

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ
ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΜΕΛΕΤΙΟΣ ΡΟΥΣΣΗΣ (4649)

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: 1) ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΑΥΡΙΔΗΣ
2) ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

ΠΑΤΡΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στη θεωρητική μελέτη των φυγοκεντρικών και αξονικών συμπιεστών αεριοστροβίλων.

Στην αρχή μελετώνται οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές, η χρήση τους, η λειτουργία τους και τα συστατικά τους μέρη,

Στην συνέχεια περιγράφονται οι συμπιεστές αξονικής ροής, οι εφαρμογές τους, τα στάδια που τους αποτελούν και η εξέλιξη που έχουν παρουσιάσει.

Ευχαριστώ θερμά τους Επιβλέποντες Καθηγητές μου κ. Κων/νο Μαυρίδη, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολογίας και κ. Ιωάννη Γιαννάκη, Συνεργάτη Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολογίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφεραν για την πραγματοποίηση της πτυχιακής αυτής εργασίας.

ΡΟΥΣΣΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Φεβρουάριος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στη θεωρητική μελέτη των φυγοκεντρικών και αξονικών συμπιεστών αεριοστροβίλων.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε δύο Κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η χρήση των φυγοκεντρικών συμπιεστών στις μικρές τουρμπίνες αερίου καθώς και η αναλυτική λειτουργία τους. Εν συνεχεία έχουμε εκτεταμένη αναφορά στα εξαρτήματα του συμπιεστή, τα πτερύγια, τον επαγωγέα, το στροφείο, τον διαχύτη, τον έλικα και την χρησιμότητα τους στον συμπιεστή. Στο κεφάλαιο 1 θα πάρουμε σημαντικές πληροφορίες για τις απώλειες, την αποδόση και την διάταξη του συμπιεστή.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο περιγράφονται οι συμπιεστές αξονικής ροής που η κύρια διαφορά τους είναι ότι σε σχέση με τους φυγοκεντρικούς συμπιεστές χρησιμοποιούνται για αναλογίες χαμηλότερης πίεσης και τιμές υψηλότερης ροής. Ένας συμπιεστής αποτελείται από πολλά στάδια με ένα από αυτά τον συνδιασμό του ρότορα ακολουθούμενο από έναν στάτορα. Επίσης γίνεται αναφορά στην θεωρία αεροτομής, στις αεροτομές στροτής ροής, στην ακτινική ισορροπία και στον κανόνα πρόσπτωσης. Θα γνωρίσουμε χαρακτηριστικά λειτουργίας του συμπιεστή καθώς και τα τρία διαφορετικά φαινόμενα μπλοκαρίσματος του.

Και στα δύο κεφάλαια υπάρχει εκτεταμένη χρήση εικόνων, διαγραμμάτων και σχεδίων για την καλύτερη κατανόηση όσον αναφέρονται.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

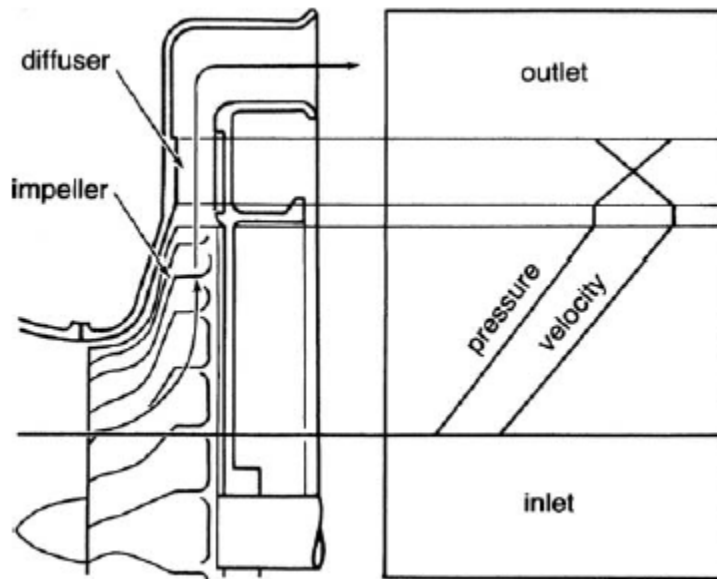
| | Σελίδα |
|--|--------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ | 2 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 3 |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | 4 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ | 5 |
| I. ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ-ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ | 7 |
| II. ΑΙΤΙΕΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΕ ΕΝΑ ΣΤΡΟΦΕΙΟ | 22 |
| III. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΤΟ ΡΟΤΟΡΑ | 33 |
| IV. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΤΟ ΣΤΑΤΟΡΑ | 36 |
| V. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ | 44 |
| VI. ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ | 45 |
| VII. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ | 51 |
| VIII. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΤΡΟΦΕΙΟΥ | 53 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ | 55 |
| I. ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΛΕΠΙΔΑΣ ΚΑΙ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ | 60 |
| II. ΤΡΙΓΩΝΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ | 67 |
| III. ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ | 72 |
| IV. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ | 79 |
| V. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ | 85 |
| VI. ΝΕΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ | 89 |
| VII. ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ | 91 |
| VIII. ΛΕΠΙΔΕΣ | 93 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 100 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ

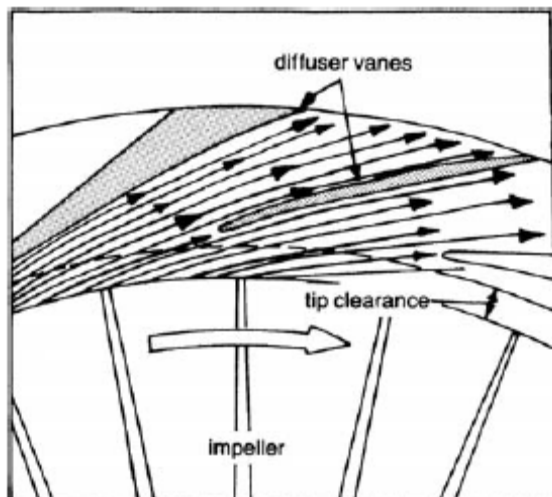
Οι φυγόκεντροι συμπιεστές χρησιμοποιούνται στις μικρές τουρμπίνες αερίου και είναι οι κινητήριες μονάδες στα περισσότερα συστήματα συμπίεσης με τουρμπίνες αερίου. Είναι αναπόσπαστο κομμάτι της πετροχημικής βιομηχανίας, καθώς χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της ομαλής λειτουργίας τους, της μεγάλης αντοχής τους στις διακυμάνσεις της διεργασίας και λόγω της υψηλής αξιοπιστίας τους σε σύγκριση με άλλους τύπους συμπιεστών. Οι φυγόκεντροι συμπιεστές ποικίλουν σε μέγεθος, από αναλογίες πίεσης 1 προς 3 ανά στάδιο έως 12 προς 1 σε πειραματικά μοντέλα. Οι συνήθειες είναι σε αναλογίες πίεσης κάτω από 3,5 προς 1, καθώς αυτός ο τύπος επικρατεί στην πετροχημική βιομηχανία. Η επιλογή του κατάλληλου συμπιεστή είναι μια πολύπλοκη και σημαντική απόφαση. Η επιτυχημένη λειτουργία πολλών μηχανημάτων/εγκαταστάσεων βασίζεται στις ομαλές και αποτελεσματικές λειτουργίες του συμπιεστή. Για να διαφυλαχτεί η σωστή επιλογή και η κατάλληλη συντήρηση ενός φυγόκεντρου συμπιεστή, ο μηχανικός πρέπει να έχει γνώση πολλών κλάδων μηχανικής.

Σε έναν τυπικό φυγόκεντρο συμπιεστή το υγρό ωθείται διαμέσου του στροφείου με τη γρήγορη περιστροφή του στροφείου λεπίδων. Η ταχύτητα του υγρού μετατρέπεται σε πίεση, τμηματικά στο στροφείο και τμηματικά στους στατικούς διαχύτες. Το μεγαλύτερο μέρος της ταχύτητας που φεύγει από το στροφείο μετατρέπεται σε ενέργεια πίεσης στο διαχύτη, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-1. Αποτελεί κοινή πρακτική να σχεδιάζεται ο συμπιεστής έτσι ώστε η μισή αύξηση πίεσης να πραγματοποιείται στο στροφείο και η άλλη μισή στον διαχύτη. Ο διαχύτης αποτελείται απαραίτητα από πτερύγια, τα οποία εφάπτονται στο στροφείο. Αυτοί οι δίοδοι των πτερυγίων αποκλίνουν προκειμένου να μετατρέψουν την ταχύτητα κεφαλής σε ενέργεια πίεσης. Τα εσωτερικά άκρα των πτερυγίων βρίσκονται σύμφωνα με την κατεύθυνση της ροής του αέρα που δημιουργείται από το στροφείο, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-2.

Οι φυγόκεντροι συμπιεστές γενικά χρησιμοποιούνται για αναλογίες υψηλότερης πίεσης και τιμές χαμηλότερης ροής σε σύγκριση με τις αναλογίες πίεσης κατώτερης βαθμίδας και τιμές υψηλότερης ροής σε αξονικούς συμπιεστές. Η εικόνα 1-3 είναι ένας χάρτης για φυγόκεντρους συμπιεστές που δείχνει την επίδραση της ειδικής ταχύτητας (N_s) και ειδικής διαμέτρου (D_s) στην αποδοτικότητά τους. Η πιο αποδοτική περιοχή της λειτουργίας του φυγόκεντρου συμπιεστή πραγματοποιείται σε μια συγκεκριμένη κλίμακα ταχύτητας μεταξύ $60 < N_s > 1500$.

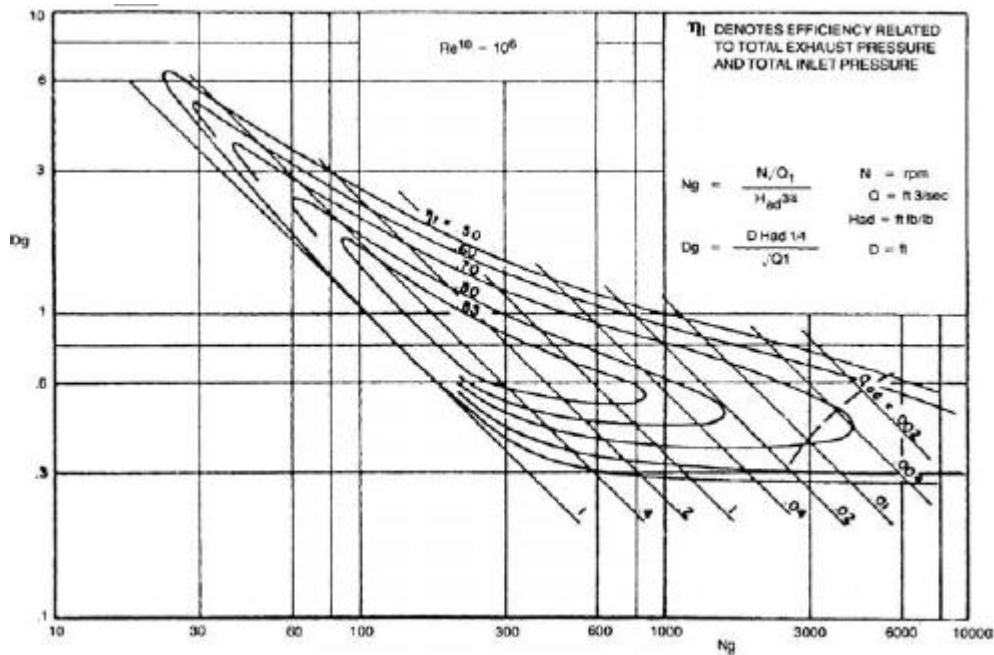


Εικόνα 1-1: Πίεση και ταχύτητα μέσω ενός φυγόκεντρικού συμπιεστή



Εικόνα 1-2: Ροή που εισέρχεται σε διαχύτη

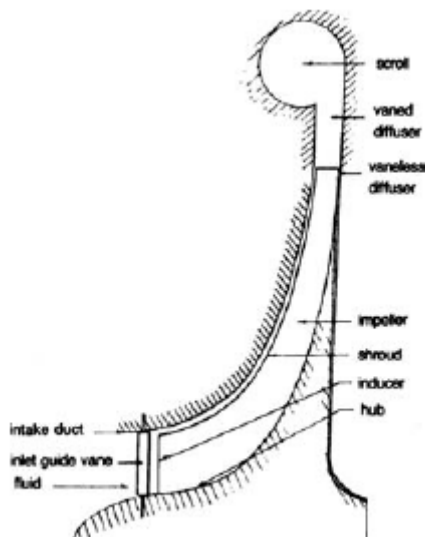
Ειδικές ταχύτητες πάνω από 3000 συνήθως απαιτούν έναν συμπιεστή τύπου αξονικής ροής. Σε έναν φυγόκεντρο συμπιεστή η γωνιακή ορμή/ταχύτητα κίνησης του αερίου που διαχέεται διαμέσου του στροφείου αυξάνεται μερικώς διότι η διάμετρος εξόδου του στροφείου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη διάμετρο εισόδου. Η κύρια διαφορά μεταξύ αξονικών και φυγόκεντρων συμπιεστών είναι η διαφορά τους στις διαμέτρους εισόδου και εξόδου. Η ροή που φεύγει από τον φυγόκεντρο συμπιεστή είναι συνήθως κάθετη στον άξονα περιστροφής.



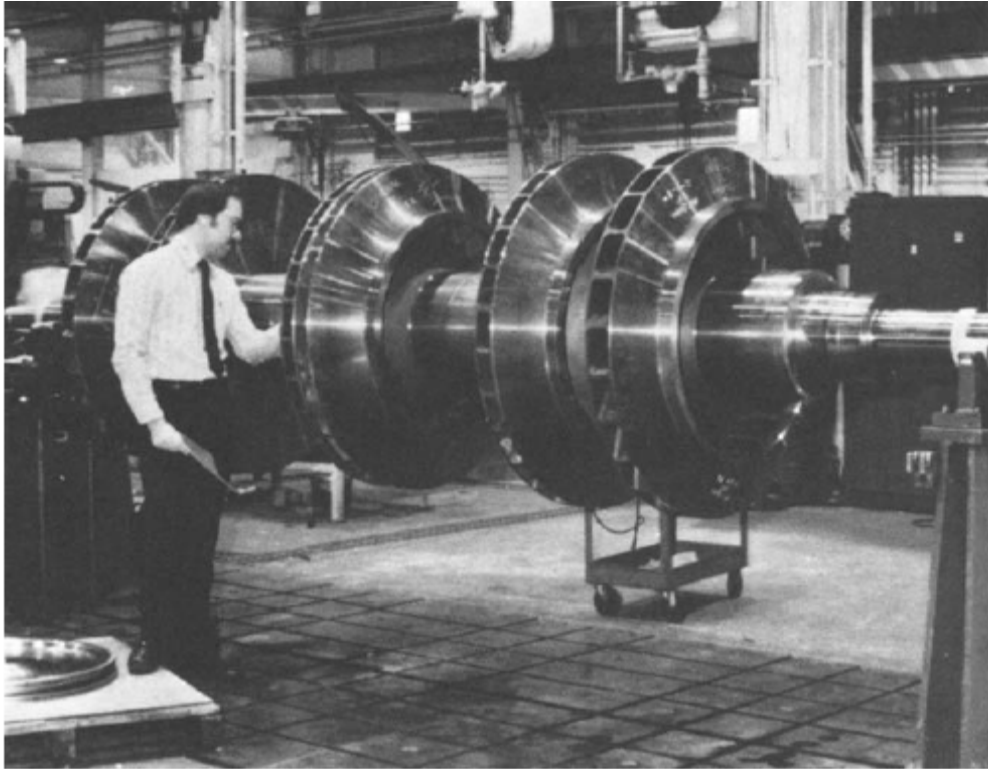
Εικόνα 1-3: Χάρτης φυοκεντρικού συμπιεστή

Τα Εξαρτήματα/συστατικά μέρη του φυγόκεντρου συμπιεστή

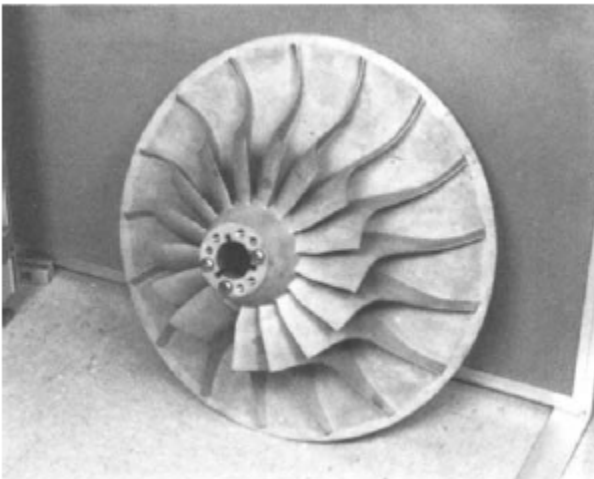
Η ορολογία που χρησιμοποιείται για να οριστούν τα μέρη του φυγόκεντρου συμπιεστή φαίνεται στην εικόνα 1-4. Ένας φυγόκεντρος συμπιεστής αποτελείται από πτερύγια-οδηγούς εισόδου, έναν επαγωγέα, ένα στροφείο, έναν διαχύτη και έναν έλικα. Τα οδηγά πτερύγια εισόδου χρησιμοποιούνται μόνο σε έναν διηχητικό συμπιεστή με αναλογία υψηλής πίεσης. Τα στροφεία των φυγόκεντρων συμπιεστών είναι είτε καλυμμένα είτε όχι, όπως φαίνονται στις εικόνες 1-5 και 1-6. Το υγρό εισέρχεται στον συμπιεστή διαμέσου ενός αγωγού εισαγωγής και στροβιλίζεται από τα οδηγά πτερύγια εισόδου. Έπειτα διαχέεται σε ένα επαγωγέα χωρίς καμία γωνία πρόσπτωσης, καθώς επίσης η κατεύθυνση της ροής μετατρέπεται από αξονική σε ακτινική. Στο υγρό δίνεται σε αυτό το στάδιο ενέργεια από το ρότορα ενώ περνά διαμέσου του στροφείου καθώς συμπιέζεται. Έπειτα εκχέεται σε έναν διαχύτη, όπου η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε στατική πίεση. Η ροή εισέρχεται στον έλικα απ'όπου λαμβάνεται η κατάθλιψη του συμπιεστή. Η εικόνα 1-1 δείχνει τις διακυμάνσεις στην πίεση και στην ταχύτητα διαμέσου του συμπιεστή.



Εικόνα 1-4: Παράσταση ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή



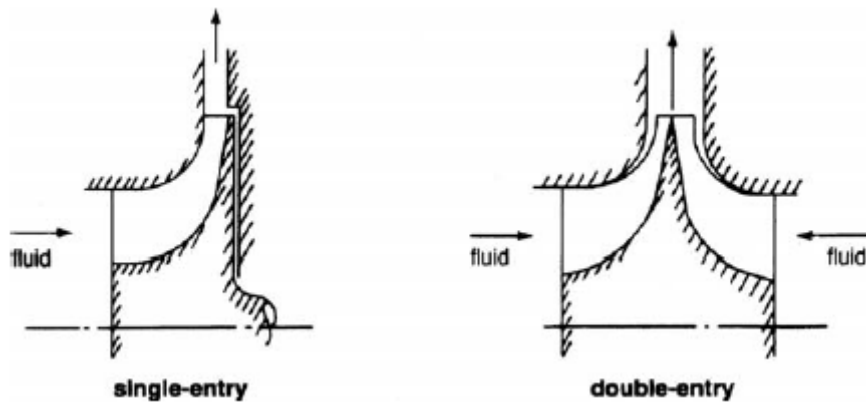
Εικόνα 1-5: Κλειστό τύπου στροφέιο



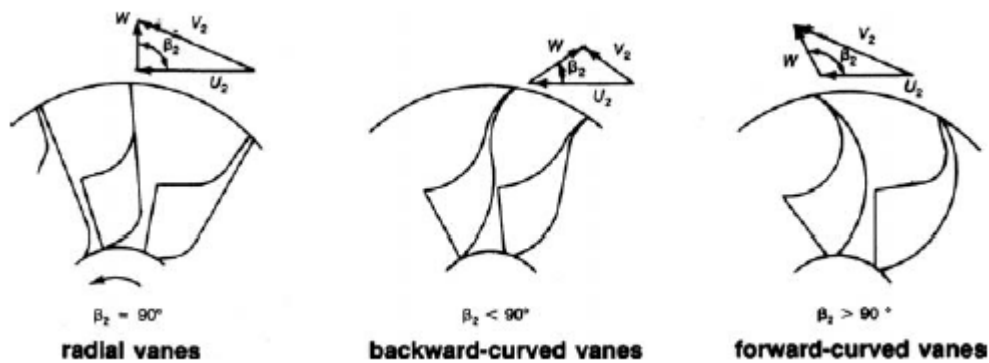
Εικόνα 1-6: Ανοιχτού τύπου στροφέιο.

Υπάρχουν δύο είδη συστημάτων ενεργειακών επαγωγέων: ένας επαγωγέας μονής εισόδου και ένας διπλής εισόδου, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-7. Το σύστημα με επαγωγή διπλής εισόδου διαχωρίζει τη ροή εισόδου ούτως ώστε μια διάμετρος μικρότερου επαγωγικού άκρου να μπορεί χρησιμοποιηθεί μειώνοντας τον αριθμό Mach του άκρου του επαγωγέα. Παρ'όλ'αυτά, το σχέδιο είναι δύσκολο να ενσωματωθεί σε πολλές συνθέσεις. Υπάρχουν τρία είδη στροφικών πτερυγίων, όπως φαίνονται στην εικόνα 1-8. Αυτά προσδιορίζονται σύμφωνα με τις γωνίες των

λεπίδων εξόδου. Τα στροφεία με γωνία στροφείου εξόδου $\beta_2=90^\circ$ είναι ακτινικά πτερύγια. Τα στροφεία με $\beta_2<90^\circ$ είναι καμπυλωτά με κλίση προς τα πίσω ή πτερύγια και για $\beta_2>90^\circ$, τα πτερύγια είναι καμπυλωτά προς τα εμπρός.

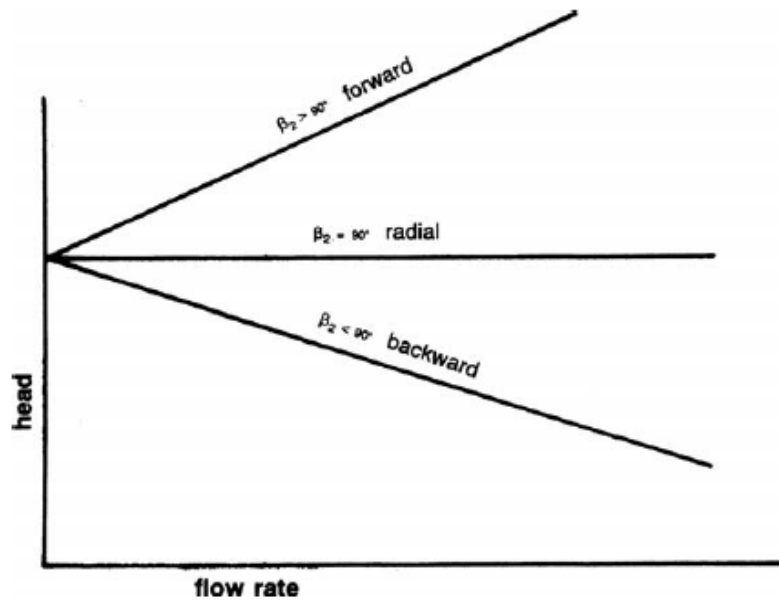


Εικόνα 1-7: Τύποι συστημάτων εισόδου - επαγωγής



Εικόνα 1-8: Διάφορα τύποι

Έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά θεωρητικής σχέσης κεφαλής-ροής μεταξύ τους, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-9. Αν και στην εικόνα 1-9 η κεφαλή πρόσθιας κλίσης είναι η μεγαλύτερη, στην πράξη τα χαρακτηριστικά της κεφαλής όλων των στροφείων είναι παρόμοια με τα καμπυλωτά στροφεία με κλίση προς τα πίσω. Ο πίνακας 1-1 δείχνει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα διαφόρων στροφείων.



Εικόνα 1-9: Χαρακτηριστικές καμπύλες μανομετρικού – παροχής για διάφορες γωνίες εξωτερικών στροφείων

| Πίνακας 1-1 Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα διαφόρων στροφείων | | |
|--|---|--|
| Είδη στροφείων | Πλεονεκτήματα | Μειονεκτήματα |
| Ακτινικά πτερύγια | <ol style="list-style-type: none"> 1. Λογικός συμβιβασμός μεταξύ μεταφοράς χαμηλής ενέργειας και υψηλής απόλυτης ταχύτητας εξόδου 2. Μη πολύπλοκη τάση λυγίσματος/κάμψης 3. Εύκολη κατασκευή | <ol style="list-style-type: none"> 1. Σχετικά στενό περιθώριο απότομης ροής |
| Καμπυλωτά πτερύγια με κλίση προς τα πίσω | <ol style="list-style-type: none"> 1. Κινητική ενέργεια χαμηλής εξόδου=αριθμός Mach εισόδου χαμηλού διαχυτή 2. Ευρή περιθώριο απότομης ροής | <ol style="list-style-type: none"> 1. Μεταφορά χαμηλής ενέργειας 2. Πολύπλοκη τάση κάμψης 3. Δύσκολη κατασκευή |
| Καμπυλωτά πτερύγια με κλίση προς τα εμπρός | <ol style="list-style-type: none"> 1. Μεταφορά υψηλής ενέργειας | <ol style="list-style-type: none"> 1. Κινητική ενέργεια υψηλής εξόδου=αριθμός Mach εισόδου υψηλού διαχυτή 2. Το περιθώριο απότομης ροής είναι μικρότερο από αυτό των ακτινικών πτερυγίων 3. Πολύπλοκη τάση κάμψης 4. Δύσκολη κατασκευή |

Η εξίσωση του Euler, θεωρώντας την απλή, μονοδιάστατη θεωρία ροής, είναι η θεωρητική ποσότητα έργου που μεταδίδεται σε κάθε κιλό υγρού καθώς περνά διαμέσου του στροφείου και δίδεται από

$$\mathcal{H} = \frac{1}{g} [u_1 v_{\theta 1} - u_2 v_{\theta 2}] \quad (1-1)$$

Όπου:

H= έργο ανά κιλό υγρού

U₂= περιφερειακή ταχύτητα στροφείου

U₁= ταχύτητα επαγωγέα στον μέσο ακτινικό σταθμό

V_{θ2}= απόλυτη εφαπτόμενη ταχύτητα υγρού στην έξοδο του στροφείου

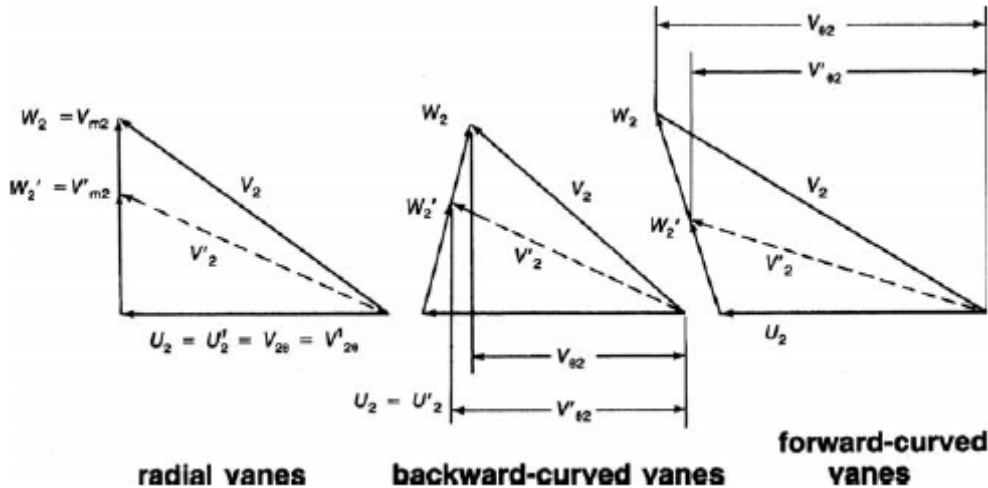
$V_{\theta 1}$ = απόλυτη εφαπτόμενη ταχύτητα αέρα στην είσοδο του επαγωγέα

Για την αξονική είσοδο,

$$V_{\theta 1} = 0$$

Τότε

$$\mathcal{H} = -\frac{1}{g_c} [u_2 v_{\theta 2}] \quad (1-2)$$



Εικόνα 1-10: Τρίγωνο ταχύτητας (radial vanes=ακτινικά πτερύγια, backward curved vanes=πτερύγια με κλίση προς τα πίσω καμπύλα πτερύγια, forward curved vanes=πτερύγια με κλίση προς τα εμπρός καμπύλα πτερύγια)

Εάν υποθέσουμε πως υπάρχουν συνεχείς ταχύτητες περιστροφής, καμία ολίσθηση και μια αξονική είσοδος, τα τρίγωνα ταχύτητας είναι όπως φαίνονται στην εικόνα 1-10. Για το ακτινικό πτερύγιο, η απόλυτη εφαπτόμενη ταχύτητα του υγρού στην έξοδο του στροφείου είναι συνεχής- ακόμα και αν το ποσοστό ροής αυξάνεται ή μειώνεται. Επομένως,

$$\mathcal{H} \approx u_2 v''_{\theta 2} \approx u_2 v_{\theta 2} \approx u_2 v'_{\theta 2} \quad (1.3)$$

Για καμπυλωτά πτερύγια με κλίση προς τα πίσω, η απόλυτη εφαπτόμενη ταχύτητα υγρού στην έξοδο του στροφείου αυξάνεται με τη μείωση των ποσοστών ροής και μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού ροής όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\mathcal{H} \approx -u_2 v''_{\theta 2} > -u_2 v_{\theta 2} < u_2 v'_{\theta 2} \quad (1.4)$$

μείωση

αύξηση

ροής

ροής

Για καμπυλωτά πτερύγια με κλίση προς τα εμπρός, η απόλυτη εφαπτόμενη ταχύτητα υγρού στην έξοδο του στροφείου μειώνεται με τη μείωση των ποσοστών της ροής και αυξάνεται με τη μείωση στο ποσοστό ροής όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\mathcal{H} \approx -u_2 v''_{\theta 2} < u_2 v_{\theta 2} > u_2 v'_{\theta 2} \quad (1-5)$$

μείωση

αύξηση

ροής

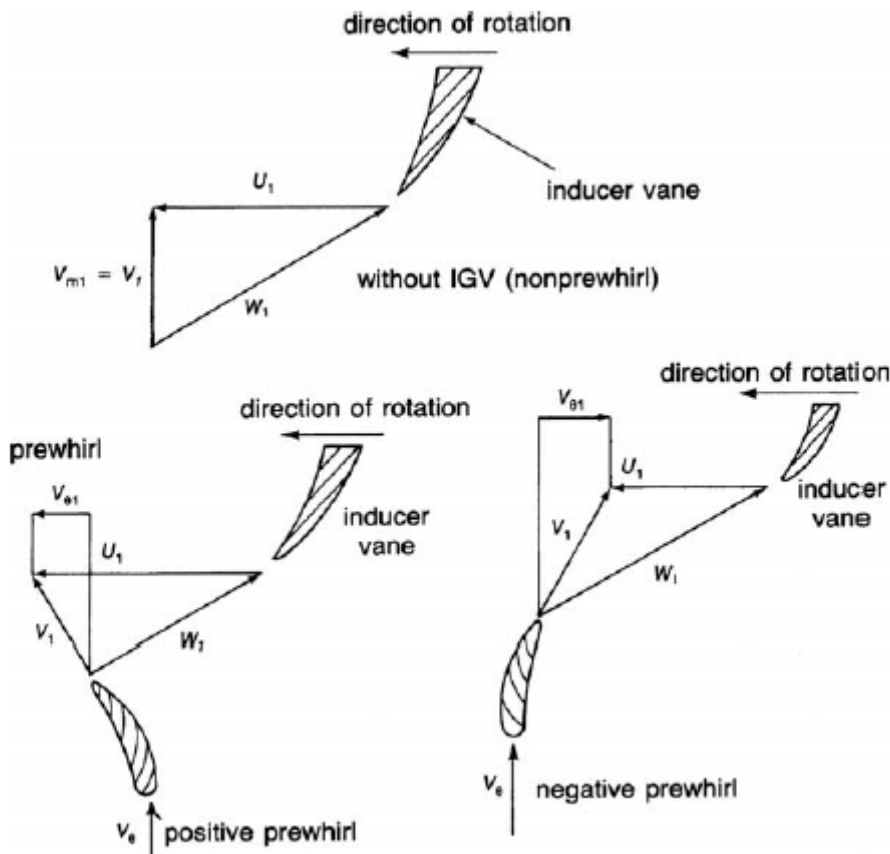
ροής

Οδηγά πτερύγια εισόδου

Τα οδηγά πτερύγια εισόδου δίνουν περιφερειακή ταχύτητα στο υγρό στην είσοδο του επαγωγέα. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται στροβιλισμός. Η εικόνα 1-11 δείχνει τα διαγράμματα της ταχύτητας εισόδου του επαγωγέα με και χωρίς πτερύγια-οδηγούς εισόδου. Τα πτερύγια εισόδου εγκαθίστανται απευθείας μπροστά στον επαγωγέα ή, όπου δεν είναι δυνατή η αξονική είσοδος, τοποθετούνται ακτινικά στον αγωγό εισόδου.

Μια θετική γωνία πτερυγίου παράγει στροβιλισμό στην κατεύθυνση περιστροφής του στροφεύου, ενώ μια αρνητική γωνία πτερυγίου παράγει στροβιλισμό στην αντίθετη κατεύθυνση. Το μειονέκτημα του θετικού στροβιλισμού είναι ότι μια θετική ταχύτητα στροβιλισμού εισόδου μειώνει τη μεταφορά ενέργειας. Εφόσον η $V_{\theta 1}$ είναι θετική σύμφωνα με την εξίσωση Euler,

$$\mathcal{H} = \frac{1}{g\omega} [u_1 v_{\theta 1} - u_2 v_{\theta 2}] \quad (1-6)$$



Εικόνα 1-11: Διαγράμματα ταχύτητας εισόδου του επαγωγέα (direction of rotation=κατεύθυνση περιστροφής, inducer vane=πτερύγιο επαγωγέα, prewhirl=στροβιλισμός, positive/negative prewhirl=θετικός/αρνητικός στροβιλισμός)

χωρίς στροβιλισμό (αξονική είσοδος χωρίς πτερύγια-οδηγούς εισόδου), η $V_{\theta 1}$ είναι ίση με το μηδέν. Τότε το έργο Euler είναι $H = -U_2 V_{\theta 2}$. Με θετικό στροβιλισμό, ο πρώτος όρος της εξίσωσης Euler παραμένει $H = U_1 V_{\theta 1} - U_2 V_{\theta 2}$. Επομένως το έργο Euler μειώνεται με τη χρήση θετικού στροβιλισμού. Αντίθετα, ο αρνητικός στροβιλισμός αυξάνει τη μεταφορά ενέργειας με την ποσότητα $U_1 V_{\theta 1}$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα

μια μεγαλύτερη πίεση κεφαλής που παράγεται στην περίπτωση αρνητικού στροβιλισμού για την ίδια διάμετρο και ταχύτητα του στροφείου.

Ο θετικός στροβιλισμός μειώνει τον σχετικό αριθμό Mach στην είσοδο του επαγωγέα, ενώ αντίθετα ο αρνητικός στροβιλισμός τον αυξάνει. Ένας σχετικός αριθμός Mach ορίζεται από:

$$M_{rel} = \frac{W_1}{a_1} \quad (1.7)$$

Όπου:

M_{rel} = σχετικός αριθμός Mach

W_1 = σχετική ταχύτητα σε μια είσοδο του επαγωγέα

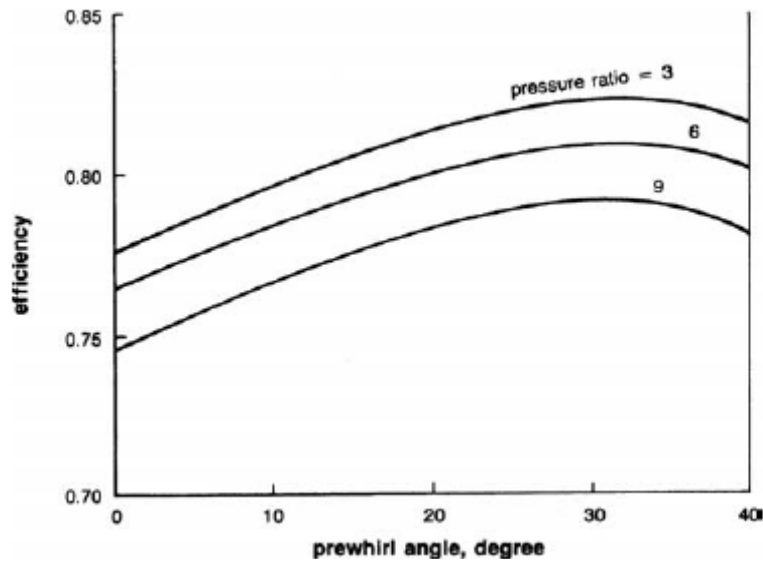
a_1 = ηχητική ταχύτητα στις συνθήκες εισόδου του επαγωγέα

Ο σκοπός εγκατάστασης των πτερυγίων-οδηγών εισόδου είναι να μειώσει τον σχετικό αριθμό Mach στην είσοδο του άκρου του επαγωγέα, επειδή η υψηλότερη σχετική ταχύτητα στην είσοδο του επαγωγέα βρίσκεται στο ακραίο τμήμα. Όταν η σχετική ταχύτητα είναι κοντά στην ηχητική ταχύτητα ή μεγαλύτερη από αυτή, ένα ωστικό κύμα πραγματοποιείται στο τμήμα του επαγωγέα. Ένα ωστικό κύμα παράγει απώλεια και «πνίγει» τον επαγωγέα. Η εικόνα 1-12 δείχνει την επίδραση του στροβιλισμού εισόδου στην απόδοση του συμπιεστή.

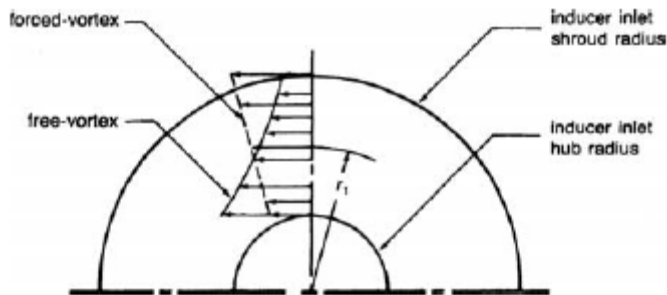
Υπάρχουν τρία είδη στροβιλισμού:

1. Στροβιλισμός χωρίς δίνη: Αυτός ο τύπος αντιπροσωπεύεται από $r_1 V_{\theta 1} = \text{σταθερό}$ σε σχέση με την ακτίνα εισόδου του επαγωγέα. Αυτή η κατανομή στροβιλισμού φαίνεται στην εικόνα 1-13. Η $V_{\theta 1}$ βρίσκεται στο ελάχιστο στην ακτίνα του καλύμματος της εισόδου του επαγωγέα. Επομένως, δεν είναι αποτελεσματικό στη μείωση του σχετικού αριθμού Mach στην περίπτωση αυτή.
2. Στροβιλισμός εξαναγκασμένης δίνης: Αυτός ο τύπος φαίνεται ως $V_{\theta 1}/r_1 = \text{σταθερό}$. Αυτή η κατανομή στροβιλισμού επίσης φαίνεται στην εικόνα 1-14. Η $V_{\theta 1}$ βρίσκεται στο μέγιστο στην ακτίνα του καλύμματος της εισόδου του επαγωγέα συμβάλλοντας στη μείωση του σχετικού αριθμού Mach εισόδου.
3. Στροβιλισμός ελεγχόμενης δίνης: Αυτό το είδος αντιπροσωπεύεται από $V_{\theta 1} = AR_1 + B/r_1$, όπου A και B είναι σταθερές. Αυτή η εξίσωση δείχνει τον πρώτο τύπο με $A = 0, B \neq 0$ και τον δεύτερο τύπο με $B = 0, A \neq 0$.

Οι κατανομές του έργου Euler στην έξοδο ενός στροφείου, σε σχέση με το εύρος του στροφείου, φαίνονται στην εικόνα 1-14. Από την εικόνα 1-14, η κατανομή στροβιλισμού θα πρέπει να πραγματοποιείται όχι μόνο από τον σχετικό αριθμό Mach στην ακτίνα καλύμματος εισόδου του επαγωγέα, αλλά και από την κατανομή του έργου Euler στην έξοδο του στροφείου. Οι συνθήκες της ροής εξόδου του επαγωγέα, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες του στροφείου, είναι σημαντικοί παράγοντες στην εξασφάλιση της καλής επίδοσης του συμπιεστή.



Εικόνα 1-12: Εκτιμώμενη επίδραση του στροβιλισμού

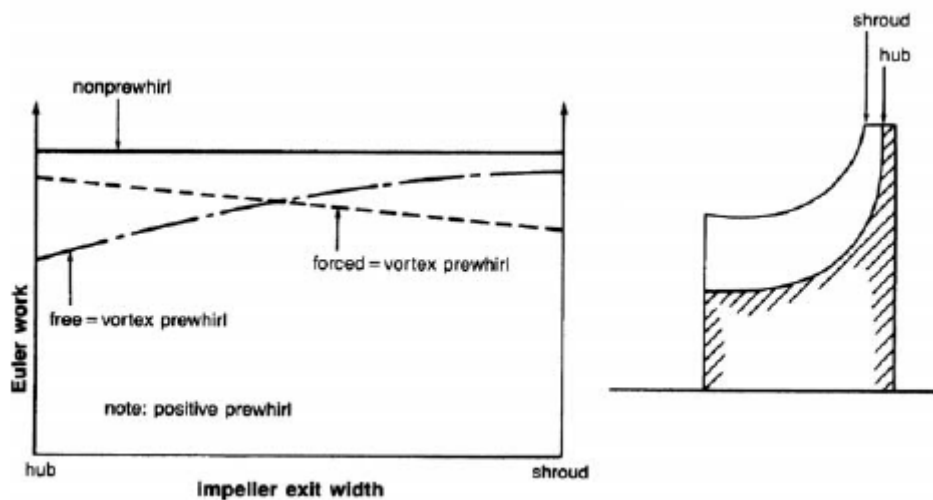


Εικόνα 1-13: Μορφές κατανομής στροβιλισμού

Στροφέιο

Ένα στροφέιο σε έναν φυγόκεντρο συμπιεστή μεταδίδει ενέργεια στο υγρό. Το στροφέιο αποτελείται από δύο βασικά συστατικά:

- 1) Έναν επαγωγέα σαν ένα ροτορα αξονικής ροής και

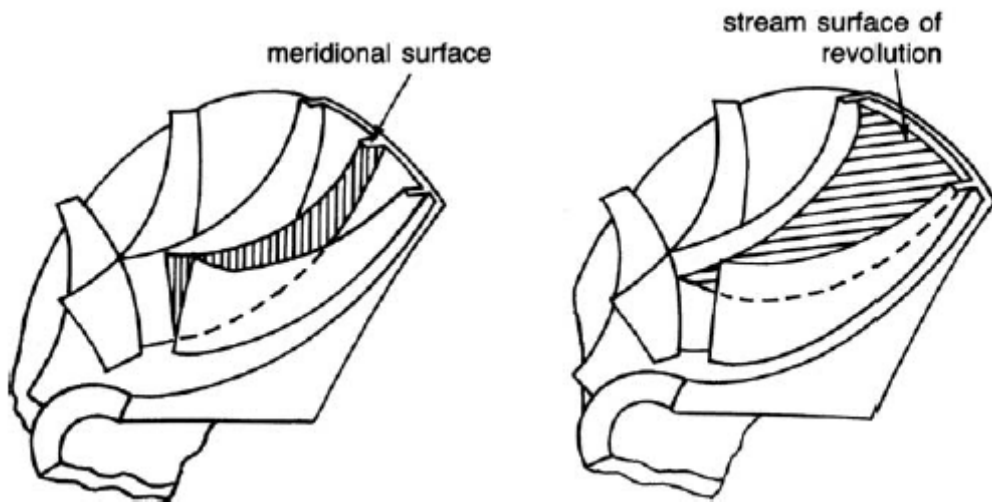


Εικόνα 1-14: Κατανομή έργου Euler στην έξοδο του στροφείου (non prewhirl=μη στροβιλισμός, free-vortex prewhirl=στροβιλισμός ελεύθερης δίνης, forced-vortex prewhirl=στροβιλισμός ωθούμενης δίνης, positive prewhirl=θετικός στροβιλισμός, impeller exit width=εύρος εξόδου του στροφείου, shroud=κάλυμμα, hub=περίβλημα)

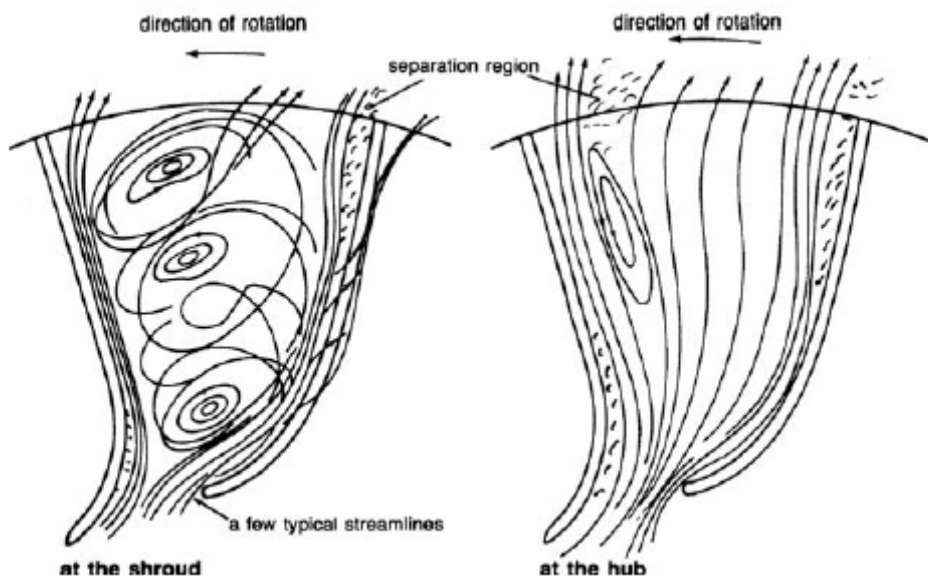
2) Ακτινικές λεπίδες στις οποίες μεταδίδεται ενέργεια από τη φυγόκεντρο δύναμη.

Η ροή εισάγεται στο στροφείο με αξονική κατεύθυνση και φεύγει από αυτό με ακτινική κατεύθυνση. Οι διακυμάνσεις ταχύτητας από την πλήμνη στο κάλυμμα που προκύπτουν από αυτές τις αλλαγές στις κατευθύνσεις ροής περιπλέκουν τη διαδικασία σχεδιασμού των φυγόκεντρων συμπιεστών έχουν γίνει πολλές ερευνητικές μελέτες για το θέμα αυτό αλλά καμία δεν είναι απολύτως επαρκής μιάς και πρέπει να γίνουν παραδοχές που σαφώς μειώνουν την ακρίβεια των εκτιμήσεων της κάθε θεωρίας. Παραδείγματα φαίνονται στην εικόνα 1-15. Χρησιμοποιώντας μια αριθμητική λύση στις εξισώσεις πολύπλοκης ροής, είναι πιθανόν να επιτευχθεί αποδοτικότητα στροφείου πάνω από 90%. Το φαινόμενο πραγματικής ροής σε ένα στροφείο είναι πιο πολύπλοκο από αυτό που μετράται. Ένα παράδειγμα αυτής της πολύπλοκης ροής φαίνεται στην εικόνα 1-16. Οι γραμμές ρεύματος, όπως φαίνονται στην εικόνα 1-16, δεν συγκλίνουν αλλά στην πραγματικότητα βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα κοντά στο κάλυμμα. Η εικόνα 1-17 δείχνει τη ροή στο νότιο επίπεδο με περιοχές διαχωρισμού στο τμήμα του επαγωγέα και στην έξοδο. Πειραματικές μελέτες της ροής μέσα στις διόδους του στροφείου έχουν δείξει ότι η κατανομή ταχυτήτων στις επιφάνειες των λεπίδων είναι διαφορετικές από τις κατανομές που έχουν προβλεφτεί σε θεωρητικό επίπεδο. Είναι πιθανόν ότι οι αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων οφείλονται στις δευτερεύουσες ροές από απώλειες πίεσης και στο διαχωρισμό του οριακού στρώματος στις διόδους των λεπίδων.

Τα στροφεία υψηλής απόδοσης θα πρέπει να σχεδιάζονται, όταν είναι δυνατόν, με τη βοήθεια θεωρητικών μεθόδων προκειμένου να προσδιοριστούν οι κατανομές ταχύτητας στις επιφάνειες της λεπίδας.

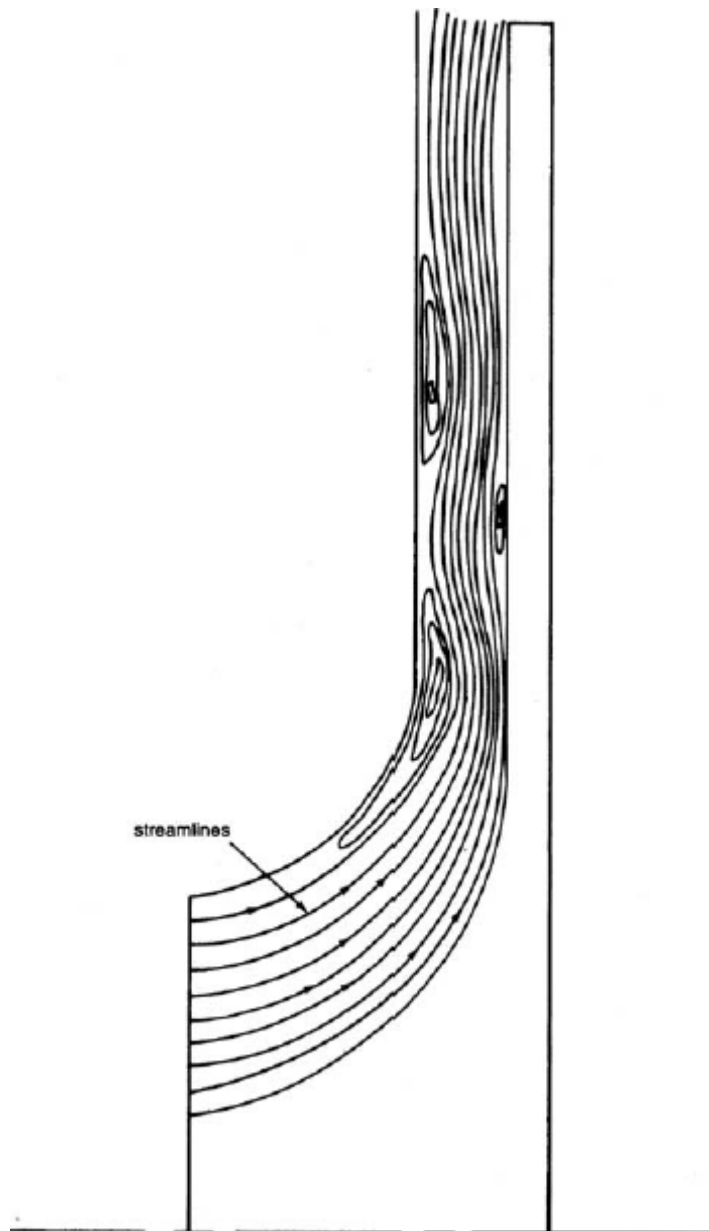


Εικόνα 1-15: Επιφάνεια δύο διαστάσεων για την ανάλυση της ροής (meridional surface=νότια επιφάνεια, stream surface of revolution=επιφάνεια κύματος)



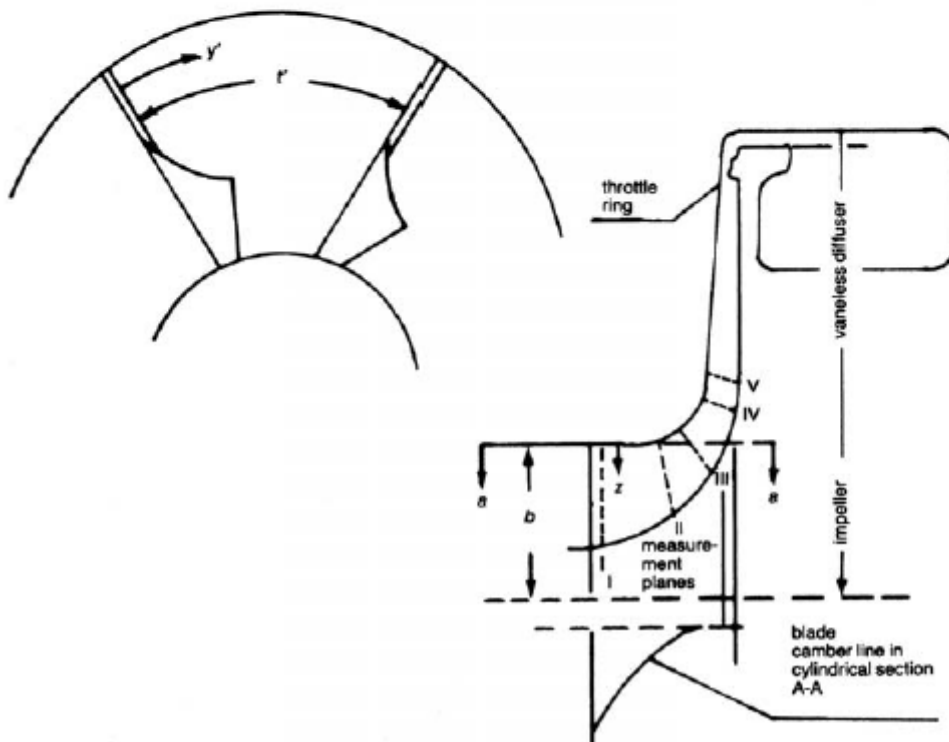
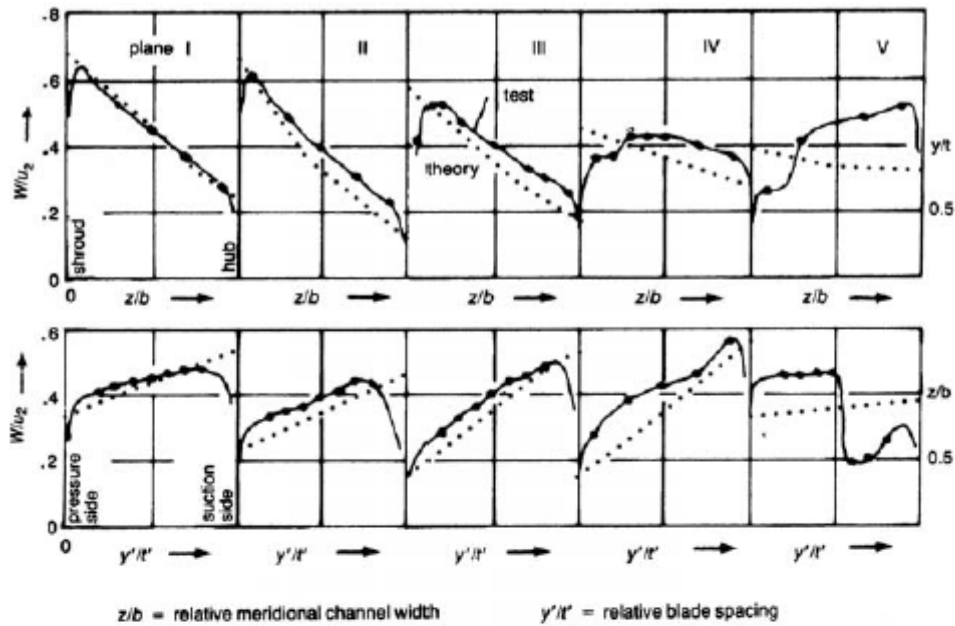
Εικόνα 1-16: Χάρτης ροής της επίπεδου πτερυγίου (direction of rotation=κατεύθυνση περιστροφής, separation region=περιοχή διαχωρισμού, a few typical streamlines=λίγες χαρακτηριστικές γραμμές κύματος, at the shroud=στο κάλυμμα, at the hub=στο περίβλημα)

Παραδείγματα κατανομής θεωρητικής ταχύτητας στις λεπίδες του στροφείου ενός φυγόκεντρου συμπιεστή φαίνονται στην εικόνα 1-18. Οι λεπίδες θα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να περιορίζουν μεγάλες επιβραδύνσεις και επιταχύνσεις της ροής στο στροφέιο οι οποίες οδηγούν σε μεγάλες απώλειες και στο διαχωρισμό της ροής.



Εικόνα 1-17: Χάρτης ροής σε μεσημβρινό επίπεδο

Πιθανές λύσεις ροής προβλέπουν την πηγή της ροής σε περιοχές μακριά από τις λεπίδες όπου τα αποτελέσματα των οριακών στρωμάτων είναι αμελητέα. Σε ένα φυγόκεντρο στροφέιο οι ιξωδεις διατμητικές δυνάμεις δημιουργούν ένα οριακό στρώμα με μειωμένη κινητική ενέργεια. Εάν η κινητική ενέργεια είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο, η ροή σε αυτό το στρώμα γίνεται στάσιμη και ύστερα αντιστρέφεται/αλλάζει.



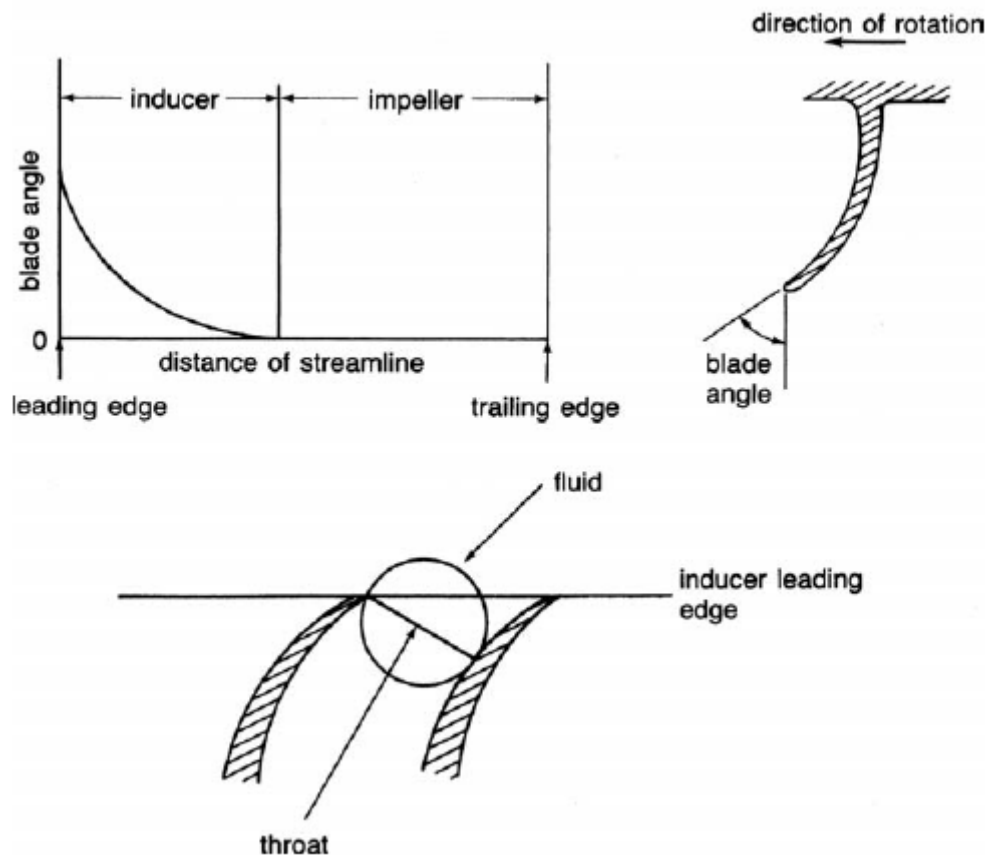
Εικόνα 1-18: Προφίλ ταχύτητας διαμέσου ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή (relative meridional channel width=σχετικό εύρος νότιου αγωγού, relative blade spacing=σχετικός χώρος λεπίδας)

Επαγωγέας

Η λειτουργία ενός επαγωγέα έγκειται στο να αυξήσει τη γωνιακή ορμή του υγρού χωρίς να αυξηθεί η ακτίνα περιστροφής του. Στο τμήμα του επαγωγέα οι λεπίδες λυγίζουν προς την κατεύθυνση της περιστροφής, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-19. Ο επαγωγέας είναι ένας αξονικό ροτορας και αλλάζει την κατεύθυνση της ροής από τη

γωνία ροής εισόδου προς την αξονική κατεύθυνση. Έχει τη μεγαλύτερη σχετική ταχύτητα στο στροφέιο και εάν δεν σχεδιαστεί σωστά, μπορεί να προκαλέσει «πνίξιμο»/» το λαιμό του, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-19.

Υπάρχουν τρεις μορφές καμπυλωτών γραμμών επαγωγέα στην αξονική κατεύθυνση. Ειδικότερα, ένα κυκλικό, ένα παραβολικό και ένα ελλειπτικό τόξο. Οι καμπυλωτές γραμμές του κυκλικού τόξου χρησιμοποιούνται σε συμπιεστές με τιμές χαμηλής πίεσης, ενώ το ελλειπτικό τόξο δημιουργεί καλή απόδοση σε τιμές υψηλής πίεσης όπου η ροή έχει διηχητικούς αριθμούς Mach.



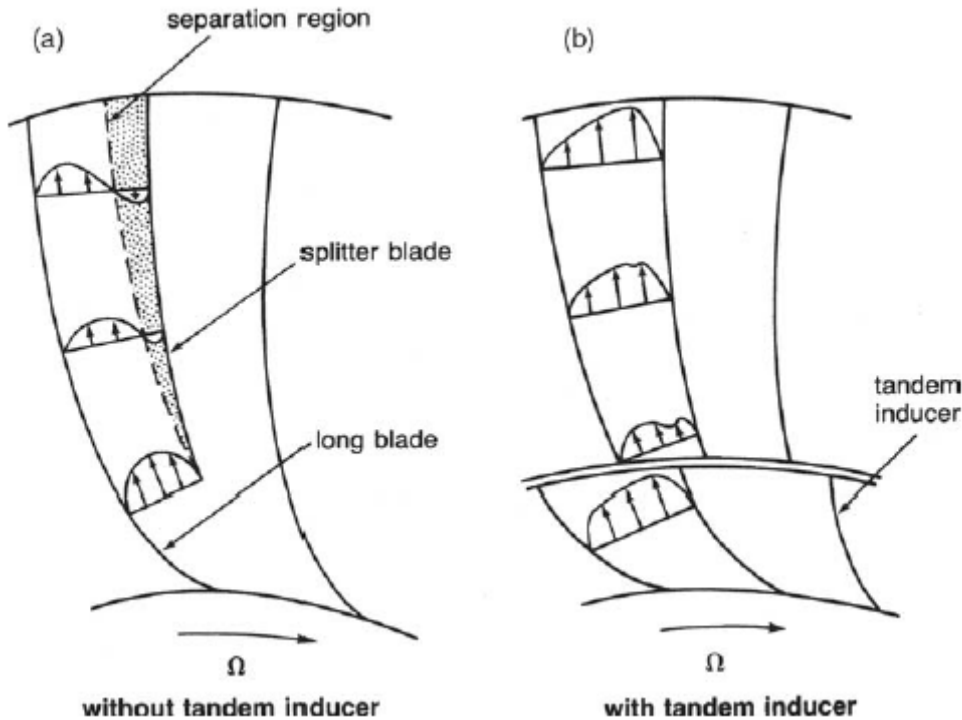
Εικόνα 1-19: Επαγωγέας φυγοκεντρικού συμπιεστή.

διαχύτη (blade angle=γωνία λεπίδας, distance of streamline=απόσταση γραμμής κύματος, leading edge=αρχικό άκρο, trailing edge=τελευταίο άκρο, inducer=επαγωγέας, impeller=στροφέιο, direction of rotation=κατεύθυνση περιστροφής, fluid=υγρό, throat='λαιμός', inducer leading edge=αρχικό άκρο επαγωγέα)

Λόγω των συνθηκών «πνιγμού» στον επαγωγέα, πολλοί συμπιεστές ενσωματώνουν ένα μοτίβο λεπίδων διάσπασης. Το μοτίβο της ροής σε ένα τέτοιο τμήμα του επαγωγέα φαίνεται στην εικόνα 1-20α. Αυτό το μοτίβο ροής δείχνει έναν διαχωρισμό στην πλευρά αναρρόφησης της λεπίδας διάσπασης. Άλλα μοτίβα περιλαμβάνουν παράλληλους επαγωγείς. Στους παράλληλους επαγωγείς το τμήμα του επαγωγέα περιστρέφεται ελαφρά, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-20b. Αυτή η τροποποίηση δίνει επιπλέον κινητική ενέργεια στο άκρο, το οποίο διαφορετικά είναι πιθανό να διαχωριστεί.

Το φυγόκεντρο τμήμα του στροφείου

Η ροή σε αυτό το τμήμα του στροφείου εισέρχεται από το τμήμα του επαγωγέα και φεύγει από το στροφείο προς την ακτινική κατεύθυνση. Η ροή σε αυτό το τμήμα δεν κατευθύνεται πλήρως από τις λεπίδες και έτσι η αποτελεσματική γωνία εξόδου του υγρού δεν ισούται με τη γωνία εξόδου της λεπίδας.



Εικόνα 1-20: Κανάλι ροής στροφείου

(separation region=περιοχή διαχωρισμού, splitter blade=λεπίδα διαχωρισμού, long blade=μακριά λεπίδα, tandem inducer=παράλληλος επαγωγέας, without tandem inducer=χωρίς παράλληλο επαγωγέα, with tandem inducer=με παράλληλο επαγωγέα)

Για την αιτιολόγηση της απόκλισης της ροής (η οποία είναι παρόμοια με το αποτέλεσμα που εξηγείται από τη γωνία απόκλισης στις μηχανές αξονικής ροής) χρησιμοποιείται ο παράγοντας ολίσθησης:

$$\mu = \frac{V_{\theta 2}}{V_{\theta 2\infty}} \quad (1-8)$$

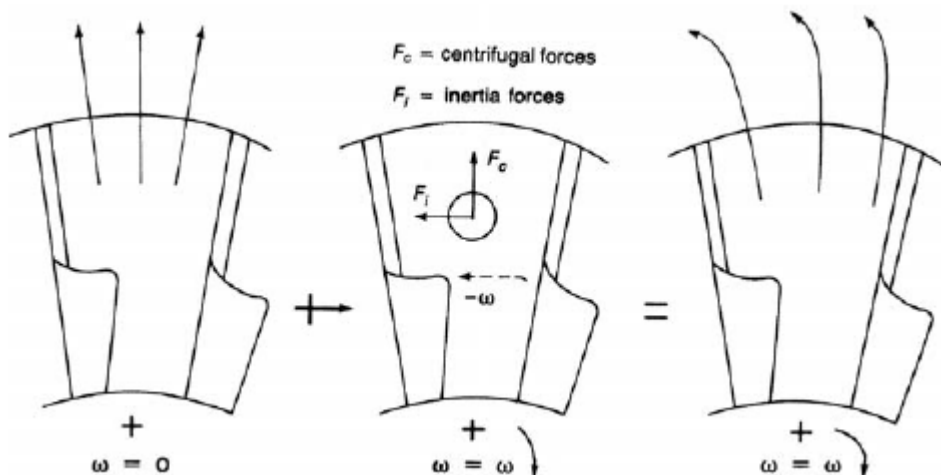
όπου $V_{\theta 2}$ είναι η εφαπτομενική συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας εξόδου με έναν πεπερασμένο αριθμό λεπίδων και $V_{\theta 2\infty}$ είναι η εφαπτομενική συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας εξόδου, εάν το στροφείο έχει έναν ατελείωτο αριθμό λεπίδων (καμία οπίσθια ολίσθηση της σχετικής ταχύτητας στην έξοδο).

Με ακτινικές λεπίδες στην έξοδο:

$$\mu = \frac{V_{\theta 2}}{U_2} \quad (1.9)$$

Η ροή σε ένα περιστρεφόμενο αγωγό του στροφείου (δίοδος λεπίδας) θα είναι ένα σύνολο ανύσματος ροής με το σταθερό στροφείο και τη ροή εξαιτίας της περιστροφής του στροφείου όπως φαίνεται στην εικόνα 1-21.

Σε ένα στατικό στροφείο, η ροή αναμένεται να ακολουθήσει το σχήμα της λεπίδας και να φύγει από αυτό εφάπτοντας. Μια μεγάλη κλίση αντίθετης πίεσης κατά μήκος της δίοδου της λεπίδας και ο ακόλουθος διαχωρισμός της ροής δεν θεωρούνται γενικώς πιθανοί. Η αδράνεια και οι φυγόκεντρες δυνάμεις ωθούν τα υγρά στοιχεία να πλησιάσουν και να κινηθούν κατά μήκος της επιφάνειας της λεπίδας προς την έξοδο. Εφόσον βρεθούν εκτός της δίοδου της λεπίδας, όπου δεν υπάρχει θετική δράση του στροφείου, αυτά τα υγρά στοιχεία επιβραδύνουν τη ταχύτητά τους.



Εικόνα 1-21: Δυνάμεις και χαρακτηριστικά ροής σε ένα φυγόκεντρικό συμπιεστή (F_c =φυγόκεντρες δυνάμεις, F_i =δυνάμεις αδράνειας)

Αιτίες ολίσθησης σε ένα στροφείο

Δεν είναι γνωστή η σαφής αιτία του φαινομένου ολίσθησης που πραγματοποιείται σε ένα στροφείο. Παρ'όλ'αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάποιοι λόγοι προκειμένου να εξηγηθεί η αλλαγή της ροής.

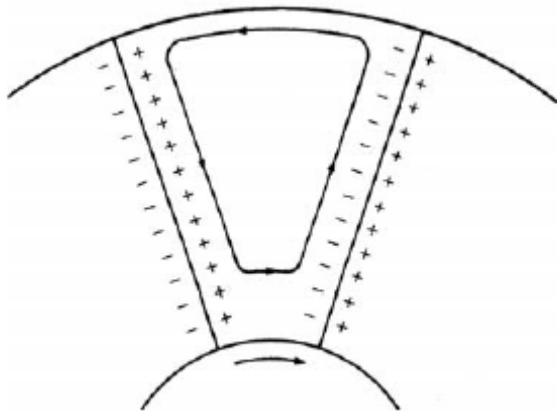
Κυκλοφορία Coriolis

Εξαιτίας της κλίσης της πίεσης μεταξύ των τοίχων δύο γειτονικών λεπίδων, οι δυνάμεις Coriolis, οι φυγόκεντρες δυνάμεις και το υγρό ακολουθούν το νόμο στροβιλότητας του Helmholtz. Η συνδυασμένη κλίση που προκύπτει προκαλεί κίνηση του υγρού από τον έναν τοίχο στον άλλο και αντίστροφα. Αυτή η κίνηση δημιουργεί κυκλοφορία μέσα στη δίοδο, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-22. Εξαιτίας αυτής της κυκλοφορίας, η κλίση της ταχύτητας καταλήγει στην έξοδο του στροφείου με αλλαγή στη γωνία εξόδου του στροφείου.

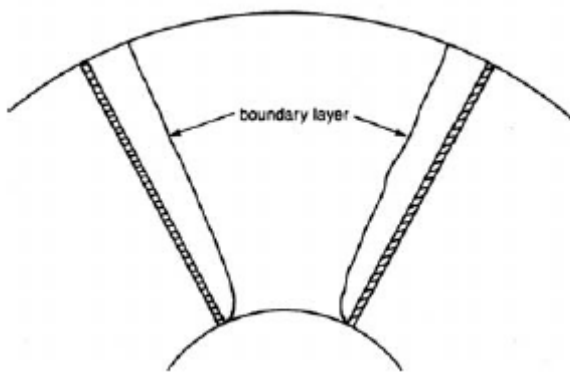
Ανάπτυξη οριακού στρώματος

Το οριακό στρώμα που αναπτύσσεται στη δίοδο του στροφείου ωθεί το υγρό να δοκιμάσει μια μικρότερη περιοχή εξόδου, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-23. Αυτή η μικρότερη έξοδος οφείλεται στη μικρή ροή (εάν υπάρχει) μέσα στο οριακό στρώμα. Προκειμένου το υγρό να βγει από αυτή τη μικρή περιοχή, θα πρέπει να αυξηθεί η ταχύτητά του. Αυτή η αύξηση δίνει μια υψηλότερη σχετική ταχύτητα εξόδου. Καθώς η μεσημβρινή ταχύτητα παραμένει σταθερή, η αύξηση της σχετικής ταχύτητας θα

πρέπει να συνοδεύεται από μείωση της απόλυτης ταχύτητας. Αν και δεν αποτελεί καινούργια προσέγγιση, ο έλεγχος του οριακού στρώματος χρησιμοποιείται περισσότερο από ποτέ. Έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε σχέδια αεροτομής, όταν υπήρχε καθυστερημένος διαχωρισμός, δίνοντας έτσι μια μεγαλύτερη χρήσιμη γωνία προσβολής. Ο έλεγχος της ροής σε μία αεροτομή πραγματοποιείται με δύο τρόπους: χρησιμοποιώντας εγκοπές διαμέσου της αεροτομής και εισάγοντας ένα ρεύμα αέρα ταχέως κίνησης. Περιοχές διαχωρισμού συναντώνται επίσης στο φυγόκεντρο συμπιεστή, όπως είδαμε νωρίτερα. Εφαρμόζοντας την ίδια ιδέα (ο διαχωρισμός προκαλεί απώλεια απόδοσης και δύναμης) μειώνει και επιβραδύνει το σχηματισμό τους.



Εικόνα 1-22: Κυκλοφορία Coriolis



Εικόνα 1-23: Ανάπτυξη οριακού στρώματος

Αλλάζοντας την πορεία του υγρού που κινείται αργά, οι περιοχές διαχωρισμού μπορούν να καταληφθούν από ένα γρηγορότερο ρεύμα υγρού το οποίο μειώνει τη συγκέντρωση του οριακού στρώματος και, επομένως, μειώνει το διαχωρισμό. Για τον έλεγχο του οριακού στρώματος σε ένα φυγόκεντρο στροφέιο χρησιμοποιούνται εγκοπές στις λεπίδες του στροφέιου στο σημείο του διαχωρισμού. Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η πλήρης δυνατότητα αυτού του συστήματος, αυτές οι εγκοπές θα πρέπει να είναι κατευθυντήριες και συγκλίνουσες σε μία διατμηματική περιοχή από τις πλευρές πίεσης ως τις πλευρές αναρρόφησης, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-24. Το υγρό με αλλαγή κατεύθυνσης λόγω των εγκοπών, αυξάνει ταχύτητα και προσκολλάται στις πλευρές αναρρόφησης των λεπίδων, με αποτέλεσμα η περιοχή

διαχωρισμού να πλησιάζει την κορυφή του στροφείου μειώνοντας έτσι την ολίσθηση και τις απώλειες που δημιουργούνται από το σχηματισμό μεγάλων περιοχών οριακού στρώματος. Οι εγκοπές θα πρέπει να βρίσκονται στο σημείο διαχωρισμού της ροής από τις λεπίδες. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων δείχνουν βελτίωση στις τιμές πίεσης, στην απόδοση και τα χαρακτηριστικά απότομης ροής του επαγωγέα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-24.

Διαρροή

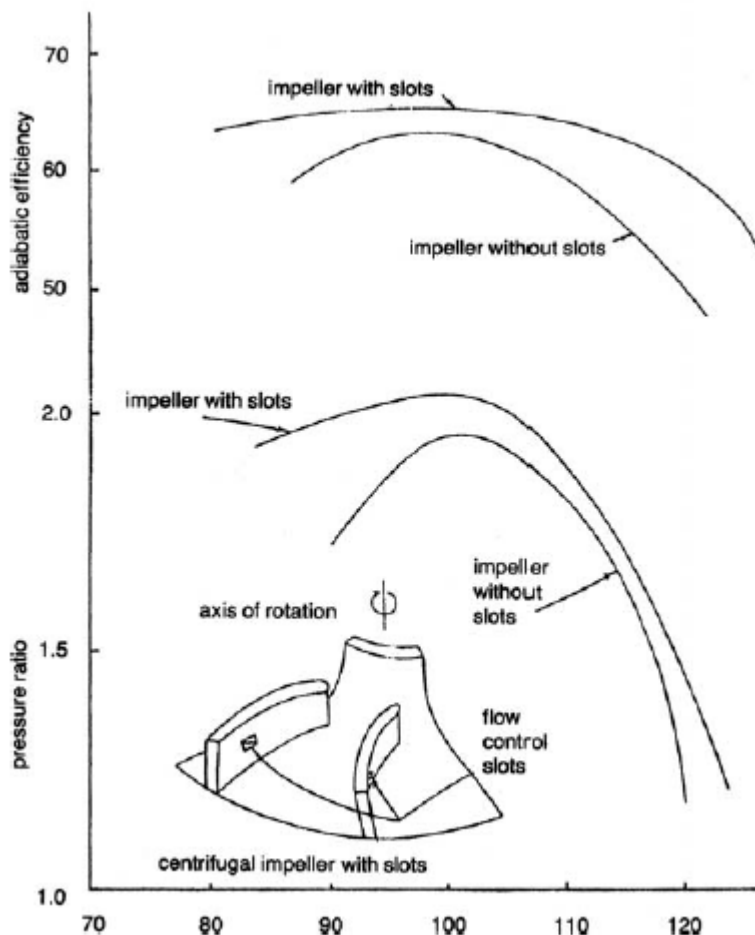
Η ροή του υγρού από τη μία πλευρά της λεπίδας στην άλλη αναφέρεται ως διαρροή. Η διαρροή μειώνει τη μεταφορά ενέργειας από το στροφείο στο υγρό και, επίσης, μειώνει τη γωνία της ταχύτητας εξόδου.

Ο αριθμός πτερυγίων

Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πτερυγίων, τόσο μικρότερο είναι το φορτίο των πτερυγίων και τόσο πιο κοντά το υγρό ακολουθεί τα πτερύγια. Με μεγαλύτερα φορτία πτερυγίων, η ροή τείνει να συγκεντρωθεί στις επιφάνειες πίεσης και εισάγει μία κλίση ταχύτητας στην έξοδο.

Πυκνότητα πτερυγίων

Εξαιτίας των προβλημάτων κατασκευής και φυσικής, τα πτερύγια του στροφείου είναι πυκνά.



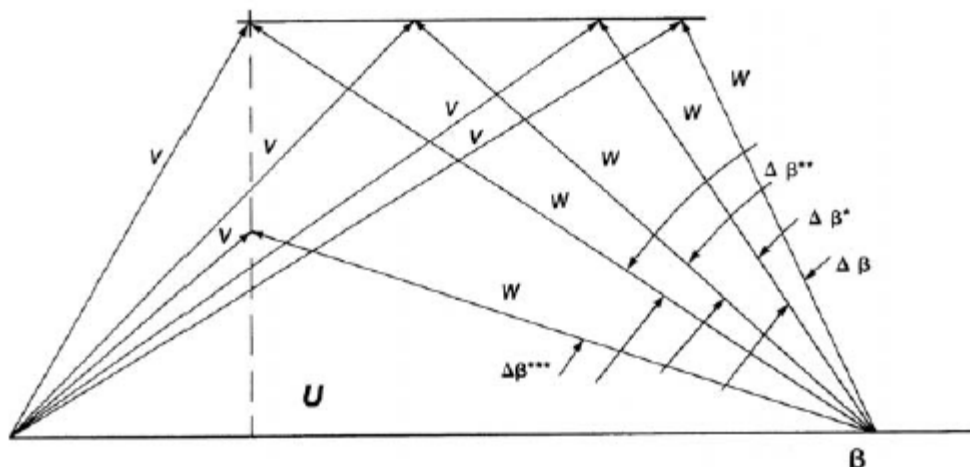
Εικόνα 1-24: Ποσοστό ελέγχου ροής σχεδιασμού στρωτής ροής σε ένα φυγοκεντρικό συμπιεστή

(impeller with slots=στροφέιο με εγκοπές, axis of rotation=ακτίνα περιστροφής, impeller without slots=στροφέιο χωρίς εγκοπές, flow control slots=εγκοπές ελέγχου της ροής)

Όταν το υγρό εξέρχεται από το στροφέιο τα πτερύγια δεν περιλαμβάνουν άλλο τη ροή και η ταχύτητα απευθείας μειώνεται. Επειδή είναι η μεσημβρινή) ταχύτητα αυτή που μειώνεται, τόσο οι σχετικές όσο και οι απόλυτες ταχύτητες μειώνονται, αλλάζοντας τη γωνία εξόδου του υγρού.

Μια λεπίδα στροφέιου καμπυλωτή προς τα πίσω συνδυάζει όλα αυτά τα αποτελέσματα. Το τρίγωνο ταχύτητας εξόδου αυτού του στροφέιου με τις αλλαγές του διαφορετικού φαινομένου ολίσθησης φαίνεται στην εικόνα 1-25. Αυτό το τρίγωνο δείχνει ότι οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας έχουν απομονωθεί από τη συνθήκη του σχεδιασμού.

Αρκετές εμπειρικές εξισώσεις έχουν προέλθει από τον παράγοντα ολίσθησης (εικόνα 1-26). Αυτές οι εμπειρικές εξισώσεις είναι περιορισμένες. Δύο από τους πιο κοινούς παράγοντες ολίσθησης παρουσιάζονται εδώ.

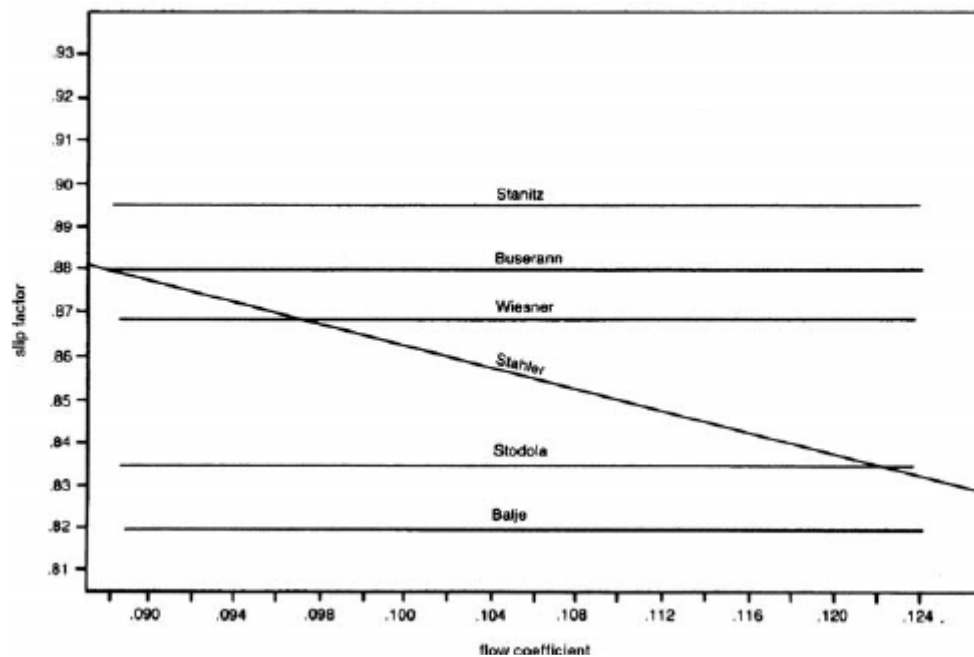


$\Delta \beta^*$ is caused by Coriolis circulation

$\Delta \beta^{**}$ is caused by boundary-layer effects

$\Delta \beta^{***}$ is caused by the blade thickness

Εικόνα 1-25: Επίδραση στα τρίγωνα ταχύτητας εξόδου ποικίλων παραμέτρων ($\Delta \beta$ προκαλείται από την κυκλοφορία Coriolis, $\Delta \beta$ προκαλείται από τις επιδράσεις του οριακού στρώματος, $\Delta \beta$ προκαλείται από την πυκνότητα των λεπίδων)



Εικόνα 1-26: Ποικίλοι παράγοντες ολίσθησης σαν συνάρτηση του συντελεστή ροής

Παράγοντας ολίσθησης Stodola

Ο δεύτερος νόμος του Helmholtz αναφέρει ότι η στροβιλότητα ενός υγρού χωρίς τριβή δεν αλλάζει με τον χρόνο. Έτσι, εάν η ροή στην είσοδο ενός στροφείου είναι αστρόβιλη, η απόλυτη ροή θα πρέπει να παραμένει αστρόβιλη σε όλη την έκταση του στροφείου. Καθώς το στροφείο έχει μια γωνιακή ταχύτητα ω , το υγρό θα πρέπει να έχει γωνιακή ταχύτητα ω σχετική με το στροφείο. Αυτή η κίνηση του υγρού ονομάζεται σχετική δίνη/στροβιλισμός. Εάν δεν υπήρχει καμία ροή στο στροφείο, το υγρό στους αγωγούς του στροφείου θα στροβιλιζόταν με γωνιακή ταχύτητα ίση και αντίθετη στη γωνιακή ταχύτητα του στροφείου.

Ως προς την προσέγγιση της ροής, η θεωρία του Stodola παρουσιάζει την υπόθεση ότι η ολίσθηση οφείλεται στη σχετική δίνη/στροβιλισμό. Η σχετική δίνη θεωρείται ως μια περιστροφή ενός κυλίνδρου με υγρό στο άκρο/τέλος της διόδου της λεπίδας με γωνιακή ταχύτητα ω σχετικά με το δικό του άξονα. Ο παράγοντας ολίσθησης δίδεται από

$$\mu = 1 - \frac{\pi}{Z} \left[1 - \frac{\sin \beta_2}{V_{m2} \cot \beta_2} \frac{U_2}{U_2} \right] \quad (1.10)$$

όπου

β_2 = η γωνία της λεπίδας

Z = ο αριθμός των λεπίδων

V_{m2} = η μέση μβρινή ταχύτητα

U_2 = η ταχύτητα άκρου της λεπίδας

Οι υπολογισμοί που χρησιμοποιούν αυτή την εξίσωση έχει βρεθεί ότι είναι χαμηλότεροι από τις πειραματικές τιμές.

Παράγοντας ολίσθησης Stanitz

Ο Stanitz υπολόγισε τις λύσεις λεπίδα προς λεπίδα για οκτώ στροφεία και κατέληξε ότι για το εύρος των συνθηκών που καλύπτονται από τις λύσεις, η U είναι μια συνάρτηση του αριθμού των λεπίδων (Z) και η γωνία εξόδου της λεπίδας (β_2) είναι περίπου η ίδια είτε η ροή είναι συμπιεστή είτε όχι.

$$\mu = 1 - \frac{0.63\pi}{Z} \left[1 - \frac{1}{\frac{W_{m2}}{U_2} \cot \beta_2} \right] \quad (1-11)$$

Οι λύσεις του Stanitz ήταν για $\pi/4 < \beta_2 < \pi/2$. Αυτή η εξίσωση συγκρίνεται με τα εμπειρικά αποτελέσματα για ακτινικές ή σχεδόν ακτινικές λεπίδες.

Διαχύτες

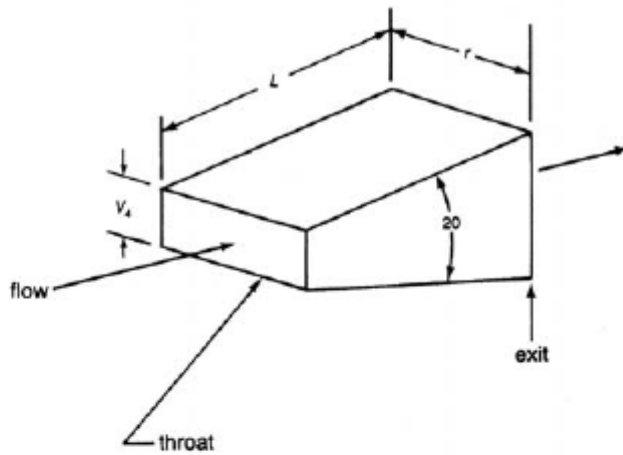
Οι δίοδοι το διαχύτη πάντα έπαιζαν ένα ζωτικό ρόλο στην επίτευξη της καλής επίδοσης των τουρμπομηχανών. Ο ρόλος τους είναι να ανακτήσουν τη μέγιστη δυνατή κινητική ενέργεια του στροφείου με την ελάχιστη απώλεια σε πλήρη πίεση. Η αποδοτικότητα των εξαρτημάτων του φυγόκεντρου συμπιεστή σταδιακά έχει βελτιωθεί με την πρόοδο της λειτουργίας τους. Παρ'όλα αυτά, σημαντική περαιτέρω αύξηση της αποδοτικότητας θα επιτευχθεί μόνο με τη βελτίωση των χαρακτηριστικών ανάκτησης της πίεσης των στοιχείων διάχυσης αυτών των μηχανών, καθώς αυτά τα στοιχεία έχουν τη χαμηλότερη αποδοτικότητα.

Τα χαρακτηριστικά της απόδοσης ενός διαχύτη είναι πολύπλοκες συναρτήσεις της γεωμετρίας του διαχύτη, των συνθηκών της ροής εισόδου και της ροής εξόδου. Η εικόνα 1-27 δείχνει τυπικούς διαχύτες κατηγοριοποιημένους ανάλογα με τη γεωμετρία τους. Η επιλογή του βέλτιστου αγωγού του διαχύτη για μια συγκεκριμένη εργασία είναι δύσκολη, διότι θα πρέπει να επιλεγεί μέσα από έναν σχεδόν ατελείωτο αριθμό μορφών διατομών και διατάξεις τοιχωμάτων. Σε ακτινικούς συμπιεστές και σε συμπιεστές μεικτής ροής η ανάγκη υψηλής απόδοσης και πυκνότητας οδηγεί στη χρήση διαχυτών με πτερύγια, όπως φαίνονται στην εικόνα 1-28. Ο συνδυασμός της ροής μεταξύ του στροφείου και του διαχύτη είναι πολύπλοκος επειδή το μονοπάτι της ροής αλλάζει από σύστημα περιστροφής σε στατικό σύστημα. Αυτή η πολύπλοκη ασταθής ροή επηρεάζεται από το τζετ απορρεύματος της ροής που εξέρχεται από το στροφείο, όπως φαίνεται στην εικόνα 6-29. Τα οριακά στρώματα τριών διαστάσεων, οι δευτερεύουσες ροές στην περιοχή χωρίς πτερύγια και ο διαχωρισμός της ροής στις λεπίδες επηρεάζουν, επίσης, τη γενικότερη ροή στο διαχύτη.

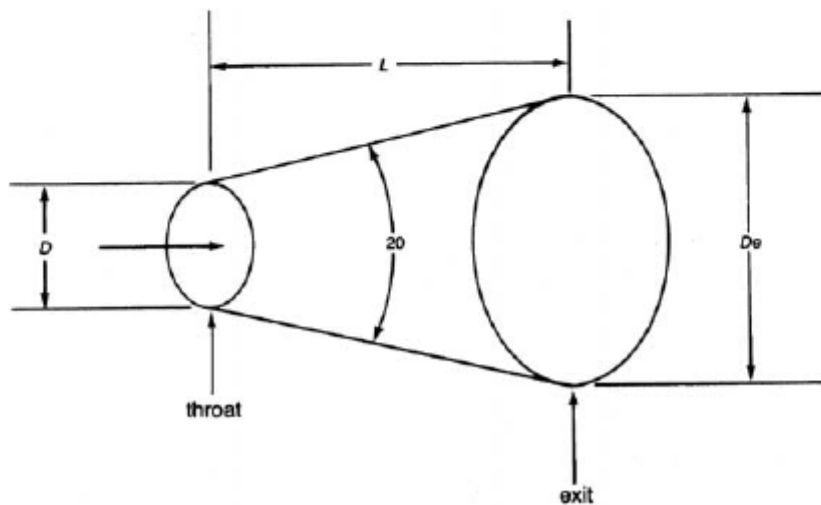
Η ροή στο διαχύτη συνήθως θεωρείται ότι είναι σταθερή για να αποκτήσει τη γενική, γεωμετρική διάταξη του διαχύτη. Σε έναν διαχύτη τύπου αγωγού, οι ιξώδεις διατμητικές δυνάμεις δημιουργούν ένα οριακό στρώμα με μειωμένη κινητική ενέργεια. Εάν η κινητική ενέργεια μειωθεί κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο, η ροή σε αυτό το στρώμα γίνεται στάσιμη και έπειτα αντιστρέφεται. Αυτή η αντιστροφή της ροής προκαλεί διαχωρισμό σε μία δίοδο του διαχύτη και καταλήγει σε απώλειες δίνης/στροβιλισμού, απώλειες μίξης και γωνίες αλλαγής της ροής. Ο διαχωρισμός θα πρέπει να αποφευχθεί ή να επιβραδυνθεί για να βελτιωθεί η λειτουργία του συμπιεστή.

Ο φυγόκεντρος συμπιεστής με τιμές υψηλής πίεσης έχει ένα περιορισμένο αλλά σταθερό εύρος λειτουργίας. Αυτό το εύρος λειτουργίας οφείλεται στη στενή εγγύτητα

των ορίων απότομης ροής και των ορίων «πνιγμού». Η απότομη ροή εκφράζει την ασταθή λειτουργία ενός συμπιεστή και είναι η περίοδος κατάρρευσης της ροής κατά τη διάρκεια ασταθούς λειτουργίας. Τα φαινόμενα ασταθούς ροής σε έναν φυγόκεντρο συμπιεστή με τιμές υψηλής πίεσης προκαλεί ταλάντευση της μαζικής ροής σε όλη την έκταση του συμπιεστή κατά τη διάρκεια των υποτιθέμενων σταθερών λειτουργιών.



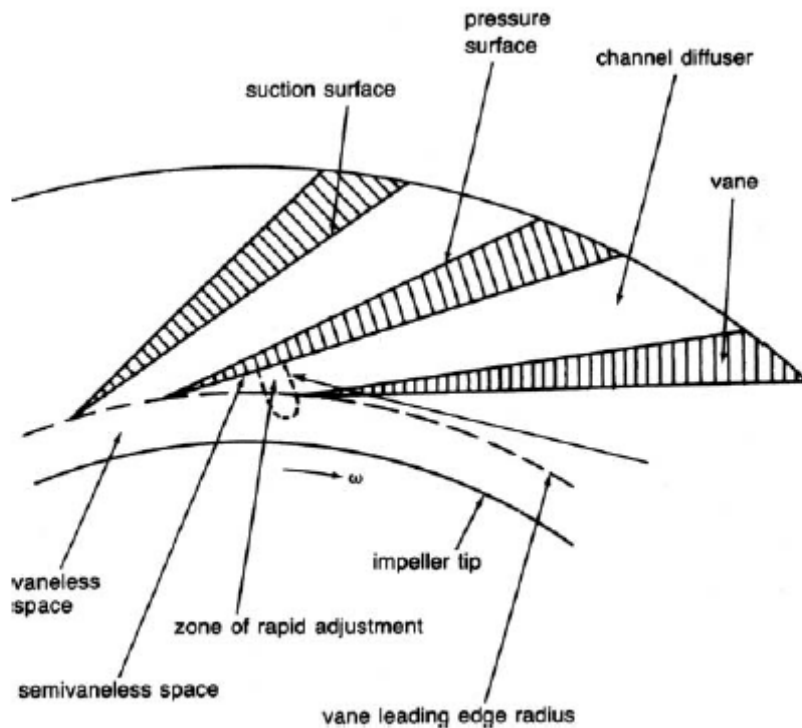
(a) straight-wall rectangular diffuser



(b) straight-wall conical diffuser

Εικόνα 1-27: Γεωμετρική ταξινόμηση των διαχυτών
(straight-wall rectangular diffuser=ορθογώνιος διαχύτης, straight-wall conical diffuser=κωνικός διαχύτης)

Η πίεση του 'λαιμού' σε ένα διαχύτη αυξάνεται κατά την προκαταρκτική περίοδο ως την πίεση του συλλέκτη P_{col} στο ξεκίνημα του κύματος απότομης ροής. Όλα τα ίχνη πίεσης (εκτός από την πλήρη πίεση) ξαφνικά πέφτουν στο σημείο κύματος. Η ξαφνική αλλαγή πίεσης μπορεί να εξηγηθεί από την υπολογισμένη εμφάνιση της επιστρεφόμενης ροής από τον συλλέκτη διαμέσου του στροφείου κατά τις περιόδους των δύο ξαφνικών αλλαγών.



Εικόνα 1-28: Περιοχές ροής του

(suction surface=επιφάνεια αναρρόφησης, pressure surface=επιφάνεια πίεσης, channel diffuser=αγωγός φιαχύτη, vane=πτερύγιο, vaneless space=τμήμα χωρίς πτερύγια, semivaneless space=τμήμα με λίγα πτερύγια, zone of rapid adjustment=ζώνη ραγδαίας προσαρμογής, impeller tip= κορυφή στροφείου, vane leading edge radius= ακτίνα πτερυγίου αρχικού άκρου)

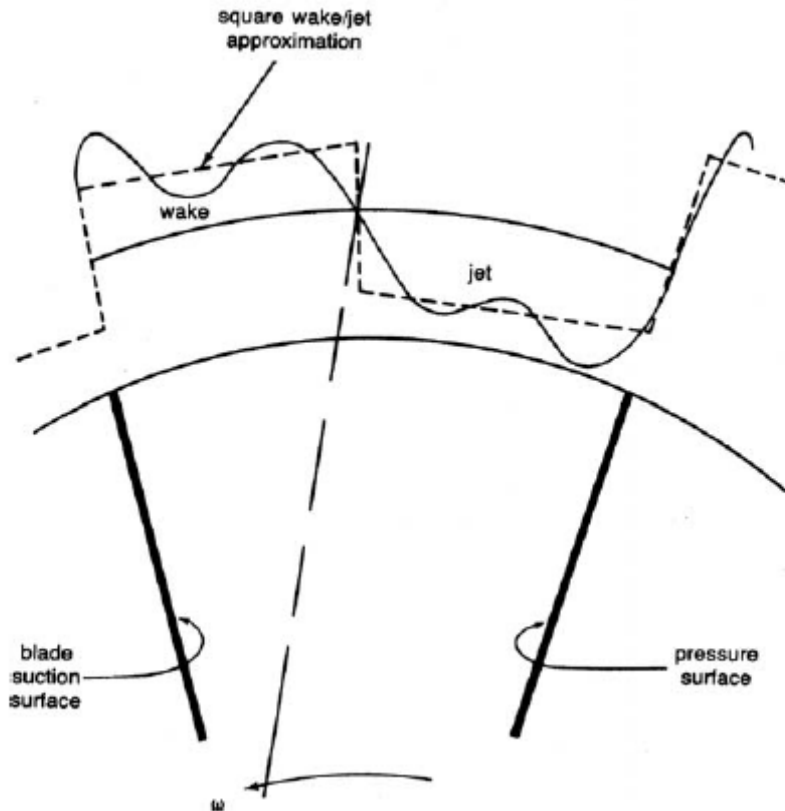
Έλικας ή Χοάνη

Ο σκοπός του έλικα είναι να συλλέξει το υγρό που φεύγει από το στροφέιο ή το διαχύτη και να το προωθήσει στο σωλήνα εξόδου του συμπιεστή. Ο έλικας έχει μια σημαντική επίδραση στη γενική απόδοση του συμπιεστή. Ο σχεδιασμός του έλικα βασίζεται σε δύο σχολές σκέψης. Πρώτον, η γωνιακή φορά της ροής στον έλικα είναι σταθερή, αγνοώντας οποιεσδήποτε επιδράσεις τριβής. Η εφαπτόμενη ταχύτητα V_{50} είναι η ταχύτητα σε οποιαδήποτε ακτίνα στον έλικα. Η ακόλουθη εξίσωση δείχνει τη σχέση εάν η γωνιακή φορά διατηρείται σταθερή

$$V_{50} r = \text{constant} = K \quad (1-12)$$

Θεωρώντας καμία διαρροή και μία σταθερή πίεση στην περιφέρεια του στροφείου, η σχέση της ροής σε κάθε τμήμα Q_θ με τη ολική ροή ενός στροφείου Q δίδεται από

$$Q_\theta = \frac{\theta}{2\pi} Q \quad (1.13)$$



Εικόνα 1-29: Κατανομή απορέυματος ροής από στροφέιο

jet-wake(εκτόξευση-αναταραχή) από ένα στροφέιο (square wake/jet approximation=τετράγωνη προσέγγιση αναταραχής/εκτόξευσης, blade suction surface=επιφάνεια αναρρόφησης λεπίδας, pressure surface=επιφάνεια πίεσης)

Επομένως, η περιοχή κατανομής σε οποιοδήποτε τμήμα θ μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση:

$$A_{\theta} = Qr \times \frac{\theta}{2\pi} \times \frac{L}{\mathcal{K}} \quad (1.14)$$

Όπου

r = η ακτίνα στο κέντρο της βαρύτητας

L = το εύρος όγκου)

Δεύτερον, ο σχεδιασμός του έλικα θα πρέπει να γίνεται θεωρώντας ότι η πίεση και η ταχύτητα είναι ανεξάρτητα της θ . Η περιοχή κατανομής στον έλικα δίδεται από:

$$A_{\theta} = \mathcal{K} \frac{Q}{V_{\infty\theta}} \times \frac{\theta}{2\pi} \quad (1.15)$$

Για να προσδιοριστεί το τμήμα του έλικα με συγκεκριμένο θ , θα πρέπει να αποφασιστούν πρώτα το σχήμα και η περιοχή του τμήματος. Μοτίβα ροής σε διάφορους τύπους έλικα φαίνονται στην εικόνα 1-30. Η ροή σε έναν ασύμμετρο έλικα έχει μονή αντί για διπλή δίνη στο συμμετρικό έλικα. Όταν το στροφέιο μεταβιβάζει τη ροή στον έλικα, είναι προτιμότερο το πλάτος του έλικα να είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του στροφέιου. Αυτή η μεγέθυνση έχει ως αποτέλεσμα η ροή από το

στροφείο να κατευθύνεται από τη δίνη που δημιουργείται από το κενό μεταξύ του στροφείου και του καλύμματος. Σε ροές διαφορετικές από τις συνθήκες σχεδιασμού, υπάρχει μία κλίση περιφερειακής πίεσης στο άκρο του στροφείου και στο έλικα με μία συγκεκριμένη ακτίνα. Σε χαμηλές ροές, η πίεση αυξάνεται με την περιφερειακή απόσταση από τη γλώσσα του έλικα. Σε υψηλές ροές, η πίεση πέφτει με την απόσταση από τη γλώσσα. Αυτό συμβαίνει διότι η ροή κοντά στη γλώσσα κατευθύνεται από το εξωτερικό τοίχωμα της διόδου. Οι κλίσεις της περιφερειακής πίεσης μειώνουν την αποδοτικότητα μακριά από το σημείο σχεδιασμού. Η μη ομοιόμορφη πίεση στην απελευθέρωση του στροφείου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ασταθών ροών στη δίοδο του στροφείου, προκαλώντας αντιστροφή της ροής και διαχωρισμό στο στροφείο.

Η απόδοση του φυγόκεντρου συμπιεστή

Η εξέταση της απόδοσης ενός φυγόκεντρου συμπιεστή σε συνθήκες σχεδιασμού και μη απαιτεί τη γνώση πολλαπλών απωλειών που συναντώνται σε ένα φυγόκεντρο συμπιεστή. Ο ακριβής υπολογισμός και η σωστή αξιολόγηση των απωλειών σε έναν φυγόκεντρο συμπιεστή είναι τόσο σημαντικοί όσο και ο υπολογισμός των παραμέτρων του φορτίου των λεπίδων. Εάν δεν ελεγχθούν οι κατάλληλες παράμετροι, μειώνεται η αποδοτικότητα. Η αξιολόγηση των διαφόρων απωλειών είναι συνδυασμός των πειραματικών αποτελεσμάτων και της θεωρίας. Οι απώλειες χωρίζονται σε δύο ομάδες:

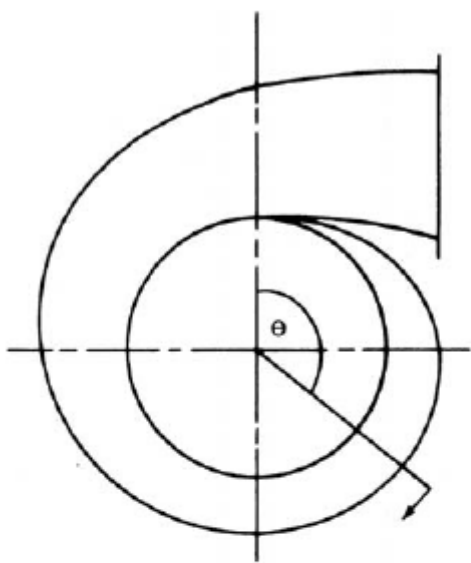
- 1) Απώλειες στο ρότορα
- 2) Απώλειες στο στάτορα

Η απώλεια συνήθως εκφράζεται ως απώλεια θερμότητας ή ενθαλπίας. Ένας συνήθης τρόπος για να εκφραστούν είναι με μία μέθοδο αδιάστατη με αναφορά στην ταχύτητα της λεπίδας εξόδου. Το διαθέσιμο, θεωρητικό, ολικό ύψος (q_{tot}) ισούται με το διαθέσιμο ύψος από την εξίσωση ενέργειας

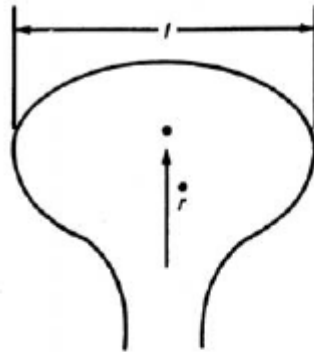
$$q_{th} = \frac{1}{U_2^2}(U_2 V_{\theta 2} - U_1 V_{\theta 1}) \quad (1-16)$$

συν το ύψος το οποίο χάνεται λόγω της τριβής του δίσκου ($\Delta_{q_{df}}$) και προερχόμενη από οποιαδήποτε ανακυκλοφόρηση ($\Delta_{q_{rc}}$) του αέρα μέσα από το διαχύτη:

$$q_{tot} = q_{th} + \Delta_{q_{df}} + \Delta_{q_{rc}} \quad (1.17)$$



volute



symmetrical



asymmetrical

Εικόνα 1-30: Μορφές ροής στην χοάνη (έλικα)

Το αδιαβατική ύψος το οποίο είναι στην πραγματικότητα διαθέσιμο στην κατάθλιψη ισούται με το θεωρητικό ύψος μείον τη θερμότητα από στο σοκ στο ρότορα (Δ_{qsh}), την απώλεια του επαγωγέα, τα φορτία των λεπίδων (Δ_{qbl}), το διάκενο μεταξύ μοτέρ και καλλύματος (Δ_{qc}) και τις παχύρρευστες απώλειες που συναντώνται στη δίοδο της ροής (Δ_{qsf}).

$$g_{ia} = q_{th} - \Delta_{qin} - \Delta_{qsh} - \Delta_{qbl} - \Delta_{qc} - \Delta_{qsf} \quad (1-18)$$

Επομένως, η αδιαβατική αποδοτικότητα στο στροφείο είναι:

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{q_{\text{ia}}}{q_{\text{tot}}} \quad (1.19)$$

Ο υπολογισμός της συνολικής αποδοτικότητας σταδίου θα πρέπει να περιλαμβάνει και τις απώλειες που συναντώνται στο διαχύτη. Επομένως, το πραγματικό συνολικό αδιαβατικό ύψος που επιτυγχάνεται θα είναι το πραγματικό αδιαβατικό ύψος του στροφείου μείον τις απώλειες ύψους που συναντώνται στο διαχύτη από τη διαταραχή που προκαλείται από τη λεπίδα στροφείου (Δ_{q_w}), την απώλεια τμήματος του κινητικού ύψους στην έξοδο του διαχύτη ($\Delta_{q_{ed}}$) και την απώλεια ύψους από τις δυνάμεις τριβής ($\Delta_{q_{osf}}$) που βρίσκονται στο τμήμα του διαχύτη με ή χωρίς πτερύγια.

$$q_{oa} = q_{ia} - \Delta_{q_w} - \Delta_{q_{ed}} - \Delta_{q_{osf}} \quad (1-20)$$

Η γενική αδιαβατική αποδοτικότητα σε ένα στροφέιο δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\eta_{ov} = \frac{q_{oa}}{q_{tot}}$$

Οι μεμονωμένες απώλειες μπορούν τώρα να υπολογιστούν. Οι απώλειες αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες : 1. απώλειες στο ρότορα και 2. απώλειες στο διαχύτη.

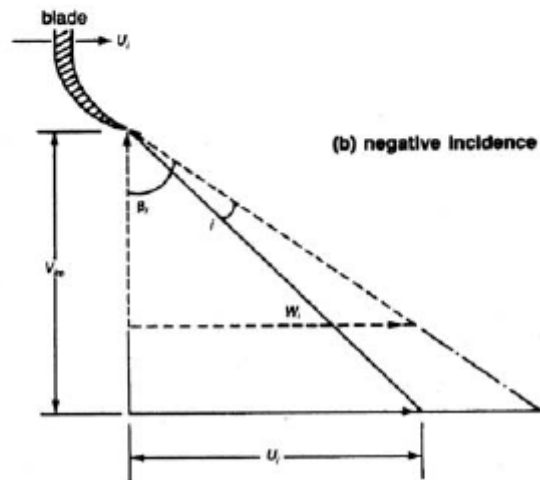
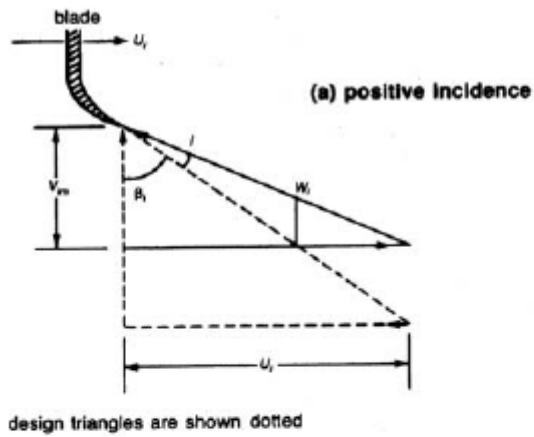
Απώλειες στο ρότορα

Οι απώλειες στο ρότορα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες :

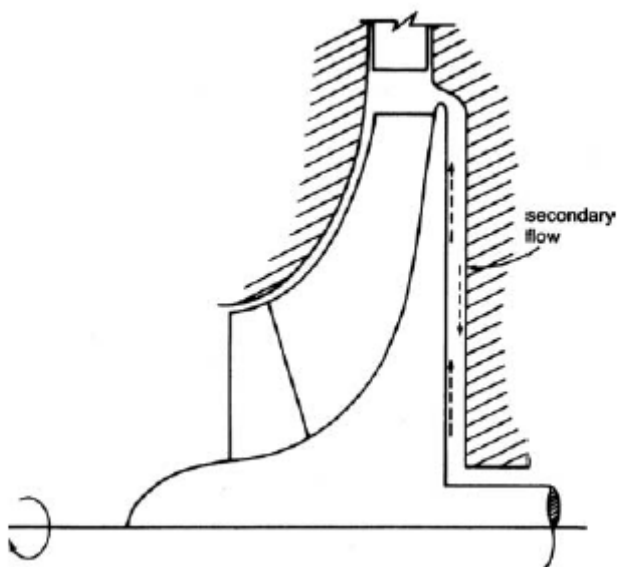
Σοκ στις απώλειες του ρότορα. Αυτές οι απώλειες οφείλονται στο σοκ που συμβαίνει στην είσοδο του ρότορα. Η είσοδος των λεπίδων του ρότορα πρέπει να είναι σφηνοειδής για να συγκρατήσει έναν ήπιο, πλάγιο κλονισμό και έπειτα να επεκταθεί σταδιακά στην πυκνότητα των λεπίδων για να αποφύγει έναν επιπλέον κλονισμό. Εάν οι λεπίδες είναι αμβλείες/στομωμένες, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα έναν κλονισμό της κλίσεως, προκαλώντας την απομάκρυνση της ροής από το τοίχωμα της λεπίδας και έτσι η απώλεια θα είναι μεγαλύτερη.

Δευτερεύουσα απώλεια. Σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού, η ροή εισέρχεται στο διαχύτη με γωνία συχνότητας που είναι είτε θετική είτε αρνητική, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-31. Η θετική γωνία συχνότητας προκαλεί μείωση της ροής. Το υγρό που προσεγγίζει τη λεπίδα με γωνία συχνότητας υφίσταται μία στιγμιαία μείωση της ταχύτητας στην είσοδο της λεπίδας για να συμβαδίσει με τη γωνία εισόδου της λεπίδας. Ο διαχωρισμός της λεπίδας μπορεί να προκαλέσει απώλεια που σχετίζεται με αυτό το φαινόμενο.

Απώλεια τριβής δίσκου. Η απώλεια αυτή οφείλεται στην τριβή της ροπής στρέψεως στην πίσω επιφάνεια του ρότορα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-32. Η απώλεια αυτή είναι ίδια για έναν δίσκο συγκεκριμένου μεγέθους είτε χρησιμοποιείται σε συμπίεστές ακτινικής εισροής είτε για τουρμπίνες ακτινικής εισροής.



Εικόνα 1-31: Τρίγωνο ταχύτητας εισόδου
(positive incidence=θετική πρόσπτωση, negative incidence=αρνητική πρόσπτωση)

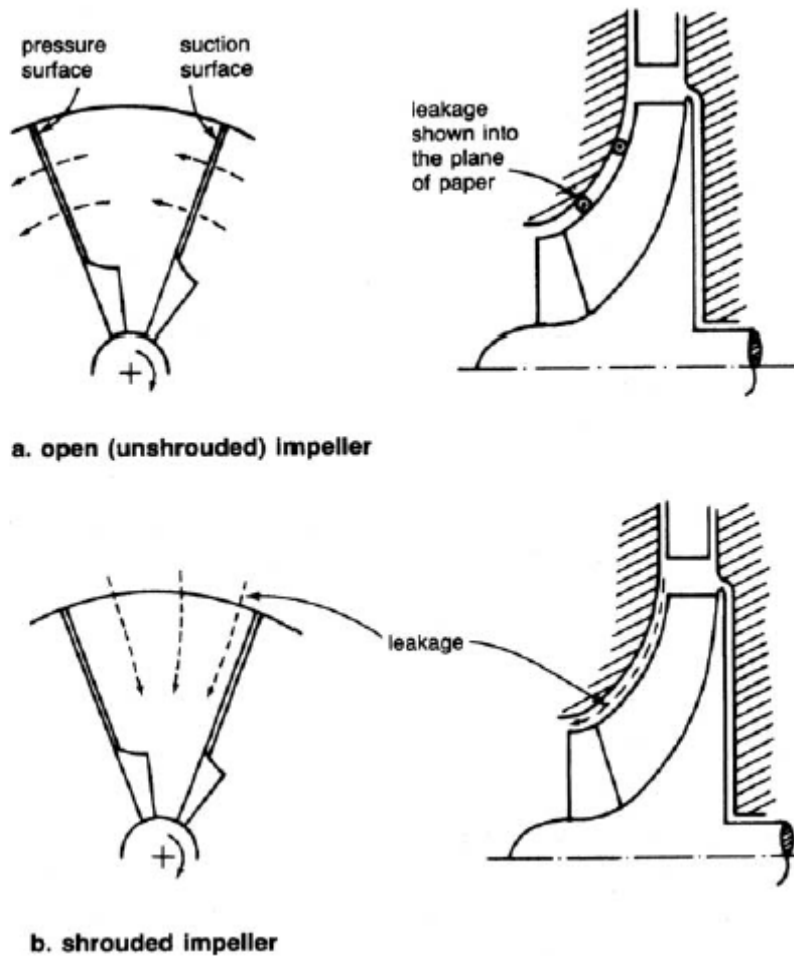


Εικόνα 1-32: Δευτερογενής ροή στο πίσω μέρος του στροφείου

Απώλειες στις στεγανοποιήσεις, στον προσανατολισμό και στο κιβώτιο ταχυτήτων (**gear box**) συμπεριλαμβάνονται σε αυτή την απώλεια, και ολόκληρη η απώλεια μπορεί να ονομαστεί εξωτερική απώλεια. Εάν το κενό δεν είναι μεγέθους οριακού στρώματος, η επίδραση του μεγέθους του κενού είναι αμελητέα.

Απώλεια λεπίδας διάχυσης. Αυτή η απώλεια πραγματοποιείται λόγω των κλίσεων αρνητικής ταχύτητας στο οριακό στρώμα. Η επιβράδυνση της ροής αυξάνει το οριακό στρώμα και προκαλεί διαχωρισμό της ροής. Η αντίθετη κλίση πίεσης, ενάντια στην οποία λειτουργεί ένας συμπίεστής, αυξάνει τις πιθανότητες διαχωρισμού και προκαλεί σημαντική απώλεια.

Απώλεια διακένου. Όταν ένα μόριο υγρού έχει κίνηση μετατόπισης σχετική με ένα μη αδρανές περιστρεφόμενο συντεταγμένο σύστημα, δέχεται τη δύναμη Coriolis. Μια διαφορά πίεσης υπάρχει μεταξύ των οδηγητικών και των πίσω πλευρών μιας λεπίδας στροφείου που προκαλείται από την επιτάχυνση Coriolis. Το συντομότερο και το πιο «ανθεκτικό» μονοπάτι για να διαχυθεί το υγρό και να μετριάσει τη διαφοροποίηση της πίεσης παρέχεται από το διάκενο μεταξύ του περιστρεφόμενου στροφείου και του στατικού καλύμματος. Με καλυμμένα στροφεία, μια τέτοια διαρροή από την πλευρά της πίεσης στην πλευρά της αναρρόφησης μιας λεπίδας στροφείου είναι αδύνατη. Αντίθετα, η ύπαρξη μιας κλίσης πίεσης στο διάκενο μεταξύ του καλύμματος και των εξαρτημάτων του στροφείου, που επικρατούν κατά μήκος της διαδρομής που φαίνεται στην εικόνα 1-33, εξηγεί την απώλεια του διακένου. Στεγανοποιήσεις στις άκρες του στροφείου μπορούν να μειώσουν σημαντικά την απώλεια.



Εικόνα 1-33: Διαρροή που επηρεάζει την απώλεια διακένου

(pressure surface=επιφάνεια πίεσης, suction surface=επιφάνεια αναρρόφησης, leakage shown into the plane of paper=διαρροή που φαίνεται στο πεδίο του χαρτιού, open impeller=ανοιχτό στροφέιο, shrouded impeller=καλυμμένο στροφέιο)

Αυτή η απώλεια μπορεί να είναι αρκετά ουσιώδης. Η ροή διαροής υφίσταται μεγάλη επέκταση και συστολή που προκαλείται από τη διαφορά στη θερμοκρασία κατά μήκος του διακένου, επηρεάζοντας τόσο τη ροή όσο και το ρεύμα μέσα στο οποίο απελευθερώνεται.

Απώλεια επιφανειακής τριβής. Είναι η απώλεια από διατμητικές δυνάμεις στο τοίχωμα του στροφέιου λόγω έντονης τριβής. Η απώλεια αυτή προσδιορίζεται θεωρώντας τη ροή ως μία ισοδύναμη κυκλική διατομή με υδραυλική διάμετρο. Έτσι η απώλεια υπολογίζεται βασιζόμενη σε γνωστές εξισώσεις απώλειας πίεσης ροής του σωλήνα.

Απώλειες στάτορα

Απώλεια ανακυκλοφόρησης. Η απώλεια αυτή συμβαίνει εξαιτίας της επιστροφόμενης ροής στην έξοδο του στροφέιου ενός συμπιεστή και είναι μία άμεση λειτουργία της γωνίας εξόδου του αέρα. Καθώς η ροή διαμέσου του συμπιεστή μειώνεται, συντελείται αύξηση στην απόλυτη γωνία ροής στην έξοδο του στροφέιου,

όπως φαίνεται στην εικόνα 1-34. Ένα τμήμα του υγρού κυκλοφορεί από το διαχύτη στο στροφέιο και η ενέργειά του επιστρέφει στο στροφέιο.

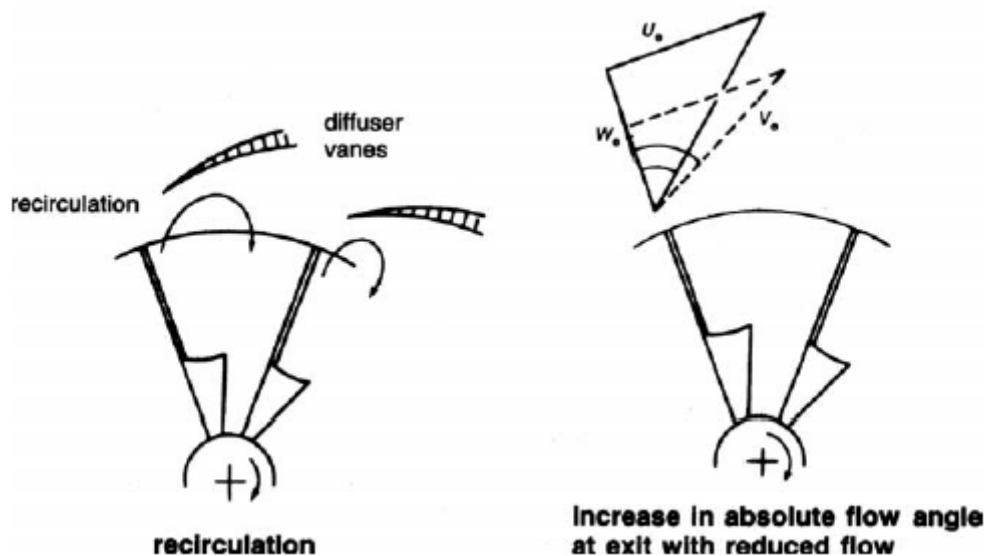
Απώλεια ανάμειξης απορρευμάτων: → Αυτή η απώλεια προκαλείται από τις λεπίδες στροφείου και προκαλεί ένα απόρρευμα στο χώρο χωρίς πτερύγια πίσω από τον ρότορα. Ελαχιστοποιείται σε έναν διαχύτη που είναι συμμετρικός γύρω από τον άξονα περιστροφής.

Απώλεια διαχύτη χωρίς πτερύγια → Η απώλεια αυτή πραγματοποιείται στο διαχύτη χωρίς πτερύγια και δημιουργείται από την τριβή και την απόλυτη γωνία ροής.

Απώλεια διαχύτη με πτερύγια → Οι απώλειες του διαχύτη με πτερύγια βασίζονται στα αποτελέσματα των τεστ σε κωνικούς διαχύτες. Αποτελούν συνάρτηση του φορτίου της λεπίδας στροφείου και της αναλογίας ακτίνας της περιοχής χωρίς πτερύγια. Λαμβάνουν υπόψιν την γωνία κλίσης λεπίδας και την επιφανειακή τριβή από τα πτερύγια.

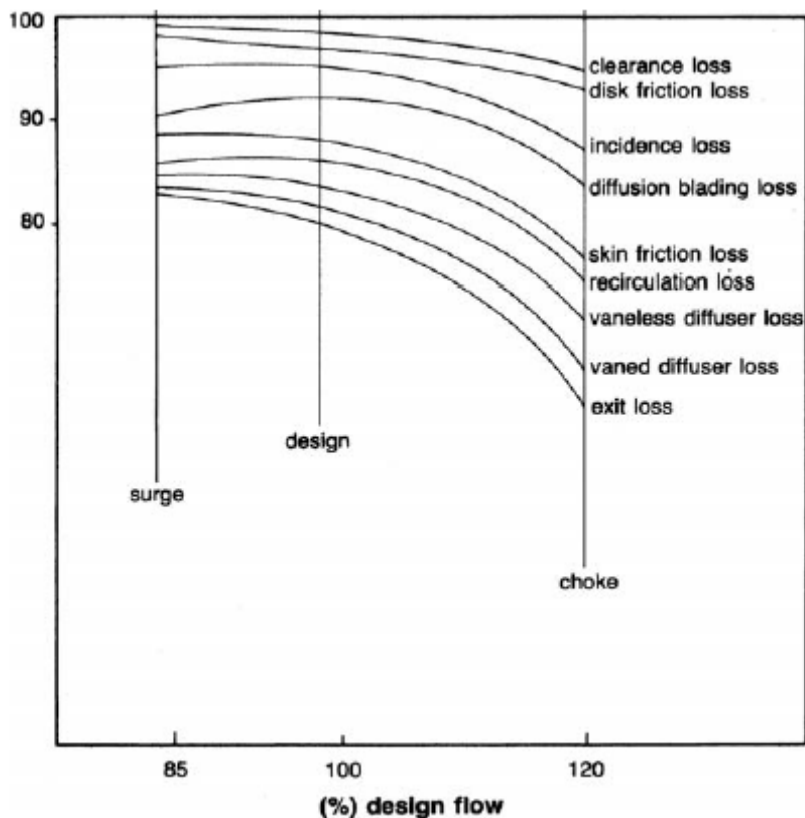
Απώλεια εξόδου → Θεωρείται ότι το μισό της κινητικής ενέργειας που φεύγει από τον διαχύτη με πτερύγια χάνεται.

Οι απώλειες είναι περίπλοκα φαινόμενα και, όπως αναλύεται εδώ, αποτελούν λειτουργία πολλών παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων των συνθηκών εισόδου, τις αναλογίες πίεσης, τις γωνίες των λεπίδων και τη ροή.



Εικόνα 1-34: Απώλειες ανακυκλοφορίας

(recirculation=ανακυκλοφόρηση, diffuser vanes=πτερύγια διαχύτη, increase in absolute flow angle at exit with reduced flow=αύξηση στην απόλυτη γωνία ροής στην έξοδο με μειωμένη ροή)



Εικόνα 1-35: Απώλειες σε φυγοκετρικό συμπιεστή

(clearance loss=απώλεια διακένου, disk friction loss=απώλεια τριβής του δίσκου, incidence loss=απώλεια πρόσπτωσης, diffusion blading loss=απώλεια λεπίδων διάχυσης, skin friction loss=απώλεια τριβής επιφάνειας, recirculation loss=απώλεια ανακυκλοφόρησης, vaneless diffuser loss=απώλεια διαχύτη χωρίς πτερύγια, vaned diffuser loss=απώλεια διαχύτη με πτερύγια, exit loss=απώλεια εξόδου, surge=κύμα, design=σχεδιασμός,choke= 'πνίξιμο/μπούκωμα')

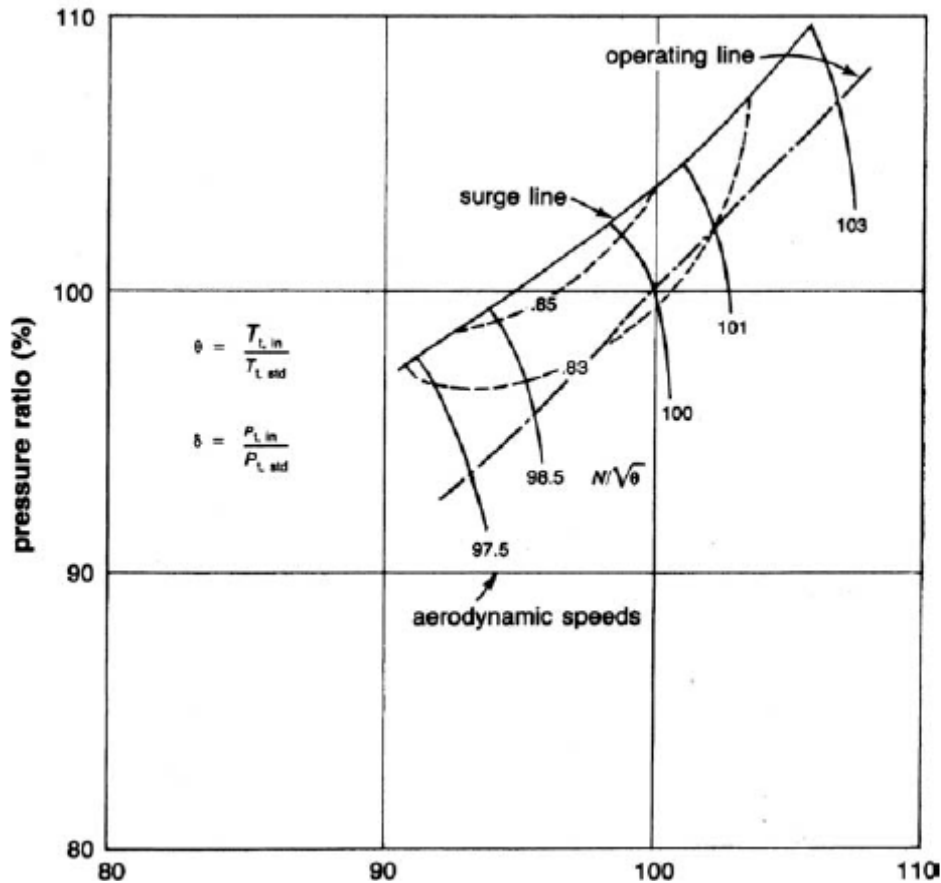
Η εικόνα 1-35 δείχνει τις απώλειες κατανεμημένες σε αναλογία πίεσης κάτω από 2 προς 1 σε ένα τυπικό φυγόκεντρο στάδιο με λεπίδες καμπυλωτές προς τα πίσω.

Απότομη μεταβολή ροής στο συμπιεστή

Ένα σχέδιο που δείχνει τη διακύμανση της αναλογίας ολικής πίεσης κατά μήκος ενός συμπιεστή ως μια συνάρτηση της τιμής της μαζικής ροής διαμέσου του συμπιεστή σε διάφορες ταχύτητες είναι γνωστό ως χάρτης απόδοσης. Η εικόνα 1-36 δείχνει ένα τέτοιο πλάνο.

Οι πραγματικές τιμές μαζικής ροής και των ταχυτήτων διορθώνονται από τους

παράγοντες $\sqrt{\frac{\theta}{\delta}}$ και $(1/\sqrt{\theta})$, αντίστοιχα, προκειμένου να αιτιολογήσουν τη διακύμανση των συνθηκών εισόδου της θερμοκρασίας και της πίεσης. Η γραμμή απότομης μεταβολής ενώνεται με τις διαφορετικές γραμμές ταχύτητας, όπου η λειτουργία του συμπιεστή γίνεται ασταθής. Ένας συμπιεστής βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση όταν η κύρια ροή διαμέσου του συμπιεστή αντιστρέφει την πορεία της και ρέει από την έξοδο προς το εσωτερικό με μικρά διαλείμματα. Εάν επιμείνει, αυτή η ασταθής διαδικασία μπορεί να καταλήξει σε ανεπιθύμητη ζημιά στη μηχανή.



Εικόνα 1-36: Χάρτης τυπικής απόδοσης του συμπιεστή (aerodynamic speeds=αεροδυναμικές ταχύτητες, surge line=γραμμή κύματος, operating line=γραμμή λειτουργίας, pressure ratio=αναλογία πίεσης)

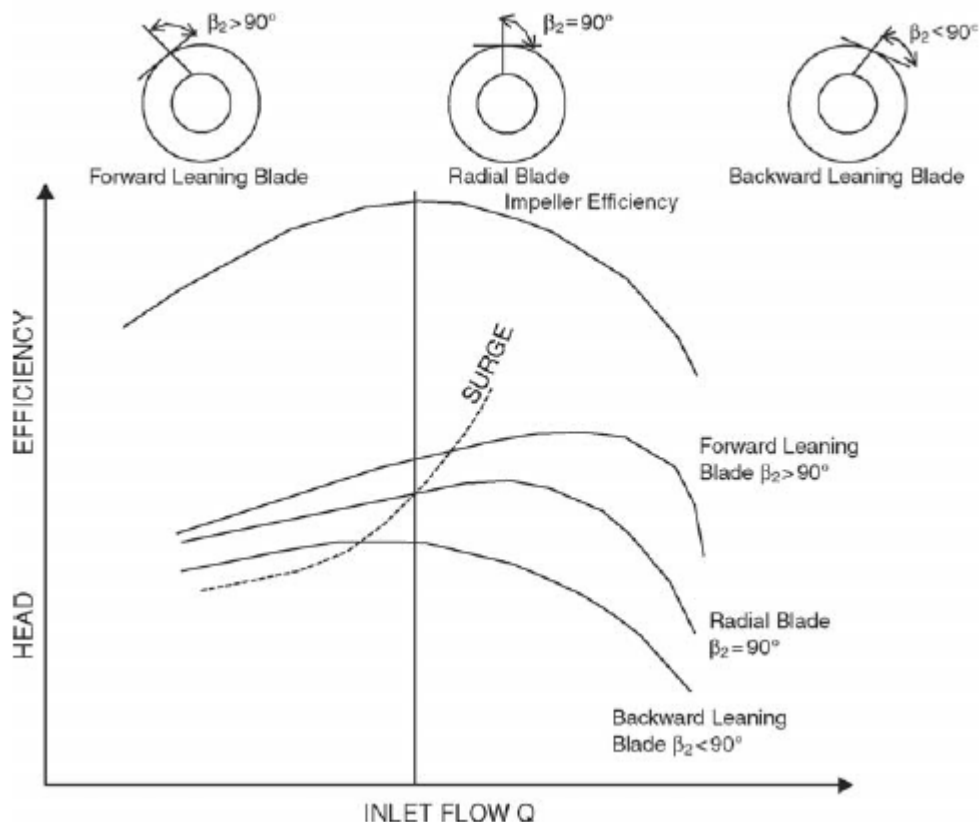
Γραμμές συνεχούς αδιαβατικής αποδοτικότητας (κάποιες φορές ονομάζονται «νήσοι» αποδοτικότητας) σχεδιάζονται επίσης στο χάρτη του συμπιεστή. Μια κατάσταση γνωστή ως «πνιγμός» ή «πέτρινη περιτοίχιση» (stone walling) φαίνεται στο χάρτη, δείχνοντας την ανώτερη πιθανή τιμή μαζικής ροής κατά μήκος του συμπιεστή σε αυτή την ταχύτητα λειτουργίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον φαινόμενο, αν και δεν είναι πλήρως κατανοητό. Είναι μια μορφή ασταθούς λειτουργίας και θα πρέπει να αποφεύγεται τόσο στο σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία. Αυτή η κατάσταση έχει οριστεί ως το κατώτερο όριο σταθερής λειτουργίας σε έναν συμπιεστή και περιλαμβάνει την αντιστροφή της ροής. Αυτή η αντιστροφή της ροής συμβαίνει εξαιτίας ορισμένης αεροδυναμικής αστάθειας στο σύστημα. Συνήθως ένα τμήμα του συμπιεστή είναι η αιτία της αεροδυναμικής αστάθειας, αν και είναι πιθανό ότι η οργάνωση του συστήματος θα ήταν ικανή να αυξήσει αυτή την αστάθεια. Η εικόνα 1-36 δείχνει έναν τυπικό χάρτη απόδοσης ενός φυγόκεντρου συμπιεστή με νήσους αποδοτικότητας και συνεχείς γραμμές αεροδυναμικής ταχύτητας. Η αναλογία πλήρους πίεσης φαίνεται ότι αλλάζει με τη ροή και την ταχύτητα. Οι συμπιεστές συνήθως χειρίζονται/χρησιμοποιούνται σε μια γραμμή λειτουργίας διαχωρισμένη από τη γραμμή κύματος με ένα περιθώριο ασφαλείας.

Το κύμα συνήθως γίνεται αντιληπτό από υπερβολικό κραδασμό και ευδιάκριτο ήχο, αν και υπάρχουν περιπτώσεις όπου προβλήματα κύματος δεν έγιναν αντιληπτά ακουστικά και προκάλεσαν σφάλματα. Έχουν διεξαχθεί εκτενείς έρευνες για το κύμα.

Η ανεπαρκής ποσοτικοποίηση των ιδιοτήτων του αεροδυναμικού φορτίου διαφορετικών διαχυτών και στροφείων, καθώς και η ανακριβής γνώση της συμπεριφοράς των οριακών στρωμάτων καθιστούν δύσκολη την ακριβή πρόβλεψη της ροής σε τουρμπομηχανές στο στάδιο σχεδιασμού. Παρ'όλ'αυτά, είναι αρκετά προφανές ότι η βαθύτερη αιτία του κύματος είναι η αεροδυναμική απώλεια ταχύτητας στηρίξεως, η οποία μπορεί να συμβεί είτε στο διαχύτη είτε στο στροφείο. Όταν το στροφείο φαίνεται να είναι η αιτία του κύματος, ο διαχωρισμός της ροής ξεκινά στο τμήμα του επαγωγέα. Μια μείωση στις τιμές της μαζικής ροής, μια αύξηση στην ταχύτητα περιστροφής του στροφείου ή και τα δύο μπορούν να προκαλέσουν κύμα στον συμπιεστή. Η εισαγωγή κύματος στο διαχύτη μπορεί να γίνει από το διαχωρισμό της ροής που λαμβάνει χώρα στην είσοδο του επαγωγέα. Ένας διαχύτης συνήθως αποτελείται από ένα χώρο χωρίς πτερύγια, με το αρχικό τμήμα του διαχύτη πριν το λαιμό να περιλαμβάνει το αρχικό τμήμα πτερυγίων σε έναν διαχύτη με πτερύγια. Ο χώρος χωρίς πτερύγια δέχεται την ταχύτητα που παράγεται από το φυγόκεντρο στροφείο και διαχέει τη ροή έτσι ώστε να εισέλθει στη δίοδο του διαχύτη με πτερύγια με μικρότερη ταχύτητα, αποφεύγοντας όποιες απώλειες σοκ και το διαχωρισμό της ροής. Όταν ο διαχύτης χωρίς πτερύγια χάνει την ταχύτητα στηρίξεως, η ροή δε θα εισέλθει στο λαιμό. Ο διαχωρισμός λαμβάνει χώρα προκαλώντας τελικά την αντιστροφή της ροής και πλημμυρίζει το συμπιεστή. Η απώλεια της ταχύτητας στηρίξεως του διαχύτη χωρίς πτερύγια μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους : αυξάνοντας την ταχύτητα του στροφείου ή μειώνοντας τις τιμές της ροής. Ο επαγωγέας ή ο διαχύτης με πτερύγια μπορεί να χάσει την ταχύτητα στήριξης, είτε το κύμα προκαλείται από μείωση της ταχύτητας της ροής είτε από την αύξηση των ταχυτήτων περιστροφής. Το ποιος από τους δύο θα χάσει πρώτος την ταχύτητα στήριξης είναι δύσκολο να πούμε, αλλά έρευνες έχουν δείξει ότι για συμπιεστές με αναλογίες χαμηλής πίεσης, το κύμα ξεκινά στο τμήμα του διαχύτη, ενώ στον επαγωγέα ξεκινά σε τμήματα με αναλογίες πίεσης πάνω από 3 προς 1.

Οι περισσότεροι φυγόκεντροι συμπιεστές έχουν κυρίως στροφεία με λεπίδες με κλίση προς τα πίσω. Η εικόνα 1-37 απεικονίζει τις επιδράσεις της γωνίας της λεπίδας στροφείου στο σταθερό πεδίο και, επίσης, την απότομη κλίση της καμπύλης του μανομετρικού με την παροχή ροής.

Οι τρεις καμπύλες βασίζονται στην ίδια ταχύτητα και δείχνουν το πραγματικό μανομετρικό ύψος. Η σχέση του ιδανικού με το θεωρητικό μανομετρικό με τη ροή εισαγωγής/είσοδου για διαφορετικές γωνίες λεπίδας θα μπορούσε να αναπαρασταθεί με ευθείες γραμμές. Για τις λεπίδες με κλίση προς τα πίσω, η κλίση της γραμμής θα ήταν αρνητική. Η γραμμή για ακτινικές λεπίδες θα ήταν οριζόντια.

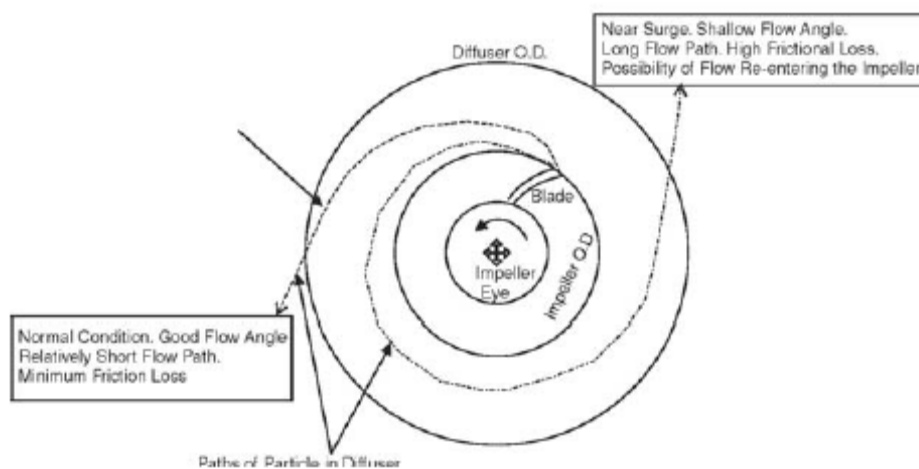


Εικόνα 1-37: Επίδραση της γωνίας πτερυγίου στην ευστάθεια (forward leaning blade=λεπίδα με κλίση μπροστα εμπρός, radial blade impeller efficiency= αποδοτικότητα ακτινικής λεπίδας στορφείου, backward leaning blade=λεπίδα με κλίση προς τα πίσω)

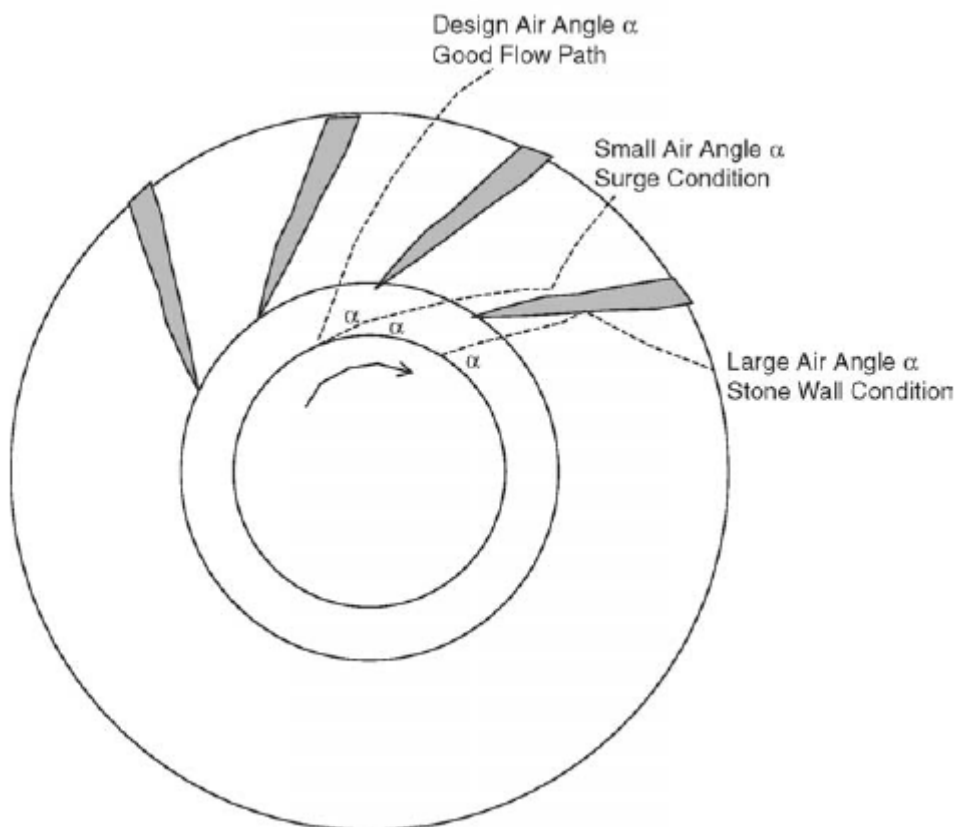
Οι λεπίδες με κλίση προς τα εμπρός θα είχαν μία θετική γραμμή κλίσης. Για την εφαρμογή μιας μέσης πετροχημικής διαδικασίας, η βιομηχανία συμπιεστών χρησιμοποιεί κυρίως λεπίδες με κλίση προς τα πίσω με γωνία (β_2) μεταξύ $55-75^\circ$ (ή γωνία οπίσθιας κλίσης $15-35^\circ$), διότι παρέχει ένα ευρύτερο σταθερό πεδίο και μια μεγαλύτερη κλίση στο πεδίο λειτουργίας. Αυτό το σχέδιο του στορφείου έχει αποδειχτεί ότι αποτελεί τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ της μετάδοσης της πίεσης, της αποδοτικότητας και της σταθερότητας. Λεπίδες με πρόσθια κλίση δε χρησιμοποιούνται συχνά στο σχεδιασμό συμπιεστών, καθώς οι υψηλές ταχύτητες εξόδου οδηγούν σε μεγάλες απώλειες διάχυσης. Ένα μηχάνημα συμπιεστή αέρα λειτουργώντας σε σταθερές συνθήκες, από μέρα σε μέρα δε θα απαιτούσε ένα ευρύ σταθερό πεδίο, αλλά ένας μηχανισμός σε μηχάνημα εντός λειτουργίας μπορεί να πέσει θύμα πολλών μεταβλητών και αναστάτωσης της λειτουργίας του. Επομένως, απαιτείται περισσότερη σταθερότητα. Στην πραγματικότητα, η χαμηλότερη καμπύλη στην εικόνα 1-37 φαίνεται να έχει πιο ήπια κλίση απ'ότι η μεσαία και η μεγαλύτερη καμπύλη. Αυτή η σύγκριση είναι ο αληθής με τη γενικότερη έννοια, αλλά θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη ότι το μέσο πεδίο λειτουργίας βρίσκεται μεταξύ του 100% της ροής (Q) και της ροής σε κύμα (**surge**) συν ένα περιθώριο ασφαλείας συνήθως γύρω στο 10%. Το δεξί τελευταίο τμήμα και των τριών καμπύλων δε βρίσκεται στο πεδίο λειτουργίας. Το μηχάνημα θα πρέπει να λειτουργεί με ένα κατάλληλο περιθώριο στα αριστερά απ'όπου αυτές οι καμπύλες ξεκινούν την απότομη κλίση τους, ενώ στο πεδίο λειτουργίας που προκύπτει, η καμπύλη των λεπίδων με οπίσθια κλίση είναι πιο

απότομη. Αυτή η απότομη καμπύλη είναι επιθυμητή για λόγους ελέγχου, καθώς επίσης δημιουργεί μια σημαντική αλλαγή στη μείωση της πίεσης κατά μήκος του στομίου για μια μικρή αλλαγή στη ροή. Η γωνία της λεπίδας δε μπορεί να εξηγήσει μόνη της το γενικό ιστορικό της απόδοσης. Η γεωμετρία και των άλλων εξαρτημάτων ενός σταδίου θα παρείχαν επίσης σημαντικά αποτελέσματα. Οι περισσότεροι φυγόκεντροι συμπιεστές που χρησιμοποιούνται σε πετρελαϊκά ή πετροχημικά λειτουργικά μηχανήματα χρησιμοποιούν διαχύτες χωρίς πτερύγια. Ο διαχύτης χωρίς πτερύγια γενικά είναι ένας απλός αγωγός ροής με παράλληλα τοιχώματα, ενώ δε διαθέτει κανένα στοιχείο στο εσωτερικό του για να καθοδηγεί τη ροή. Όταν η ροή στην είσοδο του στροφείου είναι μειωμένη, ενώ η ταχύτητα παραμένει σταθερή, υπάρχει μείωση στη σχετική ταχύτητα που φεύγει από το στροφείο και στη γωνία του αέρα που σχετίζεται με εκείνη.

Καθώς μειώνεται η γωνία του αέρα, το μήκος του σπειροειδούς μονοπατιού που ακολουθεί η ροή αυξάνεται, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-38. Εάν το μονοπάτι της ροής επεκταθεί αρκετά, η φορά της ροής στα τοιχώματα του διαχύτη διαλύεται εκτενώς από την τριβή και τη μείωση της σχετικής ταχύτητας στηρίξεως. Λόγω αυτής της μεγάλης απώλειας, ο διαχύτης χάνει την αποδοτικότητά του και μετατρέπει ένα μικρότερο τμήμα της κεφαλής της ταχύτητας σε πίεση. Ενώ η συνθήκη αυτή εξελίσσεται, το στάδιο αυτό θα σταματήσει και μπορεί να οδηγήσει σε κύμα. Οι διαχύτες με πτερύγια συνήθως οδηγούν τη ροή να ακολουθήσει ένα συντομότερο και αποδοτικότερο μονοπάτι διαμέσου του διαχύτη. Υπάρχουν πολλά είδη διαχυτών με πτερύγια με μεγάλες διαφορές στον τύπο των πτερυγίων, των γωνιών, του περιγράμματος και του χώρου τους.



Εικόνα 1-38: Τροχιά ροής σε διαχύτη χωρίς πτερύγια



Εικόνα 1-39: Διαχύτης με πτερύγια

(design air angle α =γωνία σχεδίασης αέρα α , good flow path=μονοπάτι καλής ροής, surge condition=συνθήκη κύματος, stone wall condition=συνθήκη τοίχου)

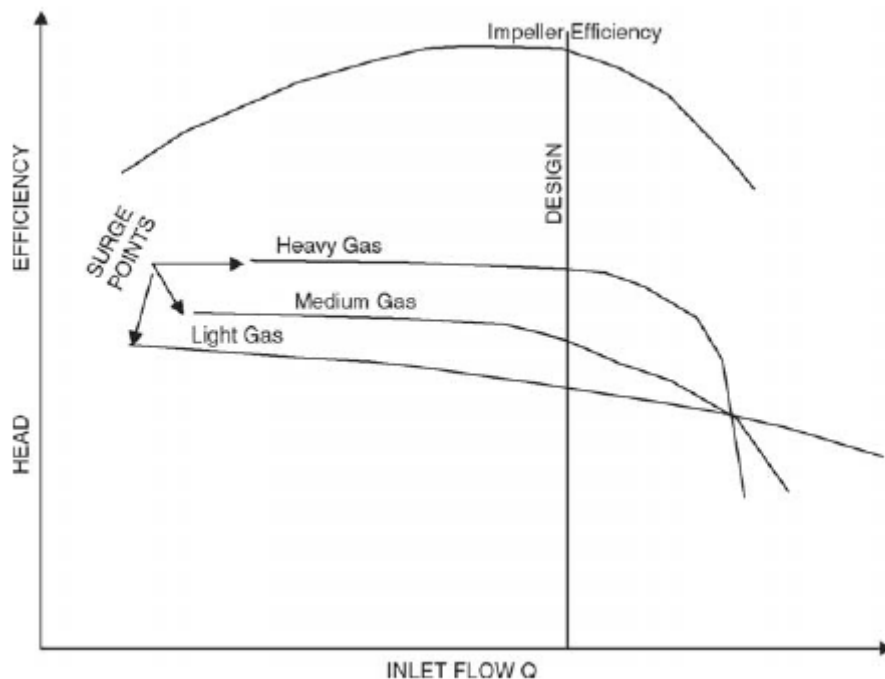
Οι πιο κοινοί διαχύτες με πτερύγια χρησιμοποιούν σφηνοειδή πτερύγια (νήσοι πτερυγίων) ή καμπυλωτά λεπτά πτερύγια. Στα υψηλής κεφαλής μπορεί να υπάρχουν από δύο έως τέσσερα στάδια διάχυσης. Αυτά συνήθως αποτελούνται από περιοχές χωρίς πτερύγια για την επιβράδυνση της ροής ακολουθούμενα από δύο ή τρία επίπεδα λεπίδων με πτερύγια προκειμένου να αποτραπεί η δημιουργία οριακού στρώματος που προκαλεί διαχωρισμό και κύμα στον συμπιεστή. Η εικόνα 1-38 δείχνει το μοτίβο της ροής σε έναν διαχύτη με πτερύγια. Ο διαχύτης αυτό μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα ενός σταδίου 2 έως 4%, αλλά το αντίτιμο της απόκτησης αποδοτικότητας είναι ένα μικρότερο διάστημα λειτουργίας στην καμπύλη της ροής και το ύψος τόσο σε σχέση με το κύμα όσο και με την κωλυσιεργία. Η εικόνα 1-39 δείχνει επίσης την επίδραση των ροών εκτός σχεδιασμού.

Εκτενής θετική κλίση στο άκρο του πτερυγίου του διαχύτη πραγματοποιείται όταν η ροή εξόδου είναι τόσο μικρή στη μειωμένη ροή και έτσι αυτή η συνθήκη επιφέρει μείωση στην ταχύτητα στηρίξεως. Αντίθετα, καθώς αυξάνεται η ροή πέρα από το υπολογισμένο όριο, η αρνητική εκτενής κλίση μπορεί να προκαλέσει κωλυσιεργία. Παρά την περιορισμένη επίδραση στο χρήσιμο πεδίο λειτουργίας στη χαρακτηριστική καμπύλη, ο διαχύτης με πτερύγια εφαρμόζεται σε καταστάσεις όπου η αποδοτικότητα έχει τεράστια σημασία. Αν και χρησιμοποιούνται σπάνια, τα πτερύγια κινητών διαχυτών ή οι νήσοι πτερυγίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ανακουφίσουν τις απώλειες σοκ σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού. Παρ'όλ'αυτά, καθώς οι προσαρμοσμένοι μηχανισμοί που απαιτούνται είναι αρκετά πολύπλοκοι, γενικά

εφαρμόζονται μόνο σε μηχανές μονού σταδίου. Οι απεικονίσεις των μονοπατιών της ροής στις εικόνες 1-37 έως 1-39 είναι κάπως απλοϊκές. Το κάθε μονοπάτι της ροής υποδεικνύεται από μονή γραμμή ρεύματος. Το πεδίο της πραγματικής ροής είναι περισσότερο περίπλοκο, με παρόντες το διαχωρισμό της ροής και τον επαναυπολογισμό. Παρ'όλ'αυτά, οι φιγούρες αυτές θα πρέπει να συμβάλουν σε μία πρακτική κατανόηση των επιδράσεων στις αλλαγές των τριγώνων ταχύτητας. Τα στατικά κατευθυντήρια πτερύγια οδηγούν τη ροή στο «μάτι» του στροφείου με τακτικό ρυθμό. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του ύψους σε ένα μεμονωμένο στάδιο, αυτά τα πτερύγια μπορεί να οδηγήσουν τη ροή προς την ίδια κατεύθυνση με την περιστροφή. Αυτό συνήθως γίνεται για να μειωθεί ο σχετικός αριθμός Mach που εισέρχεται στον επαγωγέα, προκειμένου να αποτραπούν οι απώλειες του σοκ. Παρ'όλ'αυτά, αυτό μειώνει το ύψος που κατανέμεται, αλλά βελτιώνει το περιθώριο λειτουργίας. Η αντίθετη δράση ονομάζεται 'αντι-περιστροφή' ή αρνητική προ-δίνη (pre-swirl), αυξάνοντας το ύψος αλλά και το σχετικό αριθμό Mach στην είσοδο. Η αρνητική προ-δίνη χρησιμοποιείται σπάνια, διότι μειώνει, επίσης, το πεδίο λειτουργίας. Ορισμένες φορές τα κατευθυντήρια πτερύγια ορίζονται σε μηδέν βαθμούς δίνης και ονομάζονται ακτινικά κατευθυντήρια πτερύγια. Τα κινητά κατευθυντήρια πτερύγια εισόδου περιστασιακά χρησιμοποιούνται σε μηχανές μονού σταδίου ή στο πρώτο στάδιο των συμπιεστών που καθοδηγούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες/μοτέρ με στιγμιαία ταχύτητα. Η γωνία του κατευθυντήριου πτερυγίου μπορεί να ρυθμιστεί χειροκίνητά ή αυτόματα ενώ η μονάδα βρίσκεται σε ρεύμα για να διευκολύνει τις λειτουργικές απαιτήσεις εκτός σχεδιασμού. Εξαιτίας της μηχανικής πολυπλοκότητας του ρυθμιστικού μηχανισμού και των υλικών περιορισμών, αυτό το ευμετάβλητο χαρακτηριστικό μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στην πρώτη ρόδα σε όλα σχεδόν τα σχέδια μηχανής. Έτσι, η επίδραση της αλλαγής της γωνίας του πτερυγίου χάνεται πέραν του πρώτου σταδίου. Αν και η ροή σε ολόκληρη τη μηχανή ρυθμίζεται επιτυχώς κινώντας τα πτερύγια στο πρώτο στάδιο, τα υπόλοιπα στάδια μπορεί να αντλούν τη ρυθμισμένη ροή σε μία ορισμένη γωνία κατευθυντήριου πτερυγίου. Παρεμπιπτόντως, μια ρυθμιστική βαλβίδα τύπου πεταλούδα στη γραμμή αναρρόφησης στη μηχανή θα δημιουργήσει τα ίδια αποτελέσματα σαν να κινούνταν τα κατευθυντήρια πτερύγια του πρώτου σταδίου. Παρ'όλ'αυτά, η χρήση ρυθμιστικής βαλβίδας δεν είναι τόσο αποτελεσματική όσο η κίνηση των κατευθυντήριων βαλβίδων, έτσι ώστε σε πολλές περιπτώσεις το επιπλέον κόστος του μηχανισμού κινητών πτερυγίων μπορεί να δικαιολογηθεί από εξοικονόμηση ενέργειας.

Επιδράσεις της σύνθεσης αερίου

Η εικόνα 1-40 δείχνει την επίδοση ενός μεμονωμένου σταδίου με συγκεκριμένη ταχύτητα για τρία επίπεδα μοριακού βάρους του αερίου.



Εικόνα 1-40: Επίδραση σύνθεσης αερίου
(impeller efficiency=αποδοτικότητα στροφείου)

Η κατηγορία των βαρέων αερίων περιλαμβάνει αέρια, όπως προπάνιο, προπυλένιο και σταθεροποιημένα ψυκτικά μείγματα. Το αέριο, το φυσικό αέριο και το άζωτο είναι χαρακτηριστικά της μεσαίας κλάσης. Αέρια πλούσια σε υδρογόνο που συναντώνται σε λειτουργικά μηχανήματα υδρογονάνθρακα είναι αντιπροσωπευτικά της ελαφριάς κατηγορίας. Οι παρακάτω παρατηρήσεις πραγματοποιούνται σε σχέση με τη καμπύλη των βαρέων αερίων:

1. Η ροή στο κύμα είναι υψηλότερη.
2. Το στάδιο παράγει ελαφρώς περισσότερο ύψος από εκείνο που ανταποκρίνεται στο μεσαίο αέριο.
3. Η αριστερή πλευρά της καμπύλης κινείται προς τα κάτω πιο γρήγορα.
4. Η καμπύλη είναι πιο επίπεδη στο λειτουργικό στάδιο.

Συνήθως το τελευταίο σημείο δημιουργεί προβλήματα στο σχεδιαστή του συστήματος ελέγχου ενάντια στο κύμα. Είναι αξιοσημείωτο ότι η καμπύλη γίνεται πιο επίπεδη καθώς προστίθενται στάδια στη σειρά. Το σύστημα ελέγχου, επομένως, θα πρέπει να ανταποκρίνεται καλύτερα. Είναι προφανές ότι οι καμπύλες των ελαφρότερων αερίων έχουν ένα πιο επιθυμητό σχήμα.

Εξωτερικές αιτίες και επιδράσεις του κύματος

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες από τις συνηθισμένες αιτίες κύματος που δε σχετίζονται με το σχεδιασμό του μηχανήματος:

1. Διαδικαστικές αλλαγές στην πίεση, τη θερμοκρασία και τη σύνθεση του αερίου.
2. Περιορισμός στην αναρρόφηση και στην απελευθέρωση του συστήματος.
3. Εσωτερική σύνδεση των διόδων της ροής στο συμπιεστή.
4. Ακούσια απώλεια ταχύτητας.
5. Δυσλειτουργία της βαλβίδας ελέγχου ή οργάνου.

6. Δυσλειτουργία των εξαρτημάτων, όπως των κατευθυντήριων πτερυγίων εισόδου.
7. Σφάλμα του χειριστή.
8. Κακή κατανομή του φορτίου στην παράλληλη λειτουργία δύο ή περισσότερων συμπιεστών.
9. Ακατάλληλη συναρμολόγηση ενός συμπιεστή, όπως λανθασμένη τοποθέτηση μοτέρ.

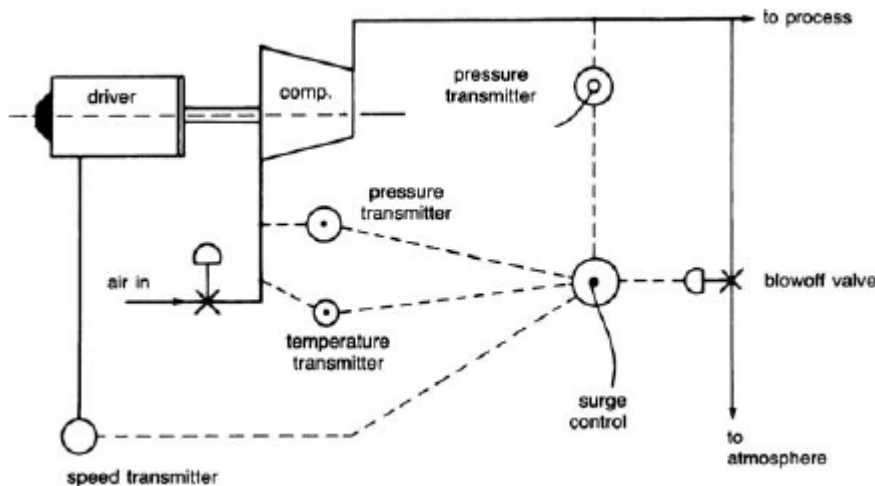
Οι επιπτώσεις ενός κύματος κυμαίνονται από μια απλή έλλειψη απόδοσης έως σοβαρή βλάβη στο μηχάνημα ή στο συνδεδεμένο σύστημα. Επίσης, μπορεί να συμβεί βλάβη, στα διαγράμματα, στα ρουλεμάν και στο ρότορα. Το κύμα συνήθως διεγείρει τη δόνηση του πλαγίου άξονα και μπορεί να προκαλέσει συστροφική βλάβη σε αντικείμενα όπως σε συνδέσμους και στα γρανάζια. Εξωτερικά μπορεί να προκληθεί καταστροφικός κραδασμός των σωλήνων προκαλώντας δομική, κατασκευαστική βλάβη, αποδιοργάνωση αξόνων και σφάλματα στα εξαρτήματα και στα όργανα. Οι επιδράσεις του μεγέθους και της διάταξη του συνδεδεμένου συστήματος, καθώς και οι διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, μπορεί να είναι συνταρακτικές κατά την ένταση του κύματος. Το κύμα αναγνωρίζεται συχνά από το σφυροκόπημα της βαλβίδας ελέγχου, τον κραδασμό των σωλήνων, το θόρυβο, την αστάθεια των μετρητών πίεσης ή του αμπερόμετρου ή τον πλάγιο ή/και τον αξονικό κραδασμό του άξονα του συμπιεστή. Ήπιες περιπτώσεις κύματος είναι δύσκολο να γίνουν αντιληπτές πολλές φορές.

Ανίχνευση κύματος και έλεγχος

Οι συσκευές ανίχνευσης κύματος χωρίζονται σε: 1. Στατικές συσκευές και 2. Δυναμικές συσκευές. Μέχρι τώρα, οι στατικές μηχανές ανίχνευσης κύματος έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως, ενώ χρειάζεται να γίνει περισσότερη έρευνα πριν χρησιμοποιηθούν γενικότερα.

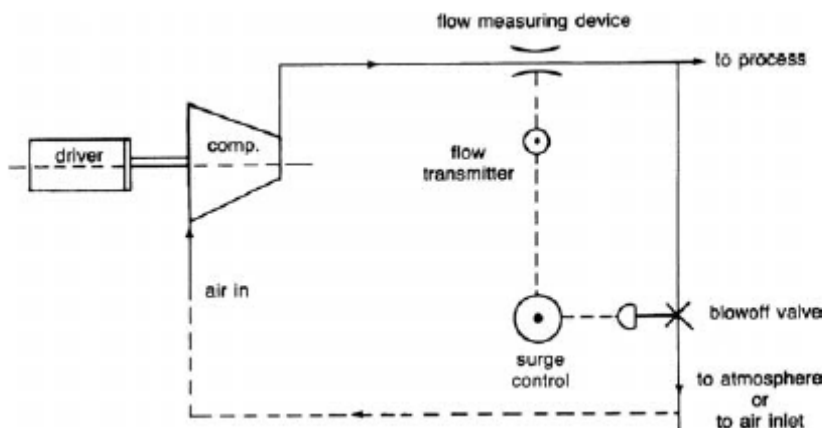
Μια δυναμική συσκευή πιθανόν θα ανταποκριθεί στις απαιτήσεις και στις ελπίδες πολλών μηχανικών για μια συσκευή ελέγχου που μπορούν να αναμένουν τη μείωση της ταχύτητας στήριξης και κύματος και το αποτρέπουν. Προφανώς, οι συσκευές ανίχνευσης θα πρέπει να συνδέονται με μία συσκευή ελέγχου προκειμένου να αποτραπεί η ασταθής λειτουργία του συμπιεστή. Οι στατικές συσκευές ανίχνευσης κύματος προσπαθούν να αποτρέψουν τη μείωση της ταχύτητας στήριξης και του κύματος με τη μέτρηση των συνθηκών συμπίεσης και διασφαλίζουν ότι η προαποφασισμένη τιμή δεν ξεπερνάται. Όταν οι συνθήκες συναντούν ή ξεπερνούν το όριο, ξεκινά ο έλεγχος. Ένα τυπικό σύστημα ελέγχου κύματος φαίνεται στην εικόνα 1-41. Ο μεταδότης/πομπός πίεσης παρακολουθεί την πίεση και ελέγχει μια συσκευή, που ανοίγει μια βαλβίδα σβέσης. Μια συσκευή ανίχνευσης της θερμοκρασίας διορθώνει τις ενδείξεις της ροής και της ταχύτητας λόγω της επίδρασης της θερμοκρασίας. Μια τυπική συσκευή προσανατολισμού της ροής φαίνεται επίσης στην εικόνα 1-42. Σε όλες τις στατικές συσκευές ανίχνευσης του κύματος δεν παρακολουθείται/εντοπίζεται άμεσα το φαινόμενο της αντιστροφής της ροής κύματος, ενώ εντοπίζονται οι άλλες συνθήκες που σχετίζονται με το κύμα. Τα όρια του ελέγχου έχουν τεθεί από προηγούμενη εμπειρία και μελέτη των χαρακτηριστικών του συμπιεστή. Οι μέθοδοι δυναμικής ανίχνευσης της ροής αλλά και ελέγχου βρίσκονται υπό μελέτη. Προσπαθούν να ανιχνεύσουν το ξεκίνημα της αντιστροφής της ροής πριν φτάσει στο κρίσιμο σημείο του κύματος. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιεί μια έρευνα του οριακού στρώματος. Ένα δυναμικό σύστημα ανίχνευσης της ροής χρησιμοποιεί έναν καθετήρα οριακού στρώματος. Αυτό το σύστημα αποτελείται από

ειδικά τοποθετημένους καθετήρες το συμπιεστή για να ανιχνεύσουν την αντιστροφή της ροής στο οριακό στρώμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1-43.



Εικόνα 1-41: Σύστημα ελέγχου ενάντια κύματος μέσης πίεσης

(pressure transmitter=μεταδότης πίεσης, temperature transmitter=μεταδότης θερμοκρασίας, surge control=έλεγχος κύματος, speed transmitter=μεταδότης πίεσης)



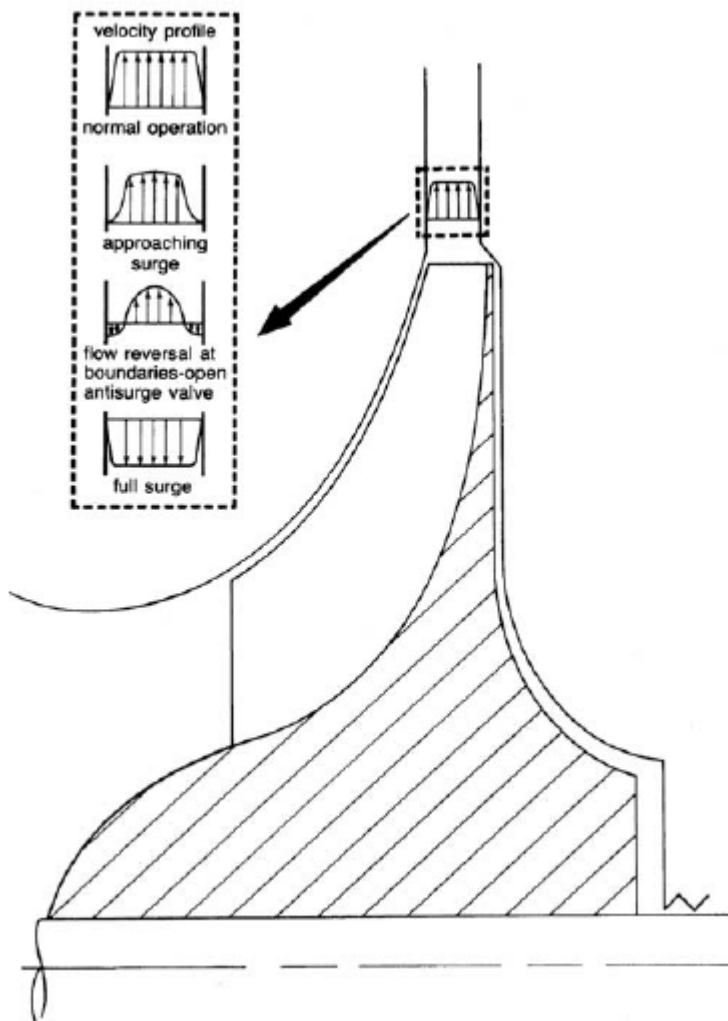
Εικόνα 1-42: Σύστημα ελέγχου κύματος μέσω ροής
(flow measuring device=συσσκευή μέτρησης της ροής)

Η ιδέα είναι ότι το οριακό στρώμα θα αντιστραφεί πριν να βρεθεί η μονάδα σε κύμα. Καθώς το σύστημα μετρά/υπολογίζει την πραγματική επίθεση/ορμή του κύματος παρατηρώντας ή ελέγχοντας την αντιστροφή της ροής, δεν εξαρτάται από το μοριακό βάρος του αερίου και δεν επηρεάζεται από την κίνηση της γραμμής του κύματος. Η χρήση αισθητήρων πίεσης και η επένδυση των επιταχυντόμετρων στην εξωτερική σωλήνωση συμβάλλει αποφασιστικά στην ανίχνευση του κύματος του συμπιεστή.

Φυγόκεντρικοί συμπιεστές λειτουργίας

Αυτοί οι συμπιεστές έχουν στροφέια με πολλή χαμηλή αναλογία πίεσης (1.1-1.30) και επομένως μεγάλα περιθώρια κύματος που οδηγούν σε 'πνιγμό'. Η εικόνα 1-44 δείχνει ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα ενός φυγόκεντρου συμπιεστή πολλών σταδίων

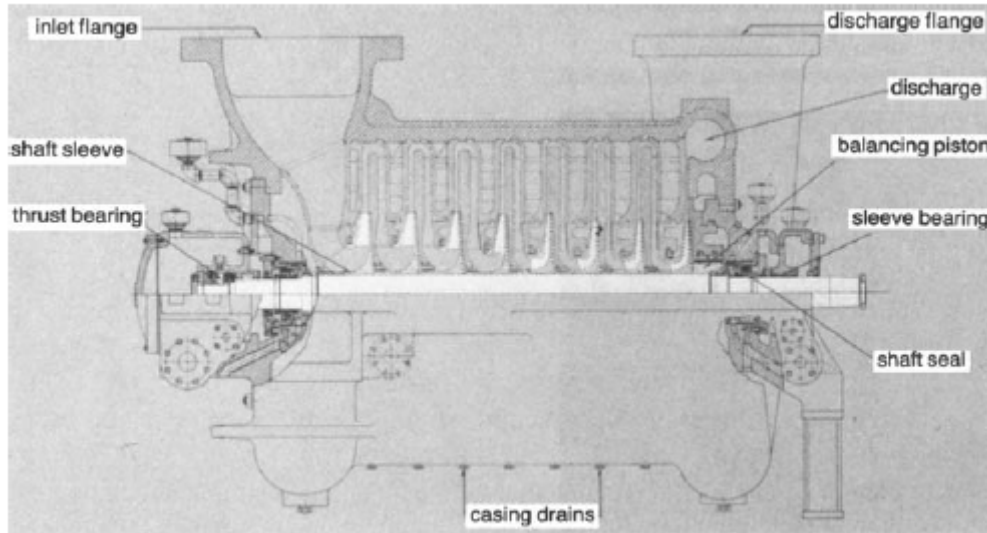
που χρησιμοποιείται στις βιομηχανικές διαδικασίες. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος κατηγοριοποίησης αυτού του είδους συμπιεστών που καθοδηγούνται από τουρμπίνες αερίου βασίζεται στον αριθμό των στροφείων και στο σχεδιασμό της επένδυσης. Ο πίνακας 1-2 δείχνει 3 είδη φυγόκεντρων συμπιεστών. Για κάθε είδος συμπιεστή φαίνονται οι κατά προσέγγιση ανώτερες κατανομές πίεσης, ικανότητας και η ιπποδύναμη τάσης. Τα τμηματοποιημένα είδη καλυμμάτων έχουν στροφεία τα οποία συνήθως ανέρχονται στο επεκτεινόμενο άξονα του κινητήρα, ενώ παρόμοια τμήματα βιδώνονται για να αποκτήσουν τον επιθυμητό αριθμό σταδίων. Το υλικό του καλύμματος είναι είτε ασάλι είτε χυτοσίδηρος.



Εικόνα 1-43: Τεχνική πρόβλεψη κύματος μέσω ορिकाού στρώματος (velocity profile=προφίλ ταχύτητας, normal operation=κανονική λειτουργία, approaching surge=προσέγγιση κύματος, flow reversal at boundaries-open anti-surge valve=αντιστροφή της ροής σε ανοιχτή βαλβίδα κατά του κύματος)

Τέτοιες μηχανές χρειάζονται ελάχιστη εποπτεία και συντήρηση, είναι και αρκετά οικονομικές στη λειτουργία τους. Το σχέδιο της επένδυσης στο κάθε τμήμα χρησιμοποιείται εκτενώς για τη διοχέτευση αέρα για την καύση/ανάφλεξη σε φούρνους και κλιβάνους. Οι οριζόντιοι διαχωρισμένοι/διαιρεμένοι τύποι έχουν καλύμματα που διαχωρίζονται οριζόντια στο μεσαίο τμήμα της κορυφής. Τα μισά/διαιρεμένα στο κάτω μέρος βιδώνονται ή συνδέονται με πείρους, όπως φαίνεται

στην εικόνα 1-45. Τα εσωτερικά τμήματα, όπως ο άξονας, τα στροφεία, τα ρουλεμάν ή και οι στεγανοποιήσεις είναι άμεσα προσβάσιμα για επιθεώρηση και επισκευή μετακινώντας το μισό πάνω τμήμα . Το υλικό του καλύμματος είναι είτε μαντέμι είτε αστάλι.



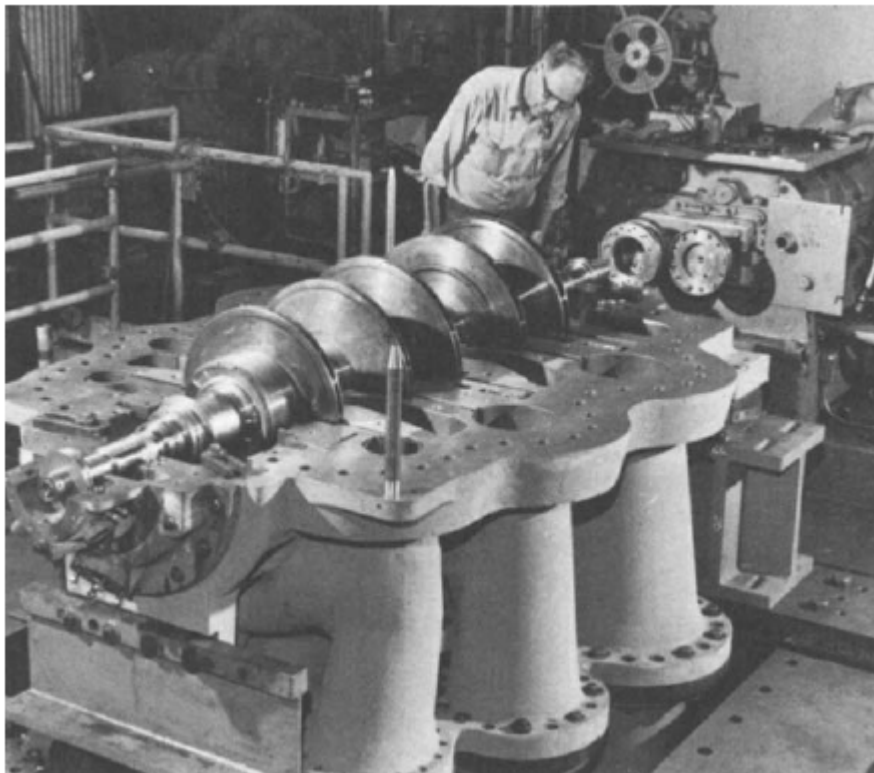
Εικόνα 1-44: Διατομή ενός τυπικού πολυβάθμιου φυγοκεντρικού συμπιεστή (inlet flange=φλαντζα εισόδου, shaft sleeve= ραβδοειδής λαβή, thrust bearing=ρουλεμάν ώθησης, discharge flange=φλαντζα εκκένωσης, discharge=εκκένωση, balancing piston=έμβολο ισορροπίας, sleeve bearing=λαβή ρουλεμάν, shaft seal=ραβδοειδής σφραγίδα, casing drains=πλάισιο αποχέτευσης)

Υπάρχουν διάφορα είδη συμπιεστών τύπου βαρέλι (barrel) ή φυγόκεντρων συμπιεστών. Τα είδη χαμηλής πίεσης με κρεμαστά στροφεία χρησιμοποιούνται για διαδικασίες καύσης ή ανάφλεξης, εξαερισμού και για εφαρμογές μεταφοράς. Τα καλύμματα τύπου βαρελιού πολλαπλών σταδίων χρησιμοποιούνται για υψηλές πιέσεις, όπου ο οριζόντιος διαχωρισμός είναι ανεπαρκής. Η εικόνα 1-46 δείχνει το συμπιεστή τύπου βαρελιού στο πίσω μέρος και την εσωτερική δέσμη από το μπροστινό μέρος. Μόλις μετακινηθεί το κάλυμμα από αυτόν τον συμπιεστή χωρίζεται οριζοντίως.

Table 6-2
Industrial Centrifugal Compressor Classification Based on Casing Design

| Casing Type | Approximate Maximum Ratings | | |
|---|------------------------------------|---|--------------------------------------|
| | Approximate Pressure psig (Bar) | Approximate Inlet Capacity cfm (cmm) | Approximate Power Horsepower (kW) |
| 1. Sectionalized Usually multi-stage | 10 (0.7) | 20,000 (566) | 600 (447) |
| 2. Horizontally split | | | |
| Single stage (double-suction) | 15 (1.03) | 650,000 (18,406) | 10,000 (7,457) |
| Multi-stage | 1000 (69) | 200,000 (5,663) | 35,000 (26,100) |
| 3. Vertically split | | | |
| Single stage (single-suction) | | | |
| Overhung | 30 (2.07) | 250,000 (7,079) | 10,000 (7,457) |
| Pipeline | 1200 (82) | 25,000 (708) | 20,000 (14,914) |
| Multi-stage | More than 5500 (379) | 20,000 (566) | 15,000 (11,185) |

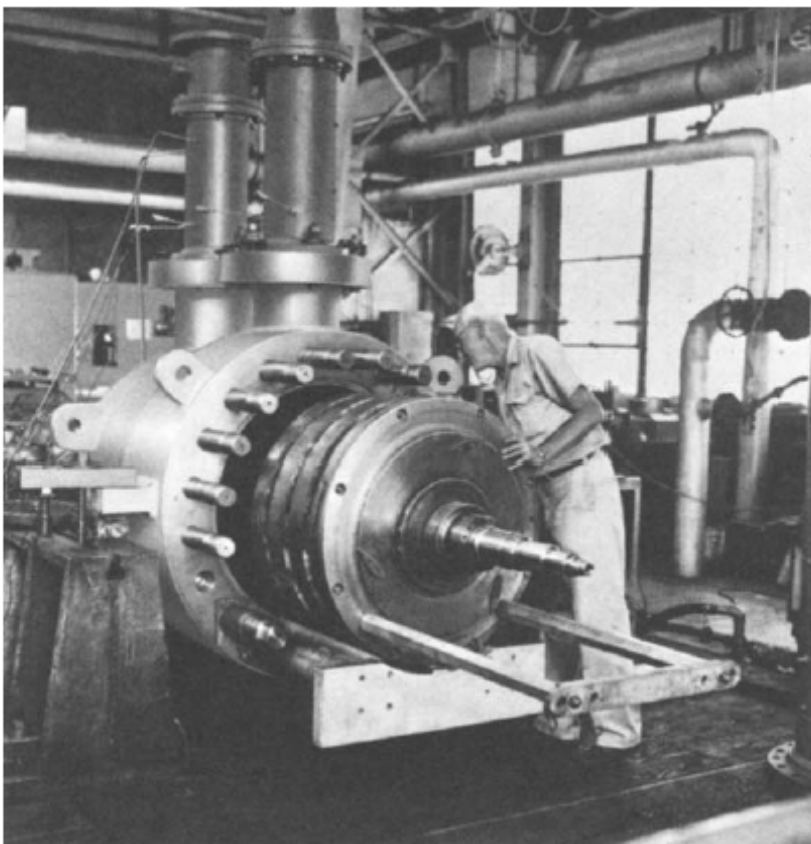
Πίνακας 1-2 :Ταξινόμηση βιομηχανικών φυγοκεντρικών συμπιεστών βασιζόμενοι στο σχεδιασμό πλαισίου



Εικόνα 1-45: οριζόντια χωρισμένος φυγοκεντρικός συμπιεστής με κλεισμένους ρότορες

Διαμόρφωση ή Διάταξη του συμπιεστή

Για να σχεδιαστεί σωστά ένας φυγόκεντρος συμπιεστής κάποιος θα πρέπει να ξέρει τις συνθήκες λειτουργίας, το είδος του αερίου, την πίεση, τη θερμοκρασία και το μοριακό του βάρος. Επίσης, θα πρέπει να γνωρίζει τις διαβρωτικές ιδιότητες του αερίου έτσι ώστε να γίνει η σωστή μεταλλουργική επιλογή. Οι διακυμάνσεις του αέρα λόγω των διαδικαστικών ασταθειών θα πρέπει να εντοπιστούν προκειμένου να λειτουργεί ο συμπιεστής χωρίς τη δημιουργία κύματος. Οι φυγόκεντροι συμπιεστές που βρίσκουν εφαρμογές σε βιομηχανίες έχουν σχετικά χαμηλές αναλογίες/ποσοστά πίεσης ανά στάδιο. Αυτή η συνθήκη είναι απαραίτητη για να μπορούν να έχουν οι συμπιεστές ένα ευρύτερο πεδίο λειτουργίας, ενώ τα επίπεδα τάσης να βρίσκονται στο ελάχιστο. Εξαιτίας των ποσοστών χαμηλής πίεσης για κάθε στάδιο, μια μονή μηχανή μπορεί να έχει έναν αριθμό σταδίων σε ένα «βαρέλι» για την επίτευξη του επιθυμητού ποσοστού γενικής πίεσης.

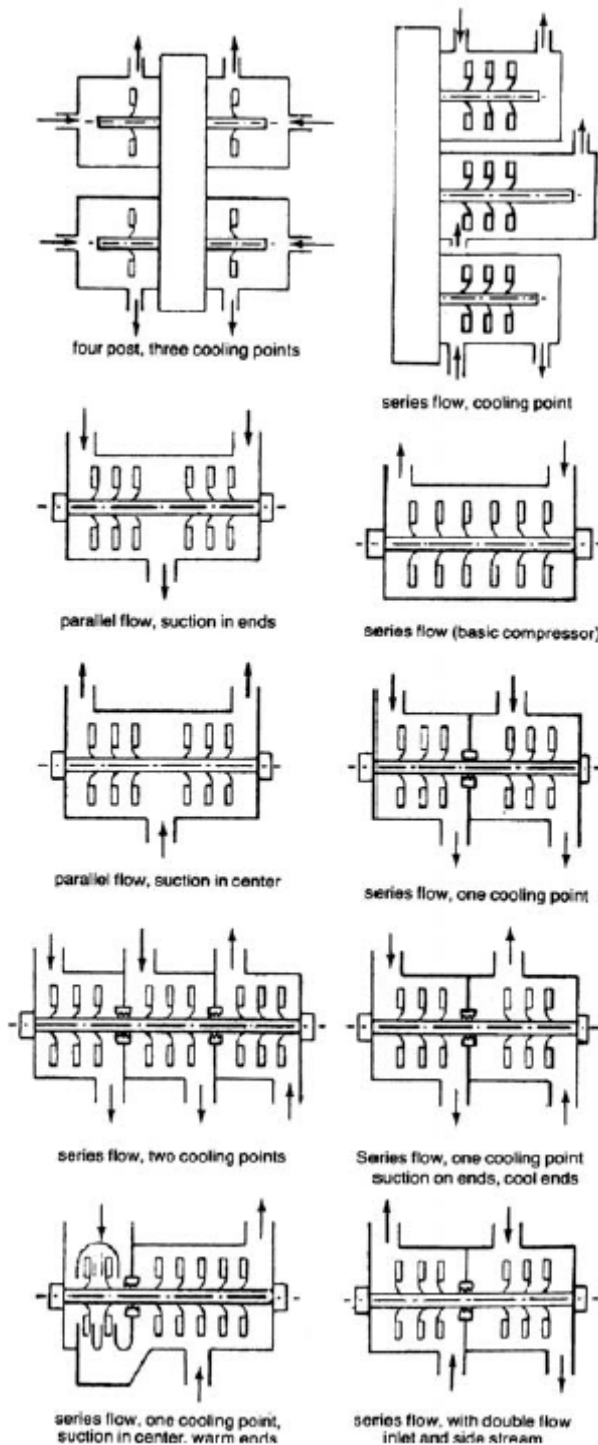


Εικόνα 1-46: Συμπιεστής τύπου βαρελιού

Η εικόνα 1-47 δείχνει ορισμένες από τις πολλές διατάξεις/διαμορφώσεις. Κάποιοι παράγοντες που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή μιας διάταξης που θα ανταποκρίνεται στις ανάγκες των εγκαταστάσεων είναι οι εξής:

1. Η εσωτερική ψύξη ανάμεσα στα στάδια μπορεί να μειώσει σημαντικά την ενέργεια που καταναλώνεται.
2. Back-to-back στροφεία επιτρέπουν μία ισορροπημένη πίεση του ρότορα και μειώνουν την υπερφόρτωση των ρουλεμάν της ώσης.
3. Ψυχρή είσοδος και ζεστή απελευθέρωση στη μέση της διαδικασίας μειώνει τη στεγανοποίηση λαδιού και τα προβλήματα λυπάνσεως.

4. Η μονή είσοδος και μονή απελευθέρωση μειώνει τα προβλήματα της εξωτερικής σωλήνωσης.
5. Οι επιφάνειες ισορροπίας που είναι εύκολα προσβάσιμες στο πεδίο μπορούν να μειώσουν σημαντικά το χρόνο ισορροπίας του πεδίου.
6. Το έμβολο ισορροπίας χωρίς εξωτερική διαρροή θα μειώσει σημαντικά τη φθορά στα ρουλεμάν της ώσης.

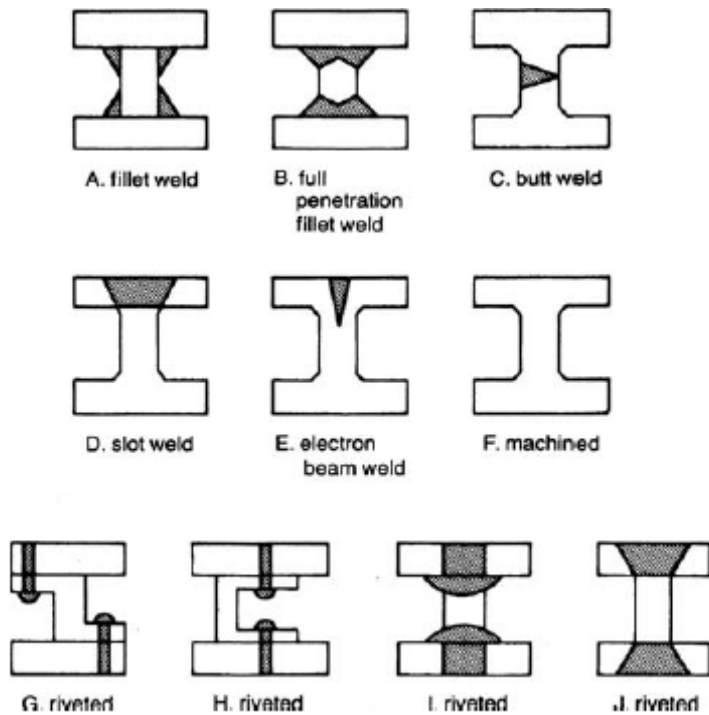


Εικόνα 1-47: Ποικίλες διαμορφώσεις φυγόκεντρικών συμπιεστών

7. Τα ζεστά και ψυχρά τμήματα της διαδικασίας που είναι απέναντι το ένα από το άλλο θα μειώσουν τις θερμικές κλίσεις και, επομένως, μειώνουν την αλλοίωση της διαδικασίας.
8. Το κάλυμμα που χωρίζεται οριζόντια είναι ευκολότερο να ανοιχτεί για έλεγχο απ'ότι εκείνα που χωρίζονται κάθετα, μειώνοντας το χρόνο συντήρησης.
9. Οι κρεμαστοί ρότορες παρουσιάζουν ένα ευκολότερο πρόβλημα ευθυγράμμισης επειδή η ευθυγράμμιση στο τέλος/άκρη του άξονα είναι απαραίτητη μόνο στη σύνδεση μεταξύ του συμπιεστή και του οδηγού.
10. Μικρότεροι συμπιεστές υψηλής πίεσης που κάνουν την ίδια δουλειά θα μειώσουν προβλήματα θεμελίωσης αλλά θα έχουν μειώσει επίσης σημαντικά και το πεδίο λειτουργικότητας.

Κατασκευή στροφείου

Τα στροφεία των φυγόκεντρων συμπιεστών είναι είτε καλυμμένα είτε όχι. Τα ανοιχτά, καλυμμένα στροφεία που χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές μονού σταδίου δημιουργούνται από χύτευση ή από τριών διαστάσεων τόννευση. Τέτοιοι συμπιεστές στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται για τα στάδια αναλογιών υψηλής πίεσης. Το καλυμμένο στροφείο χρησιμοποιείται κυρίως στον διαδικαστικό συμπιεστή λόγω των σταδίων με αναλογία χαμηλής πίεσης. Η εικόνα 1-48 δείχνει αρκετές τεχνικές κατασκευής, ο πιο κοινός από τους οποίους φαίνεται στην Α και Β όπου οι λεπίδες συνδέονται με συγκόλληση λωρίδας με την πλήμνη και είναι καλυμμένες. Στη Β τα σημεία της συγκόλλησης είναι εύκολα στη διεύθυνση. Το μειονέκτημα αυτού του είδους της κατασκευής είναι η παρεμπόδιση της αεροδυναμικής διόδου. Στη C οι λεπίδες είναι μερικώς κολλημένες με τα καλύμματα στη μέση του. Για λεπίδες με κλίση προς τα πίσω αυτή η τεχνική δεν ήταν επιτυχής και υπήρχε δυσκολία στο να επιτευχθεί ένα ομαλό περίγραμμα γύρω από το κλίνον άκρο. Η D απεικονίζει μια τεχνική σύνδεσης με εγκοπτή και χρησιμοποιείται όπου το ύψος της διόδου της λεπίδας είναι πολύ μικρό (η οπίσθια γωνία κλίσης είναι πολύ υψηλή) για να επιτρέψει σύνδεση με λωρίδα. Στην Ε μια τεχνική ακτινοβολίας ηλεκτρονίου βρίσκεται σε αρχικό στάδιο ακόμη και χρειάζεται δουλειά για να τελειοποιηθεί. Το μεγάλο της μειονέκτημα είναι ότι οι συνδέσεις με ακτινοβολία ηλεκτρονίου θα έπρεπε να αυξηθούν σε ένταση αλλά βρίσκονται σε διάτμηση. Οι διατάξεις από τη G έως τη J χρησιμοποιούν πιρτσίνια. Όπου οι κεφαλές των πιρτσινιών προεξέχουν στη δίοδο, η αεροδυναμική απόδοση μειώνεται. Τα υλικά για την κατασκευή αυτών των στροφείων είναι συνήθως ατσάλια χαμηλού κράματος, όπως AISI 4140 ή AISI 4340. Το AISI 4140 είναι ικανοποιητικό για τις περισσότερες εφαρμογές. Το AISI 4340 χρησιμοποιείται για μεγαλύτερα στροφεία απαιτώντας μεγαλύτερες αντοχές. Για διαβρωτικά αέρια χρησιμοποιείται το ανοξειδωτο ατσάλι AISI 51410 (με περίπου 12% χρώμιο). Το Monel K500 χρησιμοποιείται σε ατμόσφαιρες αερίου αλογόνου και σε συμπιεστές οξυγόνου εξαιτίας της αντοχής του στους σπινθήρες. Τα στροφεία τιτανίου έχουν εφαρμοστεί στην επισκευή ή συντήρηση με χλώριο. Τα στροφεία με κράμα αλουμινίου έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς ειδικότερα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (κάτω των 300⁰ Φαρενάιτ).



Εικόνα 1-48: Διάφορες τεχνικές κατασκευής φυγοκεντρικών τροφείων (fillet weld=συγκολλημένων πλευρών, full penetration fillet weld=συγκολλημένων πλευρών πλήρους διαπερατότητας, butt weld=συγκολλημένου άκρου, slot weld=συγκολλημένης εγκοπής, electron beam weld=συγκολλημένων ζευγών ηλεκτρονίου, machined=μηχανικά, riveted=καρφωμένες)

Αυτό το πεδίο αυξάνεται με τις νέες εξελίξεις στα κράματα αλουμινίου. Συνήθως επιλέγονται το αλουμίνιο και το τιτάνιο λόγω της χαμηλής τους πυκνότητας. Αυτή η χαμηλή πυκνότητα μπορεί να προκαλέσει αλλαγή στην κρίσιμη ταχύτητα του ρότορα, πράγμα το οποίο μπορεί να είναι πλέονεκτικό έναντι άλλων λύσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Συμπιεστές αξονικής ροής

Οι συμπιεστές στις περισσότερες εφαρμογές τουρμπίνων αερίου, ειδικά στις μονάδες πάνω από 5MW, χρησιμοποιούν συμπιεστές αξονικής ροής. Στο συμπιεστή αξονικής ροής, η ροή εισέρχεται στο συμπιεστή με αξονική κατεύθυνση (παράλληλη στον άξονα περιστροφής), καθώς επίσης εξέρχεται από την τουρμπίνα αερίου με αξονική κατεύθυνση. Ο συμπιεστής αυτός συμπιέζει το υγρό με το οποίο λειτουργεί, πρώτα προκαλώντας επιτάχυνση του υγρού και έπειτα διαχέοντάς το για να αυξηθεί η πίεση του. Το υγρό επιταχύνεται από την περιστροφή των λεπίδων του ρότορα και έπειτα διαχέεται σε μια σειρά στατικών λεπίδων του στάτορα. Η διάχυση του στάτορα μετατρέπει την αύξηση της ταχύτητας που αποκτάται στο ρότορα σε αύξηση πίεσης. Ένας συμπιεστής αποτελείται από πολλά στάδια, με ένα από αυτό το συνδυασμό του ρότορα ακολουθούμενο από ένα στάτορα. Μια επιπλέον σειρά από κλίνουσες λεπίδες, γνωστή ως κατευθυντήρια πτερύγια εισόδου, χρησιμοποιούνται συνήθως στην είσοδο του συμπιεστή για να διασφαλιστεί η είσοδος του αέρα στο ρότορα του πρώτου σταδίου με την επιθυμητή γωνία ροής. Τα πτερύγια αυτά είναι επίσης μεταβλητής κλίσης και έτσι μπορούν να προσαρμοστούν στις ποικίλες απαιτήσεις της ροής της μηχανής. Εκτός από τους στάτορες, ένας ακόμα διαχύτης στην έξοδο του συμπιεστή που αποτελείται από ένα άλλο αριθμό πτερυγίων, γνωστά ως κατευθυντήρια πτερύγια εξόδου, διαχέει επιπλέον το υγρό και ελέγχει την ταχύτητα κατά την είσοδό του στις μηχανές καύσης. Σε ένα συμπιεστή αξονικής ροής, ο αέρας περνάει από το ένα στάδιο στο άλλο, ενώ σε κάθε ένα από αυτά τα στάδια αυξάνεται ελαφρώς η πίεση. Προκαλώντας αυξήσεις μικρής πίεσης της τάξης του 1.1 προς 1 έως 1.4 προς 1, αποκτάται υψηλή αποδοτικότητα, όπως φαίνεται στον πίνακα 2-1. Η χρήση πολλαπλών σταδίων επιτρέπει συνολικές αυξήσεις πίεσης έως 40 προς 1 σε ορισμένες εφαρμογές αεροδιαστημικής και τιμή πίεσης 30 προς 1 σε ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές.

Τα τελευταία 20 χρόνια έχει παρατηρηθεί μεγάλη ανάπτυξη στην τεχνολογία τουρμπίνων αερίου. Η ανάπτυξη αυτή αποτελεί την αιχμή του δόρατος με την αύξηση των τιμών της πίεσης του συμπιεστή, με τις εξελιγμένες τεχνικές καύσης, την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών, τις καινούργιες επιστρώσεις και τα καινούρια σχήματα ψύξης.

Η αύξηση στην αποδοτικότητα των τουρμπίνων αέρα εξαρτάται από δύο βασικές παραμέτρους:

- Την αύξηση στο λόγο πίεσης
- Την αύξηση της θερμοκρασίας καύσης

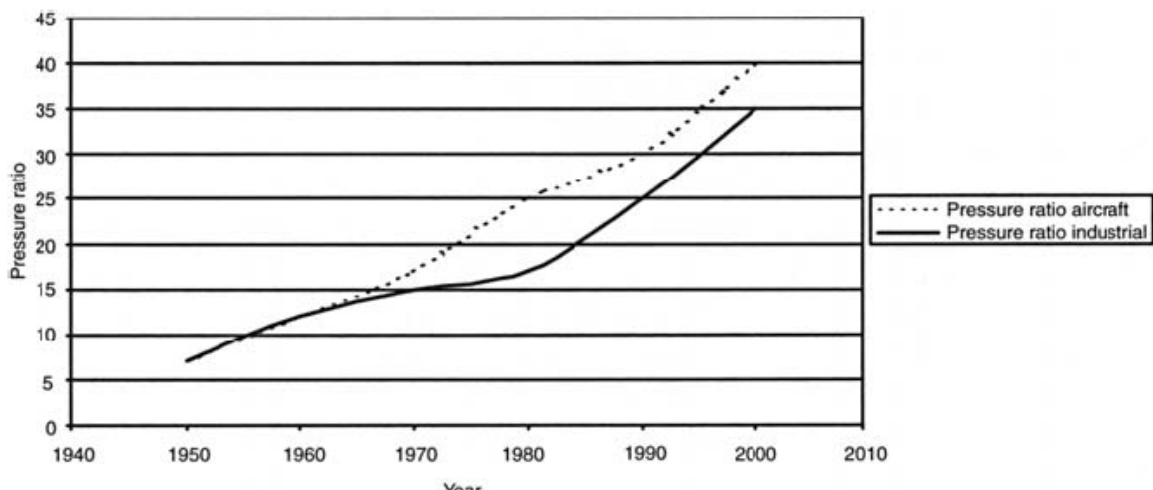
Θα πρέπει, επίσης, να λάβουμε υπόψη ότι ο συμπιεστής αξονικής ροής μιας τουρμπίνας αερίου καταναλώνει μεταξύ 55-65% της ενέργειας που παράγεται από το τμήμα της τουρμπίνας αερίου. Η **αεροδιαστημική** μηχανή είναι ο ηγέτης στην τεχνολογία των τουρμπίνων αερίου. Τα κριτήρια σχεδιασμού αυτών των μηχανών ήταν η υψηλή αξιοπιστία, η υψηλή απόδοση με πολλά ξεκινήματα και η ευέλικτη λειτουργία τους κατά μήκος του φακέλου πτήσης. Η διάρκεια ζωής της μηχανής γύρω στις 3500 ώρες μεταξύ μεγάλων γενικών επισκευών και επιθεωρήσεων θεωρήθηκε καλή. Η απόδοση της αεροδιαστημικής μηχανής πάντοτε εκτιμάται κυρίως ως προς την αναλογία ώθησης/βάρους της.

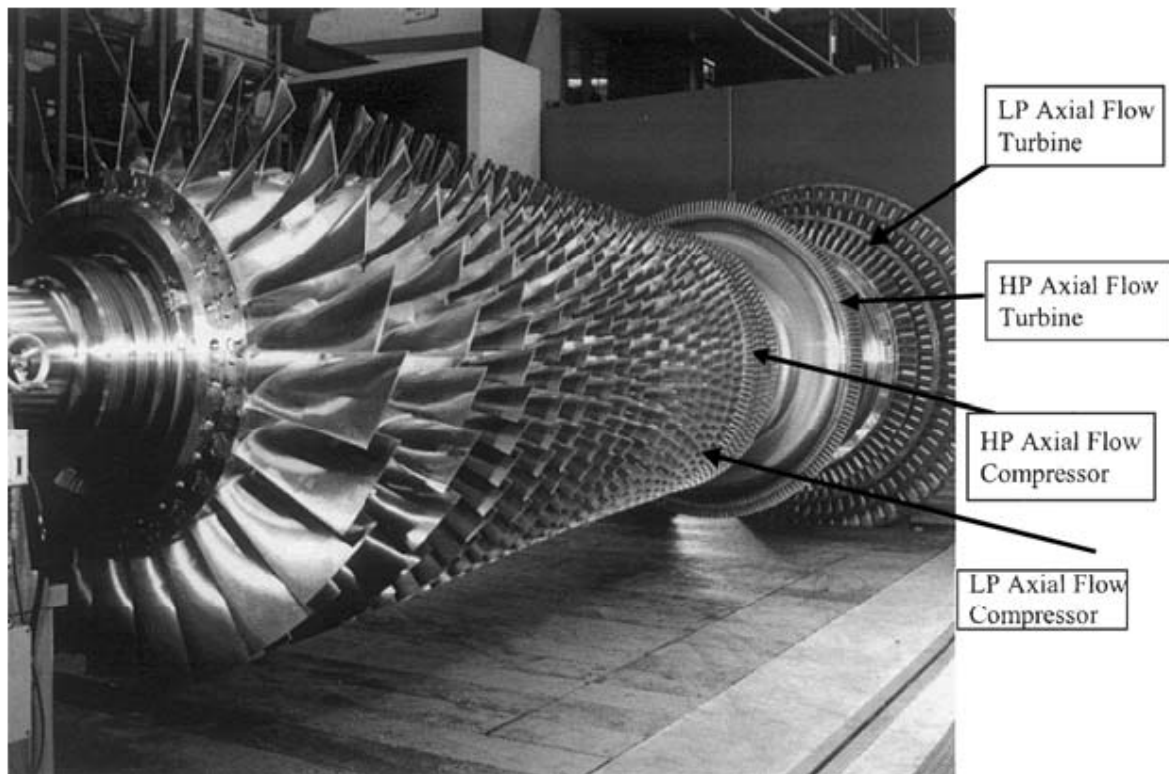
Η αύξηση στην αναλογία ώθησης/βάρους πραγματοποιείται από την αύξηση της αναλογίας της υψηλής πλευράς λεπίδων στο συμπιεστή, καθώς επίσης βελτιστοποιώντας την αναλογία πίεσης και τη θερμοκρασία όπτησης της τουρμπίνας

για μέγιστη απόδοση έργου ανά μονάδα ροής. Η βιομηχανική τουρμπίνα αερίου πάντα έδινε έμφαση στη μεγάλη διάρκεια ζωής και αυτή η συντηρητική προσέγγιση έχει ως αποτέλεσμα αυτή η βιομηχανική τουρμπίνα αερίου να χάνει την υψηλή απόδοση λόγω απότομης λειτουργίας. Η βιομηχανική τουρμπίνα αερίου είναι συντηρητική στην αναλογία πίεσης και στις θερμοκρασίες όπτησης, γεγονός το οποίο έχει αλλάξει τα τελευταία 10 χρόνια. Ωθούμενη από την εισαγωγή της αεριώθησης της τουρμπίνας αερίου, η βιομηχανική τουρμπίνα αερίου έχει βελτιώσει σημαντικά την απόδοσή της ως προς όλες τις πλευρές λειτουργίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί σημαντικά το κενό απόδοσης μεταξύ αυτών των δυο τύπων τουρμπίνων αερίου. Η εικόνα 2-1 δείχνει την αύξηση στην αναλογία πίεσης σε μια τουρμπίνα αερίου τα τελευταία 50 χρόνια. Η αύξηση στην αναλογία πίεσης αλλά και στη θερμοκρασία όπτησης είναι παράλληλες μεταξύ τους, καθώς και οι δυο είναι απαραίτητες προκειμένου να αυξηθεί η θερμική αποδοτικότητα στις τουρμπίνες αερίου. Ο συμπιεστής αξονικής ροής στις περισσότερες εξελιγμένες τουρμπίνες αερίου είναι ένας συμπιεστής πολλών σταδίων που αποτελείται από 17 έως 22 στάδια με μια εξαιρετικά μεγάλη αναλογία πίεσης. Δεν αποτελεί σπάνιο φαινόμενο η ύπαρξη αναλογιών πίεσης σε βιομηχανικές τουρμπίνες αερίου σε κλίμακα 17 έως 20 προς 1, με ορισμένες μονάδες να έχουν αναλογίες πίεσης σε κλίμακα 30 προς 1.

Axial Flow Compressor Characteristics

| Type of Application | Type of Flow | Inlet Relative Velocity Mach Number | Pressure Ratio per Stage | Efficiency per Stage |
|---------------------|--------------|-------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Industrial | Subsonic | 0.4–0.8 | 1.05–1.2 | 88–92% |
| Aerospace | Transonic | 0.7–1.1 | 1.15–1.6 | 80–85% |
| Research | Supersonic | 1.05–2.5 | 1.8–2.2 | 75–85% |





Εικόνα 2-1: Ανάπτυξη του λόγου πίεσης στα τελευταία 50 χρόνια

Εικόνα 2-2: Ρότορας συμπιεστή αξονικής ροής

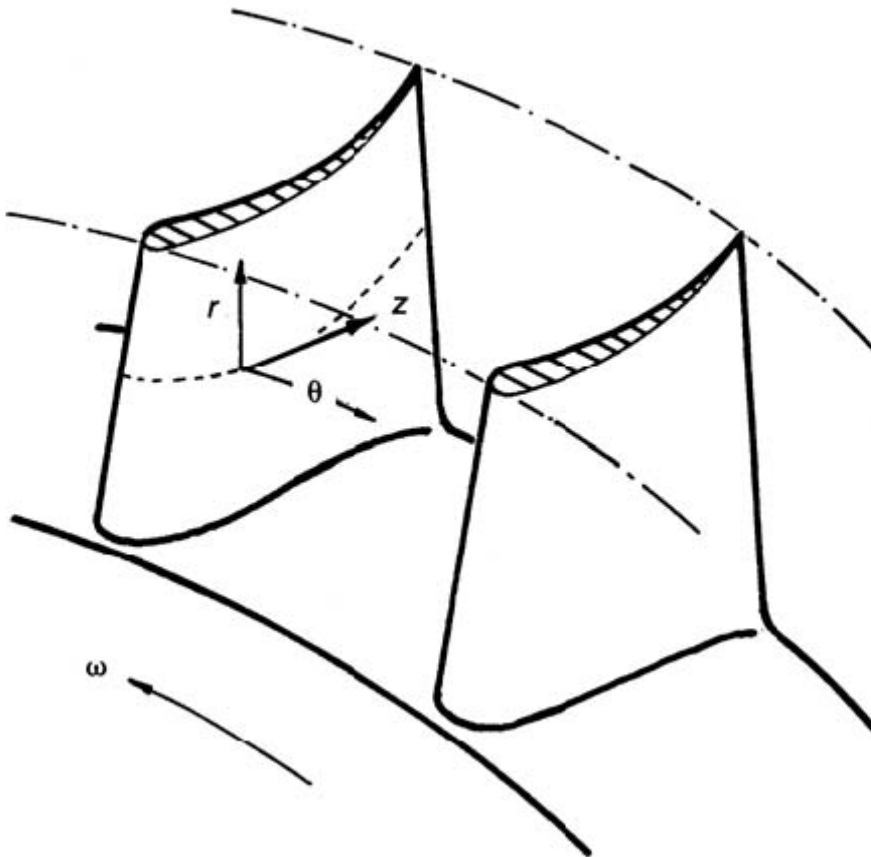
Η εικόνα 2-2 δείχνει ένα στροφέιο συμπιεστή αξονικής ροής υψηλής πίεσης πολλαπλών σταδίων. Η αύξηση της χαμηλής πίεσης ανά στάδιο, επίσης, απλουστεύει τους υπολογισμούς στον προκαταρκτικό σχεδιασμό του συμπιεστή δικαιολογώντας τον αέρα ως μη συμπιεσμένο στη ροή του κατά αυτό το στάδιο.



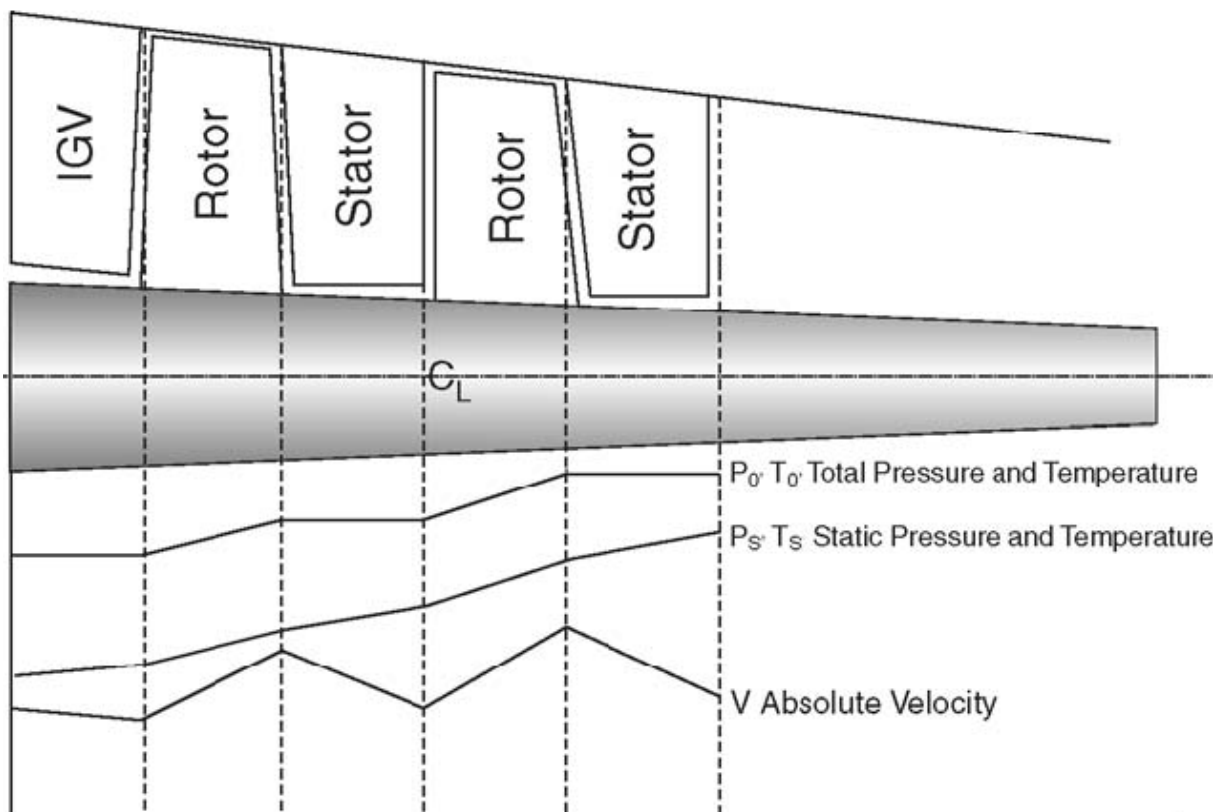
Εικόνα 2-3: Στάτορες συμπίεστή αξονικής ροής τοποθετημένοι σε θήκη

Η εικόνα 2-3 δείχνει τους στάτορες, τις στατικές λεπίδες που βρίσκονται μεταξύ των στροφικών λεπίδων και προκαλούν τη διάχυση της ροής (αύξηση στη στατική πίεση και μείωση της απόλυτης ταχύτητας). Τα αρχικά στάδια των στατόρων στην εικόνα 2-3 προσαρμόζονται εύκολα, όπως φαίνεται στην κυκλική τους βάση. Αυτοί οι στάτορες που προσαρμόζονται εύκολα επιτρέπουν στο στάτορα να τοποθετηθεί στη σωστή γωνία ροής φεύγοντας από τις λεπίδες, καθώς ο αέρας της μαζικής ροής ποικίλει με τη θερμοκρασία του φορτίου και της εισόδου. Όπως και με άλλα είδη μηχανημάτων περιστροφής, ένας αξονικός συμπίεστής μπορεί να περιγραφεί σε ένα κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων. Η ακτίνα z βρίσκεται κατά μήκος της ακτίνας περιστροφής, η οποία βρίσκεται κατά μήκος του άξονα του συμπίεστή. Η ακτίνα r υπολογίζεται εξωτερικά από τον άξονα και η γωνία περιστροφής θ είναι η γωνία που μεταβάλλεται από τις λεπίδες στην εικόνα 2-4. Αυτό το σύστημα θα χρησιμοποιηθεί για τους συμπίεστές αξονικής ροής.

Η εικόνα 2-5 δείχνει τη διακύμανση της πίεσης, τη ταχύτητα και της απόλυτης θερμοκρασίας για τη ροή διαμέσου αρκετών σταδίων ενός αξονικού συμπίεστή. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2-3, το μήκος των λεπίδων και η περιοχή μεταξύ του άξονα και του καλύμματος μειώνεται κατά μήκος του συμπίεστή. Αυτή η μείωση στην περιοχή της ροής αντισταθμίζει την αύξηση στην πυκνότητα του υγρού καθώς συμπιέζεται επιτρέποντας μια συνεχή αξονική ταχύτητα.



Εικόνα 2-4: Συστημα συντεταγμένων για συμπιεστή αξονικής ροής



Εικόνα 2-5: Μεταβολή της θερμοκρασίας(ενθαλπίας) ταχύτητας και πίεσης μέσω ενός συμπιεστή αξονικής ροής

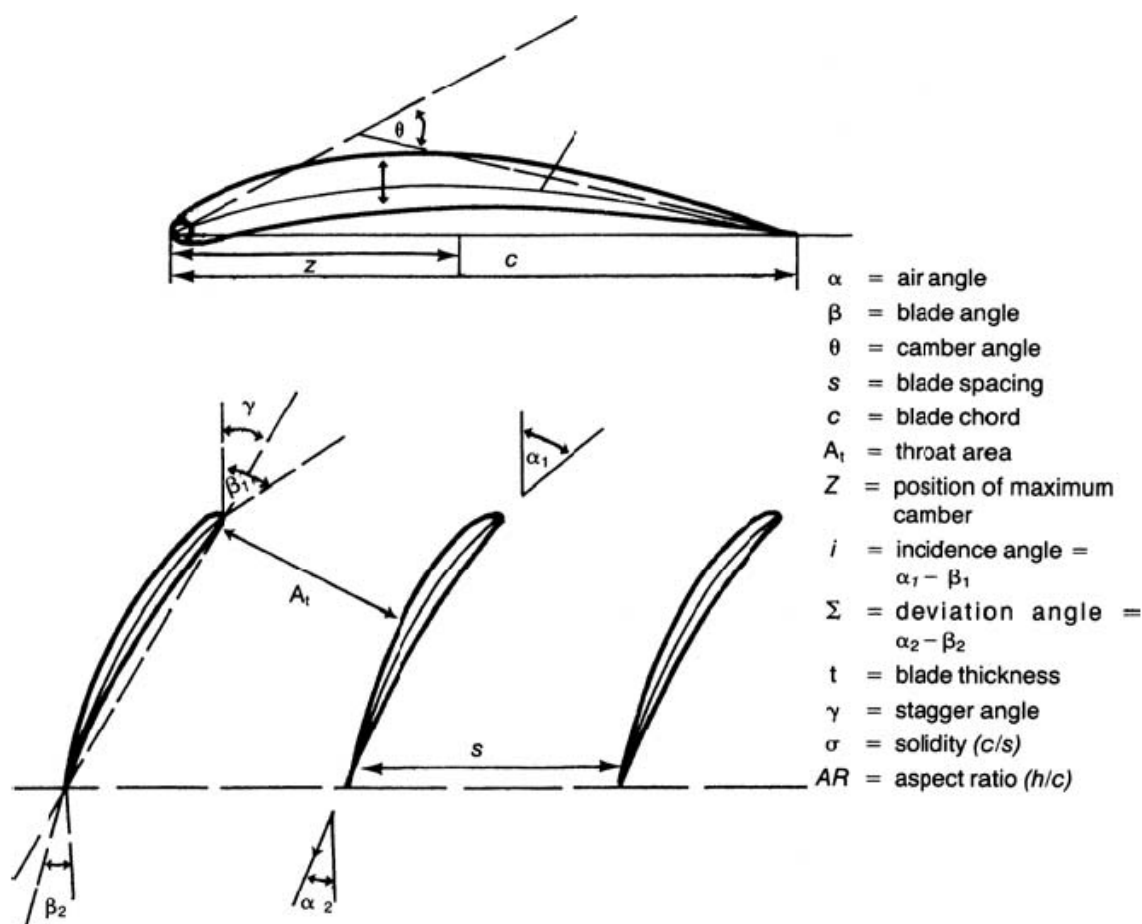
Στους περισσότερους αρχικούς υπολογισμούς που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό του συμπιεστή, το μέσο ύψος της λεπίδας χρησιμοποιείται ως το ύψος της λεπίδας για αυτό το στάδιο.

Ονοματολογία λεπίδας και σύζευξης έν σειρά

Καθώς οι αεροτομές χρησιμοποιούνται για την επιτάχυνση και τη διάχυση του αέρα σε έναν συμπιεστή, μεγάλο μέρος της θεωρίας και της έρευνα που αφορά τη ροή στους αξονικούς συμπιεστές βασίζεται στη μελέτη μεμονωμένων αεροτομών. Η ονοματολογία και οι μέθοδοι περιγραφής των σχημάτων των λεπίδων ενός συμπιεστή είναι σχεδόν ίδιες με αυτές των πτερυγίων αεροπλάνων. Η έρευνα για τους αξονικούς συμπιεστές περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση της μιας λεπίδας με την άλλη και έτσι αρκετές λεπίδες τοποθετούνται στη σειρά μιμούμενες ένα ρότορα ή στάτορα συμπιεστή. Μια τέτοια σειρά ονομάζεται σύζευξη (cascade). Όσον αφορά στις λεπίδες, όλες οι γωνίες που περιγράφουν τη λεπίδα και τον προσανατολισμό της υπολογίζονται σε σχέση με τον άξονα (ακτίνα z) του συμπιεστή.

Οι αεροτομές είναι καμπυλωτές, κυρτές από τη μία πλευρά και κοίλες στην άλλη, με το μοτέρ να περιστρέφεται προς την πλευρά που είναι κοίλα. Η πλευρά αυτή ονομάζεται πλευρά πίεσης της λεπίδας και η κυρτή πλευρά ονομάζεται αναρρόφηση της λεπίδας. Η γραμμή χορδής (chordline) μιας αεροτομής είναι μια ευθεία γραμμή που σχεδιάζεται από το αρχικό άκρο ως το πίσω άκρο της αεροτομής και η χορδή είναι το μήκος της γραμμής της χορδής, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-6. Η κυρτή γραμμή είναι μια γραμμή που σχεδιάζεται στο μέσο της απόστασης μεταξύ των δύο επιφανειών και η απόσταση μεταξύ της κυρτής γραμμής και της γραμμής της χορδής είναι η ελαφριά κυρτότητα της λεπίδας. Η γωνία κυρτότητας θ είναι η γωνία μεταβολής της κυρτής γραμμής. Το σχήμα της λεπίδας περιγράφεται καθορίζοντας την αναλογία της χορδής στην κυρτότητα σε συγκεκριμένο μήκος στη γραμμή χορδής, υπολογισμένη από το αρχικό άκρο. Η τιμή της πλευράς (AR) είναι η τιμή του μήκους της λεπίδας στο μήκος της χορδής. Ο όρος 'αναλογία καλύμματος προς την κορυφή' (hub-to-tip ratio) χρησιμοποιείται συχνά αντί της τιμής της πλευράς. Η τιμή της πλευράς γίνεται σημαντική όταν συζητούνται τα χαρακτηριστικά της ροής τριών διαστάσεων. Η τιμή της πλευράς καθορίζεται όταν συζητούνται τα χαρακτηριστικά της μαζικής ροής και, επίσης, καθορίζεται όταν η μαζική ροή και αξονική ταχύτητα έχουν προσδιοριστεί.

Η κλίση S_b μιας σύζευξης είναι η απόσταση μεταξύ των λεπίδων, συνήθως υπολογισμένη μεταξύ των κυρτών γραμμών στα αρχικά και στα πίσω άκρα των λεπίδων. Η τιμή του μήκους της χορδής στην κλίση είναι η στερεότητα σ της σύζευξης. Η στερεότητα υπολογίζει τις σχετικές επιδράσεις παρέμβασης της μιας λεπίδας με μια άλλη. Εάν η στερεότητα είναι της τάξης 0.5 έως 0.7, τα μεμονωμένα δεδομένα των τεστ σε αεροτομές, από τα οποία υπάρχει μεγάλη ποικιλία σχημάτων προς επιλογή, μπορεί να εφαρμοστούν με σημαντική ακρίβεια. Οι ίδιες μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν σε μια στερεότητα γύρω στο 1.0 αλλά με μειωμένη ακρίβεια. Όταν η στερεότητα είναι της τάξης 1.0 έως 1.5, τα δεδομένα σύζευξης είναι απαραίτητα. Για στερεότητα πάνω από 1.5, μπορεί να υιοθετηθεί η θεωρία καναλιού. Η πλειονότητα των παρόντων σχεδίων βρίσκονται στην περιοχή της σύζευξης.



Εικόνα 2-6: Ονοματολογία προφίλ πτερυγίου

Η γωνία εισόδου της λεπίδας β_1 είναι η γωνία που σχηματίζεται από μια γραμμή που εφάπτεται στο πρόσθιο άκρο της κυρτής γραμμής και του άξονα του συμπιεστή. Η γωνία εξόδου της λεπίδας β_2 είναι η γωνία που εφάπτεται στο πίσω μέρος της κυρτής γραμμής. Αφαιρώντας τη β_2 από τη β_1 δίδεται η κυρτή γωνία λεπίδας. Η γωνία που δημιουργείται από τη γραμμή της χορδής με τον άξονα του συμπιεστή είναι η γ , η κλιμακωτή γωνία της λεπίδας.

Οι λεπίδες υψηλής πλευράς συχνά προ-στροβιλίζονται έτσι ώστε σε απόλυτη ταχύτητα λειτουργίας, οι φυγόκεντρες δυνάμεις που δρουν στις λεπίδες θα σταματήσουν τις λεπίδες στη σχεδιασμένη αεροδυναμική γωνία. Η γωνία προ-στροβιλισμού στην κορυφή των λεπίδων με AR τιμές γύρω στο 5 είναι ανάμεσα 2 και 4 βαθμών. Η γωνία του αέρα εισόδου α_1 , η γωνία στην οποία ο εισερχόμενος αέρας προσεγγίζει τη λεπίδα, είναι διαφορετική από τη β_1 . Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών λεπίδων είναι η γωνία συχνότητας i . Η γωνία προσβολής α είναι η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση εισόδου του αέρα και στη χορδή της λεπίδας. Καθώς ο αέρας περιστρέφεται από τη λεπίδα φέρει αντίσταση στην περιστροφή και φεύγει από τη λεπίδα με γωνία μεγαλύτερη από τη β_2 . Η γωνία με την οποία ο αέρας αφήνει τη λεπίδα είναι η γωνία εξόδου του αέρα. Η διαφορά μεταξύ α_2 και β_2 είναι η γωνία απόκλισης δ . Η γωνία περιστροφής του αέρα είναι η διαφορά μεταξύ α_1 και α_2 και συχνά αποκαλείται γωνία εκτροπής/απόκλισης. Το πρωτότυπο έργο της NACA και της NASA αποτελεί τη βάση του σχεδιασμού των συμπιεστών αξονικής ροής. Υπό τη NASA έχει ελεγχθεί ένας μεγάλος αριθμός προφίλ λεπίδων. Τα δεδομένα σύζευξης της NASA είναι το εκτενέστερο έργο αυτού του είδους. Στους περισσότερους προς

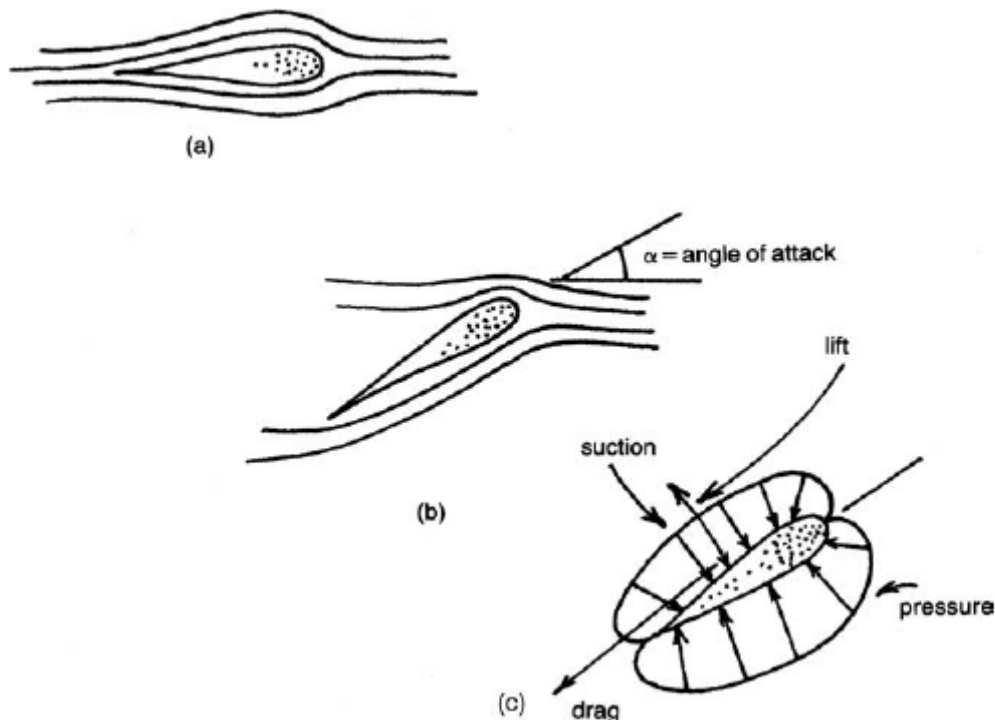
πώληση συμπιεστές αξονικής ροής σε τουρμπίνες αερίου πριν 1990 χρησιμοποιείται η σειρά λεπίδων 65 της NACA. Αυτές οι λεπίδες συνήθως καθορίζονται από τη σημειογραφία όμοια με την ακόλουθη: 65-(18) 10. Αυτή η σημειογραφία δείχνει ότι η λεπίδα έχει έναν συντελεστή ανύψωσης 1.8, προφίλ 65 και αναλογία πυκνότητας/χορδής 10%. Ο συντελεστής ανύψωσης μπορεί να σχετίζεται άμεσα με την κυρτή γωνία της λεπίδας με την ακόλουθη σχέση για 65 σειρές λεπίδων:

$$\Theta \approx 25C_L (2-1)$$

Οι καινούργιοι και εξελιγμένοι ρότορες συμπιεστή έχουν λιγότερες λεπίδες με υψηλά φορτία και οι λεπίδες είναι πιο λεπτές, μεγαλύτερες και σχεδιάζονται με τη χρήση εξελιγμένης θεωρίας ακτινικής ισορροπίας που δημιουργεί τριών διαστάσεων, ελεγχόμενες αεροτομές με σχήμα διάχυσης (3D/CDA), με μικρότερα διάκενα και υψηλό φορτίο ανά στάδιο.

Στοιχειώδης θεωρία αεροτομής

Όταν μια αεροτομή είναι παράλληλη με την ταχύτητα του αερίου, ο αέρας κινείται πάνω από την αεροτομή (εικόνα 2-7^a). Ο αέρας διαιρείται γύρω από το σώμα, διαχωρίζεται στο αρχικό άκρο και επανέρχεται στο τελευταίο άκρο του σώματος. Η κύρια ροή δεν υφίσταται μόνιμη απόκλιση από την παρουσία της αεροτομής. Δυνάμεις δρουν στο έλασμα από την τοπική κατανομή του ρεύματος και την τριβή του υγρού στην επιφάνεια. Εάν η αεροτομή είναι σωστά σχεδιασμένη, η ροή ωθείται με μικρό ή χωρίς στροβιλισμό. Εάν η αεροτομή είναι τοποθετημένη στη γωνία προσβολής προς το ρεύμα του αέρα (εικόνα 2-7b), δημιουργείται μεγαλύτερη αναταραχή λόγω της παρουσίας της, ενώ η κατεύθυνση του ρεύματος αλλάζει. Ο αέρας υφίσταται μια τοπική απόκλιση, αν και σε λίγη απόσταση πριν και πίσω από το σώμα η ροή είναι ακόμη παράλληλη και ομοιόμορφη. Η ανοδική αναταραχή είναι μικρότερη σε σύγκριση με την καθοδική. Σύμφωνα με τους νόμους του Νεύτωνα, μπορεί να δημιουργηθεί τοπική απόκλιση του ρεύματος του αέρα μόνο εάν η λεπίδα ασκεί δύναμη στον αέρα. Επομένως, η αντίδραση του αέρα θα πρέπει να παράξει μια αντίστοιχη αντίθετη δύναμη στην αεροτομή. Η παρουσία της αεροτομής έχει αλλάξει την κατανομή της τοπικής πίεσης, και σύμφωνα με την εξίσωση του Bernoulli, και τις τοπικές ταχύτητες. Εξετάζοντας τις γραμμές του ρεύματος σχετικά με το σώμα φαίνεται ότι πάνω από την κορυφή της αεροτομής, οι γραμμές προσεγγίζουν η μία την άλλη, φανερώνοντας μια αύξηση στην ταχύτητα και μείωση στη στατική πίεση. Στην κάτω πλευρά της αεροτομής η δράση διαχωρίζει τις γραμμές οδηγώντας σε αύξηση της στατικής πίεσης.



Εικόνα 2-7: Ροή γύρω από μία αεροτομή σε διάφορες γωνίες προσβολής

Οι μετρήσεις της πίεσης σε διάφορα σημεία της επιφάνειας της αεροτομής αποκαλύπτουν την κατανομή πίεσης (εικόνα 2-7c). Το άθροισμα ανύψωσης αυτών των πιέσεων μπορεί να προκαλέσει ορισμένη δύναμη που δρα πάνω στις λεπίδες. Η δύναμη αυτή αναλύεται ως ένα συστατικό ανύψωσης L στις δεξιές γωνίες του μη κατανεμημένου ρεύματος αέρα και ένα συστατικό ώθησης D , που ωθεί την αεροτομή προς την κατεύθυνση που κινείται η ροή. Η δύναμη αυτή θεωρείται ότι δρα διαμέσου ενός ορισμένου σημείου που βρίσκεται στην αεροτομή, ούτως ώστε η συμπεριφορά να είναι η ίδια σαν όλα τα συστατικά/εξαρτήματα ξεχωριστά να δρούσαν ταυτόχρονα. Μέσω πειραμάτων θα ήταν πιθανό να υπολογιστούν οι δυνάμεις L και D για όλες τις τιμές της ταχύτητας της ροής του αέρα, τις γωνίες συχνότητας και τα διάφορα σχήματα της αεροτομής. Έτσι, για οποιαδήποτε αεροτομή οι δυνάμεις που δρουν μπορούν να παρουσιαστούν όπως φαίνεται στην εικόνα 2-8^a. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές είναι πιθανός ο προσδιορισμός των σχέσεων μεταξύ των δυνάμεων

$$D = C_D A \rho V^2 / 2$$

$$L = C_L A \rho V^2 / 2$$

Όπου:

D = η δύναμη ανύψωσης ή άντωση

L = η δύναμη οπισθέλκουσας

C_L = ο συντελεστής ανύψωσης

C_D = ο συντελεστής οπισθέλκουσας

A = η περιοχή της επιφάνειας

ρ = η πυκνότητα του υγρού

V = η ταχύτητα του υγρού

Οι δύο συντελεστές C_L και C_D έχουν οριστεί συσχετίζοντας την ταχύτητα, την πυκνότητα, την περιοχή και τις δυνάμεις ανύψωσης και ώθησης. Αυτοί οι συντελεστές μπορούν να υπολογιστούν από τεστ σε τούνελ αέρα και σχεδιάζονται όπως φαίνεται στην εικόνα 2-8b ενάντια στη γωνία επίθεσης για οποιοδήποτε

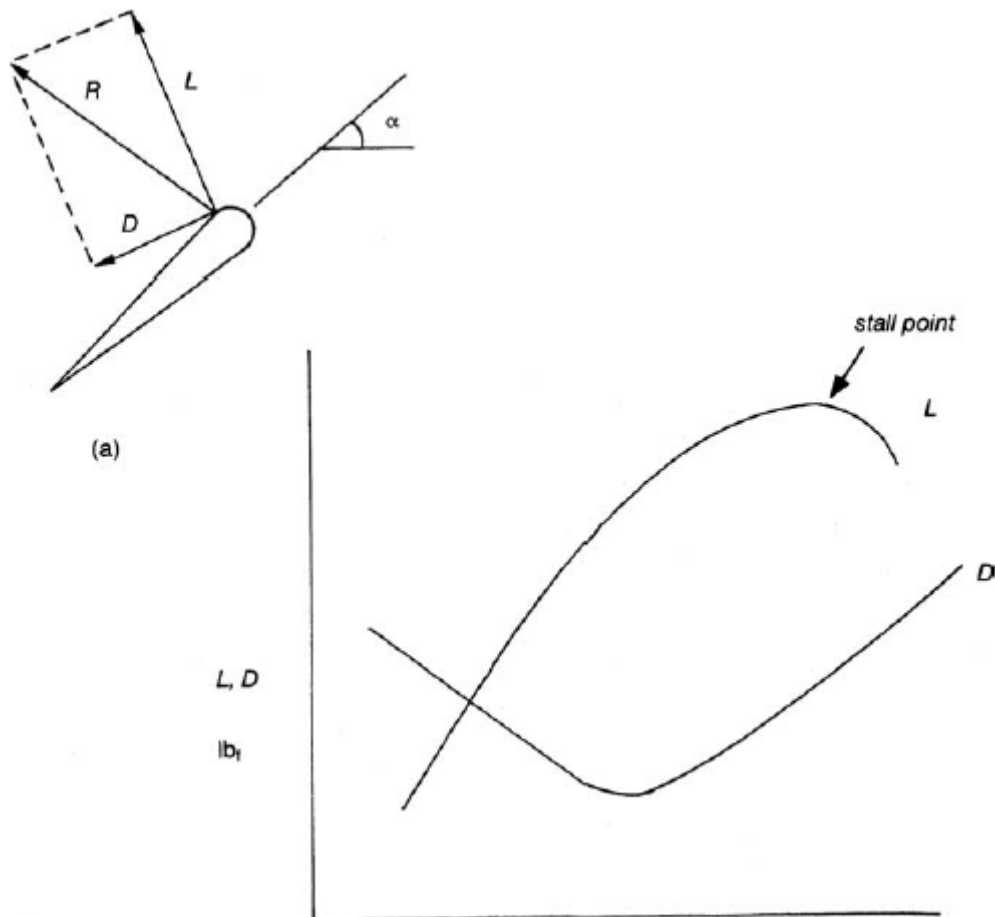
επιθυμητό τμήμα. Επομένως, αυτές οι καμπύλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις μελλοντικές προβλέψεις περιλαμβάνοντας αυτό το συγκεκριμένο σχήμα ελάσματος. Η εξέταση της εικόνας 2-8 δείχνει ότι υπάρχει μια γωνία προσβολής που παράγει τη μέγιστη δύναμη και το συντελεστή ανύψωσης. Εάν αυτή η γωνία ξεπεραστεί, η αεροτομή μπλοκάρει και η δύναμη ώθησης αυξάνεται ραγδαία. Καθώς πλησιάζει αυτή τη μέγιστη γωνία, ένα μεγάλο ποσοστό της διαθέσιμης ενέργειας χάνεται στην προσπάθεια να ξεπεράσει την τριβή, ενώ μειώνεται και η απόδοση.

Επομένως, υπάρχει ένα σημείο συνήθως πριν το μηχάνημα φτάσει το μέγιστο συντελεστή ανύψωσης, όπου πραγματοποιείται η πιο οικονομική λειτουργία, όπως υπολογίζεται από την αποτελεσματική ανύψωση για μια συγκεκριμένη παροχή ενέργειας.

Αεροτομές στρωτής ροής

Λίγο πριν και κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου είχε δοθεί μεγάλη έμφαση στις αεροτομές στρωτής ροής. Αυτές οι αεροτομές σχεδιάζονται έτσι ώστε η ελάχιστη πίεση στην επιφάνεια να πραγματοποιείται όσο πιο πίσω είναι δυνατόν. Η αιτία αυτού του σχεδιασμού είναι το γεγονός ότι η σταθερότητα του στρωτού οριακού στρώματος αυξάνεται όταν επιταχύνεται η εξωτερική ροή και η σταθερότητα μειώνεται όταν η ροή κατευθύνεται εναντίον της αυξανόμενης πίεσης. Αξιοσημείωτη μείωση στην επιφανειακή τριβή αποκτάται με την επέκταση της στρωτής περιοχής με αυτόν τον τρόπο, με την προϋπόθεση ότι η επιφάνεια είναι ομαλή.

Το μειονέκτημα αυτού του είδους της αεροτομής είναι ότι η μετάβαση από την στρωτή στη τυρβώδη ροή γίνεται ξαφνικά με μικρές γωνίες προσβολής. Αυτή η ξαφνική κίνηση σημαίνει ότι η ώθηση στις μεσαίες προς τις μεγάλες γωνίες προσβολής είναι πολύ μεγαλύτερη απ'ότι σε μία συνηθισμένη αεροτομή για την ίδια γωνία προσβολής (εικόνα 2-9).

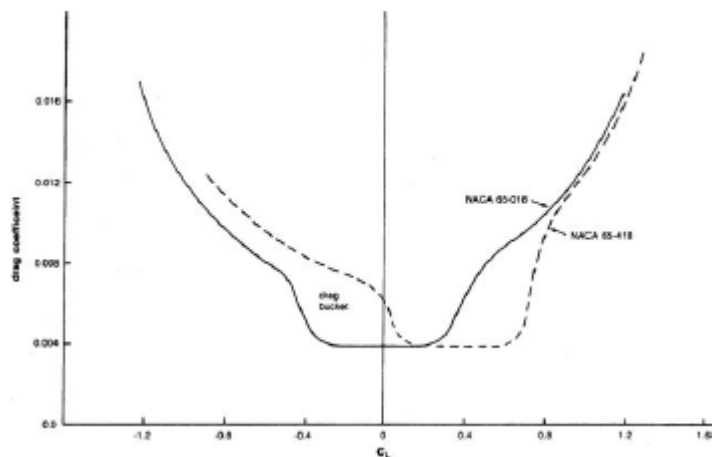


Εικόνα 2-8: Χαρακτηριστικά της άντωσης και οπισθέλκουσας σε μία αεροτομή

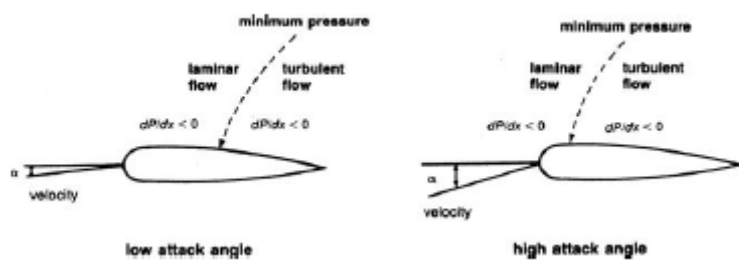
Αυτό το φαινόμενο αποδίδεται στο σημείο ελάχιστης πίεσης που κινείται εμπρός και έτσι, το σημείο μετάβασης μεταξύ της στρωτής και της τυρβώδους ροής ωθείται επίσης προς τη μύτη (**nose**), όπως φαίνεται στην εικόνα 7-10. Όσο περισσότερο περιτριγυρίζεται μια αεροτομή από μια τυρβώδη ροή αέρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιφανειακή τριβή.

Αύξηση της ενέργειας

Σε ένα συμπιεστή αξονικής ροής ο αέρας περνάει από το ένα στάδιο στο επόμενο και σε κάθε στάδιο υπάρχει μικρή αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Δημιουργώντας αυξήσεις μικρής πίεσης της τάξης 1.1 προς 1 έως 1.4 προς 1 μπορεί να αποκτήσει υψηλή αποδοτικότητα. Η χρήση πολλαπλών σταδίων επιτρέπει τη γενική αύξηση της πίεσης πάνω από 40 προς 1.



Εικόνα 2-9: Μετρήσεις NASA των συντελεστώ οπισθέλκουσας για δυο αεροτομές στρωτής ροής



Εικόνα 2-10: Αεροτομές στρωτής ροής

Η εικόνα 2-5 δείχνει τη διακύμανση της πίεσης, της ταχύτητας και της απόλυτης θερμοκρασίας για ροή διαμέσου αρκετών σταδίων ενός συμπιεστή αξονικής ροής. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι οι αλλαγές στις απόλυτες συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας και ενθαλπίας πραγματοποιούνται μόνο στο συστατικό στοιχείο της περιστροφής όπου εισάγεται ενέργεια στο σύστημα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2-5, το μήκος των λεπίδων και η περιοχή κατάργησης, όπου είναι η περιοχή μεταξύ του άξονα και του καλύμματος, μειώνονται κατά μήκος του συμπιεστή. Η μείωση στην περιοχή της ροής αντισταθμίζει την αύξηση στην πυκνότητα του υγρού ενώ συμπιέζεται, επιτρέποντας μια σταθερή αξονική ταχύτητα. Στους περισσότερους αρχικούς υπολογισμούς για το σχεδιασμό ενός συμπιεστή, ο μέσος όρος ύψους της λεπίδας χρησιμοποιείται ως το ύψος της λεπίδας για αυτό το στάδιο.

Η εμπειρική μέθοδος για ένα συμπιεστή τουρμπίνας αερίου πολλαπλών σταδίων θα ήταν ότι η αύξηση της ενέργειας ανά στάδιο θα ήταν σταθερή, παρά την κοινή αντίληψη ότι η αύξηση της πίεσης ανά στάδιο είναι σταθερή. Η αύξηση της ενέργειας ανά στάδιο μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\Delta H = \frac{[H_2 - H_1]}{N_s} \quad (2-4)$$

Όπου:

$H_1, H_2 =$ η απόλυτη ενθαλπία εισόδου και εξόδου BTU/lbm

$N_s =$ ο αριθμός των σταδίων

Υποθέτοντας ότι το αέριο είναι θερμικά και θερμιδικά τέλει (C_p και γ σταθερές), η εξίσωση 2-1 μπορεί να γραφτεί ξανά ως

$$\Delta T_{stage} = \frac{T_{in} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{N_s} \quad (2-5)$$

Όπου:

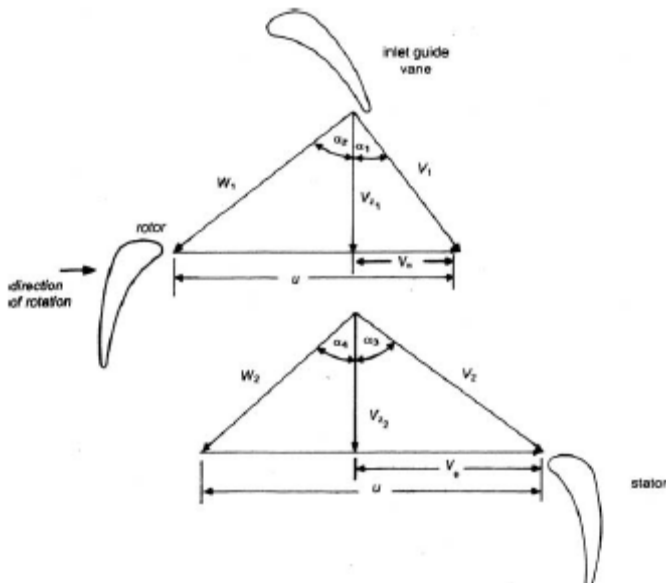
$T_{in} =$ η απόλυτη θερμοκρασία εισόδου ($^{\circ}F, ^{\circ}C$)

$P_1, P_2 =$ η απόλυτη πίεση εισόδου και εξόδου (psia, Bar)

$\gamma =$ λόγος ειδικών θερμοτήτων ($\gamma = 1.4 @ 60^{\circ}F (15^{\circ}F)$)

Τρίγωνα ταχύτητας

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ο συμπιεστής αξονικής ροής λειτουργεί με την αρχή τοποθέτησης έργου στον εισερχόμενο αέρα μέσω επιτάχυνσης και διάχυσης. Ο αέρας εισέρχεται στο μοτέρ όπως φαίνεται στην εικόνα 2-11 με απόλυτη ταχύτητα (V) κι γωνία α_1 που συνδυάζει σύνδεση ανύσματος με την εφαπτόμενη ταχύτητα της λεπίδας (U) για την παραγωγή της σχετικής ταχύτητας W_1 σε γωνία α_2 .



Εικόνα 2-11: Τυπικά τρίγωνα ταχυτήτων για αξονικής ροής συμπιεστή

Στον αέρα που κινείται κατά μήκος των διόδων και δημιουργείται από τις λεπίδες περιστροφής δίδεται μια σχετική ταχύτητα W_2 με γωνία α_4 , η οποία είναι μικρότερη από την α_2 εξαιτίας της καμπυλότητας των λεπίδων. Πρέπει να σημειώσουμε ότι η W_2 είναι μικρότερη από τη W_1 και προκύπτει από μια αύξηση στο εύρος της διόδου καθώς οι λεπίδες γίνονται πιο λεπτές προς το τελευταίο άκρο.

Επομένως, μια κάμψη θα πραγματοποιηθεί στο τμήμα του ρότορα σε αυτό το στάδιο. Ο συνδυασμός της σχετικής ταχύτητας εξόδου και της ταχύτητας της λεπίδας παράγουν μια απόλυτη ταχύτητα V_2 στην έξοδο του μοτέρ. Έπειτα, ο αέρας περνά μέσα από το στατήρα, όπου αλλάζει μέσω μιας γωνίας και έτσι ο αέρας κατευθύνεται μέσα στο ρότορα του επόμενου σταδίου με ελάχιστη γωνία συχνότητας.

Ο αέρας που εισέρχεται στο ρότορα έχει ένα αξονικό συστατικό στοιχείο με απόλυτη ταχύτητα V_{z1} και ένα εφαπτόμενο στοιχείο $V_{\theta1}$.
Εφαρμόζοντας την εξίσωση της τουρμπίνας Euler

$$H = \frac{1}{g_c} [U_1 V_{\theta1} - U_2 V_{\theta2}] \quad (2-6)$$

Υποθέτοντας ότι οι ταχύτητες της λεπίδας στην είσοδο και στην έξοδο του συμπιεστή είναι ίδιες και τονίζοντας τις σχέσεις

$$V_{\theta1} = V_{z1} \tan \alpha_1 \quad (2-7)$$

$$V_{\theta2} = V_{z2} \tan \alpha_3 \quad (2-8)$$

Η εξίσωση 2-1 μπορεί να γραφτεί ως

$$H = \frac{U_1}{g_c} (V_{z1} \tan \alpha_2 - V_{z2} \tan \alpha_3) \quad (2-9)$$

Θεωρώντας ότι το αξονικό στοιχείο (V_z) παραμένει ίδιο,

$$H = \frac{UV_z}{g_c} (\tan \alpha_1 - \tan \alpha_3) \quad (2-10)$$

Η προηγούμενη σχέση είναι σε σχέση με τις απόλυτες ταχύτητες εισόδου και εξόδου. Ξαναγράφοντας την προηγούμενη εξίσωση σε σχέση με τις γωνίες της λεπίδας ή των σχετικών γωνιών αέρα, αποκτάται η επόμενη σχέση

$$U_1 - U_2 = V_{z1} \varepsilon_{\text{φαπτ.}\alpha_1} = V_{z1} \varepsilon_{\text{φαπτ.}\alpha_2} = V_{z2} \varepsilon_{\text{φαπτ.}\alpha_3} + V_{z2} \varepsilon_{\text{φαπτ.}\alpha_4}$$

Επομένως:

$$U_1 - U_2 = V_{z1} \tan \alpha_1 = V_{z1} \tan \alpha_2 = V_{z2} \tan \alpha_3 + V_{z2} \tan \alpha_4$$

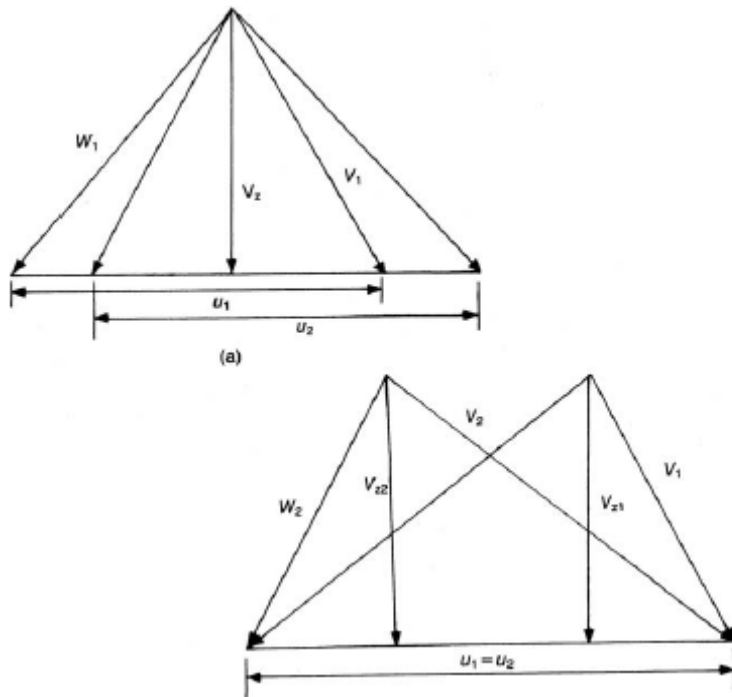
$$H = \frac{UV_z}{g_c} (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_4) \quad (2-11)$$

Η προηγούμενη σχέση μπορεί να γραφτεί ξανά για να υπολογιστεί η αύξηση της πίεσης στο στάδιο

$$c_p T_{in} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] = \frac{UV_2}{g_c} (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_4) \quad (2-12)$$

Η οποία μπορεί να ξαναγραφτεί ως

$$\frac{P_2}{P_1} = \left\{ \frac{UV_z}{g_c c_p T_{in}} [\tan \alpha_2 - \tan \alpha_4] + 1 \right\}^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2-13)$$



Εικόνα 2-12: Τρίγωνα ταχυτήτων

Τα τρίγωνα της ταχύτητας μπορούν να συνδυαστούν με διαφορετικούς τρόπους ώστε να βοηθήσουν στην απεικόνιση των αλλαγών της ταχύτητας. Μία μέθοδος είναι απλά να συνδυαστούν σε σειρά. Τα δυο τρίγωνα μπορούν επίσης να συνδυαστούν και να τεθούν επάνω το ένα στο άλλο χρησιμοποιώντας τις πλευρές που σχηματίζονται είτε από την αξονική ταχύτητα, η οποία θεωρείται ότι παραμένει σταθερή (εικόνα 2-12^α), είτε από την ταχύτητα της λεπίδας ως κοινή πλευρά, θεωρώντας ότι οι ταχύτητες εισόδου και εξόδου της λεπίδας είναι ίδιες (εικόνα 2-12^β).

Βαθμός Αντίδρασης

Ο βαθμός αντίδρασης σε έναν συμπιεστή αξονικής ροής ορίζεται ως το ποσοστό της αλλαγής τουστατικού ύψους στο ρότορα προς το ύψος που παράγεται στα στάδιο

$$R = \frac{H_{rotor}}{H_{stage}} \quad (2-14)$$

Η αλλαγή στα στατικό ύψος του ρότορα ισούται με την αλλαγή στη σχετική κινητική ενέργεια.

$$H_r = \frac{1}{2g_c} (W_1^2 - W_2^2) \quad (2-15)$$

και

$$W_1^2 = V_{z1}^2 + (V_{z1} \tan \alpha_2)^2$$

$$W_2^2 = V_{z2}^2 + (V_{z2} \tan \alpha_4)^2$$

(2-16) (2-17)

Επομένως:

$$R = \frac{V_z \tan^2 \alpha_2 - \tan^2 \alpha_4}{2U \tan \alpha_2 - \tan \alpha_4} \quad (2-18)$$

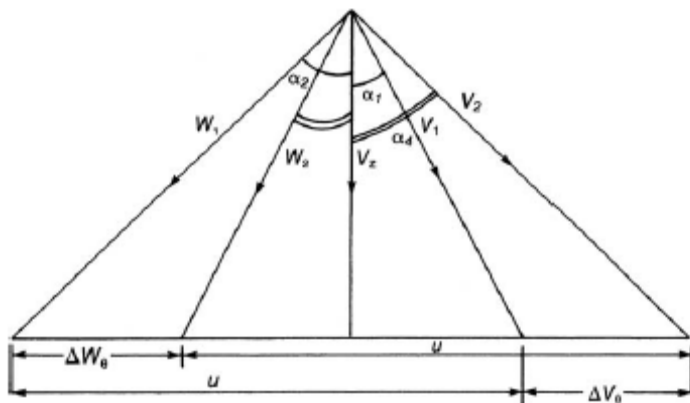
Έτσι, η αντίδραση του σταδίου μπορεί να γραφτεί ως

$$R = \frac{V_z}{2U} (\tan \alpha_2 + \tan \alpha_4)$$

(2-19)

Απλοποιώντας την προηγούμενη εξίσωση

$$R = \frac{V_z}{2U} (\text{εφαπ. } \alpha_2 + \text{εφαπ. } \alpha_4)$$



Εικόνα 2-13: Συμμετρικό τρίγωνο ταχύτητας για στάδιο 50%αντίδραση

Στο συμμετρικό στάδιο αξονικής ροής οι λεπίδες και ο προσανατολισμός τους στο ρότορα και στο στάτορα απεικονίζουν η μία την άλλη. Επομένως, σε ένα στάδιο συμμετρικής αξονικής ροής όπου $V_1 = W_2$ και $V_2 = W_1$ όπως φαίνεται στην εικόνα 2-13, το ύψος που διανέμεται στην ταχύτητα όπως δίδεται από την εξίσωση τουρμπίνας Euler μπορεί να εκφραστεί ως

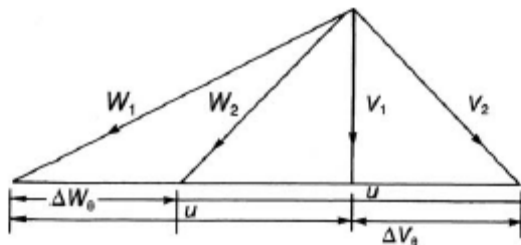
$$H = \frac{1}{2g_c} [(U_1^2 - U_2^2) + (V_1^2 - V_2^2) + (W_2^2 - W_1^2)] \quad (2-20)$$

$$H = \frac{1}{2g_c} (W_2^2 - W_1^2) \quad (2-21)$$

Η αντίδραση σε ένα συμμετρικό στάδιο είναι 50%.

Το στάδιο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως, καθώς μια αύξηση στην αντίθετη πίεση τόσο στις επιφάνειες των λεπίδων του μοτέρ όσο και στις επιφάνειες των στατικών λεπίδων μειώνεται για αύξηση της πίεσης ενός συγκεκριμένου σταδίου. Κατά το σχεδιασμό ενός συμπιεστή με αυτό τον τύπο λεπίδων πριν το πρώτο στάδιο θα πρέπει να υπάρχουν κατευθυντήρια πτερύγια εισόδου για να προκληθεί στροβιλισμός και να δημιουργηθεί η σωστή γωνία της ταχύτητας εισόδου στο ρότορα πρώτου σταδίου. Με ένα συστατικό/εξάρτημα υψηλής επαπτόμενης ταχύτητας που διατηρείται σε κάθε στατική σειρά, το μέγεθος της W_1 μειώνεται. Έτσι, είναι πιθανόν

να προκύψουν υψηλότερες ταχύτητες λεπίδας και εξαρτήματα αξονικής ταχύτητας χωρίς να ξεπεραστεί η οριακή τιμή από 0.70 έως 0.75 για τον αριθμό Mach εισόδου. Μεγαλύτερες ταχύτητες λεπίδας οδηγούν σε συμπιεστές μικρότερης διαμέτρου και μικρότερου βάρους.

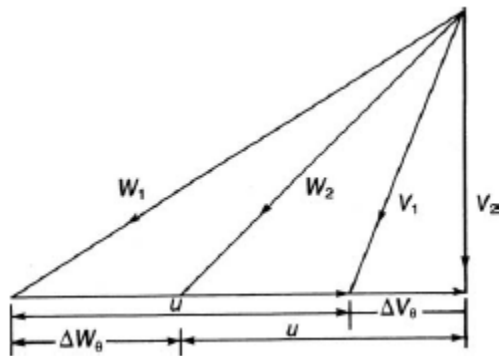


Εικόνα 2-14: Διάγραμμα ταχύτητας σταδίου αξονικής εισόδου

Ένα ακόμη πλεονέκτημα του συμμετρικού σταδίου προέρχεται από την ισότητα των αυξήσεων της στατικής πίεσης στις στατικές και στις κινητές λεπίδες, οδηγώντας στη μέγιστη αύξηση της στατικής πίεσης για το στάδιο. Επομένως, ένα συγκεκριμένο ποσοστό πίεσης μπορεί να επιτευχθεί με το μικρότερο αριθμό σταδίων αποτελώντας παράγοντα ελαφρότητας αυτού του είδους του συμπιεστή. Το σοβαρό μειονέκτημα του συμμετρικού σταδίου είναι η μεγάλη απώλεια εξόδου που προκύπτει από το εξάρτημα υψηλής αξονικής ταχύτητας. Παρ'όλαυτά, τα πλεονεκτήματά του είναι πολύ σημαντικά για τις εφαρμογές αεροσκαφών και γι'αυτό το λόγο χρησιμοποιείται εκεί συνήθως ο συμμετρικός συμπιεστής. Σε στατικές εφαρμογές ο στατικός συμπιεστής δε χρησιμοποιείται κυρίως. Όπου το βάρος και η μετωπική περιοχή είναι μικρότερης σημασίας, ένα άλλο είδος σταδίου χρησιμοποιείται.

Ο όρος ασύμμετρο στάδιο εφαρμόζεται σε στάδια με αντίδραση διαφορετική από 50%. Το στάδιο αξονικής εισροής αποτελεί ειδική περίπτωση ενός ασύμμετρου σταδίου όπου η απόλυτη ταχύτητα που εισέρχεται βρίσκεται στην αξονική κατεύθυνση. Οι κινούμενες λεπίδες μεταδίδουν στροβιλισμό στην ταχύτητα της ροής που φεύγει, ο οποίος με τη σειρά του απομακρύνεται από τον ακόλουθο στατήρα. Όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα του στροβιλισμού και της ταχύτητας στην εικόνα 2-14, το μεγαλύτερο κομμάτι της αύξησης της πίεσης του σταδίου πραγματοποιείται στην κινητή σειρά των λεπίδων με βαθμό αντίδρασης μεταξύ 60% έως 90%. Το στάδιο έχει σχεδιαστεί για συνεχή μεταφορά ενέργειας και αξονικής ταχύτητας σε όλες τις ακτίνες έτσι ώστε η συνθήκη δίνης της ροής διατηρείται στο χώρο μεταξύ των σειρών των λεπίδων. Το πλεονέκτημα ενός σταδίου με αντίδραση πάνω από 50% είναι η μικρή απώλεια εξόδου που προκύπτει από χαμηλότερη αξονική ταχύτητα και τις ταχύτητες των λεπίδων. Εξαιτίας της μικρής αύξησης στη στατική πίεση στις στατικές λεπίδες, μπορούν να παρουσιαστούν συγκεκριμένες απλοποιήσεις όπως στατικές λεπίδες σταθερού τμήματος και η εξάλειψη στεγανοποιήσεων μεταξύ των σταδίων. Σε αυτό το είδος του σταδίου έχει επιτευχθεί υψηλότερη πραγματική αποδοτικότητα απ'ότι στο συμμετρικό στάδιο, κυρίως εξαιτίας της μειωμένης απώλειας εξόδου. Τα μειονεκτήματα προκύπτουν από μια χαμηλή αύξηση της στατικής πίεσης στις στατικές λεπίδες που απαιτεί ένα μεγαλύτερο αριθμό σταδίων για να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη αναλογία πίεσης και να δημιουργηθεί ένας βαρύς συμπιεστής. Οι χαμηλότερες αξονικές ταχύτητες και η ταχύτητα της λεπίδας, απαραίτητες για να διατηρηθεί εντός ορίων ο αριθμός Mach εισόδου, καταλήγουν σε μεγάλες διαμέτρους. Σε στατικές εφαρμογές όπου το αυξημένο βάρος και η μετωπική

περιοχή δεν έχουν μεγάλη σημασία, αυτό το είδος χρησιμοποιείται συχνά για να προκύψει από μεγαλύτερη απόδοση.



Εικόνα 2-15: Διάγραμμα ταχύτητας σταδίου αξονικής ροής εξόδου

Το διάγραμμα 2-15 του σταδίου της αξονικής ροής εξόδου δείχνει μία άλλη ειδική περίπτωση ασύμμετρου σταδίου με αντίδραση πάνω από 50%. Με αυτό το είδος σχεδιασμού η απόλυτη ταχύτητα εξόδου βρίσκεται στην αξονική κατεύθυνση και όλη η αύξηση της στατικής πίεσης λαμβάνει χώρα στο μοτέρ. Μείωση της στατικής πίεσης συμβαίνει στο στατήρα έτσι ώστε ο βαθμός αντίδρασης βρίσκεται στο υπερβολικό 100%. Τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους του σταδίου είναι η χαμηλή αξονική ταχύτητα και οι ταχύτητες της λεπίδας που οδηγούν στην χαμηλότερη πιθανή απώλεια εξόδου. Αυτός ο σχεδιασμός δημιουργεί μια βαριά μηχανή πολλών σταδίων και με μεγάλη διάμετρο. Οι υπερβολικά χαμηλές τιμές θα πρέπει να είναι αποδεκτές για την ταχύτητα της λεπίδας και της αξονικής ταχύτητας προκειμένου να διατηρηθούν μεταξύ των ορίων του αριθμού Mach εισόδου. Το στάδιο της αξονικής ροής εξόδου είναι ικανό να πετύχει την υψηλότερη δυνατή αποδοτικότητα εξαιτίας της απίστευτα μικρής απώλειας εξόδου και των ευεργετικών επιδράσεων του σχεδιασμού για ροή ελεύθερης δίνης. Αυτό το είδος συμπιεστή ταιριάζει πολύ καλά σε μηχανήματα κλειστού κυκλώματος όπου εισάγονται μικρότερες ποσότητες αέρα στο συμπιεστή με υψηλή στατική πίεση. Αν και είναι δυνατή και η αντίδραση μικρότερη από 50%, ένας τέτοιος σχεδιασμός οδηγεί σε μεγάλους αριθμούς Mach εισόδου στη σειρά του στατήρα προκαλώντας μεγάλες απώλειες. Η μέγιστη απόλυτη απόκλιση των στατόρων θα πρέπει να περιοριστεί γύρω στις 20° για να αποφευχθεί η υπερβολική αναταραχή. Συνδυάζοντας την υψηλή είσοδο για τις περιορισμένες γωνίες απόκλισης παράγεται ένας μακρύς στάτορας και κατά συνέπεια ένας μακρύτερος συμπιεστής.

Ακτινική ισορροπία

Η ροή σε έναν συμπιεστή αξονική ροής προσδιορίζεται από τη συνέχεια, την ορμή και τις εξισώσεις ενέργειας. Μια πλήρης λύση σε αυτές τις εξισώσεις δεν είναι δυνατή λόγω της πολυπλοκότητας της ροής σε έναν συμπιεστή αξονικής ροής. Έχει γίνει αξιοσημείωτη δουλειά στις επιδράσεις της ακτινικής ροής σε ένα τέτοιο συμπιεστή. Η πρώτη απλοποίηση που χρησιμοποιείται θεωρεί τη ροή αξονοσυμμετρική. Η απλοποίηση αυτή υποδηλώνει ότι η ροή σε κάθε ακτινικό και αξονικό σταθμό μέσα στη σειρά των λεπίδων αντιπροσωπεύεται από μια μέση περιφερειακή συνθήκη. Μία άλλη απλοποίηση θεωρεί το ακτινικό εξάρτημα της ταχύτητας ως πολύ μικρότερο από το αξονικό εξάρτημα της ταχύτητας και επομένως μπορεί να αγνοηθεί. Για το συμπιεστή χαμηλής πίεσης με αναλογία χαμηλής πλευράς (aspect), όπου η

επίδραση κυρτότητας της γραμμής ρεύματος είναι άνευ σημασίας, η αλλαγή της απλής ακτινικής ισορροπίας του εξαρτήματος/συστατικού ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος της αξονικής κατεύθυνσης είναι μηδενική ($\partial V_{rad} / \partial z = 0$) και η αλλαγή της εντροπίας στην ακτινική κατεύθυνση είναι μηδενική ($a s / \partial r = 0$). Η μεσημβρινή ταχύτητα (V_m) ισούται με την αξονική ταχύτητα (V_z), καθώς η επίδραση της κυρτότητας της γραμμής ρεύματος είναι άνευ σημασίας. Η ακτινική κλίση της στατικής πίεσης δίδεται από:

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \frac{V_\theta^2}{r} \quad (2-22)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση απλής ακτινικής ισορροπίας, είναι δυνατός ο υπολογισμός της κατανομής της αξονικής ταχύτητας. Η ακρίβεια των τεχνικών εξαρτάται από το πόσο γραμμική είναι με την ακτίνα. Η υπόθεση αυτή θεωρείται έγκυρη για συμπιεστές χαμηλής απόδοσης, αλλά δεν ισχύει το ίδιο για τα μεγάλα φορτίου στάδια με αναλογίες υψηλής πλευράς (aspect) όπου οι επιδράσεις της κυρτότητας της γραμμής του ρεύματος είναι σημαντικές. Η ακτινική επιτάχυνση της μεσημβρινής ταχύτητας και η κλίση της πίεσης στην ακτινική κατεύθυνση θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η ακτινική κλίση της στατικής πίεσης για τη γραμμή ρεύματος με μεγάλη κυρτότητα μπορεί να γραφτεί ως

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \left(\frac{V_\theta^2}{r} \pm \frac{V_m^2 \cos \epsilon}{r_c} \right) \quad (2-23)$$

Όπου ϵ είναι η γωνία της κυρτότητας της γραμμής ρεύματος σε σχέση με την αξονική κατεύθυνση και r_c είναι η ακτίνα της κυρτότητας.

Για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η ακτίνα κυρτότητας και η κλίση της γραμμής ρεύματος θα πρέπει να είναι γνωστή η διάταξη της γραμμής ρεύματος διαμέσου της σειράς της λεπίδας. Η διάταξη της γραμμής ρεύματος αποτελεί συνάρτηση της περιοχής διόδου, της κατανομής καμπυλότητας και πυκνότητας της λεπίδας και των γωνιών ροής στην είσοδο και στην έξοδο της λεπίδας. Καθώς δεν υπάρχει ένας απλός τρόπος για να υπολογιστούν οι επιδράσεις όλων των παραμέτρων, χρησιμοποιούνται εμπειρικές τεχνικές για να αξιολογηθούν αυτές οι ακτινικές επιταχύνσεις. Χρησιμοποιώντας επαναληπτικές λύσεις μπορεί να προκύψει μια σχέση. Η επίδραση της υψηλής ακτινικής επιτάχυνσης με αναλογίες υψηλής πλευράς (aspect) μπορούν να αναιρεθεί λεπταίνοντας την κορυφή του εσωτερικού του συμπιεστή έτσι ώστε να μειωθεί η καμπυλότητα του περιβλήματος.

Παράγοντας διάχυσης

Ο παράγοντας διάχυσης που ορίστηκε πρώτη φορά από τον Lieblien αποτελεί κριτήριο φορτίου (loading) της λεπίδας.

$$D = \left(1 - \frac{W_2}{W_1} \right) + \frac{V_{\theta 1} - V_{\theta 2}}{2\sigma W_1} \quad (2-24)$$

Ο παράγοντας διάχυσης θα πρέπει να είναι μικρότερος από 0.4 για την άκρη του ρότορα και μικρότερος από 0.6 για το περίβλημα του ρότορα και το στατήρα. Η κατανομή του παράγοντα διάχυσης κατά μήκος του συμπιεστή δεν ορίζεται σωστά. Παρ'όλα αυτά, υπάρχει μικρή αποδοτικότητα στα τελευταία στάδια λόγω των

παραμορφώσεων στις κατανομές ακτινικής ταχύτητας στις σειρές λεπίδων. Τα αποτελέσματα πειραμάτων υποδεικνύουν ότι αν και υπάρχει μικρή αποδοτικότητα στα τελευταία στάδια, εφόσον δεν ξεπερνιούνται τα όρια φόρτωσης της διάχυσης, η αποδοτικότητα του σταδίου παραμένει υψηλή.

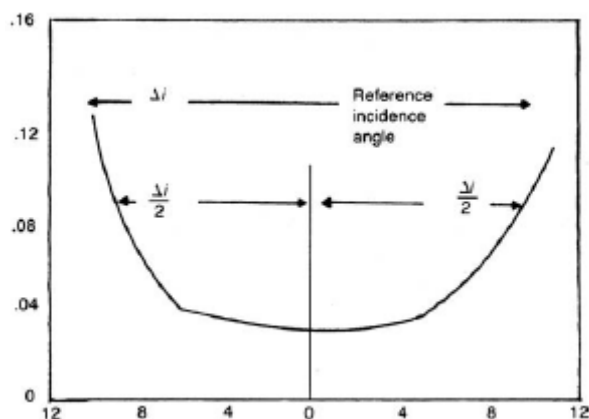
Ο κανόνας πρόσπτωσης

Για το σχεδιασμό αεροτομής χαμηλής ταχύτητας, το τμήμα της λειτουργίας με μικρή απώλεια είναι γενικώς επίπεδο και επίσης είναι δύσκολο να καθιερωθεί η ακριβής τιμή της γωνίας πρόσπτωσης που ανταποκρίνεται στην ελάχιστη απώλεια, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-16. Εφόσον οι καμπύλες είναι γενικά συμμετρικές, η περιοχή με ελάχιστη απώλεια τοποθετείται στη μέση του πεδίου μικρής απώλειας. Το πεδίο ορίζεται ως αλλαγή στη γωνία πρόσπτωσης που αντιστοιχεί σε αύξηση του συντελεστή απώλειας που ισούται με την ελάχιστη τιμή. Η ακόλουθη μέθοδος υπολογισμού της γωνίας πρόσπτωσης εφαρμόζεται στις κυρτές αεροτομές. Η γωνία πρόσπτωσης αποτελεί λειτουργία της κυρτότητας της λεπίδας που με τη σειρά της αποτελεί έμμεση λειτουργία της γωνίας αλλαγής του αέρα.

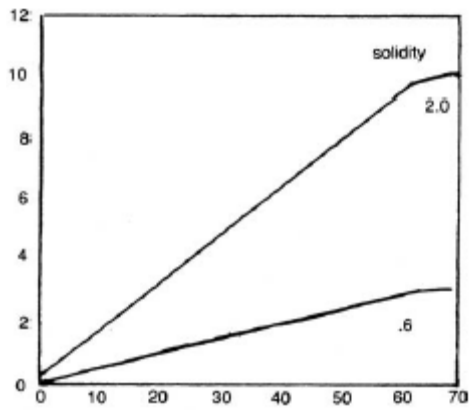
$$i = ki_0 + m\xi + \delta_m \quad (2-25)$$

όπου i_0 είναι η γωνία πρόσπτωσης για μηδενική κυρτότητα και m είναι η βραδεία μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης με τη γωνία αλλαγής του αέρα (ξ). Η γωνία πρόσπτωσης μηδενικής κυρτότητας ορίζεται ως μια λειτουργία της γωνίας εισόδου του αέρα εισόδου και της στερεότητας, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-17 και η τιμή της m δίδεται ως λειτουργία της γωνίας εισόδου του αέρα και της στερεότητας, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-18.

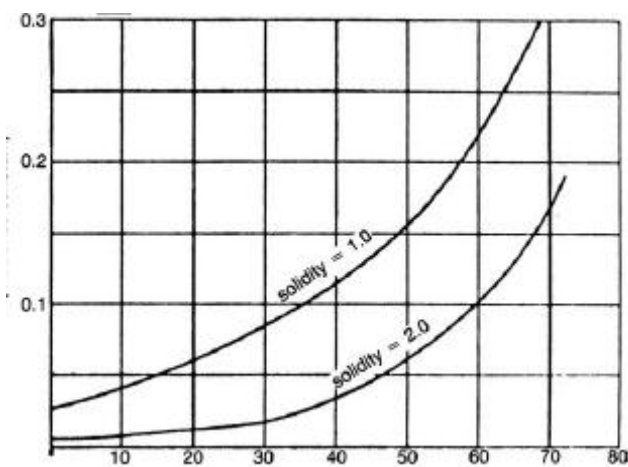
Η γωνία πρόσπτωσης i_0 ισχύει για πυκνότητα λεπίδας 10%, ενώ για λεπίδες πυκνότητας διαφορετική από 10% χρησιμοποιείται ένας παράγοντας διόρθωσης που φαίνεται στην εικόνα 2-19. Τώρα η γωνία πρόσπτωσης θα πρέπει να διορθωθεί για την επίδραση του αριθμού Mach (δ_m). Η επίδραση του αριθμού Mach στη γωνία πρόσπτωσης φαίνεται στην εικόνα 2-20. Η γωνία πρόσπτωσης δεν επηρεάζεται μέχρι να προκύψει το 0.7 στον αριθμό Mach.



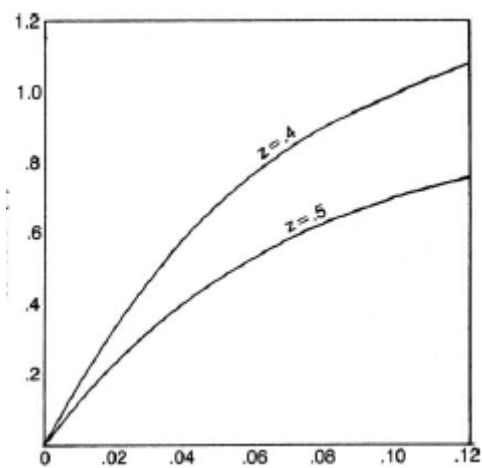
Εικόνα 2-16: Απώλεια σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης



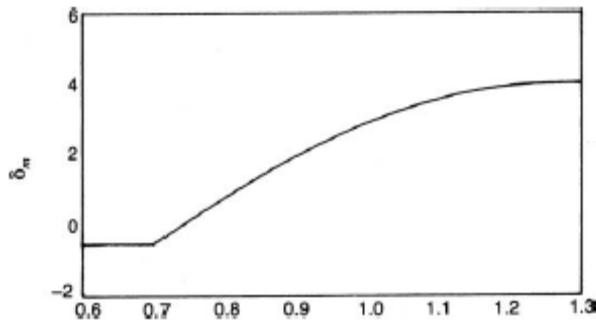
Εικόνα 2-17: Γωνία πρόσπτωσης για μηδενικής κυρτότητας αεροτομή



Εικόνα 2-18: Κλίση της γωνίας πρόσπτωσης με γωνία αέρα



Εικόνα 2-19: Συντελεστής διόρθωσης για πάχος λεπίδας και υπολογισμός γωνίας πρόσπτωσης



Εικόνα 2-20: Διόρθωση αριθμού Mach για τη γωνία πρόσπτωσης

Η γωνία πρόσπτωσης έχει τώρα οριστεί πλήρως. Έτσι, όταν οι γωνίες εισόδου και εξόδου του αέρα και ο αριθμός Mach εισόδου είναι γνωστοί, η γωνία της λεπίδας εισόδου μπορεί με αυτό τον τρόπο να υπολογιστεί.

Κανόνας απόκλισης

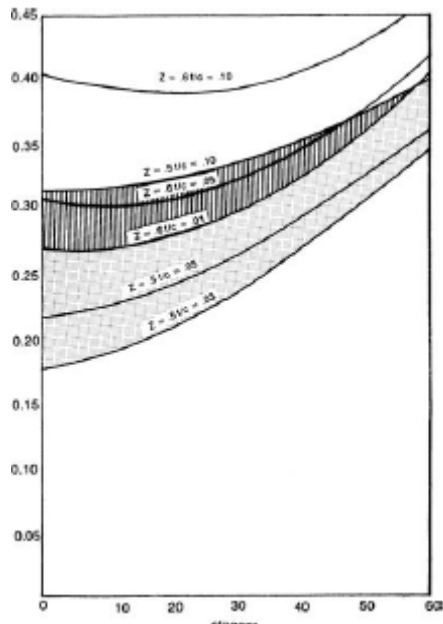
Ο κανόνας του Carter ο οποίος δείχνει ότι η γωνία απόκλισης είναι απευθείας μια λειτουργία της γωνίας κυρτότητας και είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τη στερεότητα

($\delta = m_f \theta \sqrt{1/\sigma}$) έχει τροποποιηθεί για να συμπεριλάβει και την επίδραση εναλλαγής (stagger), στερεότητας, αριθμού Mach και του σχήματος της λεπίδας όπως δείχνει η παρακάτω σχέση:

$$\delta_f = m_f \theta \sqrt{1/\sigma} + 12.15t/c(1 - \theta/8.0) + 3.33(M_1 - 0.75) \quad (2-26)$$

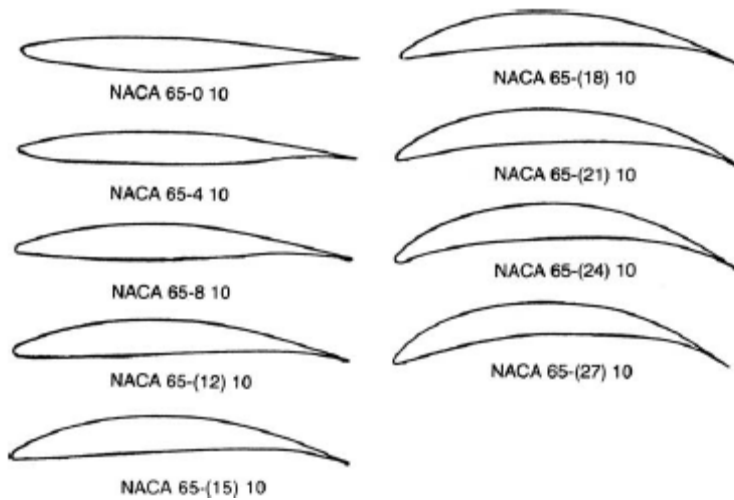
όπου m_f είναι μία λειτουργία της γωνίας εναλλαγής, της μέγιστης πυκνότητας και της θέσης της μέγιστης πυκνότητας, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-21. Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για γωνίες κυρτότητας $0 < \theta > 8$. Ο τρίτος όρος θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο όταν ο αριθμός Mach βρίσκεται ανάμεσα σε $0.75 < M > 1.3$.

Η χρήση των δεδομένων της NACA για τον υπολογισμό της γωνίας εξόδου του αέρα είναι επίσης ευρεία. Η εικόνα 2-22 δείχνει τη σειρά 65 της NACA για αεροτομές. Η σειρά 65 των λεπίδων καθορίζεται από μια σημειογραφία αεροτομής παρόμοια με 65-(18)10. Αυτός ο προσδιορισμός αποκαλύπτει ότι μία αεροτομή έχει ως σχήμα προφίλ 65 με γραμμή κυρτότητας που αντιστοιχεί σε ένα συντελεστή ζωής (C_L) = 1.8 και πυκνότητα κατά προσέγγιση 10% του μήκους της χορδής.

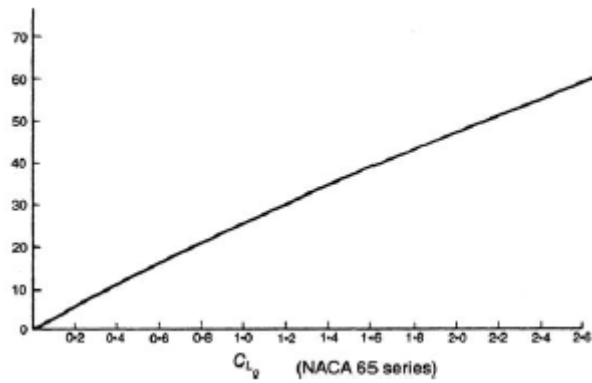


Εικόνα 2-21: Θέση της επίδρασης του μέγιστου πάχους στην απόκλιση

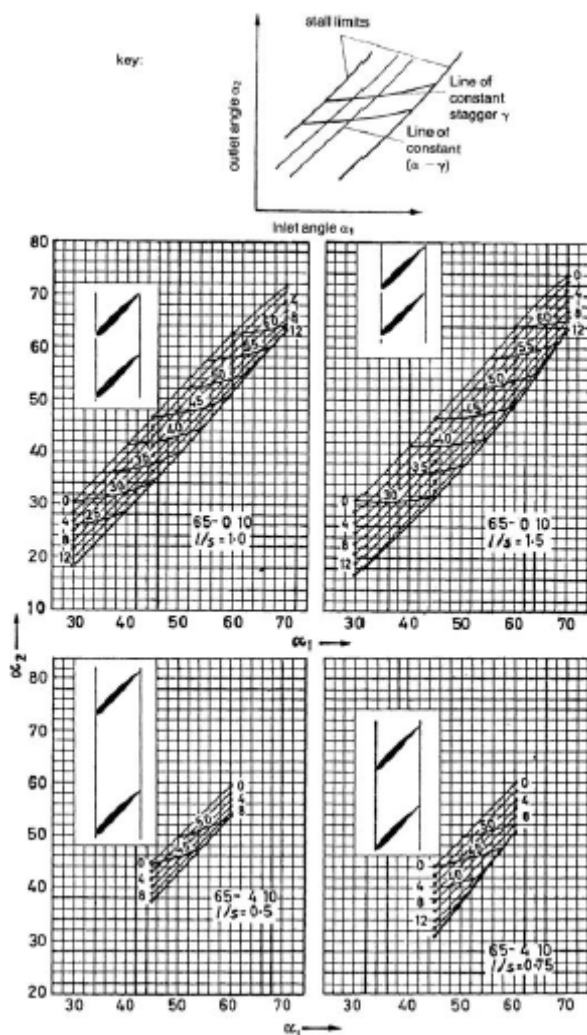
Η σχέση μεταξύ της γωνίας κυρτότητας και του συντελεστή ανύψωσης για τη σειρά 65 των λεπίδων φαίνεται στην εικόνα 2-23.



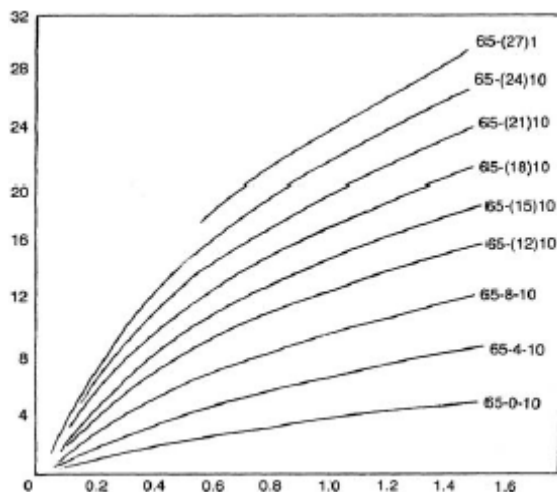
Εικόνα 2-22: Σειρές NACA 65 αεροτομών



Εικόνα 2-23: Σχέση μεταξύ γωνίας κυρτότητας (θ) και CL_0 της σειράς 65 της NACA



Εικόνα 2-24: Τα δεδομένα της σειράς 65 της NACA



Εικόνα 2-25: Σχεδιασμός γωνιών προσβολής για NACA 65

Αν και αυτός ο ορισμός μπορεί αρχικά να φαίνεται αυθαίρετος, τα τμήματα αυτών των σημείων σχεδιασμού ενάντια στη σταθερότητα και στην καμπυλότητα δίνουν σταθερές καμπύλες. Αυτά τα σημεία αναπαριστώνται στην εικόνα 2-25, παρουσιάζοντας τη γωνία επίθεσης ($\alpha_1 - \gamma$) σχεδιασμένη ενάντια στην αναλογία χώρου-χορδής και την καμπυλότητα να είναι ανεξάρτητη της προπορείας

Χαρακτηριστικά λειτουργίας του συμπιεστή

Ένας συμπιεστής λειτουργεί πάνω σε ένα μεγάλο πεδίο ροής και ταχύτητας διανέμοντας μία σταθερή αναλογία ύψους-πίεσης. Κατά τη διάρκεια του ξεκινήματος, ο συμπιεστής θα πρέπει να είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να λειτουργεί σε μια σταθερή κατάσταση χαμηλών ταχυτήτων περιστροφής. Υπάρχει ένα ασταθές όριο λειτουργίας γνωστό ως 'κύμα' και φαίνεται στο χάρτη απόδοσης ως γραμμή κύματος. Το σημείο κύματος σε ένα συμπιεστή προκαλείται όταν η οπίσθια πίεση του συμπιεστή είναι υψηλή και ο συμπιεστής δεν μπορεί να αντλήσει ενάντια σε αυτό το μεγάλο ύψος, ωθώντας τη ροή να διαχωριστεί και να αντιστρέψει την πορεία της. Το κύμα είναι η αντιστροφή της ροής και αποτελεί την πλήρη κατάρρευση της συνεχούς σταθερής ροής κατά μήκος του συμπιεστή. Αυτό προκαλεί μηχανική βλάβη στο συμπιεστή εξαιτίας των μεγάλων διακυμάνσεων της ροής, γεγονός το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της κατεύθυνσης των δυνάμεων ώθησης στο μοτέρ αλλά και την πρόκληση ζημιών στις λεπίδες και στα ρουλεμάν ώθησης. Το φαινόμενο του κύματος δε θα πρέπει να συγχέεται με το στάδιο μπλοκαρίσματος του συμπιεστή. Το μπλοκάρισμα είναι η απομάκρυνση της ροής από την πλευρά αναρρόφησης της λεπίδας της αεροτομής, προκαλώντας έτσι ένα αεροδυναμικό μπλοκάρισμα. Ένας συμπιεστής πολλαπλών σταδίων μπορεί να λειτουργήσει σταθερά σε μία περιοχή χωρίς κύμα με ένα ή περισσότερα στάδια μπλοκαρισμένα ενώ τα υπόλοιπα δεν είναι μπλοκαρισμένα.

Κύμα συμπιεστή

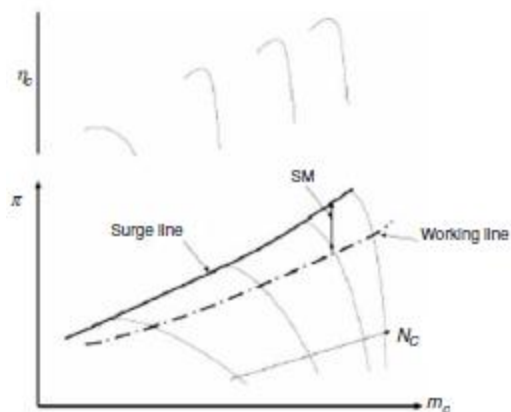
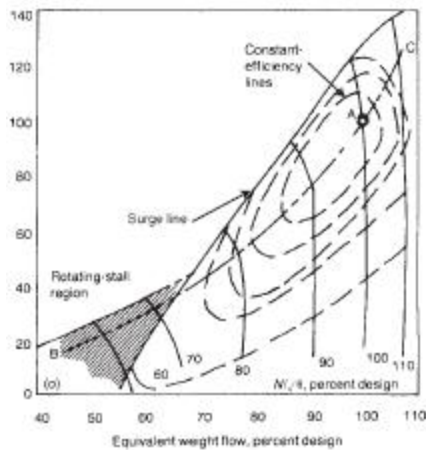
Το κύμα του συμπιεστή είναι ένα φαινόμενο με ιδιαίτερο ενδιαφέρον αν και ακόμα δεν είναι πλήρως κατανοητό. Είναι μια μορφή ασταθούς λειτουργίας και γι'αυτό θα πρέπει να αποφεύγεται. Δυστυχώς, όμως, συμβαίνει συχνά να έχει ορισμένες φορές καταστροφικά αποτελέσματα. Το κύμα παραδοσιακά ορίζεται ως το χαμηλότερο όριο σταθερής λειτουργίας ενός συμπιεστή και περιλαμβάνει αντιστροφή της ροής. Αυτή η

αντιστροφή της ροής πραγματοποιείται λόγω κάποιας αεροδυναμικής αστάθειας μέσα στο σύστημα. Συνήθως ένα τμήμα του συμπιεστή είναι η αιτία της αεροδυναμικής αστάθειας, αν και είναι πιθανή η αύξηση της αστάθειας λόγω της οργάνωσης του συστήματος. Οι συμπιεστές συνήθως λειτουργούν σε μία γραμμή εργασίας που είναι διαχωρισμένη από τη γραμμή κύματος με ένα περιθώριο ασφαλείας. Έχει διεξαχθεί εκτενής έρευνα για το κύμα. Η ακριβής πρόβλεψη της ροής σε ένα συμπιεστή στο στάδιο εκτός σχεδιασμού είναι δύσκολη λόγω της χαμηλής ποσοτικής καθολικότητας ή των δυνατοτήτων αεροδυναμικής φόρτωση των διάφορων λεπίδων και των στατόρων αλλά και της ανακριβούς γνώσης της συμπεριφοράς του οριακού στρώματος. Η μείωση του ποσοστού μαζικής ροής, η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του στροφείου ή και οι δύο μαζί, μπορεί να οδηγήσουν το συμπιεστή σε κύμα. Είτε το κύμα προκαλείται από μείωση της ταχύτητας της ροής είτε από την αύξηση των ταχυτήτων περιστροφής, οι λεπίδες ή οι στάτορες μπορεί να μπλοκάρουν. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη λειτουργία υψηλής αποδοτικότητας υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα κύματος. Επίσης, οι αυξήσεις της πλήρους πίεσης πραγματοποιούνται στο τμήμα περιστροφής του συμπιεστή, δηλαδή στις λεπίδες.

Η κλίση της γραμμής της ροής σε συμπιεστές πολλαπλών σταδίων κυμαίνονται από μια απλή παραβολική σχέση έως μία σύνθετη καμπύλη που περιλαμβάνει αρκετά σημεία αλλαγής ή ακόμα και «εγκοπές». Η πολυπλοκότητα του σχήματος της γραμμής του κύματος εξαρτάται από το εάν το στάδιο περιορισμού της ροής αλλάζει με ταχύτητα λειτουργίας από το ένα στάδιο συμπίεσης στο άλλο. Πιο συγκεκριμένα, οι πολύ κοντινοί συνδυασμοί σταδίων συνήθως παρουσιάζουν πολύπλοκες γραμμές κύματος. Στην περίπτωση των συμπιεστών με ποικίλα κατευθυντήρια πτερύγια εισόδου, η γραμμή κύματος έχει την τάση να λυγίζει περισσότερο σε υψηλότερες ροές απ'ότι σε μονάδες που ελέγχονται από την ταχύτητα. Συνήθως το κύμα εκδηλώνεται με εκτενή δόνηση και ευδιάκριτο ήχο αν και υπάρχουν περιπτώσεις όπου έχουν προκληθεί βλάβες ακόμα και αν δεν υπήρχε θόρυβος. Συνήθως η λειτουργία σε κύμα ή συχνά κοντά σε κύμα συνοδεύεται από διάφορες ενδείξεις, όπως αύξηση στα γενικά και στα παλμικά επίπεδα θορύβου, αλλαγές αξονικής θέσης, απελευθέρωση θερμοκρασίας, διαφοροποιημένες διακυμάνσεις πίεσης του συμπιεστή και ενίσχυση της πλάγιας δόνησης. Συχνά με τους συμπιεστές υψηλής πίεσης, η λειτουργία στο αρχόμενο πεδίο κύματος συνοδεύεται από την πρόκληση ενός ασύγχρονου σήματος δόνησης χαμηλής συχνότητας που μπορεί να φτάσει προεξέχουσες ενισχύσεις καθώς επίσης και διέγερση διαφόρων αρμονιών των συχνοτήτων των λεπίδων. Η εκτεταμένη λειτουργία σε κύμα προκαλεί βλάβες σε ρουλεμάν ώθησης και στο στροφέα του άξονα. Επίσης, εντοπίζονται βλάβες στις λεπίδες και στους στατήρες εξαιτίας της κίνησης του άξονα προκαλώντας την επαφή των λεπίδων και των στατήρων. Λόγω των μεγάλων ασταθειών της ροής, προκαλείται σοβαρή αεροδυναμική διέγερση σε μια από τις συχνοτήτες της λεπίδας φυσικής ανταπόκρισης που οδηγεί σε βλάβη στη λεπίδα. Ο χάρτης απόδοσης των συμπιεστών αξονικής ροής παρουσιάζει την μεταβολή του ποσοστού της συνολικής πίεσης κατά μήκος ενός συμπιεστή, ως λειτουργία της διορθωμένης μαζικής ροής σε μια σειρά συνεχών διορθωμένων γραμμών ταχύτητας (N_s). Η αδιαβατική αποδοτικότητα του συμπιεστή αξονικής ροής (η_c) παρουσιάζεται ως «νήσος» στο χάρτη αποδοτικότητας και επίσης, μπορεί να παρουσιαστεί ενάντια στη διορθωμένη μαζική ροή, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-26 για έναν αντιπροσωπευτικό συμπιεστή πολλαπλών σταδίων. Σε μία συγκεκριμένη διορθωμένη γραμμή ταχύτητας, καθώς η διορθωμένη μαζική ροή μειώνεται, το ποσοστό πίεσης αυξάνεται έως ότου να φτάσει μία ορισμένη τιμή στη γραμμή κύματος. Για ένα σημείο λειτουργίας που βρίσκεται στη

γραμμή κύματος ή κοντά σε εκείνη, η συγχρονισμένη ροή στο συμπιεστή έχει την τάση να καταστρέφεται (η ροή γίνεται μη συμμετρική και μπλοκάρεται η περιστροφή) και μπορεί να γίνει επικίνδυνα ασταθής. Επομένως, η γραμμή κύματος είναι μια περιοχή με σημεία ασταθούς λειτουργίας και γι'αυτό θα πρέπει να αποφεύγεται. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η αστάθεια, το περιθώριο κύματος (SM) ορίζεται ως:

$$SM = \frac{(PR_{surge} - PR_{working})}{PR_{working}}$$



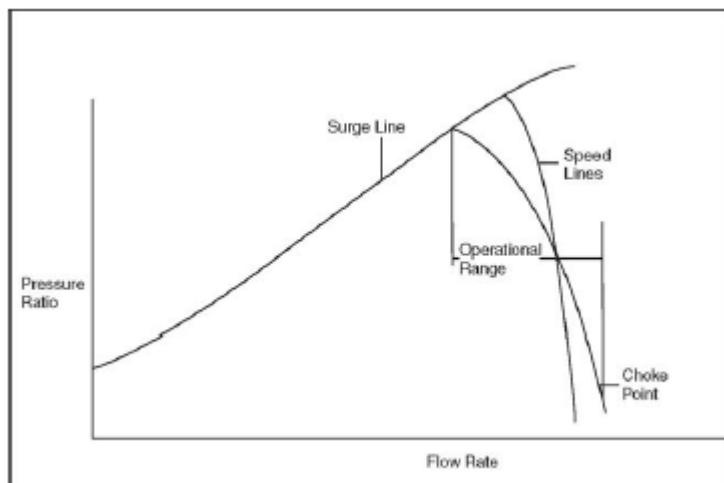
Εικόνα 2-26: Χάρτες πολυβάθμιου αξονικού συμπιεστή

Στην εξίσωση 2-27, το $PR_{surging}$ δηλώνει την αναλογία πίεσης στη γραμμή κύματος/έργου στο ίδιο διορθωμένο ποσοστό μαζικής ροής και έτσι η διορθωμένη ταχύτητα θα ήταν υψηλότερη για τα σημεία λειτουργίας στη γραμμή κύματος. Για τη λειτουργία στη συνεχή διορθωμένη γραμμή ταχύτητας θα ήταν προτιμότερος ένας εναλλακτικός ορισμός για το περιθώριο κύματος σε σχέση με τη διορθωμένη μαζική ροή στη γραμμή έργου και κύματος στην ίδια διορθωμένη ταχύτητα. Για την ομαλή λειτουργία ενός συμπιεστή πολλαπλών σταδίων απαιτείται ένα περιθώριο κύματος. Οι συμπιεστές είναι έτσι σχεδιασμένοι ώστε να λειτουργούν σε μία κατάσταση που αναφέρεται ως σημείο σχεδιασμού. Στο σημείο του σχεδιασμού τα ποικίλα στάδια που τοποθετούνται στον ίδιο άξονα ταιριάζουν αεροδυναμικά, δηλαδή η ροή εισόδου στο κάθε στάδιο είναι τέτοια ώστε το στάδιο βρίσκεται στο σημείο σχεδιασμού γεγονός το οποίο συμβαίνει μόνο για ένα συνδυασμό διορθωμένης ταχύτητας και μαζικής ροής. Ακόμα και αν το σημείο σχεδιασμού είναι ένα στο οποίο ο συμπιεστής θα λειτουργεί τον περισσότερο καιρό, υπάρχουν περιπτώσεις λειτουργίας χαμηλής

ταχύτητας κατά τη διάρκεια του ξεκινήματος των τουρμπίνων αερίου όπου ο συμπιεστής επίσης θα πρέπει να προσφέρει επαρκή αύξηση πίεσης και αποδοτικότητα. Για λειτουργίες συμπιεστών σε μια διορθωμένη ταχύτητα ή στην ίδια ταχύτητα, η διορθωμένη μαζική ροή θα είναι διαφορετική από εκείνες στο σχεδιασμό. Προκύπτουν δυσκολίες λόγω της απαίτησης να ταιριάζει η ροή εισόδου στο ένα στάδιο με τη ροή εξόδου από εκείνες ενάντια στο ρεύμα. Το αποτέλεσμα της μείωσης στη μαζική ροή σε σχέση με τη γραμμή έργου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης και έτσι μια μεγαλύτερη αύξηση στην πυκνότητα στο πρώτο στάδιο παρά τον όποιο σχεδιασμό στο πρώτο στάδιο. Η μεγαλύτερη αύξηση στην πυκνότητα σημαίνει ότι το δεύτερο στάδιο έχει μια ακόμη μικρότερη αξία συντελεστή της ροής απ'ότι στο πρώτο στάδιο με επίσης μεγαλύτερη αύξηση στην πυκνότητα. Το αποτέλεσμα είναι αθροιστικό έτσι ώστε το τελευταίο στάδιο προσεγγίζει το μπλοκάρισμα, ενώ το αρχικό αλλάζει ελάχιστα. Αντίθετα, αυξάνοντας τη μαζική ροή σχετική με τη γραμμή έργου θα είχε ως αποτέλεσμα μια μικρότερη αύξηση πίεσης και επομένως μικρότερη αύξηση στην πυκνότητα. Η μικρότερη αύξηση της πυκνότητας σημαίνει ότι το δεύτερο στάδιο διαθέτει ακόμη μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή ροής απ'ότι το πρώτο στάδιο με ακόμη μικρότερη αύξηση στην πυκνότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι το τελευταίο στάδιο προσεγγίζει το μπλοκάρισμα με αρνητική πρόσπτωση και χαμηλή αποδοτικότητα. Παρομοίως, μπορεί επίσης να αποδειχτεί ότι μειώνοντας την ταχύτητα περιστροφής κατά μήκος της γραμμής έργου στο σημείο σχεδιασμού μπορούν να μπλοκαριστούν τα αρχικά στάδια και να προκληθεί στροβιλισμός στα τελευταία στάδια. Οι μέθοδοι για την αντιμετώπιση των προβλημάτων λόγω χαμηλής πίεσης περιλαμβάνουν τη χρήση του συμπιεστή απαγωγής αέρα στα ενδιάμεσα στάδια, τη χρήση συμπιεστή μεταβλητής γεωμετρίας και τη χρήση συμπιεστών πολλαπλών τυμπάνων ή ο συνδυασμός αυτών.

Πνίξιμο του Συμπιεστή

Το σημείο ασφυξίας του συμπιεστή είναι αυτό όπου η ροή στο συμπιεστή φτάνει το Mach 1 στο «λαιμό» της λεπίδας, ενώ δεν μπορεί να περάσει περισσότερη ροή διαμέσου του συμπιεστή.



Εικόνα 2-27: Χάρτης υψηλής πίεσης πολυβάθμιου αξονικής ροής συμπιεστή

Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό στη βιομηχανία ως «τοιχοποίηση» (**stone walling**). Όσο περισσότερα είναι τα στάδια τόσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία πίεσης και τόσο

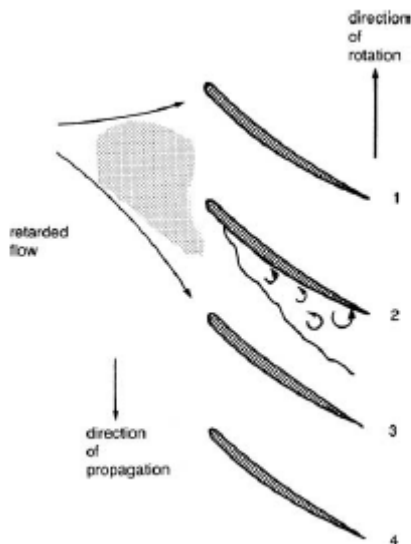
μικρότερο είναι το περιθώριο λειτουργίας μεταξύ των τμημάτων κύματος και ασφυξίας του συμπιεστή, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-27.

Μπλοκάρισμα του Συμπιεστή

Υπάρχουν τρία διαφορετικά φαινόμενα μπλοκαρίσματος. Το μπλοκάρισμα της περιστροφής και το μπλοκάρισμα των λεπίδων είναι αεροδυναμικά φαινόμενα. Η αναταραχή του μπλοκαρίσματος είναι αεροελαστικό φαινόμενο.

Μπλοκάρισμα Λεπίδας

Αυτό το είδος μπλοκαρίσματος συμβαίνει όταν όλες οι λεπίδες γύρω από το δακτύλιο του συμπιεστή μπλοκάρουν ταυτόχρονα χωρίς τη ύπαρξη ενός μηχανισμού πολλαπλασιασμού του μπλοκαρίσματος. Οι συνθήκες υπό τις οποίες δημιουργείται ένα μεμονωμένο μπλοκάρισμα των λεπίδων είναι προς το παρόν άγνωστες. Φαίνεται ότι το μπλοκάρισμα μιας σειράς λεπίδων γενικά εκδηλώνεται ως κάποιο είδος πολλαπλασιαστικό μπλοκάρισμα, ενώ το μεμονωμένο μπλοκάρισμα των λεπίδων αποτελεί εξαίρεση.



Εικόνα 2-28: Διάδοση μπλοκαρίσματος σε λεπίδα

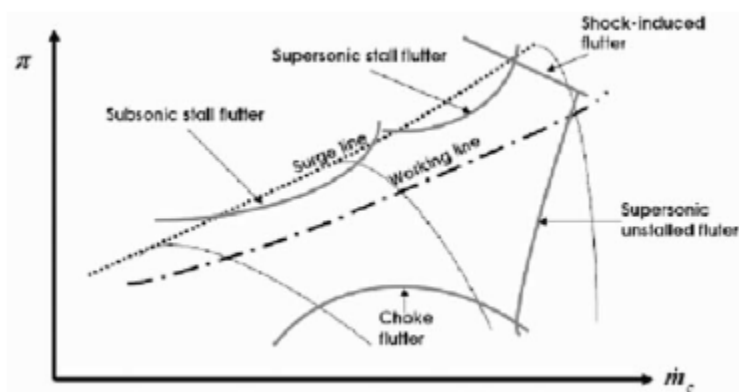
Μπλοκάρισμα περιστροφής

Πρώτη φορά παρατηρήθηκε από τον Whittle και την ομάδα του στα πτερύγια του επαγωγέα ενός φυγόκεντρου συμπιεστή. Το περιστροφικό μπλοκάρισμα αποτελείται από μεγάλες ζώνες μπλοκαρίσματος καλύπτοντας αρκετές διόδους της λεπίδας και πολλαπλασιάζεται προς την κατεύθυνση της περιστροφής και σε κάποιο κλάσμα της ταχύτητας του ρότορα. Ο αριθμός των ζωνών μπλοκαρίσματος και τα ποσοστά πολλαπλασιασμού διαφέρουν σημαντικά. Το περιστροφικό μπλοκάρισμα αποτελεί τον πιο συχνό τύπο μπλοκαρίσματος. Ο μηχανισμός πολλαπλασιασμού μπορεί να περιγραφεί στην εικόνα 2-28. Η αναταραχή της ροής οδηγεί τη λεπίδα 2 σε κατάσταση μπλοκαρίσματος πριν τις άλλες λεπίδες. Αυτή η μπλοκαρισμένη λεπίδα δε δημιουργεί μια επαρκή αύξηση πίεσης για να διατηρήσει τη ροή γύρω της και έτσι αναπτύσσεται ένα αποτελεσματικό μπλοκάρισμα της ροής ή μία ζώνη μειωμένης

ροής. Αυτή η καθυστερημένη ροή μεταβάλλει τη ροή γύρω της και έτσι αυξάνεται η γωνία επίθεσης στη λεπίδα 3 και μειώνεται στη λεπίδα 1. Με αυτό τον τρόπο ένα στοιχείο μπλοκαρίσματος μπορεί να κινηθεί κατά μήκος προς την κατεύθυνση ανύψωσης στη λεπίδα. Το μπλοκάρισμα πολλαπλασιάζεται προς τα κάτω σε σχέση με τη σειρά των λεπίδων σε ποσοστό περίπου με το μισό της ταχύτητας περιστροφής. Η παραλλαγμένη ροή μπλοκάρει τις λεπίδες κάτω από τη ζώνη της καθυστερημένης ροής και ξεμπλοκάρει τις λεπίδες πάνω από αυτή. Η καθυστερημένη ροή ή η ζώνη μπλοκαρίσματος κινείται από την πλευρά της πίεσης προς την πλευρά της αναρρόφησης της κάθε λεπίδας σε αντίθετη κατεύθυνση από την περιστροφή του ρότορα. Η ζώνη μπλοκαρίσματος μπορεί να καλύψει διάφορες διόδους λεπίδας. Η σχετική ταχύτητα πολλαπλασιασμού έχει όπως έχει αποδειχτεί από tests σε συμπίεστρες είναι μικρότερη από την ταχύτητα του ρότορα. Γενικά παρατηρείται ότι οι ζώνες μπλοκαρίσματος κινούνται στην κατεύθυνση της περιστροφής του μοτέρ. Η ακτινική έκταση της ζώνης μπλοκαρίσματος μπορεί να διαφέρει από την κορυφή και από όλη την έκταση της λεπίδας.

Δόνηση μπλοκαρίσματος

Αυτό το αεροελαστικό φαινόμενο προκαλείται από την αυτό-διέγερση της λεπίδας. Είναι διαφορετική από την κλασική αναταραχή, καθώς η κλασική αναταραχή είναι διπλός συστροφικός- κραδασμός και πραγματοποιείται όταν η ταχύτητα εκτός ρεύματος πάνω από ένα περύγιο ή το τμήμα της αεροτομής φτάνει μία συγκεκριμένη κρίσιμη ταχύτητα. Αντίθετα, η αναταραχή μπλοκαρίσματος συμβαίνει λόγω του μπλοκαρίσματος της ροής γύρω από τη λεπίδα.



Εικόνα 2-29: Περιοχές δόνησης σε ένα χάρτη λειτουργίας ενός μεταβατικού συμπίεστή

Το μπλοκάρισμα της λεπίδας διεγείρει τη στροβιλότητα Karman στην αεροτομή. Όταν η συχνότητα της στροβιλότητας συμπίπτει με τη φυσική συχνότητα της αεροτομής, δημιουργείται αναταραχή. Η αναταραχή αυτή του μπλοκαρίσματος είναι η κύρια αιτία της βλάβης της λεπίδας του συμπίεστή. Έχουν εντοπιστεί διάφορα είδη αναταραχής και παρουσιάζονται ως διάφορα όρια αναταραχής στο χάρτη λειτουργίας ενός συμπίεστή μεγάλης ταχύτητας στην εικόνα 1-29. Εκτός από τις m_c και N_c , έχουν

χρησιμοποιηθεί επιπλέον παράμετροι για το σωστό χαρακτηρισμό των ορίων αναταραχής. Ένας τέτοιος παράγοντας είναι η μειωμένη συχνότητα που δίδεται από την αναλογία της χορδής της λεπίδας προς το μήκος κύματος της ασταθούς διακοπής που προκαλείται από την κίνηση της λεπίδας. Συχνά το αντίστροφο της μειωμένης συχνότητας, η μειωμένη ταχύτητα χρησιμοποιείται αντί αυτής. Πιο πρόσφατα παρουσίασε ένα πλαίσιο για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας της αναταραχής, στο οποίο ένα σύνολο τεσσάρων παραμέτρων χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό του ορίου της αναταραχής. Αυτές οι παράμετροι είναι η διορθωμένη

μαζική ροή, η διορθωμένη ταχύτητα, η συμπιεσμένη μειωμένη συχνότητα ($\frac{c\omega_0}{\sqrt{\gamma RT}}$) (όπου η c δηλώνει το μήκος της χορδής της λεπίδας, η ω_0 την λειτουργική συχνότητα, και η συνδυασμένη παράμετρος μαζικής διακοπής. Σε αναλογία με το περιθώριο κύματος, το περιθώριο αναταραχής FM προσδιορίζεται από την παρακάτω εξίσωση 1-28

$$FM = \frac{\mathbf{PRflutter} - \mathbf{PRworking}}{\mathbf{PRworking}} \quad (2-28)$$

Το PRflutter είναι η αναλογία πίεσης στο όριο αναταραχής στην ίδια διορθωμένη μαζική ροή που ανταποκρίνεται σε αυτή σε PRworking στη γραμμή έργου. Για λειτουργία στη συνεχή διορθωμένη γραμμή ταχύτητας θα ήταν προτιμώτερο να οριστεί ένα περιθώριο αναταραχής σε σχέση με τη διορθωμένη μαζική ροή στη γραμμή έργου και στο όριο αναταραχής με την ίδια διορθωμένη ταχύτητα.

Παράμετροι Απόδοσης του Συμπιεστή

Για ένα συμπιεστή αερίου, η λειτουργική εξάρτηση της πίεσης πλήρους στασιμότητας P_{texit} στην έξοδο του συμπιεστή και η αδιαβατικά αποδοτικότητα του συμπιεστή η_c μπορούν να εκφραστούν ως μια συνάρτηση (f) των παρακάτω παραμέτρων

$$(P_{\text{texit}}, \eta_c) = f(m, P_{\text{tin}}, T_{\text{tin}}, N, v, R, \gamma, \text{σχεδιασμό}, D) \quad (2-29)$$

Οι ιδιότητες του αέρα σε σχέση με τη λειτουργία του συμπιεστή χαρακτηρίζονται από το κινηματικό ιξώδες, το λόγο ειδικής αναλογία θερμότητας γ και τη σταθερά του αέρα R . Η γεωμετρική εξάρτηση της μηχανής ορίζεται από το σχέδιο και το χαρακτηριστικό μέγεθος D , όπως τη διάμετρο του άκρου του συμπιεστή. Η ανάλυση των διαστάσεων μειώνει την πολυπλοκότητα της εξίσωσης 2-29 για να αποδοθεί το εξής

$$\frac{P_{texit}}{P_{tin}}, \eta_c = f\left(\frac{\dot{m}\sqrt{RT_{tin}}}{P_{tin}D^2}, \frac{ND}{\sqrt{\gamma RT_{tin}}}, \frac{ND^2}{v}, \gamma\right) \quad (2-30)$$

Για ένα συγκεκριμένο συμπιεστή και για συνθήκες εισόδου για τις οποίες η γ δε διαφέρει, η εξίσωση 2-30 μειώνεται σε

$$\frac{P_{texit}}{P_{tin}}, \eta_c = f\left(\frac{\dot{m}\sqrt{T_{tin}}}{P_{tin}}, \frac{N}{\sqrt{T_{tin}}}, \frac{ND^2}{v}\right) \quad (2-31)$$

Σε αρκετά μεγάλο αριθμό Reynolds ($>3 \times 10^5$), οι αλλαγές αυτού του αριθμού έχουν μικρή επίδραση στην απόδοση του συμπιεστή, έτσι ώστε $\left(\frac{P_{texit}}{P_{tin}}, \eta_c\right)$ μπορούν να συσχετιστούν σύμφωνα με

$$\left(\frac{\dot{m}\sqrt{T_{tin}}}{P_{tin}}, \frac{N}{\sqrt{T_{tin}}}\right) \\ \frac{P_{texit}}{P_{tin}}, \eta_c = f\left(\frac{\dot{m}\sqrt{T_{tin}}}{P_{tin}}, \frac{N}{\sqrt{T_{tin}}}\right) \quad (2-32^a)$$

Εφόσον δεν υπάρχει λειτουργική εξάρτηση, μπορούμε να τις αντικαταστήσουμε με το ποσοστό της διορθωμένης μαζικής ροής $m_c = \left(\frac{m\sqrt{\theta}}{\delta}\right)$ και τη διορθωμένη ταχύτητα N_c

$$\frac{P_{texit}}{P_{tin}}, \eta_c = f\left(\frac{\dot{m}\sqrt{\theta}}{\delta}, \frac{N}{\sqrt{\theta}}\right) = f(m_c, N_c) \quad (2-32b)$$

Στην παραπάνω εξίσωση $\theta = \frac{T_{tin}}{T_{ref}}$ και $\delta = \frac{P_{tin}}{P_{ref}}$ και η αναφορά της θερμοκρασίας T_{ref} και η αναφορά της πίεσης P_{ref} θεωρούνται ως η τιμή επιπέδου της θάλασσας για τη σταθερή ατμόσφαιρα, 59.6° F (15° C) και 14.7 psi (101 kN/m^2) αντίστοιχα. Το πλεονέκτημα της χρήσης αυτών των διορθωμένων μεταβλητών είναι ότι το αριθμητικό τους μέγεθος είναι παρόμοιο με την πραγματική τιμή και γι'αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικά. Μπορούμε, ακόμη, να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση τουρμπίνας του Euler για ένα σταδιο του συμπιεστή:

$$c_p(T_{texit} - T_{tin}) = \omega[(rV_\theta)_2 - (rV_\theta)_1]$$

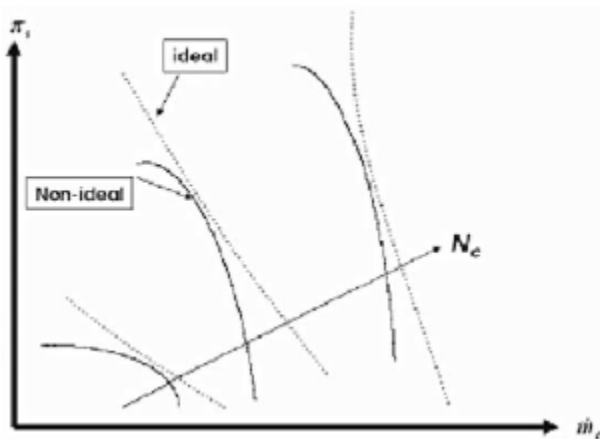
προκειμένου να διασαφηνιστεί η λειτουργική εξάρτηση και για να εξηγηθεί η εμφάνιση των χαρακτηριστικών λειτουργίας στο χάρτη του συμπιεστή. Υποθέτοντας ότι υπάρχει ισεντροπική ροή (δηλαδή καμία απώλεια), τότε η αναλογία στασιμότητας της πίεσης κατά μήκος του (ιδανικού) σταδίου δίδεται από:

$$PR_s = \frac{P_{exit}}{P_{in}} = \left\{ 1 + \left[\frac{(\omega r_2)^2}{c_p T_{in}} \right] \left[1 - \left(\frac{V_{z2}}{\omega r_2} \right) \left(\tan \beta_{exit} + \frac{V_{z1} r_1}{V_{z2} r_2} \tan \alpha_{exit} \right) \right] \right\}^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2-34)$$

Στις εξισώσεις 2-33 και 2-34 οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στις μεταβλητές που έχουν υπολογιστεί στην είσοδο του ρότορα και στην έξοδό του αντίστοιχα, η $V\theta$ δηλώνει την εφαπτόμενη ταχύτητα, η V_z την αξονική ταχύτητα, η ω τη γωνιακή ταχύτητα του ρότορα, η α_{exit} την απόλυτη γωνία ροής στην έξοδο του στάτορα, η β_{exit} τη σχετική γωνία ροής στην έξοδο του μοτέρ και η r την ακτίνα. Εισάγοντας τις διορθωμένες μεταβλητές στην εξίσωση 2-34, έχουμε

$$PR_s = \left[1 + k_0 N_c^2 - k_1 N_c \dot{m}_c G(M_1) (\tan \alpha_{exit} + \tan \beta_{exit}) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

όπου η $G(M_1)$ έχει μια ήπια εξάρτηση στον εισερχόμενο αριθμό Mach M_1 , k_0 , α r_2 και k_1 α r . Για ένα συγκεκριμένο στάδιο του συμπιεστή η (εφαπ. $\alpha_{exit} + \epsilon\phi.$ β_{exit}) είναι σταθερή και αγνοώντας τη διαφορά στο $G(M_1)$, έχουμε $PR_s = PR_s(m_c, N_c)$. Γενικά η εξάρτηση της PR_s στις m_c και N_c φαίνεται στην εικόνα 2-30 ως ένα σύνολο διακεκομμένων γραμμών συνεχούς διορθωμένης ταχύτητας για το ιδανικό στάδιο. Η εξίσωση 2-35 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επικρατήσει αυτή η τάση της διαφοράς του χαρακτηριστικού του ιδανικού σταδίου με τις m_c και N_c . Οι γραμμές της συνεχούς διορθωμένης ταχύτητας στην εικόνα 2-30 είναι οι καμπύλες $PR_s U s m_c$, με τις απώλειες της στατικής πίεσης να έχουν ληφθεί υπόψη. Η γωνία της ροής ποικίλει καθώς αλλάζει το ποσοστό της διορθωμένης μαζικής ροής κατά μήκος μιας συγκεκριμένης διορθωμένης γραμμής ταχύτητας. Το σημείο της ελάχιστης διαφοράς ανάμεσα στη διακεκομμένη (ιδανική) και στη σταθερή/συμπαγή (πραγματική) καμπύλη αντιστοιχεί σε μία διορθωμένη μαζική ροή που αποφέρει μια γωνία πρόσπτωσης για την ελάχιστη απώλεια. Καθώς απομακρυνόμαστε από αυτό το σημείο κατά μήκος μιας σταθερής διορθωμένης γραμμής ταχύτητας που ισούται με την αλλαγμένη γωνία πρόσπτωσης (αυξάνοντας τη γωνία πρόσπτωσης για τη μείωση της m_c ή μειώνοντας τη γωνία πρόσπτωσης για την αύξηση της m_c) προκειμένου να οδηγήσει σε μεγαλύτερες απώλειες.



Εικόνα 2-30: Χάρτης απόδοσης σταδίου συμπιεστή

Αυτό αντικατοπτρίζεται στην αυξανόμενη διαφορά μεταξύ των δύο καμπύλων (ιδανική προς πραγματική) σε διορθωμένη μαζική ροή διαφορετική από εκείνη που αντιστοιχεί στην ελάχιστη απώλεια. Επομένως, από αυτά τα δεδομένα καταλήγουμε στο ότι η πραγματική αύξηση της πίεσης (και η αποδοτικότητα) μπορούν επίσης να χαρακτηριστούν από την άποψη της m_c και της N_c . Η αναλογία πίεσης ενός ολόκληρου συμπιεστή που αποτελείται από πολλά στάδια μπορεί να προκύψει λαμβάνοντας τα προϊόντα της λειτουργίας του σταδίου.

Απώλειες στην απόδοση ενός συμπιεστή αξονικής ροής

Η εκτίμηση της απόδοσης ενός συμπιεστή αξονικής ροής τόσο σε συνθήκες σχεδιασμού όσο και εκτός σχεδιασμού απαιτεί τη γνώση των διαφόρων τύπων απωλειών που συναντώνται σε ένα τέτοιο συμπιεστή. Ο ακριβής υπολογισμός και η σωστή αξιολόγηση των απωλειών σε έναν συμπιεστή αξονικής ροής είναι τόσο σημαντικά όσο ο υπολογισμός της παραμέτρου του φορτίου της λεπίδας, διότι εάν δεν γίνει ο κατάλληλος έλεγχος των παραμέτρων αυτόματα μειώνεται η απόδοση. Η αξιολόγηση των διαφόρων απωλειών είναι συνδυασμός πειραματικών αποτελεσμάτων και θεωρίας. Οι απώλειες διακρίνονται σε δύο ομάδες: 1. Σε αυτές που πραγματοποιούνται στο ρότορα και 2. Σε αυτές που πραγματοποιούνται στο στάτορα. Συνήθως οι απώλειες αυτές εκφράζονται ως απώλειες θερμότητας και ενθαλπία. Ένας βολικός τρόπος έκφρασής τους είναι ένας αδιάστατος τρόπος με αναφορά στην ταχύτητα των λεπίδων. Το διαθέσιμο θεωρητικό απόλυτο ύψος (q_{tot}) ισούται με το διαθέσιμο ύψος από την εξίσωση ενέργειας ($q_{th}=q_{tot}$) συν το ύψος, που είναι η απώλεια από την τριβή του δίσκου.

$$q_{tot} = q_{th} + q_{df} \quad (\text{εξίσωση 2-36})$$

Το αδιαβατικό ύψος που είναι διαθέσιμο στην εκφόρτιση του ρότορα ισούται με τη θεωρητική ύψος μείον τις απώλειες θερμότητας από το σοκ στο ρότορα, την απώλεια πρόσπτωσης, τα φορτία της λεπίδας, τις απώλειες προφίλ, το διάκενο μεταξύ του ρότορα και του περιβλήματος και τις δευτερεύουσες απώλειες που συναντώνται στη δίοδο της ροής.

$$q_{ia} = q_{th} - q_{in} - q_{sh} - q_{bl} - q_c - q_{sf} \quad (\text{εξίσωση 2-37})$$

Επομένως, η αδιαβατική αποδοτικότητα σε ένα στροφέιο είναι

$$\eta_{imp} = \frac{q_{ia}}{q_{tot}} \quad (\text{εξίσωση 2-38})$$

Ο υπολογισμός της γενικής αποδοτικότητας του σταδίου θα πρέπει επίσης να συμπεριλάβει τις απώλειες που πραγματοποιούνται στο στάτορα. Επομένως, το γενικό πραγματικό αδιαβατικό ύψος που επιτυγχάνεται θα ήταν το πραγματικό αδιαβατικό ύψος του στροφείου μείον τις απώλειες ύψους που πραγματοποιούνται στο στάτορα από την αναταραχή που προκαλείται από τη στροφική λεπίδα, την απώλεια του κινητικού ύψους στην έξοδο του στάτορα και την απώλεια του ύψους από τις δυνάμεις τριβής στο στάτορα.

$$q_{oa} = q_{ia} - q_w - q_{ex} - q_{osf} \quad (\text{εξίσωση 2-39})$$

Επομένως, η αδιαβατική αποδοτικότητα στο στάδιο είναι

η_{stage}

$$\eta_{stage} = \frac{q_{tot}}{q_{tot}}$$

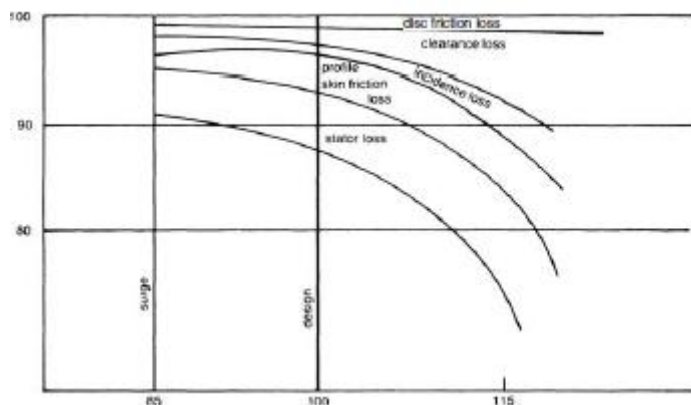
Ακολουθεί μία περαιτέρω περιγραφή των απωλειών που αναφέρθηκαν προηγουμένως:

1. *Απώλεια λόγω τριβής του δίσκου.* Αυτή η απώλεια προέρχεται από την επιφανειακή τριβή στους δίσκους που στεγάζουν τις λεπίδες του συμπιεστή και ποικίλει ανάλογα με το είδος των δίσκων.
2. *Απώλεια πρόσπτωσης.* Αυτή η απώλεια προκαλείται από το γεγονός ότι η γωνία του αέρα και η γωνία της λεπίδας δε συμπίπτουν. Η απώλεια είναι ελάχιστη περίπου μιας γωνίας $\pm 4^\circ$, μετά την οποία η απώλεια μεγαλώνει ραγδαία.
3. *Απώλειες φορτίου και προφίλ της λεπίδας.* Αυτή η απώλεια οφείλεται στις κλίσεις της αρνητικής ταχύτητας στο οριακό στρώμα, που οδηγεί στο διαχωρισμό της ροής.
4. *Απώλεια επιφανειακής τριβής.* Αυτή η απώλεια προκαλείται από την επιφανειακή τριβή στις λεπίδες και στους δακτυλιοειδείς τοίχους.
5. *Απώλεια διακένου.* Η απώλεια αυτή οφείλεται στο διάκενο μεταξύ των άκρων της λεπίδας και του πλαισίου.
6. *Απώλειες αναταραχής.* Αυτή η απώλεια προκαλείται από την αναταραχή στην έξοδο της περιστροφής.
7. *Απώλεια προφίλ του στατήρα και επιφανειακής τριβής.* Η απώλεια αυτή προκαλείται από την επιφανειακή τριβή και τη γωνία επίθεσης της ροής που εισέρχεται στο στατήρα.
8. *Απώλεια εξόδου.* Αυτή η απώλεια οφείλεται στην κεφαλή κινητικής ενέργειας που φεύγει από το στατήρα.

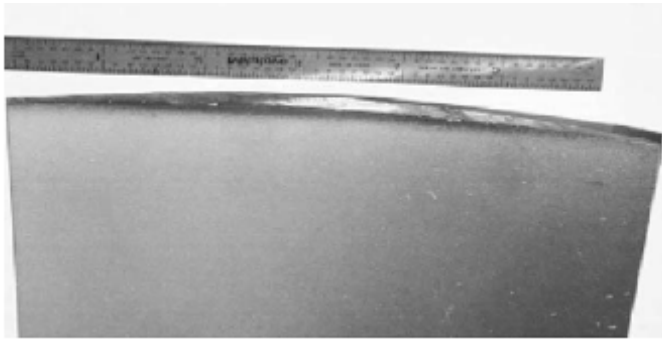
Η εικόνα 2-37 δείχνει τις διάφορες απώλειες ως λειτουργία της ροής. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συμπιεστής είναι πιο αποδοτικός καθώς η ροή πλησιάζει τις συνθήκες κύματος.

Νέες εξελίξεις στους συμπιεστές αξονικής ροής

Οι νέοι εξελιγμένοι ρότορες συμπιεστών διαθέτουν λιγότερες λεπίδες με μεγαλύτερα φορτία, ενώ οι λεπίδες αυτές είναι πιο λεπτές, μεγαλύτερες και έχουν σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας την εξελιγμένη θεωρία ακτινικής ισορροπίας.

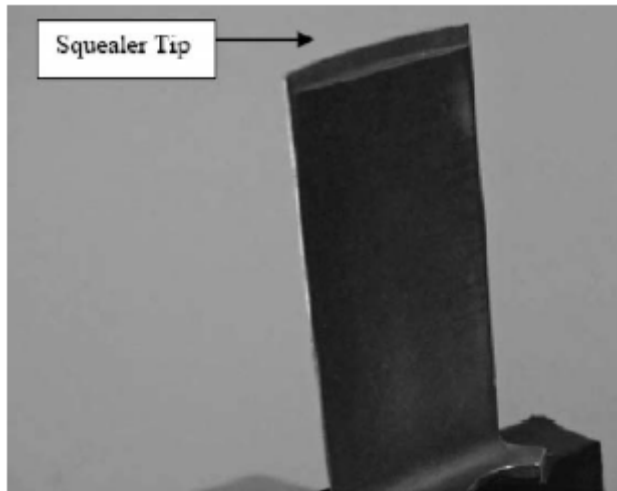


Εικόνα 2-31: Απώλειες σε σταδίου συμπιεστή αξονικής ροής



Εικόνα 2-32: Λεπίδα συμπιεστή

Δημιουργούν αεροτομές τριών διαστάσεων ελεγχόμενης διάχυσης (3D/CDA) με μικρότερα διάκενα και μεγάλο φορτίο ανά στάδιο. Υπάρχουν επίσης τάσεις προς την έκχυση του νερού προς την είσοδο ή μεταξύ των τμημάτων του συμπιεστή που μπορούν να επηρεάσουν τη διάβρωση (**erosion life**) της αεροτομής. Τα μικρότερα διάκενα (20-50 mils) και οι αναλογίες υψηλής πίεσης έχουν την τάση να αυξάνουν την πιθανότητα να δημιουργηθεί τριβή. Η τριβή στο άκρο πραγματοποιείται συνήθως κοντά στα τμήματα της ροής των τουρμπίνων όπου υπάρχουν αλλαγές στην εσωτερική διάμετρο, και το πλαίσιο του συμπιεστή θα μπορούσε να είναι εκτός κύκλου. Η εικόνα 2-32 δείχνει μια τέτοια λεπίδα που υπέστη τριβή στο άκρο της. Οι εξελιγμένες λεπίδες του συμπιεστή συνήθως έχουν τμήματα **squealer** στα άκρα των λεπίδων, που είναι σχεδιασμένα ώστε να δημιουργείται πιο ασφαλής τριβή όταν οι λεπίδες έρχονται σε επαφή με το πλαίσιο. Η εικόνα 2-33 δείχνει μια τέτοια λεπίδα. Η τριβή εάν είναι σοβαρή μπορεί να οδηγήσει σε σπάσιμο/ράγισμα του άκρου αλλά και στην πλήρη διάλυση των κάτω λεπίδων και των πτερυγίων του διαχύτη λόγω της καταστροφής του οικείου αντικειμένου. Η πολύ υψηλή θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή, η οποία σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να ξεπερνά τους 1000 °F, δημιουργεί ένα πολύ ζεστό τμήμα συμπίεσης, το οποίο απαιτεί την ψύξη των ροών πριν χρησιμοποιηθούν για την ψύξη του τμήματος της τουρμπίνας. Χρειάζονται μεγάλες συσκευές ανταλλαγής θερμότητας, καθώς επίσης σε κάποιες μονάδες συνδυασμένου κύκλου χρησιμοποιείται ατμός για την ψύξη του συμπιεσμένου αέρα. Αυτό επίσης περιορίζει τον καθορισμένο χρόνο ανάμεσα στα ξεκινήματα των τουρμπίνων. Τα περιθώρια σχεδιασμού έχουν τεθεί από τη Μοντελοποίηση Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Modelling) στο επίπεδο του στοιχείου, που έχει ως αποτέλεσμα περιθώρια μικρότερης ασφαλείας από τα προηγούμενα σχέδια. Το κόστος αυτών των αεροτομών που είναι μεγαλύτεροι, πιο λεπτοί, λιγότερο ανεκτοί στην τριβή και με πιο γυριστό σχήμα, είναι συνήθως μεγαλύτερο. Κατά την εξέταση των διαφόρων σημαντικών χαρακτηριστικών των εξελιγμένων τουρμπίνων αερίου από άποψη επικινδυνότητας, δηλαδή όσον αφορά στην πιθανότητα σφάλματος και στις επιπτώσεις του, δεν μπορούν να εντοπιστούν χαρακτηριστικά που να μειώνουν τόσο την πιθανότητα όσο και τις επιπτώσεις σφάλματος.



Εικόνα 2-33: Νέας σχεδίασης λεπίδα ρότορα συμπιεστή αξονικής ροής

Ο πίνακας 2-2 δείχνει τις σημαντικότερες αλλαγές στις λεπίδες του συμπιεστή για τις εξελιγμένες τουρμπίνες αερίου. Η πρώτη στήλη αντιπροσωπεύει τα προηγούμενα σχέδια της τουρμπίνας αερίου, η δεύτερη τα καινούργια σχέδια και η τελευταία την αλλαγή του κινδύνου για τις διαφορές αυτές στο σχεδιασμό. Οι περισσότερες συγκρίσεις δε χρειάζονται διευκρίνιση.

Πίνακας 2-2

Κατάσταση των συμπιεστών τεχνολογίας τουρμπίνων αερίου

| Προηγούμενα σχέδια Επικινδυνότητα | | Νέα σχέδια |
|--|--|------------|
| <ul style="list-style-type: none"> Κυκλικό τόξο δύο διαστάσεων ή προφίλ 65 της NACA | Προφίλ αεροτομής τριών διαστάσεων ή ελεγχόμενης διάχυσης | ↑ |
| <ul style="list-style-type: none"> Μεγάλος αριθμός αεροτομών | Μειωμένη μέτρηση αεροτομής | ↑ |
| <ul style="list-style-type: none"> Επαναλαμβανόμενα στάδια/ μικρότερες χορδές | Στάδια με μοναδικές/μεγαλύτερες χορδές | ↑ |
| <ul style="list-style-type: none"> Χαμηλές αναλογίες πλευράς | Υψηλές αναλογίες πλευράς | ↑ |
| <ul style="list-style-type: none"> Μεγάλα διάκενα | Μικρότερα διάκενα | ↑ |
| <ul style="list-style-type: none"> Χαμηλές αναλογίες πίεσης | Πολύ μεγαλύτερες αναλογίες πίεσης | ↑ |
| <ul style="list-style-type: none"> Χαμηλό λεπιδικό φορτίο ανά στάδιο | Υψηλό λεπιδικό φορτίο ανά στάδιο | ↑ |
| <ul style="list-style-type: none"> Μεγαλύτερο περιθώριο λειτουργίας | Στενότερο περιθώριο λειτουργίας | ↑ |
| <ul style="list-style-type: none"> Πυκνότερα αρχικά άκρα | Πιο λεπτά αρχικά άκρα | ↑ |
| <ul style="list-style-type: none"> Στεγνή λειτουργία | Υγρή λειτουργία | ↑ |
| <ul style="list-style-type: none"> Περιθώρια ασφαλείας όγκου(bulk) | Περιθώρια λειτουργίας από FEM | ↑ |
| <ul style="list-style-type: none"> Χαμηλότερο κόστος | Υψηλότερο κόστος | ↑ |

Έρευνα για το συμπιεστή αξονικής ροής

Πραγματοποιείται πολύ σημαντική έρευνα για να βελτιωθεί η απόδοση των συμπιεστών αξονικής ροής. Η έρευνα αφορά σε διάφορες πλευρές του συμπιεστή:

1. Σχετικά με τις επιδράσεις της αναλογίας της πλευράς στο φορτίο της λεπίδας, στη διέγερση της λεπίδας και στις γωνίες προσυστροφής της λεπίδας (φυγόκεντρες δυνάμεις στη λεπίδα). Η αύξηση στο φορτίο της λεπίδας έχει

πραγματοποιηθεί αυξάνοντας την αναλογία πλευράς της λεπίδας, ενώ οι αναλογίες αυτές έχουν φτάσει στο 9. Με αυτές τις αναλογίες, οι λεπίδες θα έπρεπε να σχεδιαστούν με περιβλήματα μισού πλάτους και καλύμματα στα άκρα τους. Το γεγονός αυτό μειώνει την αποδοτικότητα του σταδίου, αν και χωρίς τα καλύμματα η γωνία προσυστροφής της λεπίδας θα έπρεπε να αυξηθεί γύρω στις 12° και η διέγερση της λεπίδας θα καταλήξει σε σφάλμα. Τώρα τα περισσότερα σχέδια λεπίδας έχουν περιοριστεί σε αναλογία πλευράς ίση με 4.

2. Σχετικά με την αύξηση του πεδίου λειτουργίας (κύμα-‘πνίξιμο’) με μια συγκεκριμένη ταχύτητα του συμπιεστή αναπτύσσοντας καινούργια προφίλ λεπίδας προκειμένου να μειωθεί το μπλοκάρισμα των λεπίδων στο συμπιεστή.

Τεστ Σταδίων

Τα δεδομένα για τις λεπίδες σε ένα συμπιεστή αξονικής ροής προέρχονται από διάφορα είδη σταδίων, καθώς οι θεωρητικές λύσεις είναι πολύπλοκες και η εγκυρότητά τους τίθεται προς αμφισβήτηση λόγω των πολλών υποθέσεων που απαιτούνται για να λυθούν οι εξισώσεις. Ο εκτενέστερος και πιο συστηματικό έλεγχος έχει διεξαχθεί από τη NACA στο Ερευνητικό Κέντρο Lewis. Ο έλεγχος διεξήχθη με μικρούς αριθμούς Mach και σε χαμηλά επίπεδα στροβιλισμού. Οι επιδράσεις στα άκρα μελετήθηκαν σε ένα ειδικά σχεδιασμένο τούνελ νερού σταδίων με σχετική κίνηση ανάμεσα στα τοιχώματα και στις λεπίδες. Τα τεστ είναι χρήσιμα για τον προσδιορισμό όλων των πλευρών της δευτερεύουσας ροής. Για να απεικονιστούν καλύτερα αυτά τα τεστ έχουν γίνει σε νερό. Τα μοτίβα της ροής μελετώνται εισάγοντας σταγονίδια φθαλικού διβουτυλεστέρα και κηροζίνης σε ένα μείγμα ίσο με την πυκνότητα του νερού. Αυτό το μείγμα είναι χρήσιμο για την ανίχνευση της δευτερεύουσας ροής καθώς δεν πήζει. Ένα στροφείο που έχει σχεδιαστεί για αέρα μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας νερό, εάν οι αδιάστατοι παράμετροι, ο αριθμός του Reynolds (Re) και η συγκεκριμένη ταχύτητα (Ns) παραμένουν σταθερές.

$$Re = \frac{\rho_{air} V_{air} D}{\mu_{air}} = \frac{\rho_{water} V_{water} D}{\mu_{water}} \quad (\text{εξίσωση 2-41})$$

$$Ns = \frac{Q_{air}}{N_{air} D^3} = \frac{Q_{water}}{N_{water} D^3} \quad (\text{εξίσωση 2-42})$$

όπου

ρ = μέση πυκνότητα

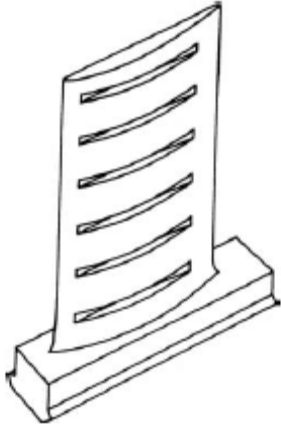
V = η ταχύτητα

D = η διάμετρος του στροφείου

μ = ιξώδες

N = η ταχύτητα

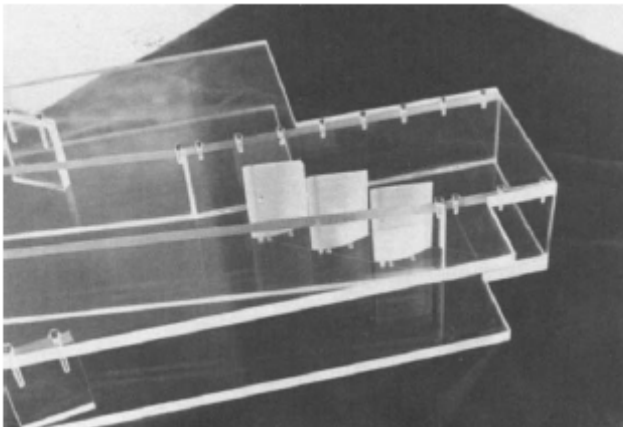
Χρησιμοποιώντας αυτή την υπόθεση μπορούμε να εφαρμόσουμε αυτή τη μέθοδο απεικόνισης της ροής σε οποιοδήποτε μέσο λειτουργίας.



Εικόνα 2-40: Όψη λεπίδας συμπιεστή με βελτίωση

Προφίλ Λεπίδων

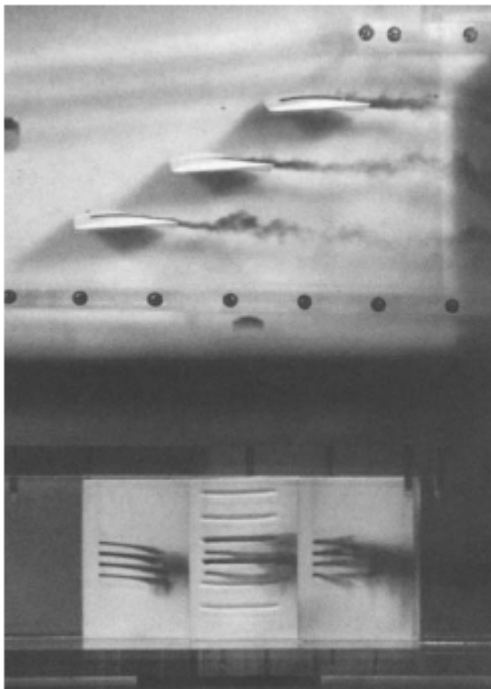
Για τη μελέτη των επιδράσεων της στρωτής ροής, οι λεπίδες τοποθετούνται όπως φαίνεται στην εικόνα 2-34.



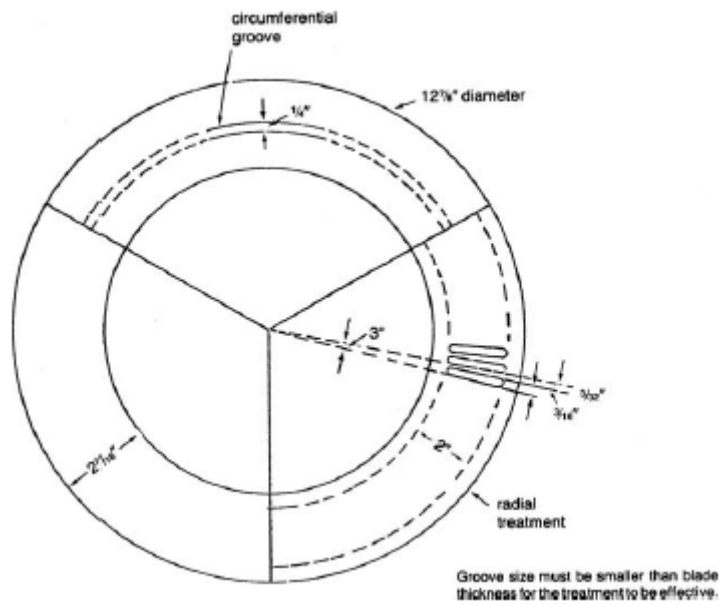
Εικόνα 2-35: Μοντέλο σταδίων σε δοκιμαστική δεξαμενή αξονικής ροής



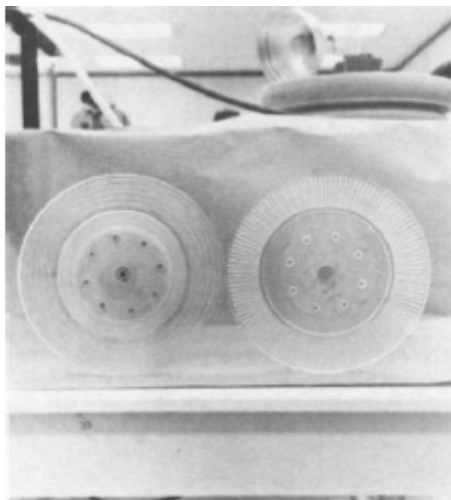
Εικόνα 2-36: Συσσκευή για το test μοντέλου σταδίων αξονικής ροής



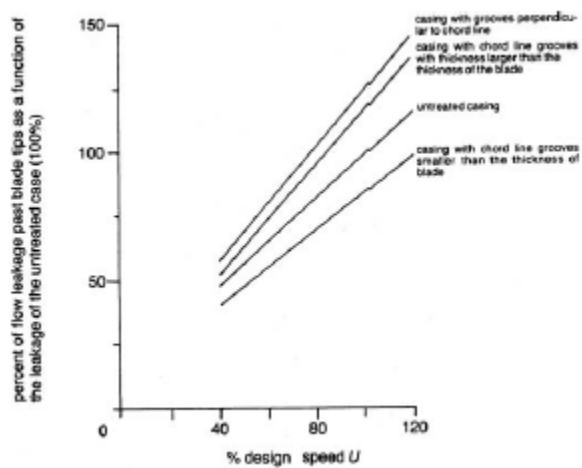
Εικόνα 2-37: Βελτιώσεις στη κεντρική λεπίδα σταδίων



Εικόνα 2-38: Λεπτομέρειες από ποικίλες διορθώσεις πλαισίου. Κάθε διορθωση είναι σε διαφορετικό δίσκο

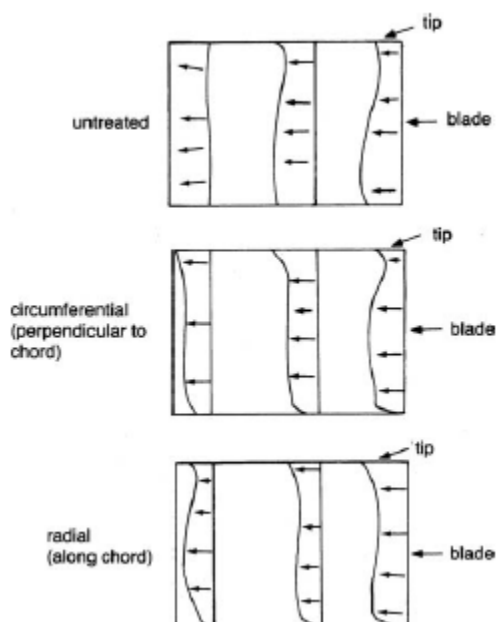


Εικόνα 2-39: Δύο δίσκοι με βελτίωση πλαισίου



Εικόνα 2-40: Διαρροή μαζικής ροής για διάφορες βελτιώσεις

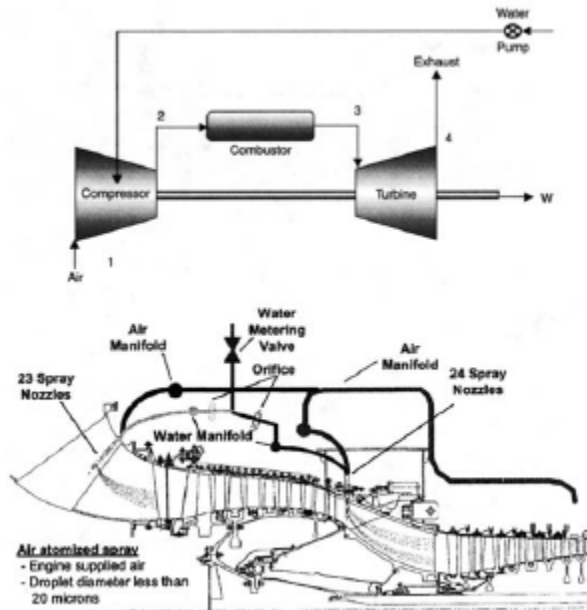
3. Ενίσχυση των αριθμητικών λύσεων της εξίσωσης των Navier και Stokes (ιξώδης συμπιεσμένη ροή).
Η λύση της πλήρους εξίσωσης των Navier και Stokes απαιτεί πολύ ενισχυμένες αριθμητικές τεχνικές. Οι παλαιότερες εξισώσεις χρησιμοποιούσαν μη ιξώδη ροή και λύσης ροής τριών διαστάσεων. Υπάρχουν πολλά ενισχυμένα αριθμητικά προγράμματα σε εξέλιξη για την επίλυση της εξίσωσης στην ουσία της.
4. Υπερηχητικά προφίλ λεπίδας για υψηλότερα ποσοστά πίεσης ανά στάδιο (>2.1)
Οι υπερηχητικές λεπίδες έχουν σχεδιαστεί στο σημείο μέγιστης πυκνότητας γύρω στο 0,6 της χορδής της λεπίδας από το αρχικό της άκρο. Οι λεπίδες αυτές έχουν πρόβλημα με την αντιμετώπιση των απότομων κυμάτων που πραγματοποιούνται καθώς η ροή εισέρχεται στους στατήρες. Οι απώλειες με τη διαδικασία διάχυσης είναι πολύ μεγάλες και έτσι γίνονται πειράματα πάνω στις αλλαγές του σχεδιασμού έτσι άλλωστε η ροή που εισέρχεται στο διαχύτη να καταπνίγεται εύκολα και, εάν υπάρχουν απότομα κύματα, να δημιουργούνται αναταραχές στα πλάγια με ελάχιστες απώλειες. Διεξάγονται τεστ σε διάφορα προφίλ για να διασφαλιστεί το γεγονός ότι οι απώλειες των σταδίων ελαχιστοποιούνται.



Εικόνα 2-41: Κατανομές ταχύτητας παρατηρούνται στη πάγια όψη του περάσματος λεπίδας για διάφορες βελτιώσεις σταδίων

5. Ψύξη μεταξύ των σταδίων του συμπιεστή με έκχυση νερού ανάμεσα στα στάδια.
Σε αυτό το σύστημα εκχέεται νερό στα μεσαία στάδια του συμπιεστή για την ψύξη του αέρα και την προσέγγιση μιας ισοθερμικής διαδικασίας συμπίεσης

(εικόνα 2-42). Το νερό που εκχέεται ψεκάζεται συνήθως μηχανικά έτσι ώστε να εισάγονται στον αέρα 'καλά' σταγονίδια. Το νερό εξατμίζεται όταν έρχεται σε επαφή με το ρεύμα υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Καθώς εξατμίζεται το νερό καταναλώνει περίπου 1058 BTU (1117 kJ) (λανθάνουσα θερμότητα εξαέρωσης) στην υψηλότερη πίεση και θερμοκρασία που καταλήγει στη μείωση της θερμοκρασίας του ρεύματος αέρα που εισέρχεται στο επόμενο στάδιο. Αυτό μειώνει το έργο που απαιτείται για τη λειτουργία του συμπιεστή. Η ψύξη του συμπιεσμένου αέρα έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε μηχανές με αναλογία υψηλής πίεσης.



Εικόνα 2-42: Ψύξη συμπιεστή

Το υλικό των λεπίδων του συμπιεστή

Οι λεπίδες του συμπιεστή κατασκευάζονται από σφυρηλάτηση, εξώθηση ή μηχανική επεξεργασία. Όλες οι λεπίδες παραγωγής, μέχρι την ανακάλυψη νέων εξελιγμένων τουρμπίνων αερίου, φτιάχνονταν από ανοξείδωτο ατσάλι τύπου 403 ή 403 Cb διαθέτοντας και τα δύο περίπου 12 Cr. Αυτή η οικογένεια κραμάτων αποτελείται από ιδιαίτερα εύπλαστα μέταλλα με υψηλά επίπεδα αντοχής, ομοιόμορφα χαρακτηριστικά και αντοχή σε θερμοκρασίες πάνω από τους 900^o F (482^o C). Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι νέοι συμπιεστές αξονικής ροής έχουν αναλογίες πίεσης 30:1 έως 40:1, θερμοκρασίες εξόδου μεταξύ 1000^o F και 1150^o F (538^o C -621^o C), νέο υλικό των λεπίδων του συμπιεστή και ένα ανοξείδωτο μαρτενσιτικό ατσάλι σκληρής καθίζησης όπως αυτό ονομασίας 15-5 PH, εισήχθη στην παραγωγή για εξελιγμένες και αναβαθμισμένες μηχανές. Αυτό το υλικό προσφέρει μεγάλη αντοχή εφελκυσμού/ελαστικότητας χωρίς να χάνεται η αντίσταση στη διάβρωση. Με αυτό το υλικό επιτυγχάνεται, επίσης, σημαντική αύξηση της αντοχής στην κόπωση του υψηλού κύκλου και στην κόπωση λόγω της διάβρωσης σε σύγκριση με το ανοξείδωτο ατσάλι τύπου 403 με 12 Cr. Ακόμη επιτυγχάνεται πολύ μεγάλη αντίσταση στη διάβρωση εξαιτίας μεγαλύτερης συγκέντρωσης χρωμίου και μολυβδαινίου στο

μέταλλο. Η διάβρωση του συμπιεστή προκαλείται λόγω της υγρασίας που περιέχει άλατα και οξέα τα οποία συγκεντρώνονται στις λεπίδες. Κατά τη λειτουργία του συμπιεστή, μπορεί να δημιουργηθεί υγρασία λόγω της 'βροχής', της χρήσης ψυκτών εξάτμισης, συστημάτων θόλωσης (fogging systems) ή των 'πλύσεων' του συμπιεστή ή της συμπύκνωσης που προκαλείται από την επιτάχυνση του υγρού αέρα στην είσοδο του συμπιεστή. Υγρασία μπορεί να παρατηρηθεί στο συμπιεστή κατά τη λειτουργία, ανάμεσα στα στάδια 5 και 8, όπου συνήθως θερμαίνεται έτσι ώστε να αποτραπεί η συμπύκνωση. Όταν η τουρμπίνα βρίσκεται εκτός λειτουργίας, ο συμπιεστής μπορεί να παρουσιάζει υγρασία εάν οι θερμοκρασίες των μετάλλων βρίσκονται κάτω από το σημείο του συγκεκριμένου τμήματος. Αυτό μπορεί να συμβεί σε μονάδες που βρίσκονται σε υγρό περιβάλλον. Η 'χημεία' της υγρασίας, ειδικότερα το άλας στον αέρα, που εναποτίθεται στις λεπίδες, προσδιορίζει τη δριμύτητα του φαινομένου της διάβρωσης.

Το κράμα της λεπίδας υψηλής θερμοκρασίας συνήθως παράγεται από ανάτηξη κενού τόξου (**vacuum-arc remelting**) και θεωρείται ότι έχει ισορροπημένη 'χημεία' που ελαχιστοποιεί τη δημιουργία δέλτα-φερρίτη (**delta-ferrite**). Οι εγκλίσεις και ο δέλτα-φερρίτης μπορούν να προκαλέσουν προβληματικά επίπεδα σε αυτό το τμήμα. Είναι συχνό φαινόμενο να προσφέρει το εργαστάσιο απόθεμα σφυρηλάτησης που έχει υποστεί κατεργασία θέρμανσης στους 1900^{°F}, για καλύτερη σφυρηλατότητα. Τα σφυρηλατημένα, ακατέργαστα υλικά συνήθως αναθερμαίνονται στους 1900^{°F} και ύστερα υφίστανται μια κατεργασία σκλήρυνσης μεταξύ των 1100^{°F} και 1150^{°F} ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που πρέπει να επιτευχθούν κάθε φορά. Υπάρχει ένας γενικότερος συσχετισμός μεταξύ σκληρότητας και δύναμης (εφελκυσμός/κόπωση). Σκληρότητα με RC32 αποκαλύπτει δύναμη εφελκυσμού γύρω στα 150.000psi και ότι η θερμοκρασία για τη σκλήρυνση που χρησιμοποιήθηκε κατά την κατασκευή ήταν γύρω στους 1100^{°F} και 1150^{°F}. Η επένδυση των λεπίδων του συμπιεστή είναι τώρα πολύ συχνό φαινόμενο. Οι λεπίδες υφίστανται μεγάλο ποσοστό διάβρωσης λόγω των προσμίξεων στο ρεύμα του αέρα. Αυτή η διάβρωση οδηγεί με τη σειρά της σε βλάβες στις λεπίδες. Οι λεπίδες σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να λειτουργήσουν πάνω από 100.000 ώρες, αλλά λόγω της διάβρωσης οι ώρες μειώνονται στις 20.000-60.000. Για πάνω από 30 χρόνια αποτελούσε κοινή πρακτική η επένδυση τουλάχιστον των πρώτων 5 έως 8 σταδίων ανάλογα με το σχεδιασμό του συμπιεστή. Τα πρώτα στάδια θεωρούνται ως 'υγρά στάδια', διότι στις μέρες μας πολλές μονάδες χρησιμοποιούν απευθείας πλύσεις με νερό, ενώ επίσης έχουν ψύξη εξάτμισης και θόλωση (fogging) για να αυξηθεί η δύναμη. Η επένδυση αυτών των λεπίδων είναι συναφής με μία απλού τύπου επικάλυψη η οποία θα πρέπει να έχει πυκνότητα τουλάχιστον 3 εκατοστών. Οι επενδύσεις Ni-Cd χρησιμοποιούνται επίσης σε επιλεγμένες εφαρμογές και αργότερα για νέα περιβλήματα, αποτελούμενες από επένδυση με πολύ αλουμινίου που διαθέτει ένα προστατευτικό κεραμικό στρώμα το οποίο προσφέρει μεγαλύτερη αντίσταση στη διάβρωση. Αυτό το είδος επένδυσης, σε σύγκριση με τις συμβατικές επενδύσεις με πολύ αλουμινίου, προσφέρει μεγαλύτερη προστασία από τη διάβρωση, καθώς επίσης συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης της τουρμπίνας αερίου μειώνοντας την ποσότητα της ενέργειας που καταναλώνεται από το συμπιεστή. Τα τεστ που έχουν διεξαχθεί δείχνουν μία μείωση της τάξης 2%-3% στην ενέργεια που καταναλώνεται από το συμπιεστή, κάνοντας απόσβεση του πρόσθετου κόστους της επένδυσης σε λειτουργία 4-6 μηνών.

Η αναλογία πλευράς των συμπιεστών αξονικής ροής, συμπεριλαμβανομένων των κατευθυντήριων πτερυγίων εισόδου ποικίλουν από AR = 4 έως AR = 0,5. Όλα τα κατευθυντήρια πτερύγια και τα πρώτα 5 έως 8 στάδια των αεροτομών περιστροφής

και των στατικών αεροτομών κατασκευάζονται από μαρτενσινικό ανοξείδωτο ασάλι υψηλής θερμοκρασίας ή υλικό λεπίδας 15-5 PH. Τα υπόλοιπα στάδια συνήθως περιλαμβάνουν AISI 403 ή 403 Cb.

Βιβλιογραφία

1. Ν.Δ Νανούσης, Βασικές αρχές στροβιλομηχανών, έκδοση Ιων 2001
2. Δ.Παπανίκας, Ρευστοδυναμικές μηχανές Παν. Πατρών 2000
3. Caltech Lecture Notes on Jet Propulsion JP121 Graduate Course (Instructor: Zukoski E.E.).2009
4. Balje, O.E., "Loss and Flow-Path Studies on Centrifugal Compressors, Parts I and II,2002"
5. Balje, O.E., "A Study of Reynolds Number Effects in Turbomachinery," *Journal of Engineering for Power*, 2006.
6. Bammert, K., and Rautenberg, M., "On the Energy Transfer in Centrifugal 2005
7. Owczarek, J.A., *Fundamentals of Gas Dynamics*, International Textbook Company, Scranton, Pennsylvania2007
8. Filipenco, V., Deniz, S., Johnston, J., Greitzer, E. and Cumpsty, N., 1998, "Effects of Inlet Flow Field Conditions on the Performance of Centrifugal Compressor Diffusers Part 1: Discrete Passage Diffuser," ASME Paper No. 98-GT-47
9. Phillips, M., 1997, "Role of Flow Alignment and Inlet Blockage on Vaned Diffuser Performance," Report No. 229, Gas Turbine Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.
10. Dallenback, F., "The Aerodynamic Design and Performance of Centrifugal and Mixed-Flow Compressors," SAE International Congress, 2002.
11. Dawes, W., "A Simulation of the Unsteady Interaction of a Centrifugal Impeller with its Vaned Diffuser: Flows Analysis," *ASME Journal of Turbo-machinery*, Vol. 117, pp. 213–222,2009
12. Domercq, O., and Thomas, R., 1997, "Unsteady Flow Investigation in a Transonic Centrifugal Compressor Stage," AIAA Paper No. 97-2877.
13. Cumpsty, N.A., 1989, *Compressor Aerodynamics*, Longman Group UK Ltd., London, England.
14. Cumpsty, N.A., 1998, *Jet Propulsion*, Cambridge University Press, Cambridge, England
15. Hill, P.G., Peterson, C.R., 1992, *Mechanics and Thermodynamics of Propulsion*, Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA.
16. Kerrebrock, J.L., 1992, *Aircraft Engines and Gas Turbines*, MIT Press, Cambridge, MA.
17. Khalak, A., 2002, "A Framework for Follower Clearance of Aeroengine Blades," *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol 124, No. 4. Also ASME 2001-GT-0270, ASME Turbo Expo 2001, New Orleans, LA, 2001.
18. Mellor, G., "The Aerodynamic Performance of Axial Compressor Cascades with Applications to Machine Design," (Sc. D. Thesis), M.I.T. Gas Turbine Lab,