βαθμίδες, δεδομένου ότι αναμένεται να υφίστανται τους λιγότερο αυστηρούς όρους λειτουργίας από τις μπροστινές και οπίσθιες βαθμίδες.

Το παρόν σύστημα αεροδυναμικού σχεδιασμού καθιστά σχετικά απλή την αναπτύξη μιας κατάλληλης κατανομής των παραμέτρων απόδοσης των βαθμίδων. Για την επεξήγηση της διαδικασίας, ο συμπιεστής B σχεδιάστηκε για την ίδια ροή μάζας σχεδιασμού, γωνιακή ταχύτητα και περίγραμμα πλημνών σαν αυτό που χρησιμοποιείται για τον συμπιεστή A. Οι παράμετροι απόδοσης των βαθμίδων που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στο σχήμα 2-9. Το σύστημα σχεδιασμού που χρησιμοποιείται για αυτό το παράδειγμα επιτρέπει τον προσδιορισμό των στοιχείων απόδοσης των βαθμίδων για έναν αυθαίρετο αριθμό βαθμίδων, με γραμμική παρεμβολή για τις άλλες βαθμίδες. Σε αυτήν την περίπτωση, ο προσδιορισμός παρέχεται για τις βαθμίδες 1, 2, 3, 4, 8 και 10. Η κατανομή του ψ_c αρχίζει με μια τιμή 0,55 για την πρώτη βαθμίδα και των κεκλιμένων επιπέδων επάνω από τις μπροστινές βαθμίδες για να επιτρέψει μια αύξηση στο ψ_c χωρίς απαράδεκτα επίπεδα διάχυσης. Οι αρχικές κατανομές των K_c και R_c υποτέθηκαν. Το K_c ορίστηκε αντί ψ_c για να παρέχει τον αμεσότερο έλεγχο των επιπέδων διάχυσης στις βαθμίδες. Οι κατανομές K_c και R_c ρυθμίστηκαν με τη δοκιμή και το λάθος έως ότου επιτεύχθηκαν τα αποδεκτά επίπεδα διάχυσης μέσω του συμπιεστή. Το K_c ρυθμίστηκε για να επιτύχει

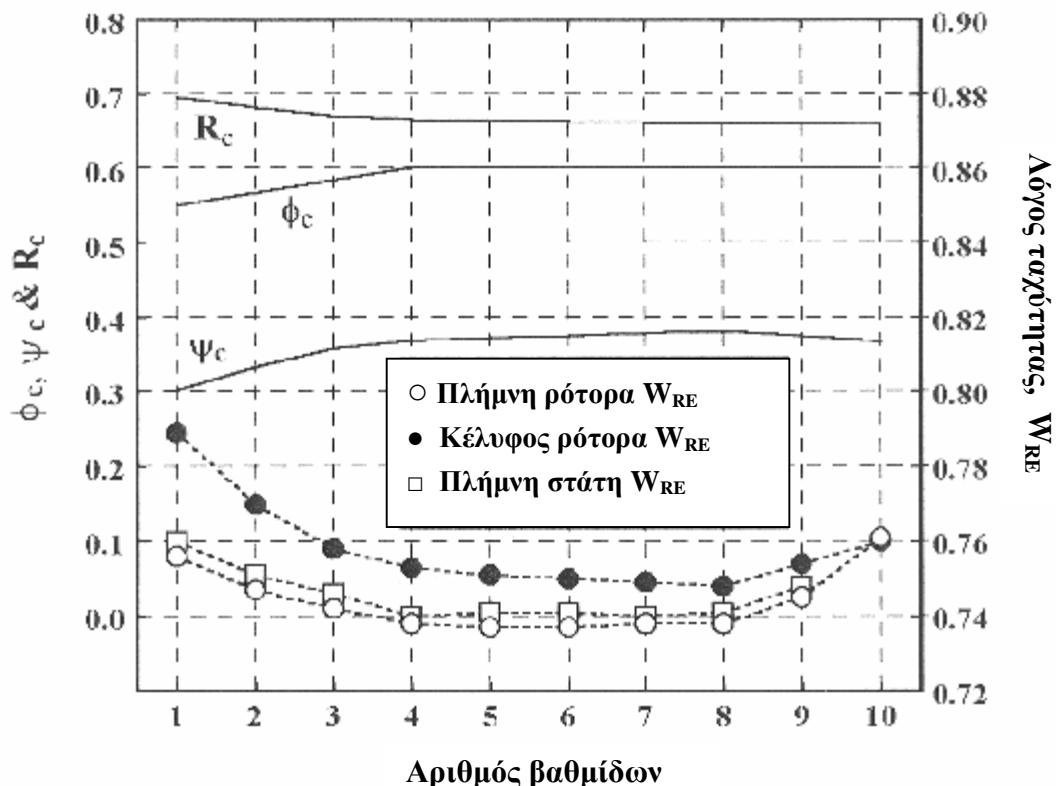
αποδεκτά επίπεδα του W_{RE} , και το R_c ρυθμίστηκε να ισορροπεί περίπου το φορτίο διάχυσης μεταξύ του ρότορα και του στάτη για όλες τις βαθμίδες. Το σχήμα 2-9 παρουσιάζει βασικές τιμές του W_{RE} που επιτεύχθηκαν στα περιγράμματα πλήμνης-και-κελύφους για τη ροή μάζας και την γωνιακή ταχύτητα του σχεδίου. Οι τιμές στο κέλυφος του στάτη παραλείπονται από το σχήμα 2-9 δεδομένου ότι δεν δημιουργούν κανένα πρόβλημα στον τύπο του στροβίλου σταθερής δίνης. Ομοίως, ο τελευταίος στάτης παραλείπεται δεδομένου ότι το φορτίο διάχυσής του μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητος των στοιχείων απόδοσης των βαθμίδων. Ως εκ τούτου οι μέσες-βαθμίδες έχουν ως χαρακτηριστικό την υψηλότερη φόρτιση και περισσότερη διάχυση είτε από τις μπροστινές είτε τις οπίσθιες βαθμίδες. Με βάση την προηγούμενη εξέταση, πρέπει να αναμένεται ότι η κατανομή φ_c πρέπει να μειωθεί σε χαμηλότερες τιμές στις οπίσθιες βαθμίδες. Αυτό γενικά δεν είναι ενδεδειγμένο και οφείλεται στα δυσμενή αποτελέσματα στα οριακά στρώματα τοίχου. Τα οριακά στρώματα τοίχου είναι σχετικά παχιά στις οπίσθιες βαθμίδες, έτσι ώστε η μείωση της μεσημβρινής ταχύτητας μπορεί εύκολα να οδηγήσει στην υπερβολική παρεμπόδιση του οριακού στρώματος. Πράγματι, η αλληλεπίδραση μεταξύ της ανάλυσης του οριακού στρώματος τοίχου και των υπολογισμών ταξινόμησης των δακτυλίων μπορεί να γίνει τόσο αυστηρή που η σύγκλιση είναι ουσιαστικά αδύνατη. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο το παρόν σύστημα σχεδιασμού περιορίζει την ταξινόμηση των δακτυλίων για να αποκλείσει μια αύξηση στην περιοχή μεταβάσεων στη κατεύθυνση ροής. Είχε το φ_c όντας μειούμενο μέσω των οπίσθιων σταδίων, εκείνος ο περιορισμός πιθανώς θα είχε αναγκάσει τις χαμηλότερες τιμές να αγνοηθούν εντελώς. Για να επεξηγηθεί περαιτέρω η διαθέσιμη ευελιξία για την προσαρμογή των κατανομών απόδοσης των βαθμίδων, ο συμπιεστής C σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας τα σχεδιαστικά στοιχεία που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 2-10. Αυτό το σχέδιο ακολούθησε την ίδια στρατηγική με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε για το συμπιεστή B, αλλά με χρήση υψηλότερων συντελεστών ροής των βαθμίδων για να επιτρέψει υψηλότερους συντελεστές φόρτισης. Το σχήμα 2-10 επίσης παρουσιάζει τις βασικές τιμές του W_{RE} που αποκτήθηκαν. Σημειώστε ότι ο συμπιεστής C επιτυγχάνει υψηλότερη φόρτιση ανά βαθμίδα από το συμπιεστή B, αλλά έχει τα παρόμοιες χαρακτηριστικές διάχυσης ροής.

Το σχήμα 2-11 συγκρίνει τις προβλέψεις απόδοσης για τους συμπιεστές A, B και C. Ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης αποδεικνύεται σε αυτήν την σύγκριση για να αποφύγει τη θερμοδυναμική επίδραση που οφείλεται στο λόγου πίεσης που συζητείται στο 2^ο κεφάλαιο. Και ο λόγος πίεσης και το σταθερό πεδίο λειτουργίας του ρευστού για το συμπιεστή B βελτιώνεται γενικά σε σχέση με το συμπιεστή A. Υπάρχει μια μικρή απώλεια στο σταθερό πεδίο λειτουργίας στην ταχύτητα σχεδιασμού, αλλά βελτιωμένη σταθερότητα στις άλλες ταχύτητες. Υπάρχει μια μικρή μείωση της αποδοτικότητας που οφείλεται στους μειωμένους λόγους διαστάσεων που προκύπτουν από τις υψηλότερες τιμές του φ_c και του λόγου πίεσης. Αυτό απαιτεί τη χρήση των χαμηλότερων τιμών του

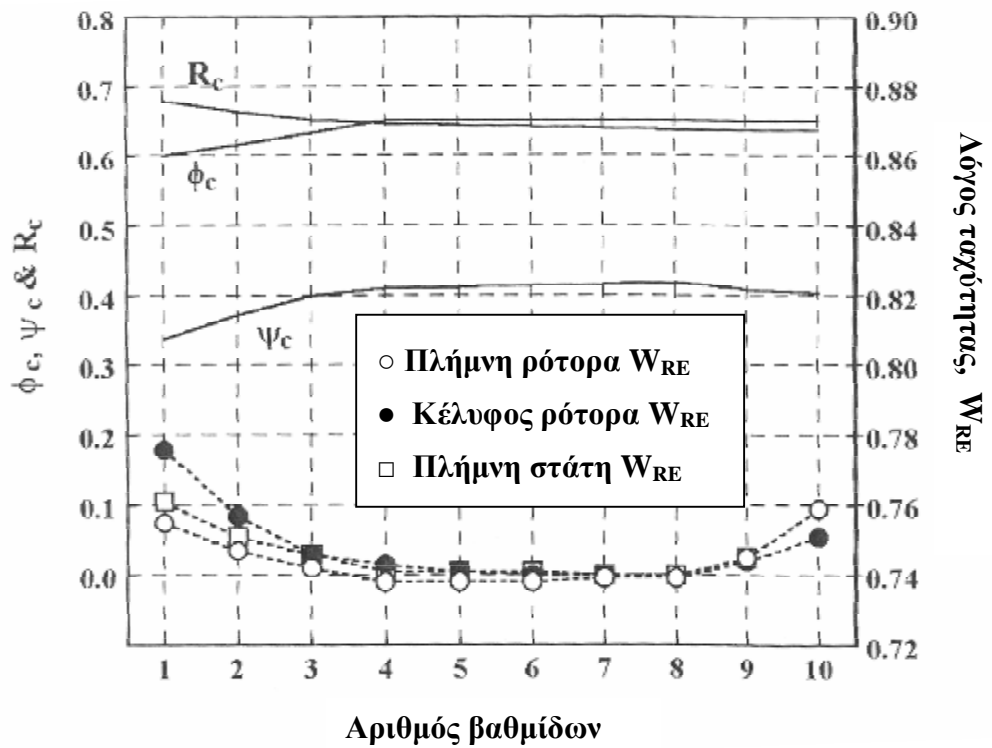
των πτερυγίων, h , στις οπίσθιες βαθμίδες, με συνέπεια τους υψηλότερους προβλεπόμενους συντελεστές απωλειών όπως παρατηρείται στην εξίσωση

$$K_2 = 1 + (s/h)\cos b_2 \quad (2-29)$$

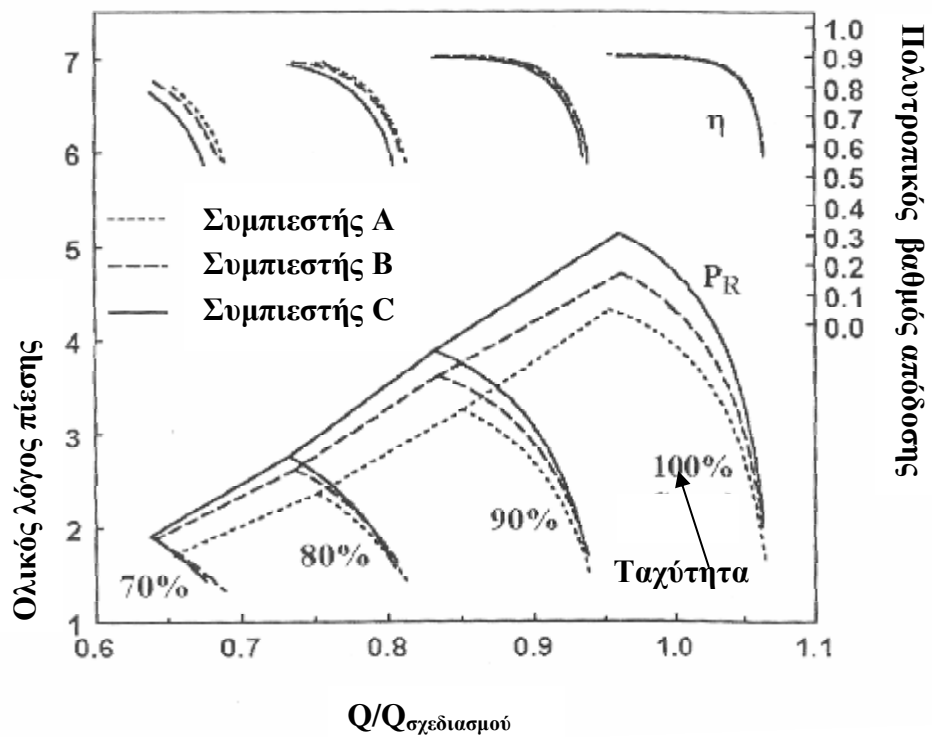
Το κατ' εκτίμηση όριο κύματος και για τους τρεις συμπιεστές είναι βασισμένο στο κριτήριο της απώλειας στήριξης. Για την ταχύτητα σχεδίου, αυτό εμφανίζεται αρχικά στις μέσες βαθμίδες, ενώ σε άλλες ταχύτητες οι μπροστινές βαθμίδες πέφτουν σε απώλεια στήριξης πρώτες. Το βελτιωμένο σταθερό πεδίο λειτουργίας είναι ιδιαίτερα εμφανές στην χαμηλότερη ταχύτητα. Όπως αναμένεται, η μειωμένη διάχυση στις μπροστινές βαθμίδες έχει επιτρέψει στο συμπιεστή να λειτουργεί αποτελεσματικότερα στις χαμηλές ταχύτητες. Σημειώστε ότι το βελτιωμένο σταθερό πεδίο λειτουργίας επίσης εμφανίζεται στον συμπιεστή C, ακόμα κι αν ο λόγος πίεσης του σχεδίου του είναι υψηλότερος από αυτών του συμπιεστή B. Σαφώς, ο προσεκτικός έλεγχος των χαρακτηριστικών διάχυσης των σειρών των απόδοσης. Όλοι οι σχεδιαστές έχουν βεβαίως ισχυρό κίνητρο για να ευνοήσουν τις μεγάλες τιμές του ϕ_c και



ΣΧΗΜΑ 2-9 Στοιχεία σχεδιασμού της βαθμίδας για τον συμπιεστή B



ΣΧΗΜΑ 2-10 Στοιχεία σχεδιασμού της βαθμίδας για των συμπιεστή C

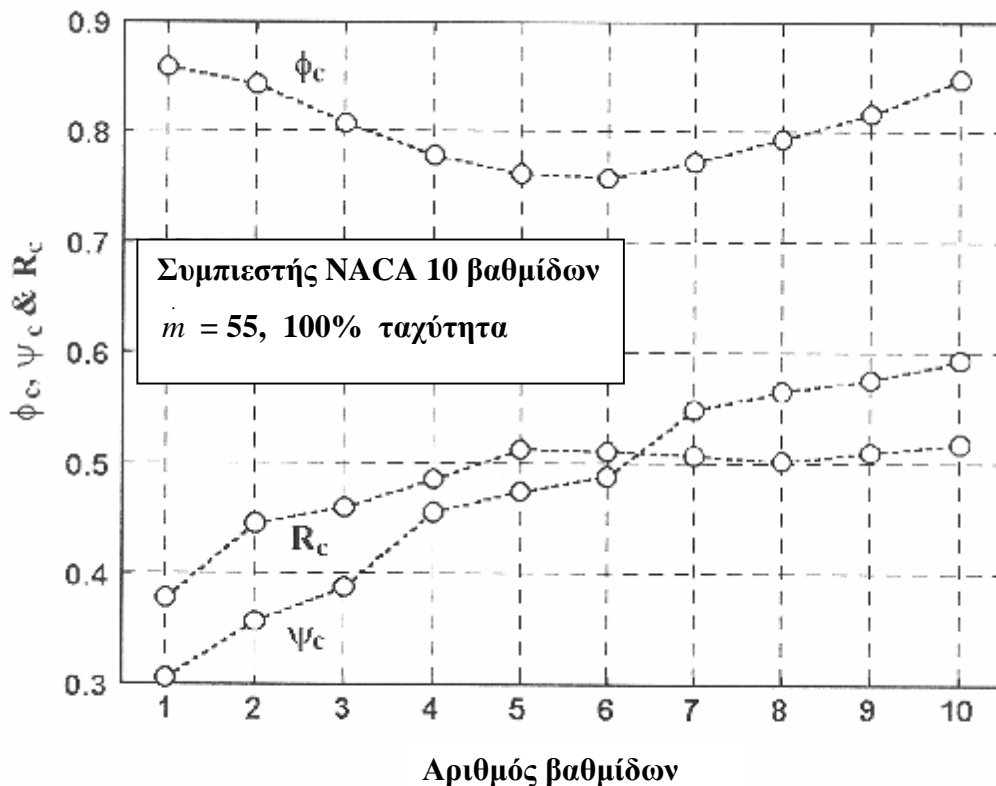


ΣΧΗΜΑ 2-11 Προβλεπόμενος χάρτης απόδοσης

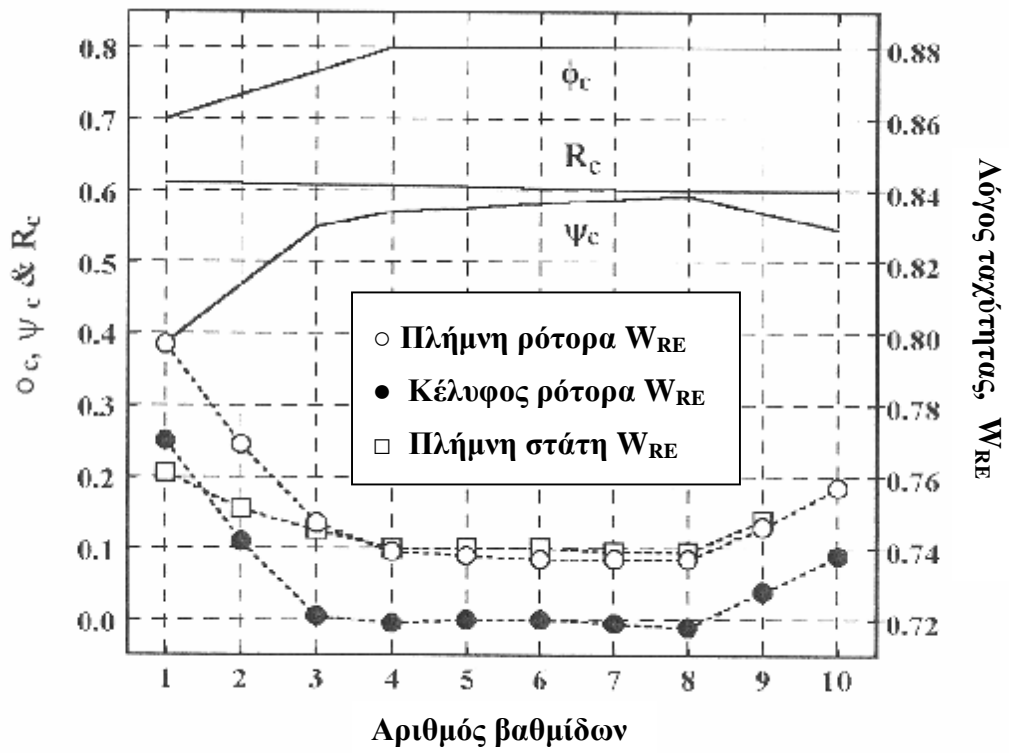
του ψ_c για να αυξήσουν τη ροή μάζας ανά μονάδα μετωπικής περιοχής και για να μειώσουν τον αριθμό των βαθμίδων που απαιτούνται. Εάν ο στόχος είναι το μειωμένο μέγεθος και βάρος ή το μειωμένο κόστος, το κίνητρο είναι πάντα παρόν. Εντούτοις, οι πρόσφατες τάσεις σχεδιασμού εμφανίζονται να ευνοούν τις χαμηλότερες τιμές του ϕ_c και του ψ_c βασισμένες πρώτιστα στα αντιληπτά οφέλη στην απόδοση. Οι πιθανές ερμηνείες εξετάστηκαν στην παράγραφο 1.4 του προηγούμενου κεφαλαίου. Άλλοι ερευνητές εμφανίζονται να πιστεύουν ότι η εξήγηση βρίσκεται στη συμπεριφορά οριακού στρώματος του ακριανού τοιχώματος.

Ενώ οι χαμηλότερες τιμές του ϕ_c και του ψ_c μπορούν να προτιμηθούν, ο σχεδιαστής έχει ιδιαίτερη ευελιξία όσον αφορά τις παραμέτρους απόδοσης των βαθμίδων. Οι μάλλον μεγάλες τιμές του ϕ_c και του ψ_c έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς. Παραδείγματος χάριν, το σχήμα 2-12 παρουσιάζει υπολογισμένες παραμέτρους απόδοσης των βαθμίδων που λαμβάνονται από την ανάλυση της απόδοσης του NACA 10-βαθμίδων υποηχητικού συμπιεστή. Αυτός ο συμπιεστής πέτυχε αξιοσέβαστη απόδοση, λαμβάνοντας υπόψη την κορυφαία τεχνολογία των αεροδυναμικών συμπιεστών αξονικής ροής πενήντα χρόνια πριν όταν σχεδιάστηκε. Ακόμα οι σχετικά μεγάλες τιμές των ϕ_c και ψ_c χρησιμοποιήθηκαν στις περισσότερες βαθμίδες. Για παράδειγμα, ο συμπιεστής D σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας τις υψηλότερες τιμές των ϕ_c και ψ_c που επιτράπηκαν από την αιχμή του ρότορα συγκριτικά με τα όρια του αριθμού Mach που επιβλήθηκε στα προηγούμενα σχέδια. Χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι όροι λειτουργίας και η ίδια στρατηγική σχεδιασμού όπως για τους συμπιεστές B και C. Το σχήμα 2-13 παρουσιάζει τις παραμέτρους σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν και τις χαρακτηριστικές διάχυσης της ροής που προέκυψαν. Δεν ήταν δυνατό να ισορροπήσει η διάχυση της ροής επίσης για αυτήν την περίπτωση. Η απώλεια στήριξης των πτερυγίων σε μια βαθμίδα στροβίλου σταθερής δίνης σχεδόν πάντα εμφανίζεται πρώτα στο περίγραμμα πλημνών, συνήθως στους στάτες. Ως εκ τούτου, οι χαμηλότεροι λόγοι ταχύτητας στο κέλυφος του ρότορα έγιναν αποδεκτές έτσι ώστε οι χαρακτηριστικές της διάχυσης της ροής στο περίγραμμα της πλήμνης να μπορούν να διατηρηθούν κατά τρόπο παρόμοιο με αυτό των συμπιεστών B και C. Πράγματι, για οποιοδήποτε συμπιεστή, οι διατομές των πτερυγίων της πλήμνης πρέπει να λειτουργήσουν πάνω από ένα ευρύτερο πεδίο της γωνίας πρόσπτωσης από ότι οι διατομές των πτερυγίων του κελύφους στον ρότορα. Το σχήμα 2-14 συγκρίνει τους προβλεπόμενους χάρτες απόδοσης για τους συμπιεστές B, C και D. Πάλι, ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης αποδεικνύεται σε αυτήν την σύγκριση για να αποφύγει τη θερμοδυναμική επίδραση που οφείλεται στο λόγο πίεσης που συζητείται στο 2^ο κεφάλαιο. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του λόγου διάστασης έχουν μια δυσμενή επίδραση στον βαθμό απόδοσης, ιδιαίτερα για τον συμπιεστή D. Μια πρόσθετη ανάλυση της απόδοσης του συμπιεστή D που χρησιμοποιεί έναν μεγαλύτερο αριθμό πτερυγίων με χορδές μικρότερου μήκους στις οπίσθιες βαθμίδες παρήγαγε ουσιαστικά τον ίδιο βαθμό απόδοσης στην

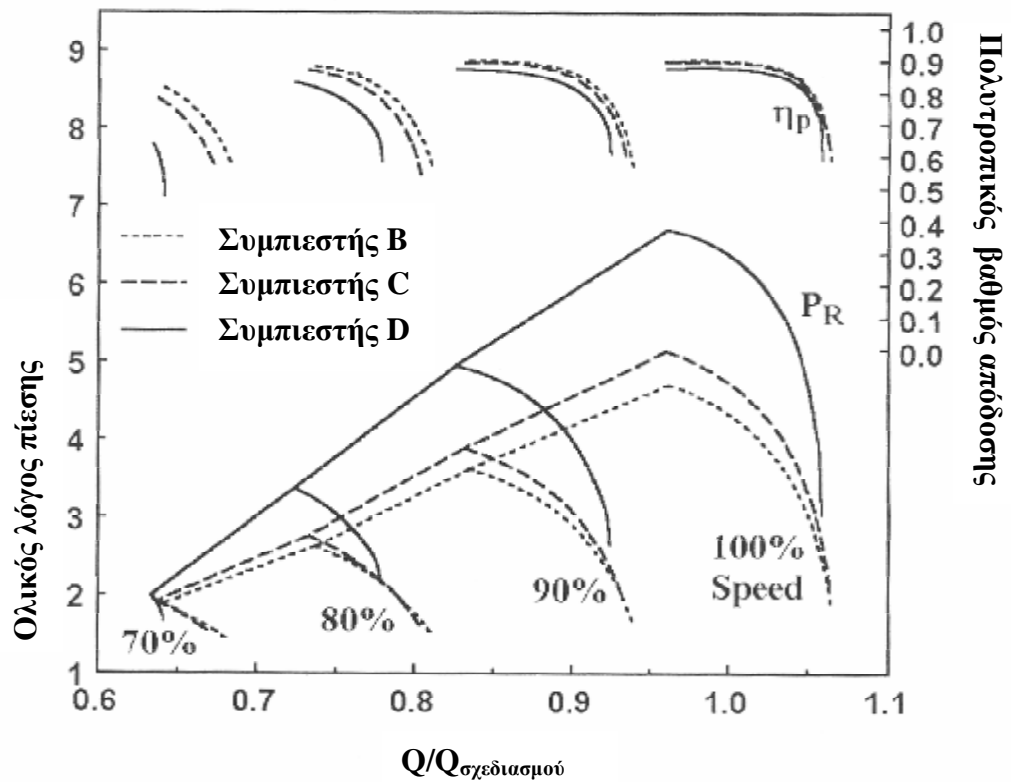
ταχύτητα σχεδιασμού όπως και για τα άλλα δύο σχέδια. Αυτό δείχνει ότι η μείωση της αποδοτικότητας της ταχύτητας σχεδιασμού που παρατηρείται στο σχήμα 2-14 οφείλεται στην επίδραση του λόγου διάστασης μάλλον που είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα των τιμών των ϕ_c και ψ_c που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία σχεδιασμού. Στις χαμηλότερες ταχύτητες, και ο βαθμός απόδοσης και η σταθερότητα εμφανίζονται να επιδεινώνονται όπως οι υψηλότερες τιμές των ϕ_c και ψ_c που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία σχεδιασμού. Ως εκ τούτου η ανάλυση της απόδοσης επισημαίνει μερικές αρνητικές επιπτώσεις στις εκτός σχεδιασμού ταχύτητες από το σχεδιασμό με τις υψηλότερες τιμές των ϕ_c και ψ_c . Αλλά πραγματικά δεν εμφανίζεται κάποια σημαντική επίδραση των ϕ_c και ψ_c στην απόδοση κατά την ταχύτητα σχεδιασμού. Είναι τώρα γενικά αποδεκτό ότι ο σχεδιασμός στις χαμηλότερες τιμές των ϕ_c και ψ_c προσφέρει σαφή οφέλη στην απόδοση. Είναι σαφές ότι εκείνα τα οφέλη δεν συνεκτιμώνται εντελώς από την ανάλυση απόδοσης.



ΣΧΗΜΑ 2-12 Στοιχεία της πραγματικής βαθμίδας απόδοσης

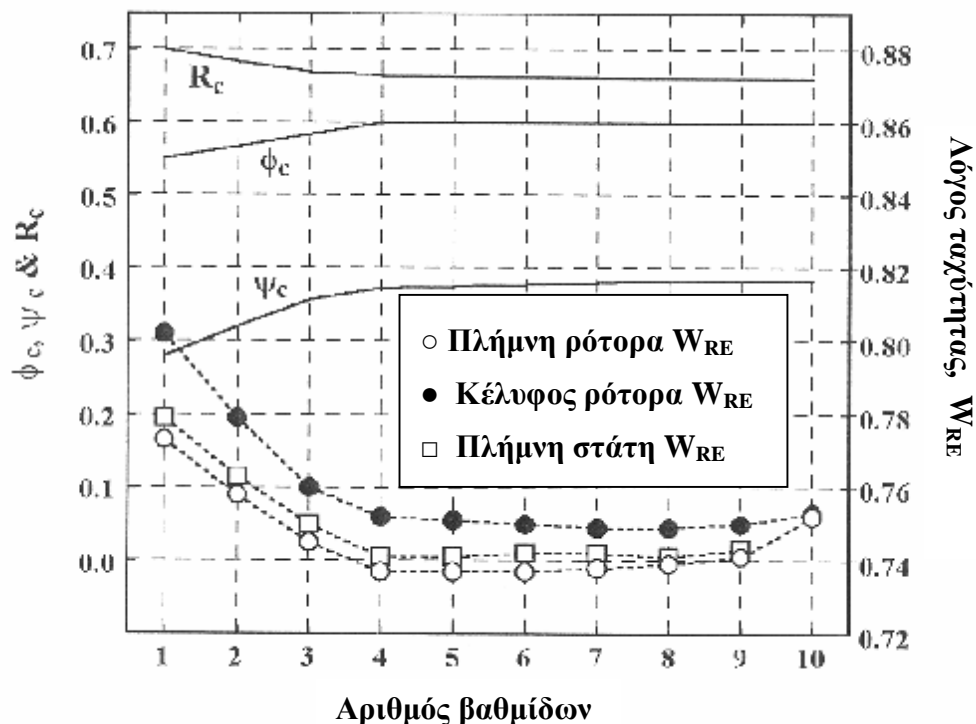


ΣΧΗΜΑ 2-13 Στοιχεία σχεδιασμού της βαθμίδας για τον συμπιεστή D

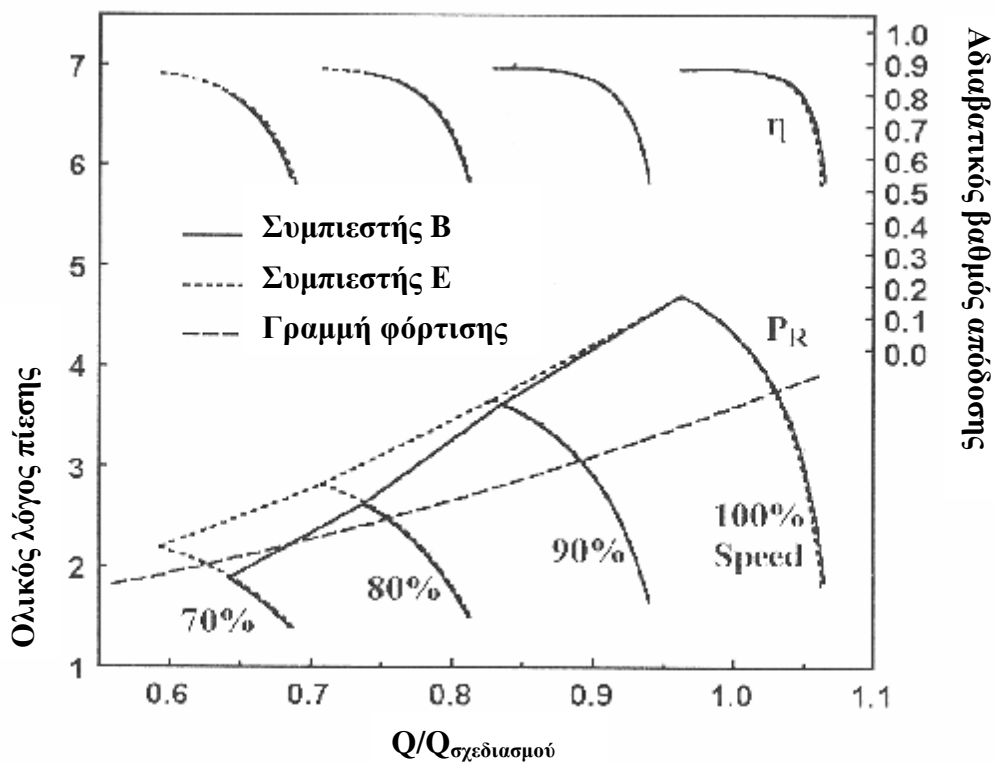


ΣΧΗΜΑ 2-14 Επίδραση του φ_c στην απόδοση

Το παρόν σύστημα σχεδιασμού καθιστά σχετικά απλό να προσαρμόσει τις κατανομές των παραμέτρων απόδοσης των βαθμίδων και των χαρακτηριστικών διάχυσης των σειρών των πτερυγίων για να τονίσει τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα που θεωρούνται σημαντικά για τους στόχους του σχεδίου. Αυτό διευκρινίζεται πιο καλά από ένα άλλο απλό παράδειγμα : Υποθέστε ότι ο συμπιεστής B πρέπει να λειτουργήσει σε μια γραμμή φορτίων που βρίσκεται επίσης κοντά στη γραμμή κύματος για τις χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής. Ο συμπιεστής E πρόκειται να σχεδιαστεί με στόχο τη βελτίωση του ορίου κύματος στις χαμηλές ταχύτητες διατηρώντας την ίδια βασική απόδοση στην ταχύτητα σχεδιασμού με το συμπιεστή B. Το περίγραμμα των δακτυλίων και ο αριθμός των βαθμίδων πρόκειται να είναι ίδιο με το συμπιεστή B. Στην πραγματικότητα, το σχέδιο του συμπιεστή E περιορίζεται για να είναι ίδιο με το συμπιεστή B εκτός από τη γεωμετρία των πτερυγίων. Το σχήμα 2-15 παρουσιάζει τις παραμέτρους σχεδιασμού των βαθμίδων και τις χαρακτηριστικές διάχυσης της ροής που χρησιμοποιούνται για να επιτύχουν αυτόν τον στόχο. Το σχήμα 2-16 απεικονίζει μια γραμμή φόρτισης η οποία απαιτεί αυτόν τον επανασχεδιασμό και συγκρίνει τους προβλεπόμενους χάρτες απόδοσης για τους δύο συμπιεστές. Η σύγκριση με το σχήμα 2-9 δείχνει ότι το σχεδιασμός του συμπιεστή E διαφέρει από αυτόν του συμπιεστή B με μια αρκετά μέτρια μετατόπιση της βαθμίδας φόρτωσης από το μπροστά στο οπίσθιο τμήμα. Μπορεί να δει ότι μια ουσιαστική βελτίωση στο αργόστροφο περιθώριο κύματος έχει επιτευχθεί με την ελάχιστη επίδραση στην απόδοση ταχύτητας σχεδίου.



ΣΧΗΜΑ 2-15 Στοιχεία σχεδιασμού για τον συμπιεστή E

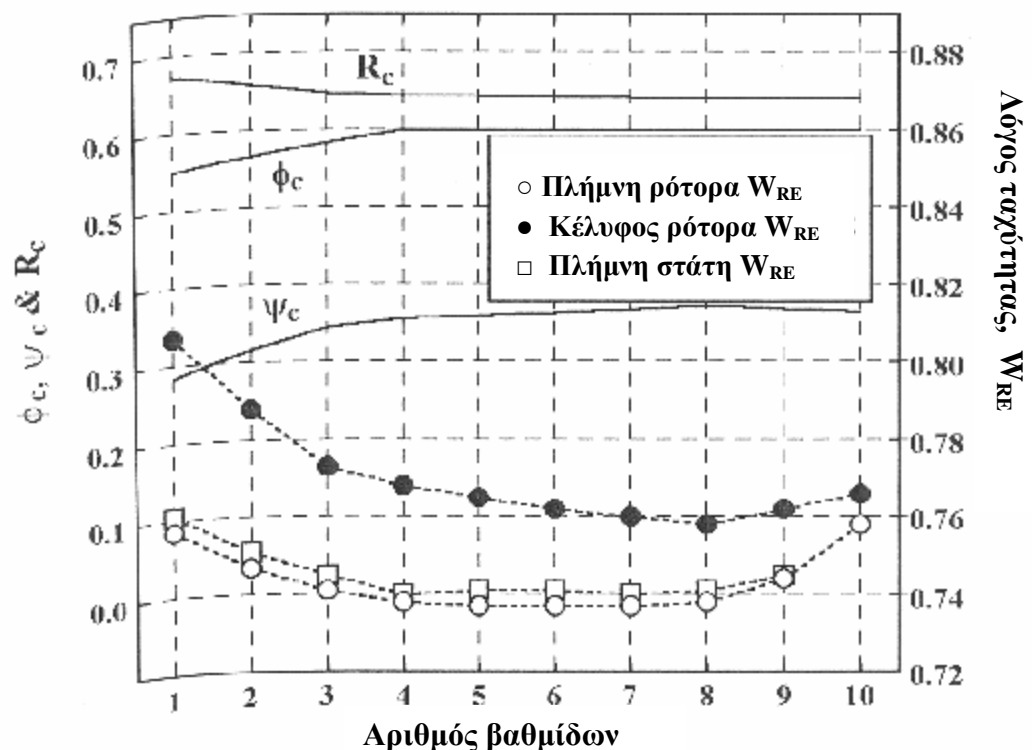


ΣΧΗΜΑ 2-16 Απόδοση των συμπιεστών Β και Ε

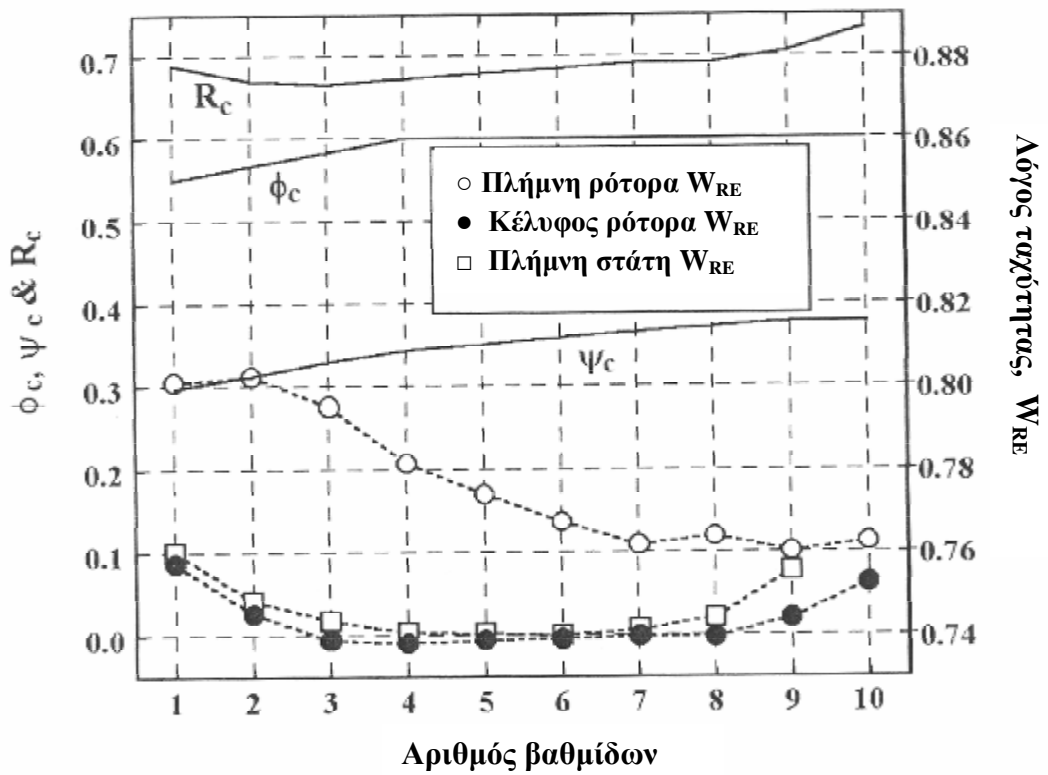
2.7 ΤΥΠΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΔΙΝΗΣ

Το 1^ο κεφάλαιο επανεξετάζει την επίδραση του στροβίλου δίνης στα πλαίσια μιας ενιαίας, επαναλαμβανόμενης βαθμίδας σχεδιασμού. Το παρόν σύστημα αεροδυναμικού σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει τους εναλλακτικούς τύπους σχεδιασμού δίνης στα πλαίσια των πολυβάθμιων συμπιεστών που σχεδιάζονται με τις προσαρμοσμένες κατανομές των παραμέτρων απόδοσης των βαθμίδων και τις χαρακτηριστικές διάχυσης της ροής. Ο συμπιεστής Β χρησιμοποιείται ως σταθερό σχέδιο στροβίλου δίνης σε αυτήν την σύγκριση. Εναλλακτικά σχέδια συμπιεστών έχουν παραχθεί χρησιμοποιώντας την ελεύθερη δίνη και τους τύπους δινών σταθερής αντίδρασης. Αν και ο τύπος δίνης σταθερής αντίδρασης δεν ήταν πολύ αποτελεσματικός για τα ενιαία σχέδια βαθμίδων στο 1^ο κεφάλαιο, η παρούσα εφαρμογή ταιριάζει καλύτερα σε αυτόν τον τύπο δίνης. Η σημαντικότερη αδυναμία που παρατηρείται στο 1^ο κεφάλαιο είναι τα ιδιαίτερα διαστρεβλωμένα σχεδιαγράμματα της μεσημβρινής ταχύτητας. Ο υψηλότερος λόγος της ακτίνας πλήμνης-κελύφους που χρησιμοποιείται στην παρούσα περίπτωση θα μειώσει την επίδραση αυτής της διαστρέβλωσης του σχεδιαγράμματος. Τα σχήματα 2-17 και 2-18 συνοψίζουν τα σχεδιαστικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τα

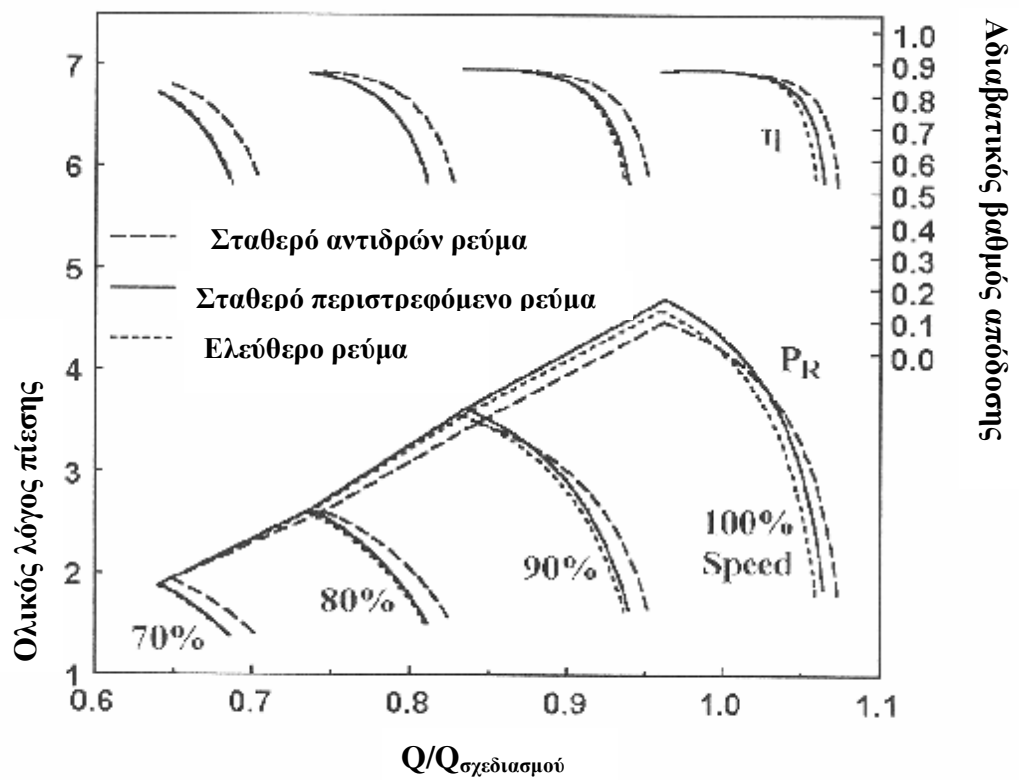
εναλλακτικά σχέδια. Τα εναλλακτικά σχέδια είναι βασισμένα στους ίδιους όρους λειτουργίας και κατανομή του ϕ_c με τον συμπιεστή Β. Οι κατανομές των R_c και Ψ_c προσαρμόζονται για να παράγουν χαρακτηριστικές διάχυσης της ροής παρόμοιες με εκείνες του σχήματος 2-9. Οι τύποι στροβίλων ελεύθερης δίνης και οι σταθερές δίνης έχουν παρόμοιες χαρακτηριστικές διάχυσης ροής. Μόνο μικρές μεταβολές στα στοιχεία του σχήματος 2-9 απαιτήθηκαν για να επιτευχθούν τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 2-17. Οι χαρακτηριστικές διάχυσης της ροής του τύπου δίνης σταθερής αντίδρασης είναι αρκετά διαφορετικές. Εκεί οι λόγοι ταχύτητας του ρότορα στο κέλυφος έπρεπε να ισορροπήσουν ενάντια στις τιμές των πλημνών των στατών για τις περισσότερες από τις βαθμίδες. Η διάχυση ροής στην πλήμνη του στάτη ήταν αναμενόμενο όριο σταθερότητας, το οποίο επιβεβαιώθηκε στη συνέχεια από την ανάλυση της απόδοσης. Ως εκ τούτου έμφαση δόθηκε στην επίτευξη των παρόμοιων λόγων ταχύτητας στην πλήμνη του στάτη όπως εκείνοι που χρησιμοποιήθηκαν για τους άλλους δύο τύπους δινών, χωρίς υπερβολική διάχυση σε άλλες θέσεις. Το σχήμα 2-19 συγκρίνει τους προβλεπόμενους χάρτες απόδοσης για τα τρία σχέδια των συμπιεστών. Σημειώστε ότι το πεδίο ροής από το σημείο σχεδιασμού μέχρι το κύμα είναι ουσιαστικά το ίδιο και για τους τρεις συμπιεστές στην ταχύτητα σχεδιασμού. Οι προβλέψεις της απόδοσης δείχνουν ότι οι χαρακτηριστικές διάχυσης της ροής στην πλήμνη του στάτη έχουν πολύ περισσότερη επιρροή στη σταθερότητα από τον τύπο της δίνης του



ΣΧΗΜΑ 2-17 Στοιχεία σχεδιασμού ελεύθερης δίνης



ΣΧΗΜΑ 2-18 Στοιχεία σχεδιασμού δίνης σταθερής αντιδρασης

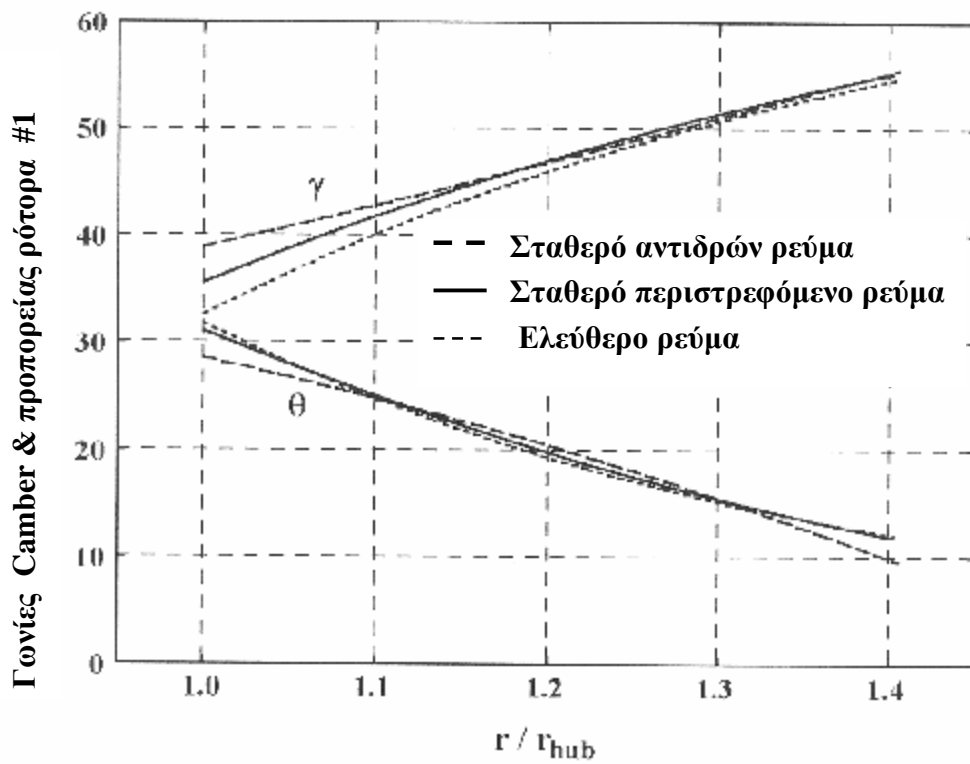


ΣΧΗΜΑ 2-19 Επίδραση του τύπου δίνης στην απόδοση

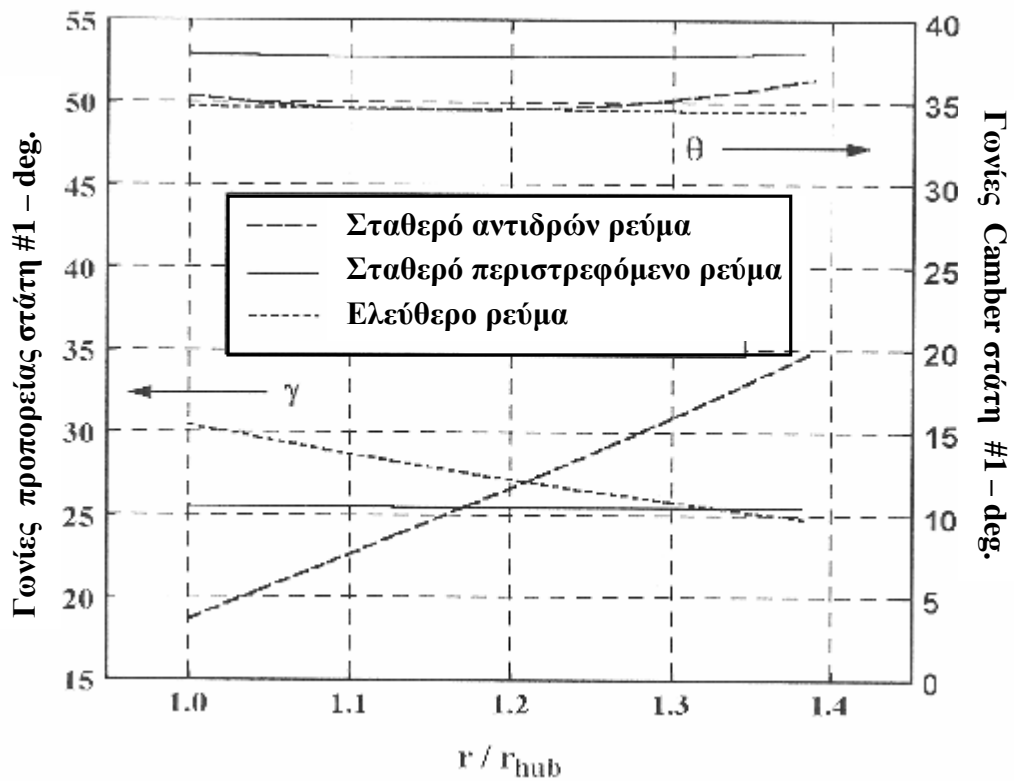
στροβίλου. Επίσης παρατηρείται ότι το επίπεδο του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή μένει ανεπηρέαστο από τον τύπο της δίνης του στροβίλου που χρησιμοποιείται. Οι χαρακτηριστικές των σχεδίων των δινών σταθερής αντίδρασης για τις χαμηλές ταχύτητες μετατοπίζονται σε ροή ανάλογη με τα άλλα δύο σχέδια, αλλά τα επίπεδα του βαθμού απόδοσης είναι παρεμφερής για όλα τα σχέδια. Το σχέδιο ελευθέρων δινών παρήγαγε έναν ελαφρώς χαμηλότερο λόγο πίεσης από ότι το σχέδιο στροβίλου σταθερής δίνης, αλλά κατά τα άλλα παρήγαγε απόδοση παρόμοια με του συμπιεστή Β. Ο τύπος δίνης σταθερής αντίδρασης παράγει σημαντικά χαμηλότερο λόγο πίεσης από τον συμπιεστή Β. Ενδεχομένως αυτό θα μπορούσε να βελτιωθεί κάπως με περαιτέρω ραφινάρισμα, αλλά φαίνεται καθαρά ότι το σχέδιο δίνης σταθερής αντίδρασης δεν προσφέρει κανένα πλεονέκτημα περισσότερο από τα άλλα δύο σχέδια. Ο τύπος δίνης σταθερής αντίδρασης είναι πολύ πιο δύσκολο να χρησιμοποιηθεί και έχει συγκεκριμένους περιορισμούς όσον αφορά τους λόγους ακτίνας από την πλήμνη στο κέλυφος που είναι αποδεκτή. Συνεπώς δεν υπάρχει λόγος να τον χρησιμοποιήσουμε για τον σχεδιασμό συμπιεστών αξονικής ροής.

Η γεωμετρία των πτερυγίων που προκύπτει από τους διάφορους τύπους στροβίλων δίνης είναι επίσης μια σημαντική μελέτη. Τα σχήματα 2-20 και 2-21 συγκρίνουν το κύρτωμα και τις γωνίες προπορείας για τα πτερύγια του ρότορα και του στάτη για την πρώτη βαθμίδα των σχεδίων των τριών συμπιεστών. Η πρώτη βαθμίδα επιλέγεται δεδομένου ότι έχει τα μακρύτερα πτερύγια, αλλά συγκρίνοντας τα πτερύγια με άλλες βαθμίδες θα είναι αρκετά παρόμοια. Τα πτερύγια του ρότορα για τα τρία σχέδια είναι τόσο παρόμοια που δεν υπάρχει καμία σαφής προτίμηση. Η γεωμετρία των πτερυγίων του στάτη εξαρτάται πολύ από τον τύπο της δίνης του στροβίλου. Ο στροβίλος σταθερής δίνης παράγει έναν στάτη που μπορεί να προσεγγιστεί καλά από ένα σταθερό-κύρτωμα, ανεστραμμένου πτερυγίου. Αυτό θα είναι ευκολότερο να κατασκευάσει και κοστίζει λιγότερο. Ο στάτης ελεύθερης δίνης μπορεί να προσεγγιστεί καλά από ένα πτερύγιο σταθερού-κυρτώματος με μια γραμμική συστροφή. Αυτό θα ήταν η δεύτερη επιλογή όσον αφορά το κόστος και την ευκολία κατασκευής. Η δίνη σταθερής αντίδρασης απαιτεί μια πιο περίπλοκη κατανομή της γωνίας καμπυλότητας, αλλά μια γραμμική συστροφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσεγγίσει την κατανομή της γωνίας προπορείας. Η χαρακτηριστική αύξηση στη γωνία καμπυλότητας κοντά στο κέλυφος είναι προφανής. Αυτό θα είναι εντονότερο εάν χρησιμοποιηθεί ένας χαμηλότερος λόγος ακτίνας από την πλήμνη στο κέλυφος, όπως παρατηρείται στο σχήμα 1-32. Κατά συνέπεια, η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του στάτη είναι ένας άλλος λόγος για να αποφευχθεί ο τύπος δίνης σταθερής αντίδρασης.

Το παρόν σύστημα αεροδυναμικού σχεδιασμού το καθιστά σχετικά απλό να ερευνηθεί την επίδραση των εναλλακτικών τύπων δίνης των στροβίλων. Εδώ, τρεις αρκετά διαφορετικοί τύποι δινών έχουν συγκριθεί για ένα πρόβλημα αρκετά χαρακτηριστικό ενός βιομηχανικού συμπιεστή αξονικής ροής. Με βάση αυτήν την σύγκριση, είναι λογικό να συναχθεί το συμπέρασμα ότι ο τύπος της



ΣΧΗΜΑ 2-20 Σύγκριση της γεωμετρίας του πτερυγίου του ρότορα



ΣΧΗΜΑ 2-21 Σύγκριση της γεωμετρίας του πτερυγίου του στάτη

δίνης του στροβίλου δεν είναι ένας σημαντικός παράγοντας όσον αφορά την αεροδυναμική απόδοση των συμπιεστών αξονικής ροής αυτού του τύπου. Εάν χρησιμοποιηθούν οι χαμηλότεροι λόγοι ακτίνας πλήμνης προς κέλυφος, μπορεί να υπάρξει κάποια επίδραση στην απόδοση που συνδέεται με τα διαφορετικά επίπεδα του μέγιστου σχετικού αριθμού Mach στην είσοδο ή εσχάτως αριθμού στα επίπεδα διάχυσης της ροής που παράγονται από τους εναλλασσόμενους τύπους δινών του στροβίλου. Αλλά, γενικά, η καταλληλότητα της στρατηγικής και των στόχων του σχεδίου, μαζί με το κόστος και την ευκολία της κατασκευής των πτερυγίων, είναι πιθανότερο να είναι η βάση για την επιλογή του τύπου δίνης του στροβίλου.

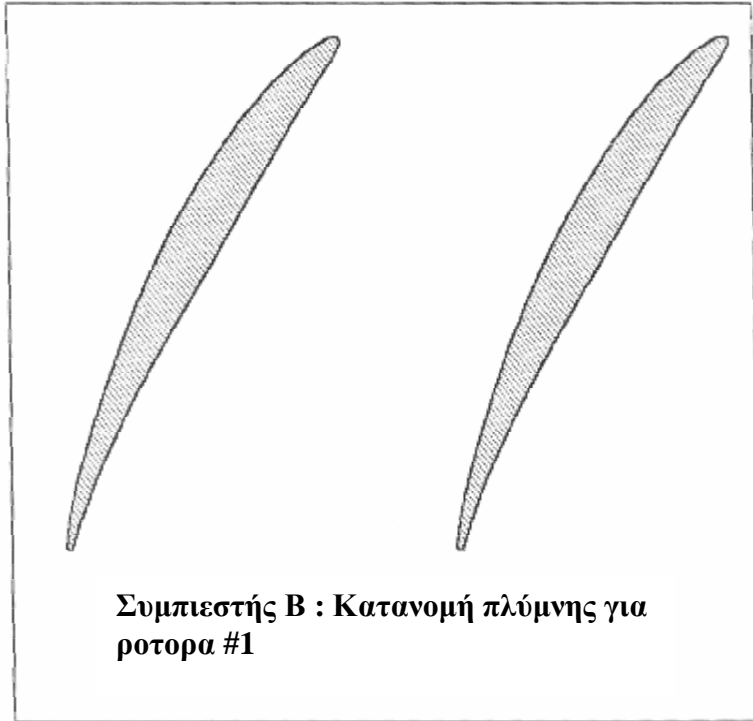
2.8 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΟΦΕΛΗ

Τα οφέλη από την παρούσα διαδικασία αεροδυναμικού σχεδιασμού συμπιεστή αξονικής ροής πρέπει να είναι σχετικά σαφή από τα παραδείγματα που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της εισαγωγής που απαιτούνται είναι μάλλον λίγα λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα του προβλήματος σχεδιασμού. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της εισαγωγής παρέχονται σχετικά εύκολα, και παρέχουν στο σχεδιαστή τον ουσιαστικό έλεγχο των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που θεωρούνται καίρια για τους στόχους του σχεδίου. Η κουραστική διαδικασία της ταξινόμησης των δακτυλίων, επιλογής πτερυγίων και τις προσαρμογές τους στο διαθέσιμο διάστημα αφήνεται στον υπολογιστή. Η διαδικασία σχεδιασμού καθοδηγείται από τη συνεχή ανατροφοδότηση από μια ανάλυση απόδοσης για το λόγο μάζας ροής σχεδιασμού και την ταχύτητα περιστροφής. Όταν ένα πραγματοποιήσιμο εξεταζόμενο σχέδιο προσδιορίζεται, το σύστημα σχεδιασμού μπορεί να δημιουργήσει ένα αρχείο εισαγωγής για την αεροδυναμική ανάλυση της απόδοσης για να επιτρέψει μια αξιολόγηση των χαρακτηριστικών της απόδοσης στο σημείο εκτός σχεδιασμού.

Για λήψη του πλήρους οφέλους από το σύστημα σχεδιασμού, επιδείξεις σε H/Y συνοπτικών και γραφικών στοιχείων είναι ουσιαστικές. Η γεωμετρία του περιγράμματος των ακριανών τοιχωμάτων, η γεωμετρία των κινητών πτερυγίων, τα στοιχεία της σχετικής και απόλυτης ροής, τα στοιχεία απόδοσης των σειρών των πτερυγίων και τα στοιχεία ανάλυσης του οριακού στρώματος των ακριανών τοιχωμάτων είναι απαραίτητα για την αξιολόγηση του σχεδίου. Η γραφική παρουσίαση του ισοδύναμου λόγου ταχύτητας, W_{RE} , είναι ιδιαίτερα χρήσιμη κατά την προσπάθεια προσαρμογής της κατανομής της διάχυσης της ροής όμοια με τα παραδείγματα που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Έχει διαπιστωθεί ότι η ικανότητα να καθορίζει τη βαθμίδα απόδοσης για μερικές βασικές βαθμίδες και να παρεμβάλει τις ενδιάμεσες βαθμίδες μπορεί να απλοποιήσει τις προδιαγραφές εισαγωγής. Το ίδιο πράγμα ισχύει για τη διευκρίνιση των σταθερών στοιχείων περιγράμματος των ακριανών

τοιχωμάτων. Η διευκρίνιση του αξονικού διαστήματος είναι συχνά απλούστερη από διευκρινίζοντας τις αξονικές συντεταγμένες. Ο όρος να εισαχθεί η ακτίνα σε μερικούς σταθμούς και να παρεμβληθεί για τους ενδιάμεσους σταθμούς είναι επίσης μια χρήσιμη απλοποίηση. Είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθεί μια αντιπροσωπευτική ανοχή των ακρωπτερυγίων, αλλά είναι συνήθως ικανοποιητικό να χρησιμοποιηθεί μια σταθερή τιμή για όλες τις σειρές των πτερυγίων. Παρουσιάσεις σε H/Y των πραγματικών σχεδιαγραμμάτων των πτερυγίων σε οποιαδήποτε ακτίνα είναι επίσης χρήσιμες, και το σύστημα σχεδίου πρέπει να έχει την ικανότητα να εξάγει τις συντεταγμένες σχεδιαγράμματος των πτερυγίων για τον προσχεδιασμό και την κατασκευή των λεπίδων. Το σχήμα 2-22 είναι ένα παράδειγμα αυτών των στοιχείων που λαμβάνονται από το σχέδιο του συμπιεστή Β.

Είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι τα ουσιαστικά οφέλη αυτού του συστήματος σχεδιασμού εισάγουν επίσης ένα επίπεδο κινδύνου που απαιτεί από τους σχεδιαστές να ασκήσουν την κρίση τους. Μια ανάλυση απόδοσης είναι κανονικά κατάλληλη ενάντια στα πειραματικά στοιχεία για να τα καθορίσει με ακρίβεια έως ότου προσφέρει την ικανοποιητική ακρίβεια πρόβλεψης για τις επιδιωκόμενες εφαρμογές. Γενικά, καμία από τις περιπτώσεις που εξετάζονται σε μια τέτοια μελέτη ανάλυσης θα αξιολογηθεί από την ανάλυση της απόδοσης όπως εντελώς βελτιστοποιείται. Αλλά το παρόν σύστημα σχεδιασμού παρέχει τη μοναδική κατάσταση της παραγωγής ενός σχεδίου συμπιεστή αξονικής ροής που βελτιστοποιείται ακριβώς στα πρότυπα που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση απόδοσης. Δεδομένου ότι αυτά τα πρότυπα δεν είναι ακριβή, η παρούσα προσέγγιση σχεδιασμού θα εκθέσει αναπόφευκτα τις αδυναμίες σε αυτά τα πρότυπα. Ο προφανέστερος κίνδυνος είναι ότι η προβλεφθείσα απόδοση του σημείου σχεδίου έχει πιθανώς υπερεκτιμηθεί. Στα παραδείγματα που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο, κάθε σειρά πτερυγίων λειτουργεί ακριβώς στον ελάχιστο όριο απωλειών της σε όλες τις ρευματικές επιφάνειες. Αυτό το σύστημα σχεδιασμού πρέπει να παρέχει ένα πολύ καλό σχέδιο, αλλά πιθανώς όχι τόσο καλό όσο θα προκύψει από την ανάλυση της απόδοσης. Πράγματι, οι πεπειραμένοι αεροδυναμικοί σχεδιαστές στροβιλομηχανών γνωρίζουν αρκετά τον κίνδυνο που περιλαμβάνεται σχεδιάζοντας απευθείας με την ανάλυση απόδοσης που θα χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει το σχέδιο. Ο συμπιεστής αξονικής ροής είναι κάπως μοναδικός δεδομένου ότι είναι μάλλον εύκολο να μετατραπεί μια ανάλυση απόδοσης σε ένα σύστημα σχεδιασμού του τύπου που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο. Τα ουσιαστικά οφέλη παρεχόμενα βεβαίως δικαιολογούν να εκμεταλλευτούν αυτήν την ευκαιρία, αλλά σίγουρα απαιτούν την ιδιαίτερη κρίση του σχεδιαστή για να διατηρήσουν τις ρεαλιστικές προσδοκίες για το σχέδιο που θα προκύψει.



ΣΧΗΜΑ 2-22 Τυπική πλάγια όψη των πτερυγίων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΜΕΡΙΚΩΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΔΙΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός και η ανάλυση των πολυβάθμιων συμπίεστων αξονικής ροής είναι συνήθως βασισμένοι στα εμπειρικά μοντέλα πτώσης της απόδοσης. Αν και αυτή η προσέγγιση είναι ικανοποιητική για τις περισσότερες εφαρμογές, οι σχεδιαστές απαιτούν περιστασιακά την υποστήριξη που προσφέρεται από τις πιο θεμελιώδεις αναλύσεις της εσωτερικής ροής. Όταν μια συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτεί μια σειρά πτερυγίων σε συνθήκες πιο ακραίες από τις συνηθισμένες, η συμπληρωματική ανάλυση μπορεί να αυξήσει πολύ την εμπιστοσύνη του σχεδιαστή ή ίσως να αποτρέψει μια κακή απόφαση. Στην περίπτωση των βιομηχανικών συμπίεστων αξονικής ροής, αυτό συνήθως αφορά το επίπεδο του αριθμού Mach στην είσοδο των σειρών των πτερυγίων. Ο σχεδιαστής βιομηχανικών συμπίεστων έχει συνήθως διαθέσιμες έναν αριθμό από χωριστές γεωμετρικές κλίμακες ή μέγεθος πλαισίων. Εάν μια συγκεκριμένη εφαρμογή υπερβαίνει ελαφρώς το ανώτερο όριο της ικανότητας ροής για ένα μέγεθος πλαισίου, ο σχεδιαστής πρέπει είτε να δεχτεί κάπως υψηλότερα επίπεδα του αριθμού Mach είτε να επιλέξει ένα μεγαλύτερο μέγεθος πλαισίου με μια ουσιαστική αύξηση στο κόστος. Εναλλακτικά, τα μεταβατικά τμήματα των πτερυγίων όπως τα πτερύγια διπλού-κυκλικού-τόξου μπορεί να εξεταστούν. Συνήθως αυτό περιλαμβάνει επίσης το αυξανόμενο κόστος και μπορεί να είναι μη ελκυστικός όσον αφορά την κατασκευαστική του ακεραιότητα. Ακόμα και όταν η εφαρμογή είναι σύμφωνη με τα φυσιολογικά όρια της ικανότητας ροής ενός μεγέθους πλαισίου, ένα ασυνήθιστο ρευστό λειτουργίας ή μια απαραίτητη ταχύτητα περιστροφής μπορεί να οδηγήσει τα επίπεδα του αριθμού Mach πέρα από τις γνώσεις του σχεδιαστή. Σε εκείνες τις περιπτώσεις, οι σχεδιαστές χρειάζονται μια πιο θεμελιώδη ανάλυση της εσωτερικής ροής για να αξιολογήσουν καλύτερα τις πιθανές επιπτώσεις των υψηλών επιπέδων του αριθμού Mach.

Αυτές οι αναλύσεις ροής από πτερύγιο σε πτερύγιο μπορούν να παρέχουν την επιθυμητή λεπτομερή αξιολόγηση, αλλά όλες τους απαιτούν η γεωμετρία της επιφάνειας των ρευμάτων και το πάχος των φύλλων των ρευμάτων να διευκρινίζονται με κάποιο τρόπο. Μια κατά προσέγγιση ανάλυση μπορεί να διεξαχθεί χρησιμοποιώντας τη γεωμετρία των φύλλων των ρευμάτων πριν και μετά από τις σειρές των πτερυγίων από τη μεσημβρινή ανάλυση δια

μέσου της ροής, υποθέτοντας μια γραμμική διακύμανση μεταξύ εκείνων των σταθμών. Αυτή είναι βεβαίως η γρηγορότερη και απλούστερη προσέγγιση και συχνά μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική.

Εναλλακτικά, μια ακριβέστερη ανάλυση μπορεί να εξαχθεί χρησιμοποιώντας την τεχνική της μερικός τρισδιάστατης ανάλυσης της ροής. Αυτή είναι μια πολύ αποδοτική τεχνική ανάλυσης που παρέχει μια λογική προσέγγιση στον τρισδιάστατο πεδίο ροής δια μέσω μιας σειράς πτερυγίων. Αρχικά προτεινόμενη από τον Wu (1952), αυτή η τεχνική στηρίζεται στην επίλυση της δισδιάστατης ροής στις πτερύγιο προς πτερύγιο επιφάνειες ρευμάτων και στην επιφάνεια ρευμάτων πλήμνης προς κέλυφος, με την αλληλεπίδραση μεταξύ τους έως ότου είναι σύμφωνοι ο ένας με τον άλλον. Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει μια μερικώς τρισδιάστατη ανάλυση της ροής κατάλληλη για αυτόν τον σκοπό. Αυτή η ανάλυση αναπτύχθηκε αρχικά για τους φυγοκεντρικούς συμπιεστές (Aungier, 2000), όπου διαδραματίζει έναν ουσιαστικό ρόλο στο αεροδυναμικό σχεδιασμό των στροφείων. Επεκτάθηκε στη συνέχεια να αντιμετωπιστεί την αυθαίρετη τρισδιάστατη γεωμετρία των πτερυγίων για την πρόσθετη ευελιξία στο σχέδιο των φυγοκεντρικών στροφείων. Αυτή η επέκταση κατέστησε πιθανή τη χρησιμοποίηση της ανάλυσης απευθείας για τις σειρές των πτερυγίων των συμπιεστών αξονικής ροής.

Η μόνη διαφορετική επέκταση που προστίθεται για τους συμπιεστές αξονικής ροής είναι ο όρος για την αυτόματη παραγωγή της λεπτομερούς γεωμετρίας των πτερυγίων για όλα τα τυποποιημένα προφίλ των πτερυγίων. Αυτό επιτρέπει τον πλήρη προσδιορισμό των πτερυγίων αναφορικά με ακτινική διακύμανση των παραμέτρων των βασικών τμημάτων των πτερυγίων (π.χ., θ , γ , c και t_b/c). Η ίδια ικανότητα ενσωματώνεται στις διάφορες αναλύσεις ροής βαθμίδα προς βαθμίδα για ένα ενιαίο τμήμα πτερυγίων. Ως εκ τούτου είναι σχετικά απλό να παρέχει την ικανότητα να δημιουργηθούν αυτόματα τα αρχεία εισαγωγής είτε για μια απλή ανάλυση βαθμίδα προς βαθμίδα σε μια ενιαία επιφάνεια ρευμάτων είτε μια μερικώς τρισδιάστατη ανάλυση ροής για μια μετάβαση των πτερυγίων κατευθείαν από μια ολοκληρωμένη ανάλυση της μεσημβρινής κίνησης.

ΟΡΟΛΟΓΙΑ

B^*	= παράγοντας απόσβεσης της επιφάνειας επανατοποθέτησης του ρεύματος
b	= πάχος ρευστού στρώματος
C	= απόλυτη ταχύτητα
D	= παράγοντας απόσβεσης της καμπυλότητας της επιφάνειας ρεύματος
E	= συνάρτηση διεύθυνσης
f	= δύναμη πτερυγίου
g	= $2pr \cos b' / Z$
H	= ολική ενθαλπία
H_1	= μεσημβρινός παράγοντας μορφής = d_1^* / q_{11}
H_2	= παράγοντας εφαπτομενικής μορφής οριακού στρώματος = d_2^* / q_{22}
h	= στατική ενθαλπία
I	= ροθαλπία
K_B	= παράγοντας παρεμπόδισης των πτερυγίων
M	= αριθμός Mach
m	= μεσημβρινή συντεταγμένη
m	= ρυθμός παροχής μάζας
n	= κανονική συντεταγμένη
P	= πίεση
q	= δυναμική ανύψωση εισόδου
r	= ακτίνα
s	= εντροπία
T	= θερμοκρασία
t_b	= πάχος πτερυγίου
W	= σχετική ταχύτητα προς τη σειρά των πτερυγίων
y	= απόσταση κατά μήκος ημικανονικού
Z	= αριθμός των πτερυγίων
z	= αξονική συντεταγμένη
β	= γωνία ροής
ΔA	= περιοχή ρευματικών στρωμάτων
Δv	= αύξηση στην v λόγω οδηγού πτερυγίου
δ	= πάχος οριακού στρώματος
δ_c	= διάκενο πτερυγίου
d_1^*	= μεσημβρινό πάχος μετατοπίσεως του οριακού στρώματος
d_2^*	= εφαπτομενικό πάχος μετατοπίσεως του οριακού στρώματος
ε	= γωνία μεταξύ ημικανονικού και αληθώς κανονικού
η	= αδιάστατη συντεταγμένη της εφαπτομένης
θ	= συντεταγμένη της εφαπτομένης και πάχος ορμής ροής

ΟΡΟΛΟΓΙΑ

θ_{11}	=	μεσημβρινό πάχος ορμής
θ_{22}	=	εφαπτομενικό πάχος ορμής
κ	=	γωνία καμπυλότητας με μεσημβρινή κατεύθυνση
κ_m	=	καμπυλότητα της ρευματικής επιφάνειας
λ	=	γωνία ημικανονική (σχήμα 3-3)
ν	=	πάχος ελάτωσης δύναμης πτερυγίου
ρ	=	πυκνότητα του ρευστού
φ	=	γωνία της ρευματικής επιφάνειας με αξονική κατεύθυνση
ω	=	γωνιακή ταχύτητα, radians/sec

Δείκτες

h	=	παράμετρος στο περίγραμμα της πλήμνης
m	=	μεσημβρινή συνιστώσα
s	=	παράμετρος στο περίγραμμα του κελύφους
θ	=	εφαπτομενική συνιστώσα

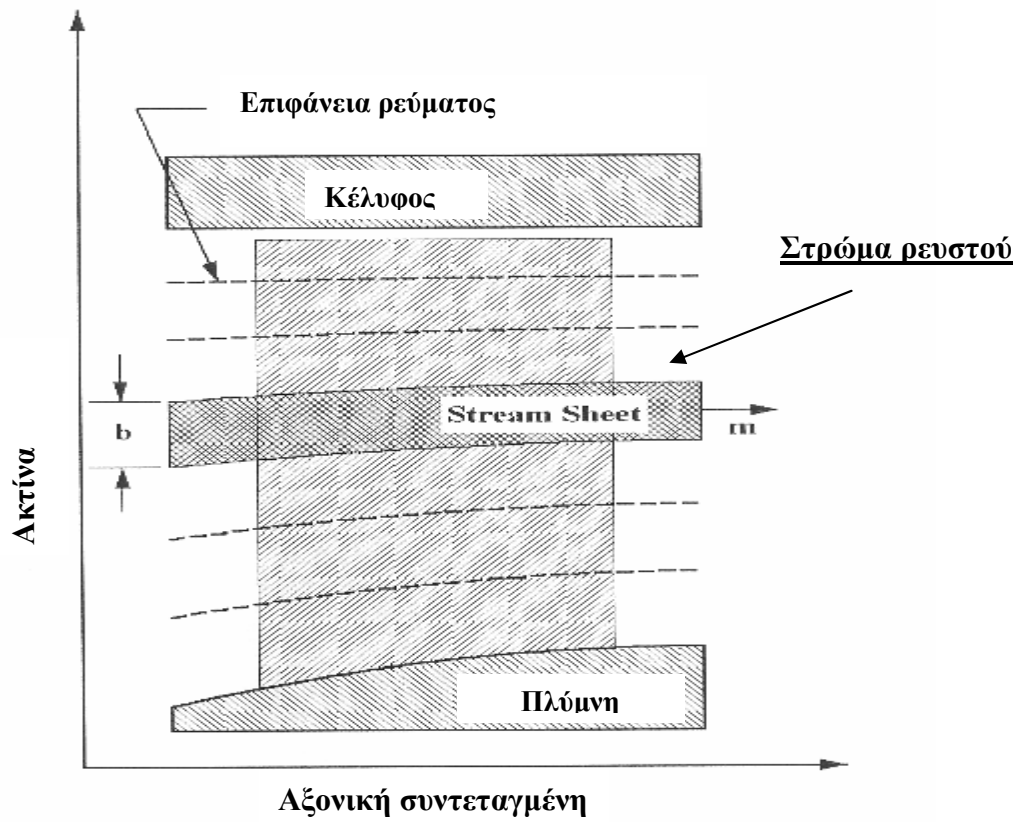
Εκθέτες

$\acute{\prime}$	=	παράμετρος στην περιστρεφόμενη συντεταγμένη
$-$	=	τιμή μέσης μάζας

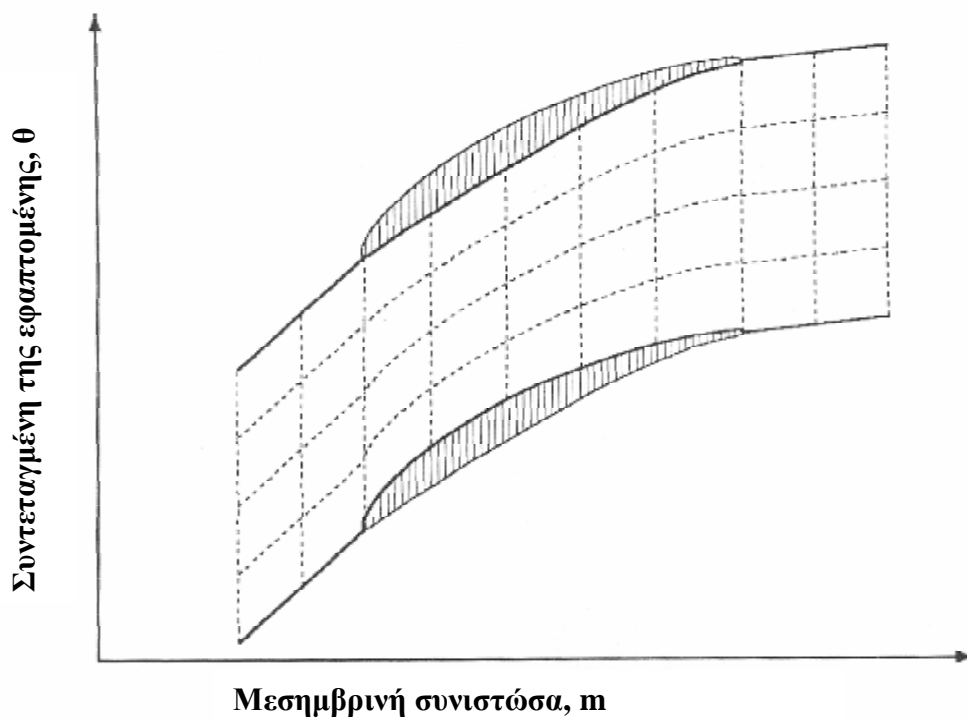
3.1 ΜΕΡΙΚΩΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ

Το σχήμα 3-1 παρουσιάζει μια μεσημβρινή άποψη επιπέδου μιας σειράς πτερυγίων για να αναλυθεί. Η δακτυλιοειδής δίοδος διαιρείται σε μια σειρά ρευματικών στρωμάτων, που χωρίζεται από τις επιφάνειες των ρευμάτων. Όλα τα ρευματικά στρώματα καθορίζονται για να περιέχουν ίση ροή μάζας. Για απλοποίηση, υποθέτεται ότι όλες οι επιφάνειες ρευμάτων είναι αξοσυμμετρικές, δηλ., η συστροφή των ρευματικών στρωμάτων θα αγνοηθούν. Η μεσημβρινή συντεταγμένη, m , μετριέται κατά μήκος ενός ρευματικού στρώματος της μέσης επιφάνειας, και το πάχος του ρευματικού στρώματος καθορίζεται ως b . Εάν η επιφάνεια των ρευμάτων και η κατανομή του b είναι γνωστές, μια πλήρης δισδιάστατη ανάλυση πτερύγιο προς πτερύγιο της ροής μπορεί να διεξαχθεί. Το σχήμα 3-2 παρουσιάζει μια χαρακτηριστική άποψη της επιφάνειας πτερύγιο προς πτερύγιο για να επεξηγήσει την περιοχή λύσης για μια από τις αναλύσεις της ροής πτερύγιο προς πτερύγιο που διεξάγεται. Είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί μόνο η συγκεκριμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται. Η καλύτερη επιλογή για την μερικώς τρισδιάστατη ανάλυση της ροής είναι η ανάλυση της γραμμικής πιθανής ροής, συμπεριλαμβανομένης της επέκτασης στην μεταβατική ροή. Αυτή η μέθοδος προσφέρει εξαιρετική ταχύτητα υπολογισμού και αξιοπιστία καθώς επίσης και την άριστη ακρίβεια πρόβλεψης για τις σειρές πτερυγίων των συμπιεστών. Πράγματι, η δισδιάστατη ανάλυση της ροής πτερύγιο προς πτερύγιο προσφέρει κάπως καλύτερη ακρίβεια. Αλλά είναι ακόμα δυνατό να εκμεταλλευτούν εκείνες οι γενικότερες αναλύσεις όταν απαιτούνται. Η γραμμική μέθοδος είναι αρκετά επαρκής για να παρέχει υποστήριξη στην ανάλυση της ροής από την πλήρη στο κέλυφος, έτσι ώστε η ακριβής θέσει επιφάνειας ρευμάτων και το πάχος του στρώματος των ρευμάτων να λαμβάνονται. Μόλις η μερικώς τρισδιάστατη ανάλυση της ροής ολοκληρωθεί, όλα τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για τις δισδιάστατες αναλύσεις της ροής πτερύγιο προς πτερύγιο είναι διαθέσιμα. Είναι αρκετά απλό να ληφθούν μέτρα για να παραχθούν τα αρχεία εισαγωγής για εκείνες τις πιο ακριβείς μεθόδους για οποιαδήποτε ή όλες τις επιφάνειες των ρευμάτων που είναι μια αποδοτικότερη προσέγγιση από την ενσωμάτωση των ακριβέστερων μεθόδων κατευθείαν στην μερικώς τρισδιάστατη ανάλυση της ροής. Πράγματι, δεν είναι ασυνήθιστο για μια πλήρη μερικώς τρισδιάστατη ανάλυση της ροής να χρειάζεται σημαντικά λιγότερος χρόνος υπολογισμών από μια ανάλυση της ροής πτερύγιο προς πτερύγιο για το ίδιο πρόβλημα σε ένα ενιαίο στρώμα ρευμάτων από τις δισδιάστατες αναλύσεις της ροής πτερύγιο προς πτερύγιο.

Η ανάλυση της ροής από την πλήρη στο κέλυφος προβλέπει συνήθως τη μέση μεσημβρινή κίνηση στη δίοδο. Εναλλακτικά, το μεσημβρινό πεδίο ροής σε μια μέση επιφάνεια ρευμάτων πλήρους προς κέλυφος μερικές φορές είναι προβλεπόμενη. Η πρόβλεψη της μέσης κίνησης θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το



ΣΧΗΜΑ 3-1 Γεωμετρία της ροής πλήμνης προς κέλυφος

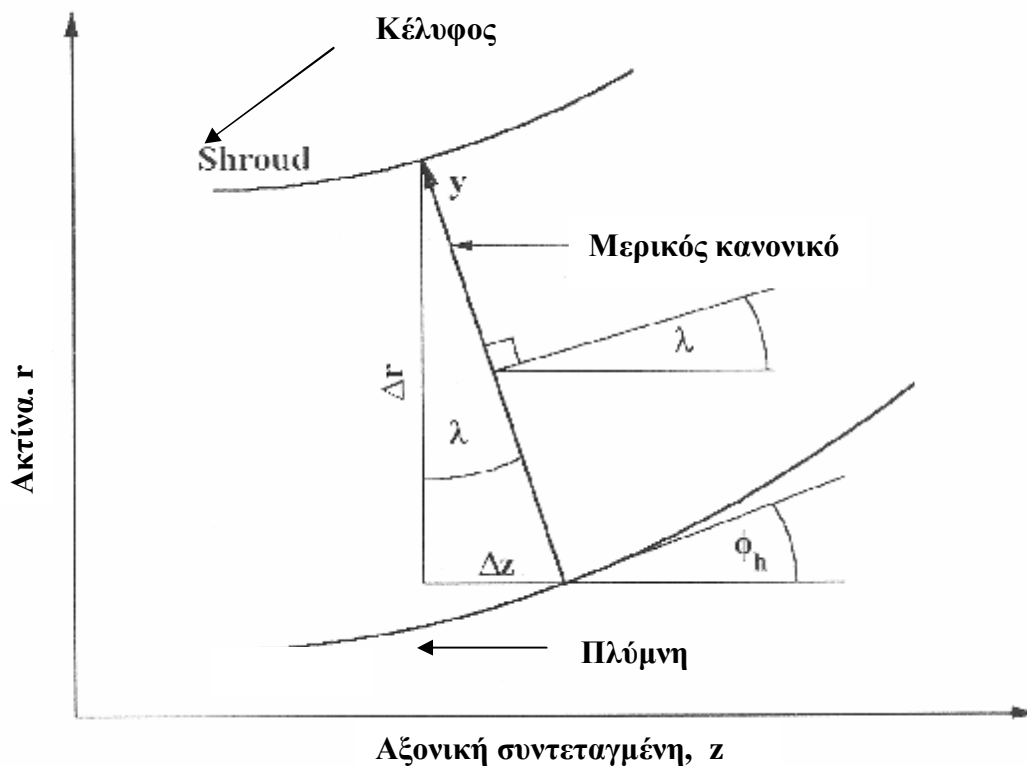


ΣΧΗΜΑ 3-2 Γεωμετρία της ροής πτερύγιο προς πτερύγιο

κεφάλαιο, δεδομένου ότι είναι πιο σύμφωνη με την υπόθεση των αξοσυμμετρικών πτερύγιο προς πτερύγιο επιφανειών ρευμάτων. Η ανάλυση της ροής πλήμνης προς κέλυφος είναι παρόμοια με τη ανάλυση της μεσημβρινής κίνησης, εκτός από το ότι η εξίσωση της επαπτόμενης ορμής δεν ικανοποιείται πλέον από τη διατήρηση της γωνιακής ορμής. Πράγματι, η κατανομή της γωνιακής ορμής μέσω της σειράς των πτερυγίων πρέπει να ληφθεί από τις αναλύσεις της ροής πτερύγιο προς πτερύγιο για όλες τις επιφάνειες ρευμάτων.

3.2 ΟΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΠΛΗΜΝΗΣ ΠΡΟΣ ΚΕΛΥΦΟΣ

Η ανάλυση της ροής πλήμνης προς κέλυφος οδήγησε στη χρησιμοποίηση του μερικώς ομαλού συστήματος συντεταγμένων για την ανάλυση της μεσημβρινής κίνησης. Η βασική ονοματολογία και η κατασκευή αυτού του συστήματος συντεταγμένων συνοψίζονται στις ακόλουθες εξισώσεις και στο σχήμα 3-3.



ΣΧΗΜΑ 3-3 Γεωμετρία μερικώς κανονική

$$\tan I = \frac{\Delta z}{\Delta r} = \frac{z_h - z_s}{r_s - r_h} \quad (3-1)$$

$$\sin f = \frac{\partial}{\partial m} \quad (3-2)$$

$$e = f - I \quad (3-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} = \frac{1}{\cos e} \left[\frac{\partial}{\partial y} - \sin e \frac{\partial}{\partial m} \right] \quad (3-4)$$

$$k_m = -\frac{\partial f}{\partial m} \quad (3-5)$$

Οι σχετικές εξισώσεις για την αδιαβατική ανιζώδης ροή αναπτύσσονται σε γενική μορφή σε ένα φυσικό σύστημα συντεταγμένων. Για την παρούσα εφαρμογή, οι παρακάτω εξισώσεις

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial r r W_m}{\partial m} + \frac{\partial r W_q}{\partial q} \right] + k_n r W_m = 0 \quad (3-6)$$

$$\frac{\partial I}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial t} + W_m \frac{\partial I}{\partial m} + \frac{W_q}{r} \frac{\partial I}{\partial q} = 0 \quad (3-7)$$

$$k_m W_m^2 + \frac{W_q}{r} \frac{\partial (r W_q + w r^2)}{\partial n} + W_m \frac{\partial W_m}{\partial n} = \frac{\partial I}{\partial n} - T \frac{\partial s}{\partial n} \quad (3-8)$$

ισχύουν αφότου απλοποιηθούν στην αμετάβλητη με το χρόνο μορφή τους. Θα ήταν βολικό να ικανοποιεί τη διατήρηση της μάζας στην αέρεια μορφή παρά να χρησιμοποιεί την εξίσωση (3-6). Η διατήρηση της μάζας κατά μήκος ενός ημικανονικού μπορεί να εκφραστεί από τον τύπο

$$\dot{m} = 2p \int_0^{y_s} K_B r r W_m \cos e dy \quad (3-9)$$

K_B είναι ο παράγοντας παρεμπόδισης των πτερυγίων, ο οποίος διορθώνει την περιοχή των ρευματικών στρωμάτων που είναι διαθέσιμη για την κίνηση για να αποτελέσει την παρεμπόδιση μετάλλων των πτερυγίων. Εάν η γωνία που διαμορφώνεται από μια εφαπτομένη στην καμπυλότητα των πτερυγίων όσον αφορά τη μεσημβρινή κατεύθυνση που δείχνεται από τα κ, K_B προκύπτει από

$$K_B = 1 - t_b Z(2pr \cos k) \quad (3-10)$$

Σύμφωνα με την ανάλυση ροής πτερύγιο προς πτερύγιο που χρησιμοποιείται, η ροθαλπία και η εντροπία υποτίθεται ότι ήταν σταθερές στις επιφάνειες των ρευμάτων, αλλά μπορούν να ποικίλουν στην ομαλή κατεύθυνση στις επιφάνειες των ρευμάτων. Χρησιμοποιώντας της εξισώσεις (3-7) και (3-8), αυτές οι υποθέσεις μπορούν να εκφραστούν από

$$\frac{\partial I}{\partial q} = \frac{\partial s}{\partial q} = 0 \quad (3-11)$$

$$\frac{\partial I}{\partial m} = \frac{\partial s}{\partial m} = 0 \quad (3-12)$$

$$k_m W_m^2 + \frac{W_q}{r} \frac{\partial(rW_q + wr^2)}{\partial n} + W_m \frac{\partial W_m}{\partial n} = \frac{\partial I}{\partial n} - T \frac{\partial s}{\partial n} \quad (3-13)$$

Η εξίσωση (3-13) μπορεί να λυθεί για το W_m εάν το W_θ , s και I είναι γνωστά σε όλες τις επιφάνειες των ρευμάτων. Τα I και το s μπορούν να προκύψουν μέσω των ορισμένων ανάντη ορίων, ακριβώς όπως έγινε για την ανάλυση της μεσημβρινής κίνησης. Οι εξισώσεις (3-11) και (3-12) παρέχουν τις τιμές για όλα τα άλλα σημεία στο πεδίο ροής. Η κατανομή του W_θ στις επιφάνειες των ρευμάτων πρέπει να ληφθεί από την ανάλυση ροής πτερύγιο προς πτερύγιο.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3-11) και $\frac{\partial W_q}{\partial t} - \frac{W_m}{r} \left[\frac{\partial W_m}{\partial q} - \frac{\partial(rW_q + wr^2)}{\partial m} \right] = T \frac{\partial s}{\partial q} - \frac{\partial I}{\partial q}$ προκύπτει

$$\frac{\partial(rW_q + wr^2)}{\partial m} = \frac{\partial W_m}{\partial q} \quad (3-14)$$

Η εξίσωση (3-14) είναι η κύρια εξίσωση ορμής που χρησιμοποιείται στην ανάλυση ροής πτερύγιο προς πτερύγιο. Σαφώς, μια ανάλυση ροής πλήμνης προς κέλυφος που περιορίζεται στις αξοσυμμετρικές επιφάνειες ρευμάτων μπορεί να ταιριάζει με μόνο μια ενιαία κατανομή του W_θ στο μεσημβρινό επίπεδο. Η λογικότερη επιλογή είναι να χρησιμοποιηθεί μια κατανομή της μέσης μάζας του W_θ που λαμβάνεται από τις αναλύσεις ροής πτερύγιο προς πτερύγιο στις διάφορες επιφάνειες ρευμάτων. Στην πραγματικότητα, η ανάλυση ροής πλήμνης προς κέλυφος θα παράγει ένα αξοσυμμετρικό πεδίο ροής που είναι σύμφωνο με την κατανομή της μέσης μάζας της γωνιακής ορμής που παράγεται από τις αναλύσεις ροής πτερύγιο προς πτερύγιο. Η εξίσωση (3-14) βασικά παραβλέπεται από αυτήν την κατά προσέγγιση πλήμνης προς κέλυφος ανάλυση για όλα τα σημεία μέσα σε μια δίοδο των πτερυγίων. Αυτή η εξίσωση μπορεί να ικανοποιηθεί για τα σημεία ανάντη και κατόντη της διόδου των

περυγίων, όπου απαιτείται η διατήρηση της μέσης μάζας της γωνιακής ορμής. Σε αυτήν την περίπτωση, η εξίσωση (3-14) μπορεί να γραφτεί όπως

$$\frac{\partial(rW_q + wr^2)}{\partial m} = \frac{\partial rC_q}{\partial m} = 0 \quad (3-15)$$

Αφού η γραμμική ανάλυση ροής περύγιο προς περύγιο ισχύει μόνο για τα σημεία μέσα στη δίοδο των περυγίων, η εξίσωση (3-15) απαιτείται για να επεξεργαστεί τη εξωτερική τα σημεία έξω από τη δίοδο των περυγίων. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις $W_q = C_q - wr$, (3-4), (3-12) και (3-13) προκύπτει η κανονική εξίσωση της ορμής στο μερικώς κανονικό σύστημα συντεταγμένων.

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_m}{\partial y} + \left[\kappa_m \cos \varepsilon - \frac{\sin \varepsilon}{W_m} \frac{\partial W_m}{\partial m} \right] W_m + \frac{W_\theta}{r W_m} \left[\frac{\partial r C_\theta}{\partial y} - \sin \varepsilon \frac{\partial r C_\theta}{\partial m} \right] \\ = \frac{1}{W_m} \left[\frac{\partial I}{\partial y} - T \frac{\partial s}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (3-16)$$

Για τα σημεία έξω από τη δίοδο των περυγίων όπου η εξίσωση (3-15) μπορεί να εφαρμοστεί, εύκολα παρατηρείται ότι η εξίσωση (3-16) είναι ίδια με την εξίσωση

$$W_m \frac{\partial W_m}{\partial y} + k_m W_m^2 \cos \varepsilon - W_m \sin \varepsilon \frac{\partial W_m}{\partial m} + \frac{W_q}{r} \frac{\partial (r C_q)}{\partial y} = \frac{\partial I}{\partial y} - T \frac{\partial s}{\partial y} \quad (3-17)$$

η οποία χρησιμοποιείται για την ανάλυση της μεσημβρινής κίνησης. Για τα σημεία μέσα στη δίοδο των περυγίων είναι καταλληλότερο να εκφραστεί η γωνιακή ορμή σε αντιστοιχία με τη σχετική γωνία ροής, σημειώνοντας ότι το $W_\theta = W_m \tan \beta'$. Αυτό παράγει

$$\begin{aligned} \left[\kappa_m \cos \varepsilon - \frac{\sin \varepsilon}{W_m \cos^2 \beta'} \frac{\partial W_m}{\partial m} + \frac{\tan \beta'}{r} \left(\frac{\partial r \tan \beta'}{\partial y} - \sin \varepsilon \frac{\partial r \tan \beta'}{\partial m} \right) \right] W_m \\ + \frac{1}{\cos^2 \beta'} \frac{\partial W_m}{\partial y} + 2 \omega \tan \beta' (\cos \lambda - \sin \phi \sin \varepsilon) = \frac{1}{W_m} \left[\frac{\partial I}{\partial y} - T \frac{\partial s}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (3-18)$$

Για τα σημεία έξω από τη δίοδο των περυγίων όπου ισχύει η εξίσωση (3-15), η εξίσωση (3-18) πρέπει να αναχθεί στη μορφή που χρησιμοποιείται στην ανάλυση της μεσημβρινής κίνησης, δηλ., στην εξίσωση (3-19). Εισάγοντας $W_\theta = W_m \tan \beta'$ στην εξίσωση (3-12), εύκολα προκύπτει ο τύπος

$$\begin{aligned} \frac{W_m}{\cos^2 b'} \frac{\partial W_m}{\partial y} + k_m W_m^2 \cos e - W_m \sin e \frac{\partial W_m}{\partial m} + \frac{W_m^2 \tan b'}{r} \frac{\partial (r \tan b')}{\partial y} \\ + 2W_m w \tan b' \cos l = \frac{\partial I}{\partial y} - T \frac{\partial s}{\partial y} \end{aligned} \quad (3-19)$$

$$\frac{W_m \tan b'}{r} \frac{\partial r \tan b'}{\partial m} = -\tan^2 b' \frac{\partial W_m}{\partial m} - 2w \sin f \tan b' \quad (3-20)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (3-20) στην (3-18) προκύπτει η εξίσωση (3-19). Ενώ οι δύο μορφές είναι από μαθηματική άποψη ισοδύναμες, κάποια προσοχή συστήνεται κατά τη διατύπωση μιας αριθμητικής ανάλυσης. Οι εξισώσεις (3-16) και (3-18) είναι απαραίτητες όταν η κατανομή της γωνιακής ορμής παρέχεται επιφανειακά από τις αναλύσεις ροής πτερύγιο προς πτερύγιο. Αλλά έξω από τη δίοδο των πτερυγίων όπου ισχύει η εξίσωση (3-15), η χρήση των εξισώσεων (3-17) και (3-19) είναι πιθανό να οδηγήσει σε μια ακριβέστερη αριθμητική λύση.

3.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της ορμής μπορούν να ολοκληρωθούν αριθμητικά για μια συγκεκριμένη γεωμετρία της επιφάνειας των ρευμάτων και η κατανομή της γωνίας ροής μέσω της διόδου των πτερυγίων. Η εξίσωση ορμής γράφεται στη μορφή

$$\frac{\partial W_m}{\partial y} = f_1(y)W_m + f_2(y) + \frac{f_3(y)}{W_m} \quad (3-21)$$

όπου f_1 , f_2 και f_3 είναι γνωστές λειτουργίες του y . Για ημικανονικό μέσα στη δίοδο των πτερυγίων,

$$f_1(y) = \cos^2 b' \left[-k_m \cos e - \frac{\tan b'}{r} \left(\frac{\partial r \tan b'}{\partial y} - \sin e \frac{\partial r \tan b'}{\partial m} \right) \right] + \frac{\sin e}{W_m} \frac{\partial W_m}{\partial m} \quad (3-22)$$

$$f_2(y) = -2w \cos b' \sin b' [\cos l - \sin f \sin e] \quad (3-23)$$

$$f_3(y) = \cos^2 b' \left[\frac{\partial I}{\partial y} - T \frac{\partial s}{\partial y} \right] \quad (3-24)$$

Για ημικανονικό ανάντη και κατάντη της διόδου των πτερυγίων,

$$f_1(y) = -k_m \cos e + \frac{\sin e}{W_m} \frac{\partial W_m}{\partial m} \quad (3-25)$$

$$f_2(y) = 0 \quad (3-26)$$

$$f_3(y) = \frac{\partial I}{\partial y} - T \frac{\partial s}{\partial y} - \frac{W_q}{r} \frac{\partial (rC_q)}{\partial y} \quad (3-27)$$

Στο ανάντη όριο, είναι συνήθως πιο βολικό να παρέχεται η συνθήκη του ορίου στο αμετάβλητο πλαίσιο της αναφοράς, αναφορικά με της κατανομές των H , s και είτε του C_θ ή του β . Η πρώτη περίπτωση διαμορφώνεται εύκολα με την αντικατάσταση του C_θ για το W_θ και του H για το I στη εξίσωση (3-27). Όταν η κατανομή του β είναι γνωστή, οι εξισώσεις (2-28) μέσω (3-29),

$$f_1(y) = \cos^2 b \left[-k_m \cos e - \frac{\tan b}{r} \frac{\partial (r \tan b)}{\partial y} + \frac{\sin e}{W_m} \frac{\partial W_m}{\partial m} \right] \quad (3-28)$$

$$f_3(y) = \cos^2 b \left[\frac{\partial I}{\partial y} - T \frac{\partial s}{\partial y} \right] \quad (3-29)$$

στο αμετάβλητο πλαίσιο της αναφοράς, παράγουν

$$f_1(y) = \cos^2 b \left[-k_m \cos e - \frac{\tan b}{r} \frac{\partial (r \tan b)}{\partial y} + \frac{\sin e}{W_m} \frac{\partial W_m}{\partial m} \right] \quad (3-30)$$

$$f_2(y) = 0 \quad (3-31)$$

$$f_3(y) = \cos^2 b \left[\frac{\partial H}{\partial y} - T \frac{\partial s}{\partial y} \right] \quad (3-32)$$

Για τη διευκρινισμένη γεωμετρία της επιφάνειας των ρευμάτων και τις κατανομές της γωνίας ροής μέσω της διόδου των πτερυγίων, τα f_1 , f_2 και f_3 θα αξιολογηθούν σε όλα τα σημεία του συστήματος πριν ενσωματωθούν στην εξίσωση της ορμής. Αυτή η διαδικασία είναι απλή με εξαίρεση τη μεσημβρινή κλίση του W_m στο f_1 , η οποία εξαρτάται από τη λύση. Η συνηθισμένη πρακτική είναι να χρησιμοποιεί τιμές του W_m από την προηγούμενη επανάληψη για να αξιολογήσει αυτήν την κλίση. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει στα αριθμητικά προβλήματα σταθερότητας σε περιπτώσεις όπου το W_m αλλάζει

γρήγορα μεταξύ των επαναλήψεων. Δεδομένου ότι το W_m εμφανίζεται στον παρονομαστή, μπορεί επίσης να παραγάγει ασυνήθιστα αποτελέσματα όταν το W_m πλησιάζει στο μηδέν. Ο Aungier (2000) προτείνει μια καλύτερη προσέγγιση βασισμένη στην απλή διατήρηση της μάζας σε όλα τα στρώματα των ρευμάτων. Εάν η τοπική περιοχή κίνησης ενός στρώματος ρευμάτων υποδεικνύεται από ΔA , η διατήρηση της μάζας στο στρώμα των ρευμάτων απαιτεί

$$\Delta \dot{m} = r W_m \Delta A \quad (3-33)$$

Μετά η μεσημβρινή κλίση στο f_1 μπορεί να αντικατασταθεί από

$$\frac{1}{W} \frac{\partial W_m}{\partial m} = - \frac{1}{r \Delta A} \frac{\partial r \Delta A}{\partial m} \quad (3-34)$$

Αυτό εκφράζει την κλίση σε αντιστοιχία με τη γεωμετρία του στρώματος των ρευμάτων και την πυκνότητα του αερίου. Η γεωμετρία του στρώματος των ρευμάτων είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ολοκλήρωσης των εξισώσεων διατήρησης της μάζας και της ορμής. Είναι ακόμα απαραίτητο να βασιστούμε στις τιμές της πυκνότητας του αερίου από την προηγούμενη επανάληψη, αλλά η πυκνότητα κανονικά δεν ποικίλλει πολύ μεταξύ των διαδοχικών επαναλήψεων. Δεδομένου ότι ο λόγος της μάζας της ροής σε όλα τα στρώματα των ρευμάτων είναι σταθερός, ο κίνδυνος των ασυνήθιστων αποτελεσμάτων εξουδετερώνεται. Ο Aungier (2000) χρησιμοποιεί την ίδια προσέγγιση για να αφαιρέσει την ιδιομορφία στην εξίσωση (3-21) όταν το W_m πλησιάζει στο μηδέν με τον καθορισμό μιας νέας λειτουργίας, f_4 , όπως

$$f_4(y) = f_2(y) + f_3(y) \frac{r \Delta A}{\Delta \dot{m}} \quad (3-35)$$

Έπειτα η εξίσωση (3-21) μπορεί να γραφτεί ως εξής

$$\frac{\partial W_m}{\partial y} = f_1(y) W_m + f_4(y) \quad (3-36)$$

Η λύση αυτής της γραμμική διαφορικής εξίσωσης

$$W_m(y) = W_m(0) F(y) + F(y) \int_0^y \frac{f_4(y)}{F(y)} dy \quad (3-37)$$

όπου

$$F(y) = \exp \left[\int_0^y f_1(y) dy \right] \quad (3-38)$$

Η μεσημβρινή ταχύτητα στο περίγραμμα των πλημνών, $W_m(0)$, είναι η σταθερά της ολοκλήρωσης. Καθορίζεται από τη διατήρηση της μάζας μέσω της εξίσωσης (3-9). Οι εξισώσεις (3-36) και (3-9) λύνονται σε ένα αριθμητικό σχέδιο επανάληψης, βελτιώνοντας διαδοχικά τον υπολογισμό του $W_m(0)$ έως ότου η μάζα διατηρείται και η εξίσωση της ορμής ικανοποιείται. Αυτό απαιτεί τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων όπως το ρ , χρησιμοποιώντας μια κατάλληλη εξίσωση από το σύνολο των συνθηκών. Σε οποιοδήποτε σημείο, η σχετική ολική ενθαλπία δίνεται από την εξίσωση

$$H' = H - wrC_q + \frac{1}{2}(wr)^2 = I + \frac{1}{2}(wr)^2 \quad (3-39)$$

$$H' = I + \frac{1}{2}(rw)^2 \quad (3-40)$$

Η τοπική στατική ενθαλπία δίνεται από τον τύπο

$$h = H' - \frac{1}{2}W^2 \quad (3-41)$$

Κατόπιν οι στατικοί θερμοδυναμικοί όροι υπολογίζονται από τους σχετικούς ολικούς θερμοδυναμικούς όρους για την μεταβολή στην ενθαλπία, $(h - H)$, κρατώντας σταθερή την εντροπία. Η εντροπία και η ροθαλπία σε κάθε επιφάνεια ρευμάτων είναι γνωστή από τις καθορισμένες συνθήκες των ανάντη ορίων. Ομοίως, η γωνιακή ορμή, rC_θ , ανάντη του πτερυγίου σε κάθε επιφάνεια ρευμάτων είναι γνωστή από τις καθορισμένες συνθήκες των ανάντη ορίων. Η γωνιακή ορμή ανάντη του πτερυγίου σε κάθε επιφάνεια ρευμάτων λαμβάνεται από τη λύση στο ημικανονικό πίπτον άκρο του πτερυγίου.

3.4 ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ

Μετά από την ολοκλήρωση των εξισώσεων διατήρησης της μάζας και της ορμής, το νέο πεδίο ροής δεδομένων δεν είναι γενικά σύμφωνο με την εδρεύουσα γεωμετρία των ρευματικών στρωμάτων. Η σωστή γεωμετρία των ρευματικών στρωμάτων μπορεί να υπολογιστεί με την ολοκλήρωση της εξίσωσης (12-6) δια μέσου της διόδου σε κάθε ημικανονικό και την παρεμβολή για τις νέες θέσεις των ρευματικών στρωμάτων έτσι ώστε όλα τα ρευματικά στρώματα να περιέχουν ίδιο λόγο μάζας ροής. Στην πράξη, οι αρκετά περίπλοκες αριθμητικές διαδικασίες απόσβεσης απαιτούνται για να αποφευχθούν τα αριθμητικά προβλήματα αστάθειας. Αυτός ο συγγραφέας χρησιμοποιεί την αριθμητική διαδικασία απόσβεσης που προτείνεται από τον

Novak (1973). Για τα ημικανονικά έξω από τις διόδους των πτερυγίων ο Novak συστήνει

$$\frac{1}{F} = 1 + \frac{(1 - M'^2)(\Delta y)^2}{B^*(\Delta m)^2} \quad (3-42)$$

Το F είναι το κλάσμα της απόστασης μεταξύ των νέων και παλαιών θέσεων των ρευματικών στρωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν πραγματικά για να επανατοποθετήσουν τα ρευματικά στρώματα, το Δy είναι το μήκος πλήμνης προς κέλυφος ημικανονικά, το Δm είναι το ελάχιστο μεσημβρινό διάστημα μεταξύ των ημικανονικά, το M_m είναι ο μεσημβρινός αριθμός Mach και το B^* είναι μια εμπειρική σταθερά. Για τα ημικανονικά μέσα στη δίοδο των πτερυγίων, ο Novak προτείνει

$$\frac{1}{F} = 1 + \frac{(1 - M'^2)(\cos b' \Delta y)^2}{B^*(\Delta m)^2} \quad (3-43)$$

Αυτή η διαδικασία απόσβεσης έχει βρεθεί ότι είναι αρκετά αποτελεσματική εφ' όσον τα M_m και M' περιορίζονται για να είναι όχι μεγαλύτερα από 0.9. Οι τιμές του B^* που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως στο πεδίο 8 έως 16, αλλά η αριθμητική διαδικασία πρέπει να προσαρμόσει το B^* αυτόματα στηριζόμενο στο εάν τα λάθη θέσης των επιφανειακών ρευμάτων αυξάνονται ή μειώνονται στις διαδοχικές επαναλήψεις.

3.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΠΛΗΜΝΗΣ ΠΡΟΣ ΚΕΛΥΦΟΣ

Για να αρχίσει η λύση, μια αρχική υπόθεση θα πρέπει να παρασχεθεί για όλο το πεδίο ροής δεδομένων που χρησιμοποιείται στη λύση πλήμνης προς κέλυφος. Δεδομένου ότι κανένα αποτέλεσμα της ανάλυσης ροής πλήμνης προς κέλυφος δεν είναι διαθέσιμο σε αυτό το σημείο, η αρχική υπόθεση πρέπει να περιλάβει έναν κατά προσέγγιση καθορισμό πτερύγιο προς πτερύγιο της ροής των πτερυγίων. Αυτός ο συγγραφέας χρησιμοποιεί την ακόλουθη διαδικασία για να αρχικοποιήσει το πεδίο ροής δεδομένων:

- Οι επιφάνειες ρευμάτων τοποθετούνται έτσι ώστε όλα τα ρευματικά στρώματα να περιέχουν ίση περιοχή κίνησης σε κάθε μια μερικώς κανονική.
- Η εντροπία και ροθαλπία υπολογίζεται για όλες τις επιφάνειες ρευμάτων από τις συνθήκες του ανάντη ορίου.

- Η μεσημβρινή ταχύτητα υπολογίζεται από την τοπική διατήρηση της μάζας υποθέτοντας ότι η τοπική πυκνότητα του αερίου είναι ίση με τη σχετική ολική πυκνότητα.
- Το C_θ ανάντη από το πτερύγιο λαμβάνεται από τη διατήρηση της γωνιακής ορμής, εξίσωση (3-15), χρησιμοποιώντας τις συνθήκες του ανάντη ορίου. Αυτό περιλαμβάνει την μερικός κανονική αρχική ακμή των πτερυγίων.
- Το πτερύγιο υποτίθεται ότι παρείχε τέλεια καθοδήγηση στη ροή πάνω από το τελευταίο 85% του μήκους της διόδου του πτερυγίου βασισμένο στη γωνία καμπυλότητας του πτερυγίου, κ.
- Το C_θ κατάντη του πτερυγίου λαμβάνεται από τη διατήρηση της γωνιακής ορμής χρησιμοποιώντας την τιμή στο μερικός κανονικό πίπτον άκρο.
- Μια συνθήκη «ολίσθησης εισαγωγής» εφαρμόζεται πάνω από το πρώτο 15% του μήκους της διόδου του πτερυγίου βασισμένο στη σχετική γωνία ροής που υπολογίζεται στην μερικός κανονική αρχική ακμή και στη γωνία καμπυλότητας των πτερυγίων, κ, δηλ.,

$$\tan b' = \tan b'_{LE} + (\tan k - \tan b'_{LE}) [(m - m_{LE}) / (m_{TE} - m_{LE}) / 0.15]^2 \quad (3-44)$$

Αυτή η διαδικασία έναρξης είναι πολύ συντηρητική και ουσιαστικά θα αρχίσει επιτυχώς την ανάλυση. Αλλά η εξίσωση (12-36) είναι μάλλον μια αδέξια προσέγγιση για τη πτερύγιο προς πτερύγιο ροή που οδηγεί συχνά στη δύσκολη και αργή σύγκλιση της πλήμνης προς κέλυφος ανάλυσης της ροής. Μόλις επιτευχθούν τα πρώτα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής πτερύγιο προς πτερύγιο, η σύγκλιση της ανάλυσης πλήμνης προς κέλυφος βελτιώνεται εντυπωσιακά. Μια αποδοτικότερη γενική ανάλυση λαμβάνεται απλά χωρίς να απαιτείται σύγκλιση στην πρώτη προσπάθεια στην ανάλυση ροής πλήμνης προς κέλυφος. Και έτσι περιορίζει απλά τον αριθμό των επαναλήψεων στη ροή πλήμνης προς κέλυφος που κυβερνά τις εξισώσεις σε αυτήν την πρώτη προσπάθεια, για παράδειγμα 1-12, αγνοώντας την απαίτηση σύγκλισης. Αυτό είναι επαρκές για να λάβει ένα λογικό σχέδιο ρευματικών στρωμάτων για να τρέξει την πρώτη ανάλυση ροής πτερύγιο προς πτερύγιο.

Η γενική διαδικασία που χρησιμοποιείται για την ανάλυση ροής πλήμνης προς κέλυφος είναι μια άμεση εφαρμογή της γνωστής τεχνικής βελτιστοποίησης της κυρτότητας. Οι βασικές εξισώσεις διατήρησης λύνονται σε κάθε μερικός κανονική χρησιμοποιώντας τις διαδικασίες που περιγράφονται στην παράγραφο 3.3. Κατόπιν οι επιφάνειες των ρευμάτων επανατοποθετούνται όπως περιγράφονται στην παράγραφο 3.4. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου οι θέσεις της επιφάνειας των ρευμάτων και το πεδίο ροής δεδομένων συγκλίνει μέσα σε μια αποδεκτή ανοχή. Αυτή η διαδικασία είναι επαρκής για τα περισσότερα προβλήματα, αλλά ο Aungier (2000) προτείνει δύο απλές επεκτάσεις που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την αξιοπιστία της

ανάλυσης στο σημείο όπου μια λύση σύγκλισης σχεδόν πάντα λαμβάνεται : Πρώτα, η ανάλυση ροής πλήμνης προς κέλυφος πρέπει να ελέγξει για την στραγγαλισμένη ροή, και να περιορίσει το συνολικό ποσοστό ροής μάζας στην τιμή έμφραξης όταν εμφανίζεται. Στην ονοματολογία της παραγράφου 12.3, η ροή σε κάθε μερικός κανονικό είναι τοπικά πέρα από το όριο έμφραξης όταν

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial W_m(0)} \leq 0 \quad (3-45)$$

όπου \dot{m} είναι ο υπολογισμένος λόγος μαζικής ροής που λαμβάνεται από την εξίσωση (3-9). Όταν αυτός ο όρος αντιμετωπίζεται, η διαδικασία λύσης πρέπει να καθορίσει τον λόγο μαζικής ροής για τον οποίο αυτός ο όρος κλίσης είναι μηδέν, ο οποίος είναι η τιμή έμφραξης. Η συνθήκη έμφραξης της ροής της εξίσωσης (3-45) δεν είναι πάντα μια ένδειξη της αληθινής έμφραξης της ροής. Συχνά προκαλείται από τα αριθμητικά λάθη κατά τη διάρκεια των πρόωρων επαναλήψεων. Η λύση πρέπει να προχωρήσει χρησιμοποιώντας τον μεγαλύτερο αποδεκτό λόγο μαζικής ροής, αλλά μη υπερβαίνοντας τον καθορισμένο λόγο μαζικής ροής. Στην περίπτωση μιας προσωρινής έμφραξης λόγω του αριθμητικού λάθους, ο λόγος μαζικής ροής θα αυξηθεί βαθμιαία στην καθορισμένη τιμή καθώς η λύση συγκλίνει. Αυτή η απλή διαδικασία αποφεύγει την πιο κοινή αιτία της απόκλισης της λύσης. Μια άλλη κοινή αιτία της απόκλισης της λύσης είναι τα αριθμητικά λάθη στους όρους της βελτιωμένης κυρτότητας. Η αριθμητική απόσβεση της επανατοποθέτησης της επιφάνειας των ρευμάτων που δίνεται στην παράγραφο 12.4 αποφεύγει τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα. Αλλά αυτή η διαδικασία απόσβεσης είναι έμμεση όσον αφορά τους όρους κυρτότητας. Αυτός ο συγγραφέας επιβάλλει επίσης μια άμεση διαδικασία απόσβεσης που μπορεί να εκφραστεί όπως

$$k_m \rightarrow (k_{m_i} + Dk_{m_{i-1}})/(1 + D) \quad (3-46)$$

όπου οι δείκτες i και $i-1$ αναφέρονται στον αριθμό επανάληψης και το D είναι ένας παράγοντας απόσβεσης. Χαρακτηριστικά, το $D = 1$ χρησιμοποιείται, αλλά το D αυξάνεται εάν οι διαδοχικές επαναλήψεις παρουσιάζουν μια σημαντική αύξηση στα λάθη σύγκλισης.

3.6 ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΡΟΗΣ

Η μερικώς τρισδιάστατη ανάλυση της ροής λαμβάνεται συνδέοντας την ανάλυση ροής πλήμνης προς κέλυφος που περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο με τη γραμμική ανάλυση της ροής πτερύγιο προς πτερύγιο. Η ανάλυση ροής πλήμνης προς κέλυφος καθορίζει τη γεωμετρία των ρευματικών στρωμάτων και την αντίστοιχη γεωμετρία των πτερυγίων για την ανάλυση της ροής πτερύγιο προς πτερύγιο. Απαιτείται επίσης το πάχος των ρευματικών στρωμάτων, το

οποίο υπολογίζεται από τα στοιχεία ροής πλήμνης προς κέλυφος και τη καθορισμένη ροή μάζας των ρευματικών στρωμάτων με απλή διατήρηση της μάζας.

$$b = \Delta m / (2prK_B rW_m) \quad (3-47)$$

Ομοίως, όταν ολοκληρώνεται η ανάλυση ροής πτερύγιο προς πτερύγιο, τα αποτελέσματα είναι μαζικά υπολογισμένα δια μέσου της διόδου των πτερυγίων για να προσφέρουν την κατανομή της σχετικής γωνίας ροής που χρησιμοποιείται στην επόμενη ανάλυση ροής πλήμνης προς κέλυφος. Υπενθυμίζοντας ότι η αδιάστατη εφαπτομενική συντεταγμένη, η, που χρησιμοποιείται στην πτερύγιο προς πτερύγιο ανάλυση ροής ποικίλλει από 0 σε 1, τα στοιχεία που απαιτούνται δίνονται από

$$\bar{W}_m = \frac{\int_0^1 rbW_m^2 dh}{\int_0^1 rbW_m dh} \quad (3-48)$$

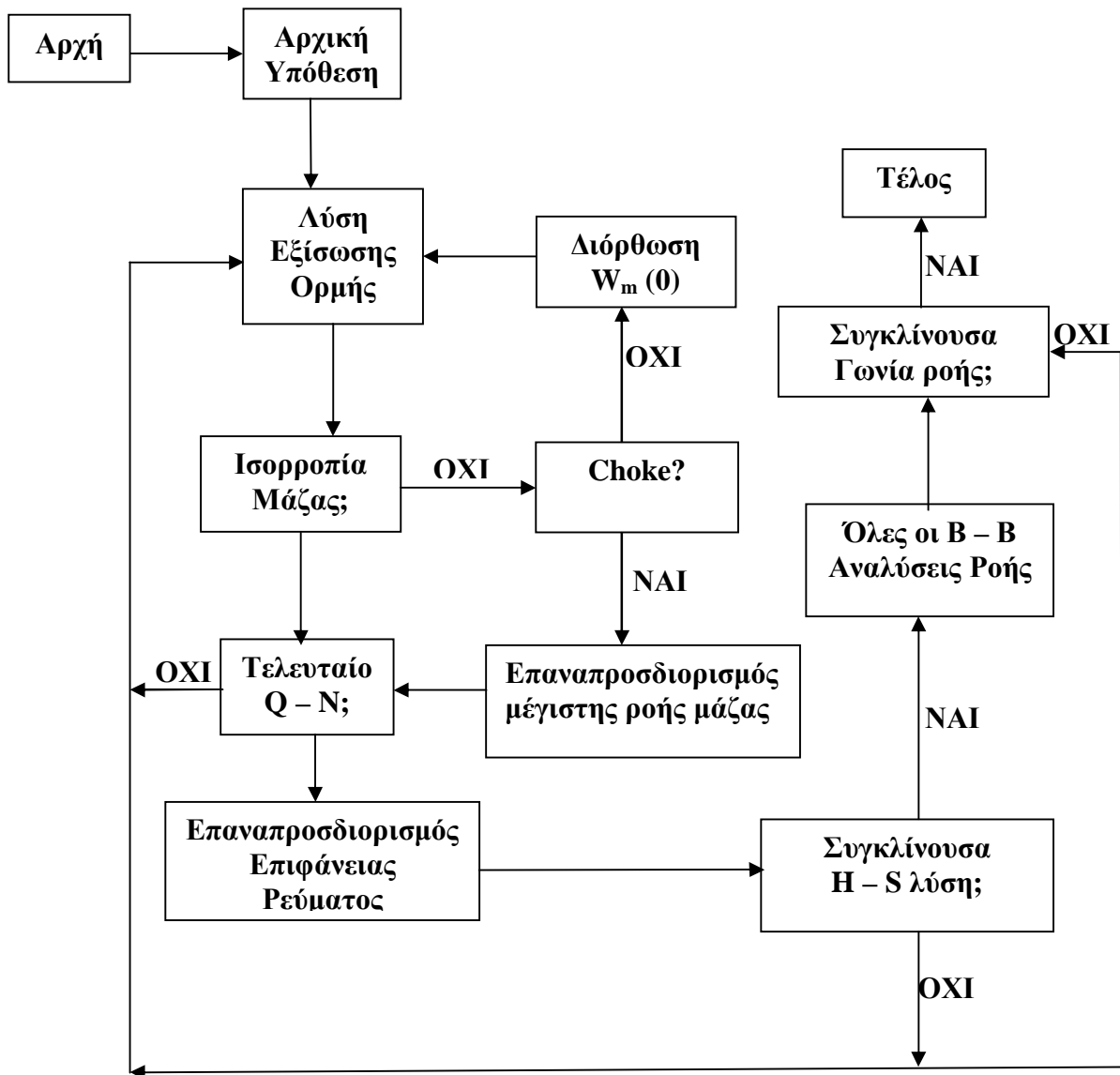
$$\bar{W}_q = \frac{\int_0^1 rbW_m W_q dh}{\int_0^1 rbW_m dh} \quad (3-49)$$

$$\tan b' = \bar{W}_q / \bar{W}_m \quad (3-50)$$

Εκτός από την απαίτηση της σύγκλισης των αναλύσεων των δύο συνιστωσών, απαιτείται ένα κριτήριο σύγκλισης για τη γενική μερικός τρισδιάστατη ανάλυση ροής. Αυτός ο συγγραφέας προϋποθέτει ότι όλες οι σχετικές γωνίες ροής που προβλέπονται από την εξίσωση (3-50) στις διαδοχικές πτερύγιο προς πτερύγιο αναλύσεις ροής συγκλίνουν μέσα σε μια αποδεκτή ανοχή.

Το σχήμα 3-4 παρουσιάζει βασικό διάγραμμα ροής για τη μερικός τρισδιάστατη ανάλυση ροής. Ο συνδυασμός της παρούσας ανάλυσης πλήμνης προς κέλυφος με τη γραμμική ανάλυση ροής πτερύγιο προς πτερύγιο παρέχει μια πολύ αξιόπιστη και αποδοτική μερικός τρισδιάστατη ανάλυση ροής για ένα ευρύ φάσμα των προβλημάτων μεταβάσεων λεπίδων συμπιεστών αξονικής ροής. Ο σημαντικότερος περιορισμός είναι σχετικός με τα επίπεδα του αριθμού Mach, δεδομένου ότι η ανάλυση ροής δεν μπορεί να υπολογίσει τα κρουστικά κύματα. Αυτή η ανάλυση περιγράφει τη μεταβατική επέκταση, έτσι κάποια υπερηχητική ροή είναι αποδεκτή. Ο άλλος σημαντικός περιορισμός προκύπτει από τη βασική υπόθεση της ατριβής ροής. Αυτό είναι μια λογική υπόθεση εφ' όσον οι γωνίες πρόσπτωσης είναι λογικές και η διάχυση ροής δεν είναι υπερβολική. Οι ακραίες γωνίες πρόσπτωσης ή η υπερβολική διάχυση θα

οδηγήσουν στον ουσιαστικό διαχωρισμό της ροής, ο οποίος δεν μπορεί να διαμορφωθεί από μια ανάλυση της ατριβής ροής. Για να επιτευχθούν θετικά αποτελέσματα, αυτές οι περιπτώσεις απαιτούν έναν πιο θεμελιώδη υπολογιστικό κώδικα ρευστοδυναμικής του ιξώδους.



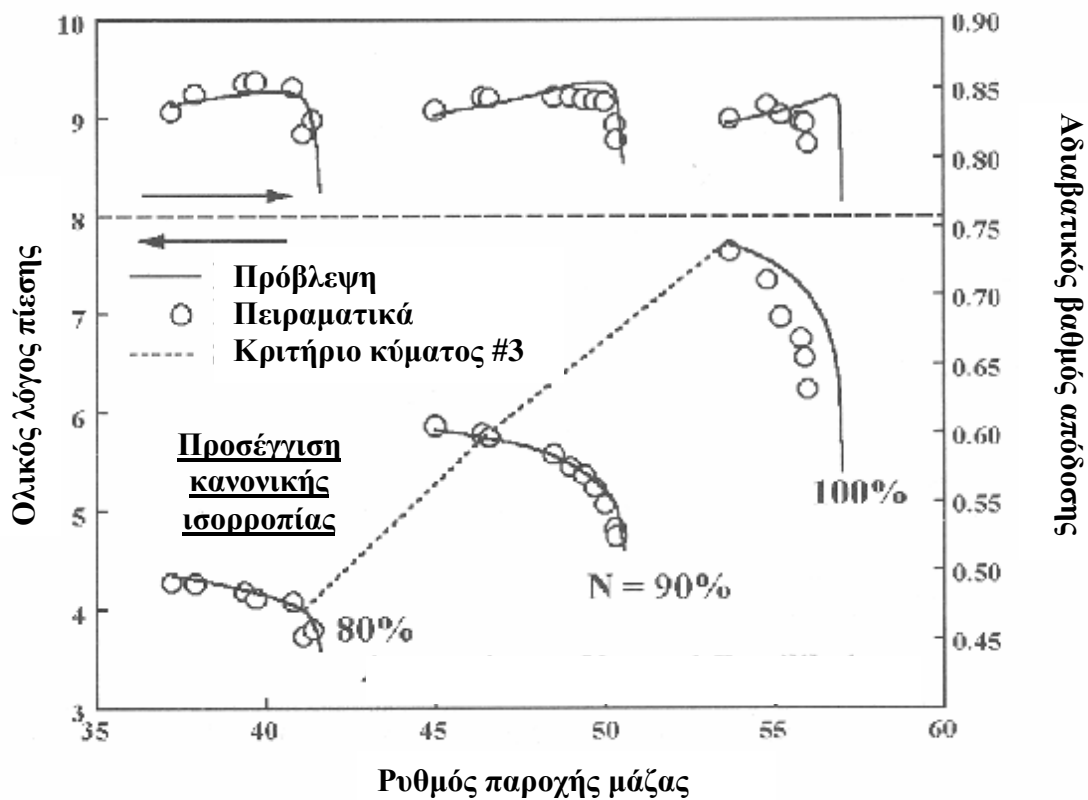
ΣΧΗΜΑ 3-4 Ιστόγραμμα της ανάλυσης ροής

Αυτή η ανάλυση απαιτεί έναν πολύ μεγάλο αριθμό υπολογισμών των εξισώσεων των βαθμίδων. Η εξίσωση του ψευδοτέλειου αερίου του επίσημου πρότυπου μπορεί να μειώσει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο συγκριτικά με τα πρότυπα του πραγματικού αερίου, ή ακόμα και με τα πρότυπα του ιδανικού αερίου με θερμοκρασία εξαρτώμενη της ειδικής θερμότητας. Αυτό το πρότυπο είναι σχεδόν πάντα επαρκές για τις αναλύσεις ροής των διόδων των πτερυγίων στους συμπιεστές. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι κάποια προσοχή κανονικά λαμβάνεται για να αποφευχθεί οποιοσδήποτε επικίνδυνος παράγοντας των λειτουργούντων συμπιεστών με το τρέχον υγρό στη ροή. Συνεπώς οι λειτουργούντες όροι είναι κανονικά ακίνδυνοι στην ζώνη υπερθέρμανσης, όπου οι ιδιότητες του αέριο δεν παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση πάνω από το περιορισμένο όριο των όρων που απαιτούνται για μια ανάλυση των πεδίων ροής. Αντίθετα, οι εφαρμογές των στροβίλων μπορούν να προϋποθέτουν τη διασπαστική ροή, ή τις συνθήκες εισόδου πολύ κοντά στη γραμμή κορεσμού του ατμού. Σε καθεμία περίπτωση, το πρότυπο του ψευδοτέλειου αερίου δεν είναι συνήθως επαρκές για αυτά τα προβλήματα.

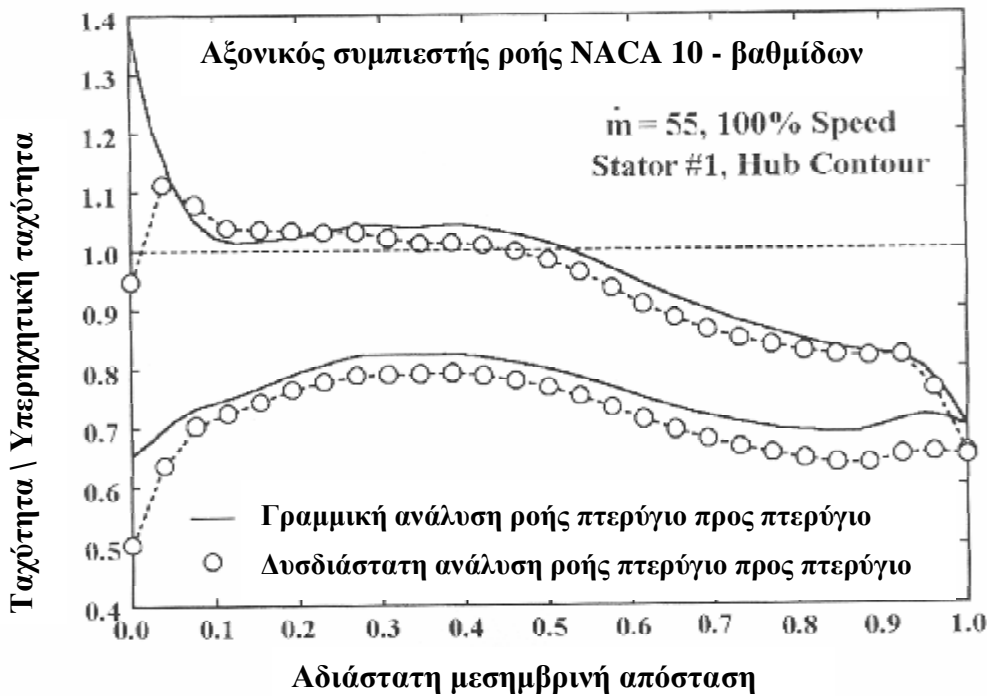
Η μερικώς τρισδιάστατη ανάλυση της ροής διαδραματίζει έναν κεντρικό ρόλο στον αεροδυναμικό σχεδιασμό των πτερυγίων για τους φυγοκεντρικούς συμπιεστές, όπου κάθε σειρά πτερυγίων είναι χαρακτηριστικά ένα μοναδικό σχέδιο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή (Aungier, 2000). Όπως συζητείται στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, ο ρόλος του για τους συμπιεστές αξονικής ροής είναι πιθανότερο να περιλάβει μια αξιολόγηση μιας συγκεκριμένης σειράς πτερυγίων που λειτουργεί κάτω συνθήκες πιο ακραίες από ότι δικαιολογείται από την πείρα. Για να είναι αποτελεσματικός σε εκείνο τον ρόλο, η ανάλυση πρέπει να εφαρμόζεται εύκολα καθώς επίσης γρήγορα και αξιόπιστα. Η ανάλυση του συγγραφέα περιλαμβάνει τις μεθόδους για πολύ ακριβή καθορισμό της γεωμετρίας του πτερυγίου για την τυποποιημένη καμπυλότητα των πτερυγίων των συμπιεστών αξονικής ροής και των σχεδιαγραμμάτων για να ελαχιστοποιήσει τα στοιχεία γεωμετρίας που απαιτούνται. Αυτό, στη συνέχεια, το καθιστά αρκετά απλό για να παρέχει στην ανάλυση της απόδοσης και στο πρόγραμμα αεροδυναμικού σχεδιασμού την ικανότητα να εξαχθεί ένα πλήρες αρχείο εισόδου για την παρούσα ανάλυση. Ως εκ τούτου μια πιο λεπτομερής αξιολόγηση οποιασδήποτε σειράς πτερυγίων που αναλύεται σε ένα από αυτά τα προγράμματα μπορεί να ολοκληρωθεί με πολύ λίγη προσπάθεια.

Η ανάλυση της απόδοσης που διευθύνεται στον συμπιεστή 10-βαθμίδων NACA θα χρησιμοποιηθεί για να επεξηγήσει μια χαρακτηριστική εφαρμογή αυτής της ανάλυσης. Σε σχέση με το σχέδιο 3-5, η ανάλυση της απόδοσης για ένα ποσοστό μάζας ροής από 55 σε 100% ταχύτητα προβλέπει ότι ο πρώτος στάτης λειτουργεί σε έναν υπερκρίσιμο αριθμό Mach κατά μήκος του περιγράμματος των πλημνών. Αν και η ανάλυση της απόδοσης δεν εμφανίζει κάποιο σημαντικά αρνητικό αποτελέσματα, ο σχεδιαστής μπορεί να θελήσει να αξιολογήσει αυτήν την κατάσταση σχολαστικότερα. Τα εμπειρικά πρότυπα εκτίμησης του κρίσιμου αριθμού Mach είναι βεβαίως αρκετά προσεγγιστικά,

και τα πτερύγια 65-σειρών NACA που χρησιμοποιούνται δεν ταιριάζουν ώστε να λειτουργούν με σημαντική υπερηχητική ροή. Για να αξιολογηθεί αυτή η κατάσταση, ένα αρχείο εισόδου τις μερικώς τρισδιάστατης ανάλυσης της ροής για αυτό το στάτη εξήχθη από την ανάλυση της απόδοσης. Μετά τρέχοντας τη μερικώς τρισδιάστατη ανάλυση της ροής, ένα αρχείο εισόδου για τη δισδιάστατη ανάλυση της ροής πτερύγιο προς πτερύγιο για την επιφάνεια των πλημνών εξήχθη και υποβλήθηκε σε επεξεργασία για μια ακριβέστερη ανάλυση σε αυτήν την κρίσιμη επιφάνεια ρευμάτων. Το σχήμα 3-6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από αυτές τις δύο αναλύσεις. Παρατηρείται ότι ο στάτης λειτουργεί για έναν υπερκρίσιμο αριθμό Mach. Όπως σημειώνεται, τα στοιχεία φόρτωσης των πτερυγίων κοντά στην αιχμή που προβλέπονται από τη γραμμική ανάλυση ροής πτερύγιο προς πτερύγιο πρέπει γενικά να αγνοηθούν. Σε αυτό το πλαίσιο, οι εσωτερικές αναλύσεις της ροής δείχνουν ότι η ροή είναι μόνο ελαφρώς υπερηχητική και δεν πρέπει να θέσει κανένα σημαντικό κίνδυνο απόδοσης. Η πλήρης διαδικασία της ολοκλήρωσης των δύο εσωτερικών αναλύσεων της ροής για να αξιολογήσει αυτήν την κατάσταση ολοκληρώθηκε σε ελάχιστο χρόνο. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα που προσφέρεται



ΣΧΗΜΑ 3-5 Συμπιεστής 10-βαθμίδων NACA



ΣΧΗΜΑ 3-6 Αξιολόγηση του φορτίου του πτερυγίου

από το συνυπολογισμό των αποδοτικών τεχνικών ανάλυσης της ατρίβης εσωτερικών ροής σε ένα καλά διατυπωμένο σύστημα αεροδυναμικού σχεδιασμού και ανάλυσης. Αν είχε χρησιμοποιηθεί ένας θεμελιώδης ιξώδης CFD κώδικας για αυτόν το λόγο, η αξιολόγηση εύκολα μπορεί να πάρει αρκετές ημέρες. Αυτή η ανάλυση ενθαρρύνει πραγματικά τους σχεδιαστές να αξιολογήσουν τα πεδία ανησυχίας, η οποία μπορεί διαφορετικά να αγνοηθεί λόγω της απαγορευτικής προσπάθειας που απαιτήθηκε για μια περισσότερο αναλυτική αξιολόγηση.

3.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Η ανάλυση του οριακού στρώματος παρέχει μια χρήσιμη επέκταση σε μια ανάλυση της εσωτερικής ατρίβης ροής. Μπορεί να παρέχει μια κατά προσέγγιση αξιολόγηση των επιπτώσεων του ιξώδους χωρίς σημαντική αύξηση στο χρόνο υπολογισμού. Η δισδιάστατη ανάλυση του οριακού στρώματος της επιφάνειας των πτερυγίων και το πρότυπο του συντελεστή απωλειών που μπορεί να ενσωματωθεί κατευθείαν στη μερικώς τρισδιάστατη ανάλυση του πεδίου ροής μπορεί να εισαχθεί. Εκείνα τα πρότυπα εφαρμόζονται αυστηρά ακριβώς στις δισδιάστατες ροές υδατοπτώσεων. Αγνοούν τις δευτεροβάθμιες ροές που είναι συνέχεια εμφανίζονται σε μια πραγματική υδατόπτωση. Εντούτοις, παρέχουν μια λογική ποιοτική αξιολόγηση των επιπτώσεων του ιξώδους που μπορούν να παρέχουν μια χρήσιμη καθοδήγηση στο σχεδιαστή. Αντίθετα από

την περίπτωση του οριακού στρώματος της επιφάνειας των πτερυγίων, υπάρχει ένα μικρό πλεονέκτημα στην εξέταση των δισδιάστατων προτύπων για τα ιδιαίτερα τρισδιάστατα ακριανά τοιχώματα των οριακών στρωμάτων. Επίσης ούτε υπάρχει μεγάλο πλεονέκτημα σήμερα στην εξέταση της χρήσης της ανάλυσης της ατριβής ροής που συνδέεται με τα τρισδιάστατα πρότυπα ανάλυσης του οριακού στρώματος. Αυτή η προσέγγιση θα περιελάμβανε τους χρόνους και την πολυπλοκότητα υπολογισμού σε σύγκριση με έναν ιξώδη CFD κώδικα, αλλά θα πρόσφερε τη λιγότερη γενικότητα και ακρίβεια. Με τους πολλούς άριστους εμπορικά προσιτούς κώδικες ιξώδεις CFD που είναι διαθέσιμοι σήμερα, δεν υπάρχει κανένας λόγος να εξεταστούν περισσότεροι μέθοδοι προσέγγισης εκτός αν προσφέρουν ουσιαστικά πλεονεκτήματα αναφορικά με την ταχύτητα υπολογισμών και την αξιοπιστία. Ο Aungier (2000) χρησιμοποιεί μια ανάλυση των ακριανών τοιχωμάτων του οριακού στρώματος. Αυτή η ανάλυση των ακριανών τοιχωμάτων του οριακού στρώματος έχει αναβαθμιστεί από τότε για να περιλάβει μερικές από τις νεώτερες εξελίξεις. Αυτός ο τύπος αξοσυμμετρικής, τρισδιάστατης ανάλυσης του οριακού στρώματος είναι η μόνη μέθοδος που μπορεί να παρέχει σημαντικά αποτελέσματα και να προσφέρει την ταχύτητα υπολογισμών και την αξιοπιστία που απαιτείται. Από αυτή τη προσέγγιση είναι γνωστό ότι προκύπτουν άριστα αποτελέσματα στις διόδους με λιγότερα πτερύγια φτερωτής [Aungier, 1988 (β) και Davis, 1976]. Μέσα στις διόδους των πτερυγίων, τα οριακά στρώματα δεν είναι βεβαίως αξοσυμμετρικά. Εκεί το πρότυπο επιδιώκει να προβλέψει τη συμπεριφορά από το υπολογισμένο χάσμα του οριακού στρώματος (Horlock, 1970).

Η περιγραφή της ανάλυσης των ακριανών τοιχωμάτων του οριακού στρώματος εφαρμόζεται άμεσα εδώ με δύο πολύ συγκεκριμένες εξαιρέσεις: σε αρκετές μελέτες, όλοι οι μεσημβρινοί σταθμοί υπολογισμών βρίσκονται έξω από τις διόδους των πτερυγίων, έτσι όταν αντιμετωπίζονται οι σειρές των πτερυγίων, το μεσημβρινό βήμα ολοκλήρωσης είναι πάντα πέρα από τη σειρά του πτερυγίου. Στην παρούσα εφαρμογή, θα υπάρξουν πολλοί μεσημβρινοί σταθμοί υπολογισμών μέσα στη δίοδο των πτερυγίων. Η διαδικασία της αριθμητικής ολοκλήρωσης παραμένει η ίδια, αλλά εδώ οι εξισώσεις του οριακού στρώματος είναι ενσωματωμένες πάνω από πολλά χωρικά βήματα μέσα στη δίοδο των πτερυγίων αντί ενός ενιαίου χωρικού βήματος δια μέσου αυτού. Αυτό, στη συνέχεια, απαιτεί την αναθεώρηση του προτύπου ατέλειας της ισχύς των πτερυγίων για να ισχύσει μέσα στη δίοδο των πτερυγίων. Ο Aungier (2000) προτείνει το ακόλουθο πρότυπο πάχους ατέλειας της ισχύς των πτερυγίων:

$$n = kq_{11} \quad (3-51)$$

Με βάση τα πειραματικά στοιχεία από τους Koch και Smith (1976) και Hunter και Cumpsty (1982), συστήθηκαν τιμές του K στο πεδίο 0,7 έως 1. Δεδομένου ότι αυτά τα σύνολα πειραματικών στοιχείων είναι από τις δοκιμές των

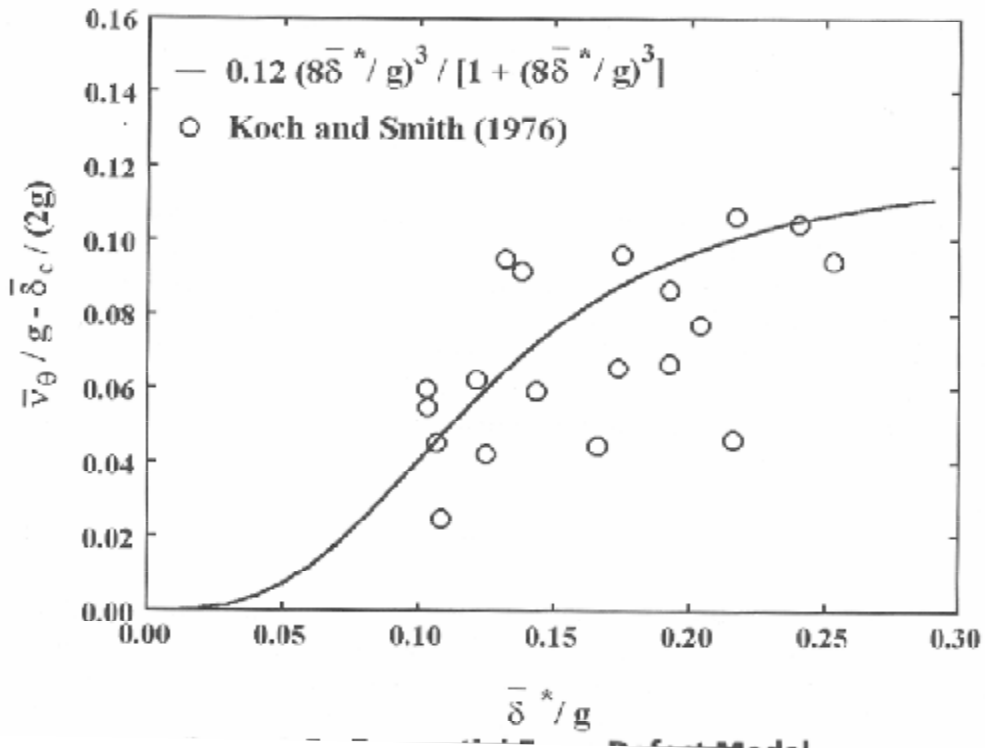
συμπιεστών αξονικής ροής, δεν είναι απροσδόκητο ότι αυτό απλό πρότυπο παράγει λογικά αποτελέσματα για τις εφαρμογές των συμπιεστών αξονικής ροής. Εντούτοις, δεδομένου ότι ο Aungier (2000) δημοσιεύτηκε, ένας αριθμός εφαρμογών των φυγοκεντρικών συμπιεστών έχουν αντιμετωπιστεί εκεί όπου τα αποτελέσματα δεν εμφανίστηκαν ρεαλιστικά. Η αδυναμία στο πρότυπο είναι εμφανέστερη κατά τη διάρκεια της ανάλυσης του οριακού στρώματος μέσα σε μια δίοδο του περυγίου όπου και τα πτερύγια και ο τοίχος περιστρέφονται. Καθώς η γωνία φ μεγαλώνει, οι φυγοκεντρικές δυνάμεις στο οριακό στρώμα γίνονται επίσης μεγάλες, τείνοντας να μειώσουν το θ_{11} και, επομένως, το v . Κάτω από ορισμένες συνθήκες, αυτό μπορεί να παραγάγει σχεδόν ομοιόμορφα σχεδιαγράμματα της μεσημβρινής ταχύτητας και σε υψηλό βαθμό παραμορφωμένα σχεδιαγράμματα της εφαπτομενικής ταχύτητας. Είναι εμφανές ότι τόσο ιδιαίτερα λοξά σχεδιαγράμματα του οριακού στρώματος δεν είναι λογικά μέσα στις διόδους των περυγίων, όπου τα πτερύγια θα τείνουν να οδηγήσουν τη ροή προς μια παράλληλη κατάσταση του οριακού στρώματος. Η ανάλυση του Aungier (2000) δεν αναγνωρίζει ότι η ακραία στρέβλωση των σχεδιαγραμμάτων ροής του οριακού στρώματος θα περιοριστεί από τον προσανατολισμό της ροής που επιβάλλεται από τα πτερύγια.

Αυτές οι αδυναμίες που παρατηρήθηκαν στη μέθοδο περιγράφονται στον Aungier (2000) πρόσφατα έχουν βελτιωθεί σημαντικά με την προσαρμογή του προτύπου ατέλειας της ισχύς των περυγίων. Το σχήμα 3-8 παρουσιάζει τα ίδια πειραματικά στοιχεία με το σχήμα 3-7 και τον απλουστευμένο εμπειρικό συσχετισμό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εφαρμογή. Δεδομένου ότι η παρούσα ανάλυση προορίζεται για τις ενιαίες αναλύσεις των διόδων των περυγίων, οι μεγαλύτερες τιμές του πάχους μετατοπίσεως που παρατηρούνται στα οπίσθιες βαθμίδες των πολυβάθμιων συμπιεστών δεν θα αντιμετωπιστούν. Με λίγες πιθανότητες για προσέγγιση του μεγίστου που αποφαίνεται στο σχήμα 3-7, ο απλούστερος γραμμικός εμπειρικός συσχετισμός είναι μια λογική προσέγγιση, η οποία απαλείφει τον όρο του ελαστικού διαστήματος στη συνάρτηση. Ως εκ τούτου το βασικό πάχος ατέλειας της δύναμης των περυγίων της εξίσωσης

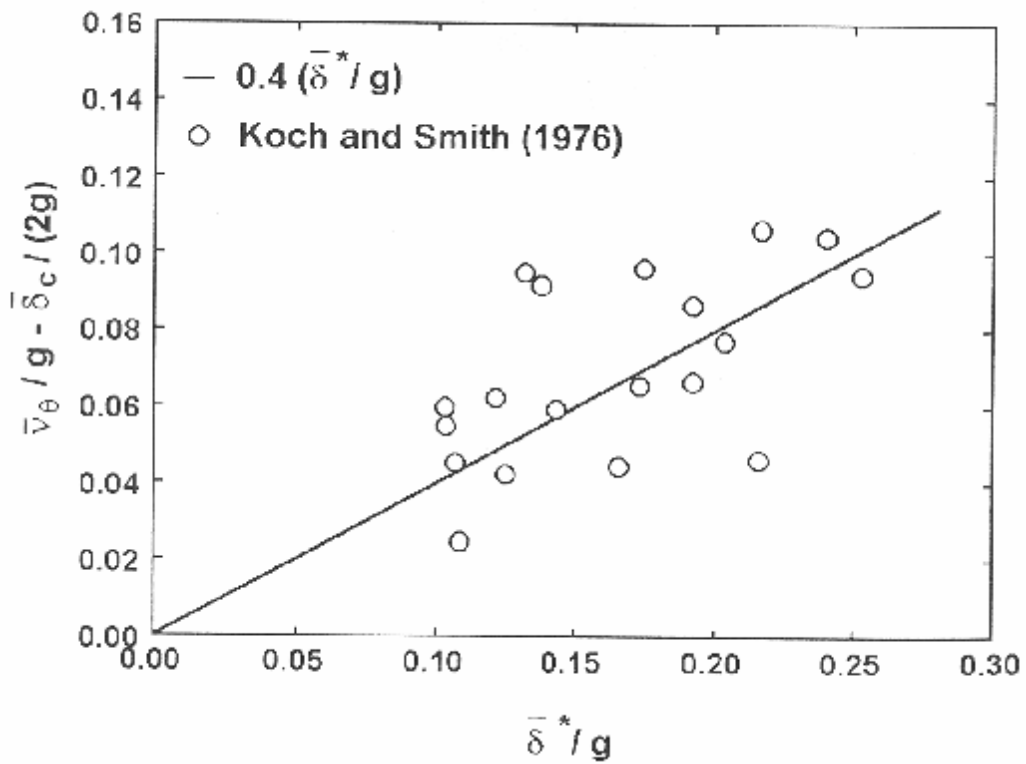
$$n_0 = \frac{(0.12g + d_c / 2)(8\bar{q}_{11} / g)^3}{1 + (8\bar{q}_{11} / g)^3} \quad (3-52)$$

αντικαθίσταται από την εξίσωση

$$v_0 = 0.4d_1^* + d_c / 2 \quad (3-53)$$



ΣΧΗΜΑ 3-7 Μοντέλο της ατελείς δύναμης της εφαπτομένης



ΣΧΗΜΑ 3-8 Πάχος της ατελείς δύναμης της εφαπτομένης

Παρατηρείται ότι η εξίσωση (3-53) είναι παρόμοια με την εξίσωση (3-51), αλλά είναι βασισμένη στο πάχος μετατοπίσεων παρά στο πάχος ορμής και την επίδραση της ανοχής των πτερυγίων. Μετά από την προσέγγιση που χρησιμοποιείται, το πάχος της ατελείς δύναμης των πτερυγίων τροποποιείται από έναν όρο Δn για να αποτελέσει την επίδραση της καθοδήγησης των πτερυγίων

$$v = v_0 + \Delta v \quad (3-54)$$

Αυτός ο όρος διορθώσεων υπολογίζεται ακριβώς χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3-55) και (3-56),

$$x = \left[\frac{\bar{r}}{r} + \frac{\bar{W}_{qe} W_{qe}}{\bar{V}_{me} V_{me}} \right] \frac{\bar{r} f_{qe} \Delta m}{r \Gamma_e V_{me}} \quad (3-55)$$

$$\Delta n \rightarrow [\Delta n - (V_{qe} q_{12} - W_{qe} q_{11}) / x] F \quad (3-56)$$

αλλά με έναν εναλλακτικό καθορισμό για την παράμετρο, F , η οποίος είναι καταλληλότερος στην ολοκλήρωση μέσα στη δίοδο των πτερυγίων. Η μορφή που χρησιμοποιείται για το F είναι βασισμένη στις ακόλουθες υποθέσεις:

- Τα πτερύγια καθοδηγούν τη ροή προς την παράλληλη ροή πρώτιστα κοντά στις επιφάνειες των πτερυγίων. Υποτίθεται ότι η απόκλιση του υπολογισμένου διάκενου από την παράλληλη ροή που επιβάλλεται με την ενσωμάτωση των εξισώσεων του οριακού στρώματος, που χρησιμοποιούν μόνο το v_0 , θα μειωθεί περίπου κατά 50% λόγω της καθοδήγησης του πτερυγίου.
- Η επίδραση της καθοδήγησης των πτερυγίων και το ελεύθερο διάκενο στην ατέλεια δύναμης των πτερυγίων είναι αμελητέο όταν το ελεύθερο διάκενο των πτερυγίων είναι μεγαλύτερο από το πάχος του οριακού στρώματος.
- Η επίδραση της καθοδήγησης των πτερυγίων και το ελεύθερο διάκενο στην ατέλεια δύναμης των πτερυγίων είναι αμελητέο στην αιχμή των σειρών των πτερυγίων. Αυτή η επίδραση υποτίθεται ότι ήταν ανάλογη προς το λόγο της μεσημβρινής απόστασης στο διάστημα των πτερυγίων.

Η δεύτερη υπόθεση αναγνωρίζει απλά την ειδική περίπτωση όπου το οριακό στρώμα και τα πτερύγια δεν αλληλεπιδρούν πραγματικά. Αν και αυτή η κατάσταση είναι πολύ σπάνια σε έναν συμπιεστή, μπορεί εύκολα να εμφανιστεί στην παρούσα ανάλυση εάν το πάχος του οριακού στρώματος στην είσοδο ορίζεται αρκετά μικρό. Η εμπειρία έχει δείξει ότι αυτό θα οδηγήσει στα

ακανόνιστα και ιδιαίτερα αμφισβητήσιμα αποτελέσματα. Η τρίτη υπόθεση αναγνωρίζει ότι η επίδραση των πτερυγίων δεν θα επεκταθεί δια μέσου ολόκληρου του διαστήματος της διόδου του πτερυγίου έως ότου η ροή να διαπερνά καλά στην καθοδηγημένη δίοδο. Αυτό οδηγεί στην ακόλουθη προσέγγιση για το F :

$$F = [1 - d_c / d] m / [g + m] / 2; d_c \leq d \quad (3-57)$$

$$F = 0; d_c > d \quad (3-58)$$

Η εξίσωση (3-57) περιλαμβάνει την επίδραση του λόγου m/g , όπου το m είναι η μεσημβρινή απόσταση από την αιχμή των πτερυγίων και το g είναι ανάλογο με το τοπικό ελαστικό διάστημα δηλ.,

$$g = 2pr \cos b' / Z \quad (3-59)$$

Το F χρησιμοποιείται απευθείας την εξίσωση (3-56) και επιβάλλεται επίσης ως διόρθωση που εφαρμόζεται στην εξίσωση (3-53).

$$v_0 = 0.4d_1^* + d_c F \quad (3-60)$$

Δεδομένου ότι υπάρχουν τώρα διάφορα χωρικά βήματα ολοκλήρωσης μέσα στη δίοδο του πτερυγίου, η ατέλεια δύναμης του πτερυγίου και η κατεύθυνση της δύναμης του πτερυγίου που δίνονται από την εξίσωση (3-61)

$$f_{me} = -\bar{W}_{qe} f_{qe} / \bar{V}_{me} \quad (3-61)$$

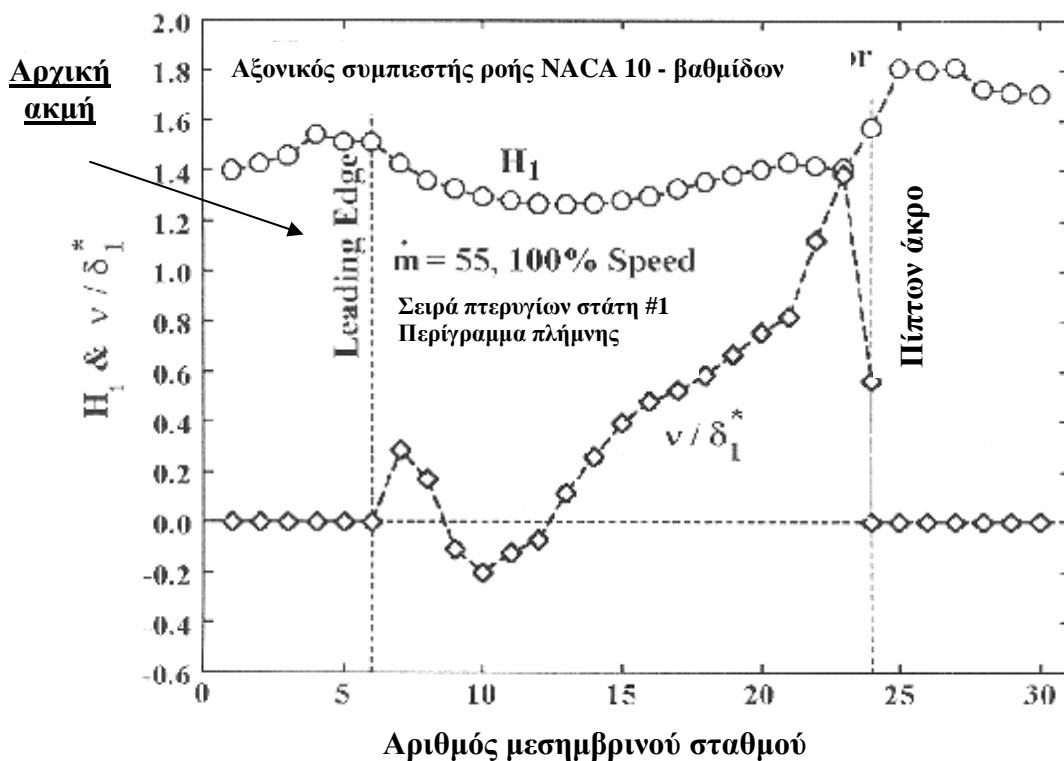
και οι δύο ποικίλλουν μέσω της διόδου του πτερυγίου, αλλά η διαδικασία της αριθμητικής ολοκλήρωσης είναι η ίδια με αυτήν που χρησιμοποιείται συχνά. Εντούτοις, ο υπολογισμός του Δv απαιτεί περισσότερη προσοχή δεδομένου ότι σχετίζεται με μια τοπική διόρθωση της δύναμης του πτερυγίου παρά μια γενική διόρθωση της σειράς των πτερυγίων. Τοπικά, η ιδανική δύναμη του πτερυγίου μπορεί να είναι εξαιρετικά μικρή, ή ακόμα και μηδέν. Αυτό μπορεί να παραγάγει τις μη ρεαλιστικές τιμές του Δv . Για να αποφευχθούν τέτοια προβλήματα, επιβάλλεται ένας περιορισμός στο Δv της μορφής

$$|\Delta v| \leq [0.05 + 0.2(H_1 - 1)]d \quad (3-62)$$

Αυτό περιορίζει τη διόρθωση της δύναμης του πτερυγίου για να είναι περίπου λιγότερη από 75% του μεσημβρινού πάχους μετατοπίσεως, εκτός από τις τιμές του H_1 που είναι πολύ κοντά στο 1. Το πάχος μετατοπίσεως θα εξαφανιστεί όταν $H_1 \rightarrow 1$, έτσι ειδική προσοχή απαιτείται για να αποφευχθεί η κατάπνιξη της

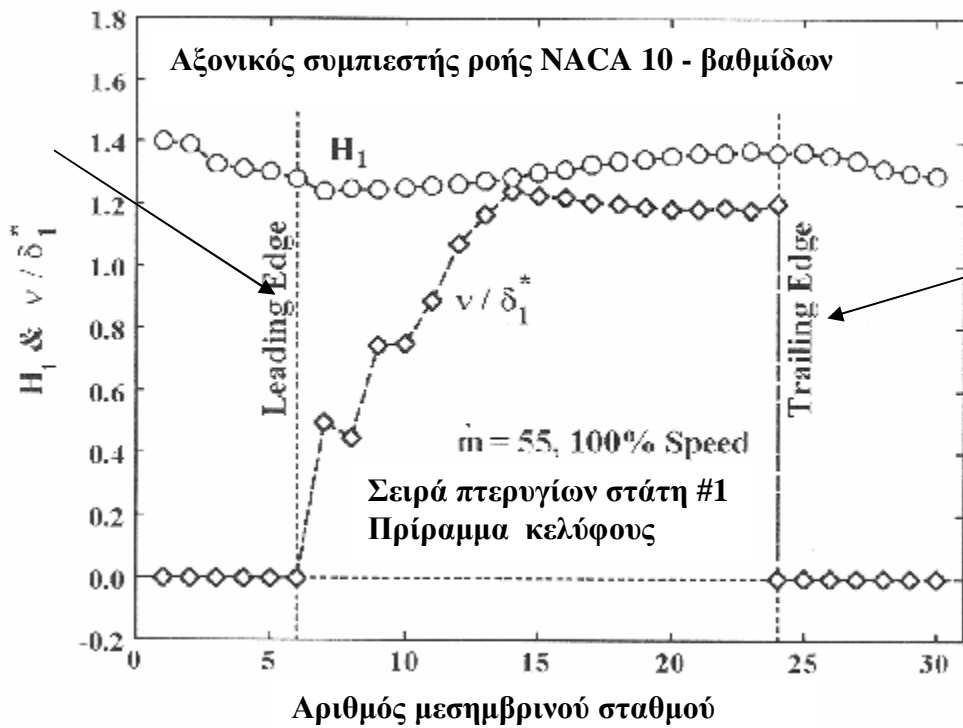
επίδρασης της καθοδήγησης των πτερυγίων εξ ολοκλήρου σε αυτή την περίπτωση.

Τα σχήματα 3-9 και 3-10 παρουσιάζουν χαρακτηριστικές παραμέτρους του οριακού στρώματος που προβλέπονται από αυτήν την ανάλυση των ακριανών τοιχωμάτων του οριακού στρώματος όταν εφαρμόζεται στο πρόβλημα του στάτη του συμπιεστή αξονικής ροής που χρησιμοποιήθηκε σαν παράδειγμα νωρίτερα σε αυτό το κεφάλαιο. Αυτή η σειρά των πτερυγίων λειτουργεί κοντά στις βέλτιστες γωνίες πρόσπτωσης στις συνθήκες λειτουργίας που εξετάζονται σε αυτήν την περίπτωση δειγμάτων. Ως εκ τούτου, ο συντελεστής πίεσης της σειράς των πτερυγίων είναι σχετικά ήπιος για αυτήν την περίπτωση. Με βάση τα πειραματικά στοιχεία που παρουσιάζονται στο σχήμα 3-11, το πάχος ατέλειας της δύναμης των πτερυγίων, που υπολογίζεται κατά μέσο όρο πέρα από τη σειρά των πτερυγίων, αναμένεται να είναι ένα αρκετά μεγάλο κλάσμα του μεσημβρινού πάχους μετατοπίσεως, το οποίο είναι τουλάχιστον σύμφωνο με τις παρούσες προβλέψεις. Αυτός βεβαίως δεν παρέχει μια πραγματική τεκμηρίωση των υποθέσεων, ούτε υπάρχει κάποιο στοιχείο διαθέσιμο στη βιβλιογραφία κατάλληλο για να τεκμηριώσει αυτά. Οι υποθέσεις θεωρούνται λογικές, και παράγουν αποτελέσματα σύμφωνα με τα γενικά πειραματικά στοιχεία των σειρών των πτερυγίων. Επίσης, δεν παράγουν εμφανείς ανεπάρκειες όπως εκείνες που παρατηρήθηκαν από το απλούστερο πρότυπο του Aungier (2000). Αυτά είναι περίπου όλα που μπορούν να ειπωθούν για να δικαιολογήσουν τη χρήση τους.



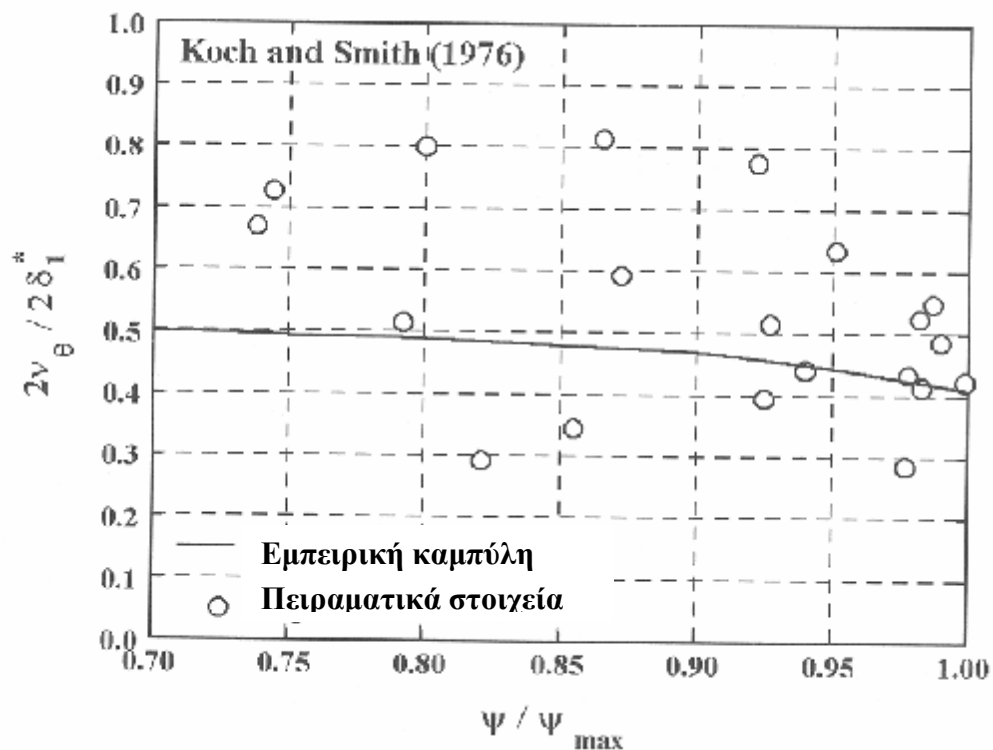
ΣΧΗΜΑ 3-9 Οριακό στρώμα του περιγράμματος της πλήμνης

Αρχική ακμή



Πίπτον άκρο

ΣΧΗΜΑ 3-10 Οριακό στρώμα του περιγράμματος του κελύφους



ΣΧΗΜΑ 3-11 Δεδομένα της ατελείς δύναμης της εφαπτομένης

