

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΣΤΗΝ
ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΕΝΟΣ ΑΞΟΝΙΚΟΥ
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ**

ΜΑΡΙΝΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΚΑΘ. ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΤΟΥΡΑΙΔΑΚΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ ΙΟΥΝΙΟΣ 2024

UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA



DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

MASTER'S THESIS

**COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF CASING TREATMENT
GEOMETRIES ON STALL MARGIN EXPANSION OF AN AXIAL
COMPRESSOR**

MARINOS GEORGIOS

THESIS SUPERVISOR

PROF. ANTONIOS TOURLIDAKIS

KOZANI JUNE 2024

Περίληψη

Οι αεριοστρόβιλοι βρίσκουν πληθώρα εφαρμογών για την παραγωγή μηχανικού έργου και ώσης από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων των αεροπορικών μεταφορών για μείωση των εκπομπών ρύπων, προέκυψε η ανάγκη για παραγωγή κινητήρων με αυξημένη ισχύ και απόδοση, δίχως να αυξηθεί το βάρος και το μέγεθός τους. Ένας τρόπος επίλυσης του προβλήματος είναι, η παραγωγή υψηλότερου λόγου πιέσεων από τον συμπιεστή, διατηρώντας το ίδιο μέγεθος και αριθμό βαθμίδων, με αποτέλεσμα οι συμπιεστές να λειτουργούν κοντά σε συνθήκες υψηλού φόρτου, όπου μπορεί να εμφανιστεί αποκόλληση της ροής. Για αυτό είναι απαραίτητο, κατά την σχεδίαση του συμπιεστή, να περιλαμβάνονται μηχανισμοί επέκτασης του εύρους ευσταθούς λειτουργίας. Οι γεωμετρικές τροποποιήσεις στο κέλυφος είναι ένα από τα συστήματα παθητικού ελέγχου, που έχουν μελετηθεί με στόχο την αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας δίχως να προκαλείται σημαντική πτώση του βαθμού απόδοσης στο σημείο σχεδιασμού του συμπιεστή. Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε υπολογιστική μελέτη της επίδρασης των γεωμετριών τροποποιήσεων κελύφους στην επέκταση του περιθωρίου ευστάθειας και στην εμφάνιση αποκόλλησης στον ρότορα NASA Rotor 37, με την χρήση λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ANSYS CFX. Η μελέτη ξεκινά με μια εισαγωγή στις αρχές λειτουργίας των αξονικών συμπιεστών ακολουθούμενη από τις πηγές γένεσης απωλειών και τους τρόπους αντιμετώπισής τους. Εν συνεχεία παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του NASA Rotor 37 και των γεωμετριών κελύφους καθώς και η μοντελοποίηση του προβλήματος. Με την εισαγωγή των γεωμετρικών τροποποιήσεων στο κέλυφος παρατηρήθηκε αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας κατά 3.8% και 4.9% για τις δύο περιπτώσεις, δίχως σημαντική πτώση του βαθμού απόδοσης. Οι αυλακώσεις προσέφεραν βελτίωση των αεροδυναμικών φαινομένων κοντά στο κέλυφος κατά την λειτουργία του συμπιεστή κοντά σε συνθήκες αποκόλλησης, οδηγώντας σε επέκταση του εύρους λειτουργίας.

Abstract

Gas turbines have found numerous applications for the generation of mechanical work and thrust since the beginning of the 20th century. Due to the increasing demands of aviation to reduce emissions, there is a need to produce engines with increased power and efficiency without increasing their weight and size. One way of solving the problem is to produce higher pressure ratios from the compressor, while maintaining the same size and number of stages, which leads to the compressor operating near high load conditions, where flow separation can occur. Casing treatment geometries are one of the passive flow control systems that have been studied to increase the stall margin without causing a significant drop in efficiency at the design point of the compressor. In this master thesis, a computational study of the effect of casing treatments on the expansion of the stall margin and the inception of surge in the NASA Rotor 37, was carried out using ANSYS CFX computational fluid dynamics software. The study starts with an introduction to the principles of operation of axial compressors, followed by the sources of loss generation and ways of dealing with them. Subsequently, the geometric characteristics of the NASA Rotor 37 and casing geometries are presented as well as the problem modeling. With the introduction of the geometric modifications to the shell, an increase of the stall margin of 3.8% and 4.9% was observed for both cases, without a significant drop in efficiency. The grooves offered an improvement in the aerodynamic phenomena near the shell when the compressor was operating near stall conditions, leading to an extension of the operating range.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	11
Κεφάλαιο 2. Θεωρία Αξονικών Συμπιεστών	14
2.1 Κινηματική Ανάλυση	14
2.2 Θερμοδυναμική Ανάλυση	15
2.3 Σχεδιαστικές Παράμετροι Πτερύγωσης.....	18
2.3.1 Συντελεστής Φόρτισης.....	18
2.3.2 Συντελεστής Παροχής.....	19
2.3.3 Βαθμός Αντίδρασης	19
2.3.4 Διάταμα Πτερυγίων	19
2.3.5 Στερεότητα Πτερυγίου	20
2.3.6 Χαρακτηριστική Καμπύλη.....	20
2.4 Πηγές Απωλειών Συμπιεστών.....	22
2.4.1 Δίνη Ακροπτερυγίου	24
2.4.2 Κρουστικά Κύματα.....	25
2.4.3 Μείωση της Ενεργού Διατομής	27
2.5 Μηχανισμοί Αντιμετώπισης Απωλειών.....	28
2.5.1 Σχήμα Διατομής Πτερυγίων.....	29
2.5.2 Τρισδιάστατη Σχεδίαση Πτερυγίων.....	29
2.5.3 Γεωμετρικές Τροποποιήσεις Κελύφους.....	31
2.5.4 Σύγχρονες Μελέτες.....	33
Κεφάλαιο 3. Αξονικός Συμπιεστής NASA Rotor 37	35
3.1 Υπολογιστικό Χωρίο.....	37
3.2 Κατασκευή Γεωμετρικών Τροποποιήσεων Κελύφους	39
3.3 Μοντελοποίηση	42
3.4.1 Μοντέλο Τύρβης.....	45
3.4.2 Κριτήρια Σύγκλισης.....	46
Κεφάλαιο 4. Ανάλυση Ευαισθησίας Πλέγματος.....	48
4.1 Πλέγμα Δρομέα	48
4.2 Τοποθέτηση Πλέγματος Κελύφους	52
Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα.....	56

5.1	Ομαλό Κέλυφος NASA Rotor 37	56
5.2	Τροποποιημένες Γεωμετρίες Κελύφους	64
5.3	Χρονικά Μεταβαλλόμενο Πεδίο Ροής.....	72
Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα και Προτάσεις.....		76
6.1	Συμπεράσματα	76
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	76
Βιβλιογραφία		78

Ελληνικά Σύμβολα

α	Γωνία Απόλυτης Ταχύτητας
β	Γωνία Σχετικής Ταχύτητας
η	Βαθμός Απόδοσης
λ	Λόγος Ακτίνας βάσης-κορυφής πτερυγίου
ρ	Πυκνότητα
σ	Στερεότητα Πτερυγίου
φ	Συντελεστής Παροχής
Ω / ω	Ταχύτητα Περιστροφής (rad/s)
ΠΕ	Περιθώριο Ευστάθειας
ΑΡ	Απλός Ρότορας
ΜΚ	Ρότορας Με Κέλυφος

Λατινικά Σύμβολα

A	Επιφάνεια
AR	Διάταμα πτερυγίου
c_a	Αξονική συνιστώσα απόλυτης ταχύτητας
c_w	Περιφερειακή συνιστώσα απόλυτης ταχύτητας
c_L	Συντελεστής άνωσης
C	Χορδή πτερυγίου
h	Ειδική ενθαλπία
M	Αριθμός Mach
m	Μάζα
\dot{m}	Παροχή μάζας
N	Περιστροφική ταχύτητα (RPM)
U	Εφαπτομενική ταχύτητα
V	Σχετική ταχύτητα πτερυγίου
r	Ακτίνα
R	Βαθμός αντίδρασης
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes

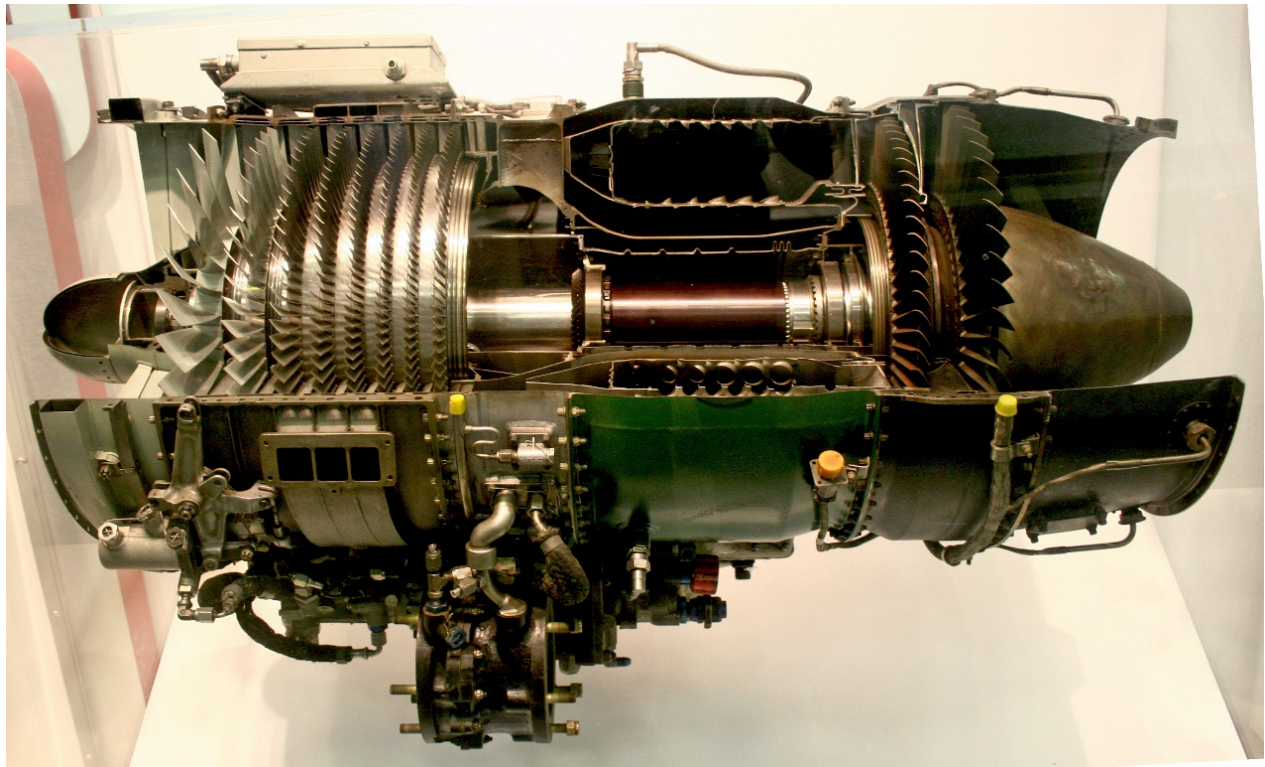
Rs	Ακτίνα κελύφους
Rh	Ακτίνα πλήμνης
S	Ακτίνα ρότορα
T	Θερμοκρασία
T_0	Θερμοκρασία ανακοπής
W	Μεταφορά έργου
SM	Stall Margin
CGCT	Circumferential Groove Casing Treatment
LE	Leading Edge
TE	Trailing Edge
PR	Pressure Ratio

Δείκτες

1	Σημείο εισόδου δρομέα
2	Σημείο εξόδου δρομέα
3	Σημείο εξόδου στάτορα
2s	Ισεντροπική μεταβολή
02	Ολικές Συνθήκες στην θέση 2

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η αρχή λειτουργίας των αεροστροβίλων αποτελείται από τις διεργασίες συμπίεσης, καύσης και εκτόνωσης του εργαζόμενου μέσου και κατά αυτόν τον τρόπο κατηγοριοποιούνται τα κύρια μηχανικά μέρη του αεροστροβίλου που είναι ο συμπιεστής, ο θάλαμος καύσης και ο στρόβιλος. Το κύριο πλεονέκτημα των αεροστροβίλων, σε σχέση με άλλες διατάξεις κινητήρων, είναι η δυνατότητα παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων έργου και ώσης σε σχέση με το βάρος και το μέγεθός τους. Τα κύρια χαρακτηριστικά που επιδρούν στις επιδόσεις των αεροστροβίλων είναι ο λόγος συμπίεσης του συμπιεστή, η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο και οι βαθμοί απόδοσης των επιμέρους στοιχείων.



*Εικόνα 1. Αεροστρόβιλος,
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/J85_ge_17a_turbojet_engine.jpg*

Ο συμπιεστής αποτελείται από διαδοχικές βαθμίδες που η κάθε μια περιλαμβάνει μια σειρά κινούμενων πτερυγίων (δρομέας) και μια σειρά σταθερών πτερυγίων (στάτορας). Ο δρομέας απορροφά μηχανική ισχύ μέσω άξονα την οποία προσδίδει ως κινητική ενέργεια στο ρευστό, η οποία μετατρέπεται σε αύξηση πίεσης στον στάτορα. Οι σύγχρονοι συμπιεστές λειτουργούν σε υπερηχητικές συνθήκες, καθώς σε υψηλούς αριθμούς Mach η παροχή μάζας αυξάνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα να παράγονται μεγάλες ποσότητες ισχύος από κινητήρες με μικρό μέγεθος. Η σχεδίαση διηχητικών βαθμίδων προσπαθεί να μετριάσει τις απώλειες που προέρχονται από την εμφάνιση κρουστικών κυμάτων, χρησιμοποιώντας πτερύγια λεπτού πάχους και χαμηλού λόγου

πάχους προς χορδή. Διηχητικές βαθμίδες μπορούν να εντοπιστούν σε όλα τα τμήματα ενός συμπίεστη και κυρίως στους ανεμιστήρες κινητήρων υψηλού λόγου παράκαμψης.

Το εύρος λειτουργίας των αεριοστροβίλων περιορίζεται από το περιθώριο ευστάθειας του συστήματος συμπίεσης του κινητήρα. Εάν ο συμπίεστης εισέλθει σε συνθήκες ασταθούς λειτουργίας, οι συνέπειες μπορεί να είναι καταστροφικές για την ασφάλεια της πτήσης, ενώ σε βιομηχανικές εφαρμογές, μπορεί να προκληθούν ζημιές λόγω των μηχανικών καταπονήσεων που εμφανίζονται σε συνθήκες αστάθειας, με καταστροφικές συνέπειες από πλευράς κόστους και ασφάλειας. Είναι επομένως απαραίτητο, η σχεδίαση ενός κινητήρα να περιλαμβάνει συστήματα παθητικής ή ενεργητικής λειτουργίας τα οποία να περιορίζουν τα φαινόμενα αστάθειας, όταν ο αεριοστρόβιλος καλείται να λειτουργήσει μακριά από το σημείο σχεδιασμού. Οι συνθήκες αυτές μπορεί να βρεθούν σε φάσεις έντονης επιτάχυνσης, επιβράδυνσης ή ακόμα και σε ρελαντί. Η επέκταση του περιθωρίου ευστάθειας των διηχητικών συμπίεστων είναι ένα σύνθετο πρόβλημα που απασχολεί τους σχεδιαστές από τα πρώτα χρόνια εμφάνισης των αεριοστροβίλων. Οι κύριες τεχνικές διεύρυνσης του εύρους λειτουργίας επιτυγχάνεται με την κατάλληλη σχεδίαση των πτερυγίων και με συστήματα παθητικού και ενεργητικού ελέγχου της ροής εντός του συμπίεστη.

Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές παθητικού ελέγχου για την σταθεροποίηση της ροής είναι, η απομάστευση αέρα (Bleeding), η τοποθέτηση οδηγητικών πτερυγίων εισόδου (IGVs) και οι γεωμετρικές κελύφους (Casing Treatments). Ο ενεργητικός έλεγχος της ροής περιλαμβάνει την έγχυση ρευστού (Injection) με ψεκασμό κοντά στο κέλυφος και την αλλαγή της θέσης των οδηγητικών πτερυγίων κατά την λειτουργία του κινητήρα. Οι πρώτες ιδέες για την ανάπτυξη γεωμετριών κελύφους πραγματοποιήθηκαν από την δεκαετία του 1950 με την πατέντα που κατατέθηκε από τον Geoffrey Wilde της Rolls Royce Limited για την απομάστευση αέρα από μια περιοχή κοντά στην έξοδο του συμπίεστη ώστε να εγχυθεί στο κέλυφος ανάντη των οδηγητικών πτερυγίων. Το 1955 κατατέθηκε μια πατέντα του Ronald Turner από την Power Jets Limited για την ενσωμάτωση οπών και αυλακώσεων στα κελύφη του ρότορα και στάτορα με στόχο την αύξηση της τύρβης ώστε να διεγερθεί το ρευστό χαμηλής ενέργειας κοντά στο κέλυφος.[12]

Οι πρώτες πειραματικές μελέτες γεωμετριών κελύφους πραγματοποιήθηκαν από τα μέσα της δεκαετίας του 1960 στο ερευνητικό κέντρο NASA Lewis Research Center με την συγκρότηση του τμήματος Flight Propulsion Division της General Electric ώστε να μελετηθεί ένας μονοβάθμιος αξονικός συμπίεστης υψηλής ταχύτητας με την εισαγωγή κελύφους απομάστευσης και έγχυσης αέρα. Βρέθηκε ότι είτε εγχέεται ρευστό από το κέλυφος είτε όχι, το πορώδες κέλυφος βελτίωσε το εύρος ευστάθειας του συμπίεστη, χωρίς ωστόσο να εξακριβωθεί ο μηχανισμός που οδηγεί σε αυτό το αποτέλεσμα. Από τότε, πραγματοποιούνται συνεχώς πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες σε γεωμετρίες κελύφους για ένα πλήθος εφαρμογών σε αξονικούς και φυγοκεντρικούς συμπίεστες. Με την σημερινή εξέλιξη των υπολογιστικών εργαλείων, η μελέτη των γεωμετριών είναι ταχύτερη και μπορούν να αποτυπωθούν με καλύτερη ευκρίνεια τα φαινόμενα ροής σε πτερυγώσεις υψηλών ταχυτήτων.

Ο NASA Rotor 37 σχεδιάστηκε από τους Reid και Moore στο ερευνητικό κέντρο Lewis Research Center της NASA στα μέσα της δεκαετίας του 1970, στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος ανάπτυξης ενός προηγμένου πολυβάθμιου συμπιεστή υψηλών ταχυτήτων. Από τότε ο συμπιεστής έχει μελετηθεί πειραματικά και υπολογιστικά για ένα πλήθος εφαρμογών, όπως οι γεωμετρικές κελύφους και χρησιμοποιείται ακόμη για την αξιολόγηση κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, καθώς η σχεδιάσή του δεν διαφέρει πολύ από τους σύγχρονους διηχητικούς συμπιεστές.

Σκοπός της Εργασίας

Ο σκοπός της μελέτης αυτής είναι η αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας και άρα του εύρους ασφαλούς λειτουργίας του διηχητικού συμπιεστή NASA Rotor 37, μέσω της τοποθέτησης γεωμετριών κελύφους και η διερεύνηση των φαινομένων που οδηγούν στην μεταβολή αυτή.

Επιμέρους στόχοι της εργασίας αποτελούν: α) η μελέτη των απωλειών που προκαλούν φαινόμενα αποκόλλησης σε έναν συμπιεστή, β) η παρουσίαση των τεχνικών και σχεδιαστικών παραμέτρων που συμβάλλουν στην επέκταση τους εύρους λειτουργίας και του βαθμού απόδοσης, γ) η σχεδίαση δύο γεωμετριών κελύφους που να οδηγούν σε αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας με το ελάχιστο δυνατό κόστος στον βαθμό απόδοσης και δ) η αποτύπωση των ροϊκού πεδίου όταν ο συμπιεστής λειτουργεί κοντά σε συνθήκες αποκόλλησης.

Δομή της Εργασίας

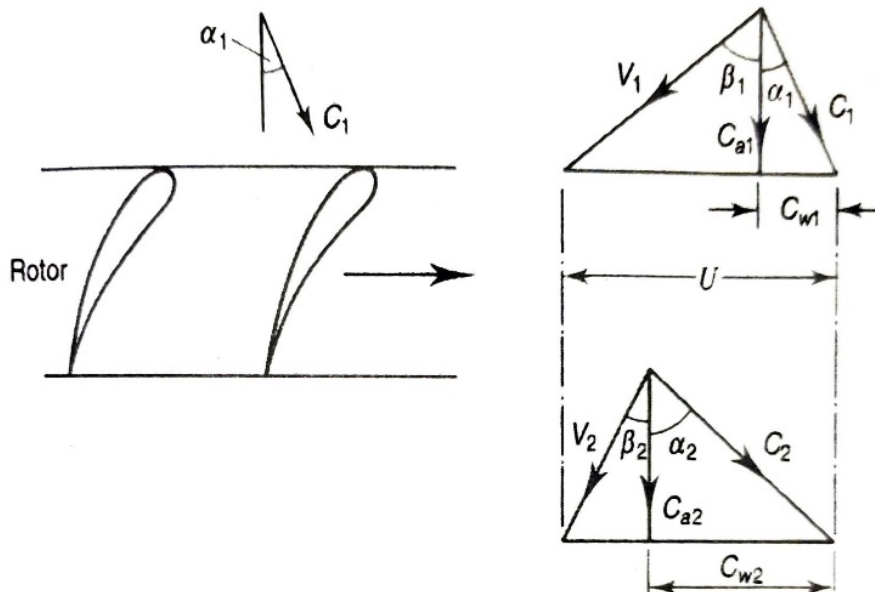
Η παρούσα μελέτη ξεκινά με μια σύντομη αναφορά στις αρχές λειτουργίας των πτερυγώσεων αξονικών συμπιεστών και στις κύριες σχεδιαστικές παραμέτρους τους στο Κεφάλαιο 2. Εν συνεχεία, γίνεται αναφορά στις πηγές γένεσης απωλειών, στον βαθμό απόδοσης των πτερυγώσεων, καθώς και σε τεχνικές παθητικού και ενεργητικού ελέγχου της ροής κοντά στο κέλυφος των συμπιεστών. Στο τρίτο Κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του NASA Rotor 37 μαζί με τον τρόπο κατασκευής του υπολογιστικού χωρίου και η μοντελοποίηση του προβλήματος με τις παραμέτρους επίλυσης. Στο τέταρτο Κεφάλαιο πραγματοποιείται μια ανάλυση διαφορετικών πλεγμάτων, ώστε να επιλεγθεί το πλέγμα με την καλύτερη πιστότητα σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Με την επιλογή του τελικού πλέγματος, ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για κάθε κέλυφος στο πέμπτο Κεφάλαιο. Κλείνοντας ακολουθούν τα συμπεράσματα μαζί με μερικές προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2. Θεωρία Αξονικών Συμπιεστών

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται μια σύντομη ανασκόπηση των κινηματικών και θερμοδυναμικών σχέσεων που περιγράφουν την αρχή λειτουργίας των αξονικών συμπιεστών. Η ισχύς που καταναλώνεται από τον ρότορα καθώς μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και εν συνεχεία σε αύξηση της στατικής πίεσης στον στάτορα, μπορεί να υπολογιστεί με τα τρίγωνα ταχυτήτων. Η περιγραφή των εννοιών αφορά τον αέρα ως εργαζόμενο μέσο και χρησιμοποιείται η παραδοχή της ακτινικής ισορροπίας, οπότε η προσέγγιση αφορά το δισδιάστατο επίπεδο στο μέσο του πτερυγίου όπου εμφανίζεται αξονική (C_a) και περιστροφική ταχύτητα (U). Η προσέγγιση αυτή είναι επαρκής για πτερυγώσεις στις τελευταίες βαθμίδες του συμπιεστή καθώς το ύψος του πτερυγίου είναι μικρό και η διαφορά της ταχύτητας του ρευστού από τον πόδα έως την κορυφή του πτερυγίου είναι περιορισμένη.

2.1 Κινηματική Ανάλυση

Χρησιμοποιώντας το τρίγωνο ταχυτήτων και της γωνίες εισόδου και εξόδου της ροής, παρουσιάζεται η διαδικασία με την οποία μπορεί να προσδιοριστεί η αύξηση της πίεσης και το έργο που καταναλώνεται από τον συμπιεστή. Η ανάλυση αφορά την μέση ακτίνα του πτερυγίου Saravanamuttoo [24].



Σχήμα 1. Τρίγωνα Ταχυτήτων Πτερύγωσης. Saravanamuttoo

Με την υπόθεση ότι η αξονική ταχύτητα είναι σταθερή $C_a \approx C_{a1} \approx C_{a2}$ τότε προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\frac{U}{C_a} = \tan \alpha_1 - \tan \beta_1 \quad 2.1$$

$$\frac{U}{C_a} = \tan\alpha_2 - \tan\beta_2 \quad 2.2$$

Η ισχύς της βαθμίδας μπορεί να εκφραστεί από την μεταβολή της στροφορμής, ως προς την διαφορά των περιφερειακών ταχυτήτων εισόδου (C_{w1}) και εξόδου (C_{w2}).

$$W = mU(C_{w1} - C_{w2}) \quad 2.3$$

Με όρους γωνιών ροής σχετικά με τα πτερύγια του ρότορα:

$$W = mUC_a(\tan\beta_1 - \tan\beta_2) \quad 2.4$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας για μια αδιαβατική μεταβολή, η ισχύς μπορεί να εκφραστεί ως:

$$W = mc_p(T_{02} - T_{01}) \quad 2.5$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 2.4 και 2.5 η ισεντροπική αύξηση της ολικής θερμοκρασίας από μια βαθμίδα δίνεται από την σχέση:

$$\Delta T = T_{02} - T_{01} = \frac{UC_a}{c_p}(\tan\beta_1 - \tan\beta_2) \quad 2.6$$

Αν η ισεντροπική μεταβολή της θερμοκρασίας συμβολίζεται με T'_{02} τότε ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης n_s της βαθμίδας ορίζεται ως:

$$n_s = \frac{T_{02} - T_{01}}{T'_{02} - T'_{01}} \quad 2.7$$

Η αύξηση πίεσης της βαθμίδας μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση:

$$R_s = \frac{p_{03}}{p_{01}} = \left[1 + \frac{n_s \Delta T_{0s}}{T_{01}} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad 2.8$$

Η αύξηση της πίεσης του συμπιεστή εξαρτάται από τις περιφερειακές συνιστώσες τις ταχύτητας, άρα από την συστροφή του πτερυγίου σε σχέση με τον άξονα περιστροφής και από την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα.

2.2 Θερμοδυναμική Ανάλυση

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε μια περιγραφή της σχέσης που συνδέει τις ταχύτητες εξόδου της ροής από τα πτερύγια με το έργο που καταναλώνεται από την βαθμίδα. Η ισχύς που μεταφέρεται από το περιστρεφόμενο πτερύγιο στο ρευστό ισούται με το γινόμενο της ροπής επί την γωνιακή ταχύτητα. Η σχέση αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί με το έργο του Euler σε ένα πτερύγιο με περιφερειακή ταχύτητα $U = \Omega r$.

$$\dot{W}_c = \dot{m}(U_2 c_{w2} - U_1 c_{w1}) \quad 2.10$$

Το ειδικό έργο που παράγεται ανά μονάδα μάζας σε έναν συμπιεστή:

$$\Delta W_c = \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = U_2 c_{w2} - U_1 c_{w1} > 0$$

$$\Delta W_c = \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = U_2 c_{w2} - U_1 c_{w1} > 0 \quad 2.11$$

Για μια οποιαδήποτε αδιαβατική στροβιλομηχανή, με την εφαρμογή της εξίσωσης ενέργειας μόνιμης ροής προκύπτει ότι:

$$\Delta W_c = (h_{02} - h_{01}) = U_2 c_{w2} - U_1 c_{w1} \quad 2.12$$

Επομένως η μεταβολή της ενθαλπίας ανακοπής ισούται με την μεταβολή της περιφερειακής συνιστώσας της ταχύτητας $\Delta h_0 = \Delta(Uc_w)$. Η ενθαλπία ανακοπής προκύπτει από τον συνδυασμό της ενθαλπίας με την κινητική ενέργεια.

$$h_0 = h + \frac{1}{2} c^2 \quad 2.13$$

Στην παρούσα μελέτη ο συμπιεστής λειτουργεί σε περιοχές συμπιεστής ροής καθώς ο αριθμός Mach είναι μεγαλύτερος του 0.3 σε όλο το εύρος λειτουργίας.

Αν ο αριθμός Mach περιγράφεται από την σχέση:

$$M = \frac{c}{a} = \frac{c}{\sqrt{\gamma RT}} \quad 2.14$$

Η σχέση συμπιεστής ροής μεταξύ της στατικής πίεσης και της πίεσης ανακοπής (Ολικής πίεσης):

$$\frac{p_0}{p} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad 2.15$$

Σε περίπτωση μιας ισεντροπικής ροής, η αύξηση των θερμοκρασιών και πιέσεων ανακοπής:

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \left(\frac{T_{02}}{T_{01}}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad 2.16$$

Χρησιμοποιώντας την καταστατική εξίσωση, $p = \rho RT$ με την σχέση 2.16 η πυκνότητα ανακοπής υπολογίζεται ως:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \quad 2.17$$

Στην μελέτη το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας και αντιμετωπίζεται ως ιδανικό ρευστό που υπακούει στην καταστατική εξίσωση για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης.

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad 2.18$$

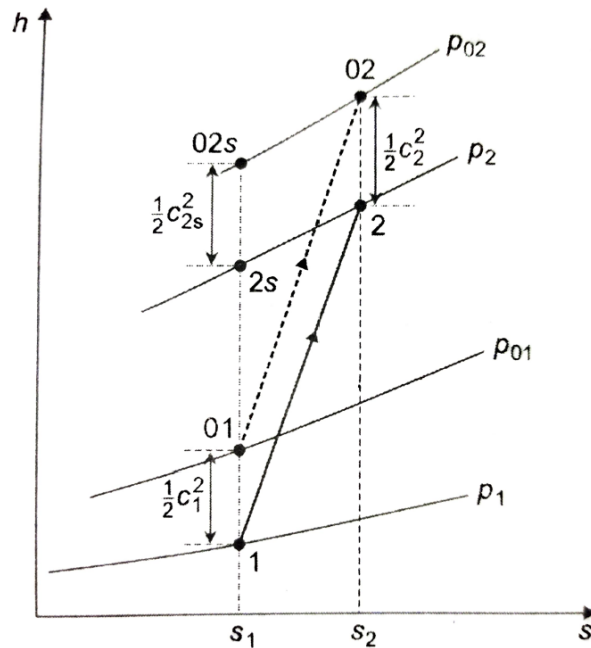
$$PV = mRT \quad 2.19$$

Η θερμοχωρητικότητα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του αερίου.

$$c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} = F(T) \quad 2.20$$

Ισεντροπικός Βαθμός Απόδοσης

Οι βαθμοί απόδοσης εκφράζουν τον λόγο της μεταδιδόμενης ενέργειας στο ρευστό σε πραγματικές συνθήκες, προς την θεωρητική μέγιστη ενεργειακή διαφορά στο ρευστό ανά μονάδα χρόνου. Στο επόμενο σχήμα αναπαρίσταται ένα διάγραμμα Mollier για μια διεργασία συμπίεσης. Η ισεντροπική αύξηση της ενθαλπίας αποτυπώνεται με τον δείκτη 02s.



Σχήμα 2. Διάγραμμα Mollier διεργασίας συμπίεσης. Dixon [1]

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ολικών προς ολικές συνθήκες για την συμπίεση 1 – 2 δίνεται από την σχέση:

$$n_s = \frac{h_{02} - h_{01}}{h_{02s} - h_{01}} \quad 2.21$$

Διαφορετικά:

$$n_s = \frac{(P_{02}/P_{01})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{(T_{02}/T_{01}) - 1} \quad 2.22$$

Με τη χρήση του βαθμού απόδοσης μπορεί να γίνει εκτίμηση της ολικής γένεσης εντροπίας εντός του συμπιεστή από τις επιμέρους πηγές απωλειών.

Η αυξανόμενη ανάγκη για μείωση των εκπομπών ρύπων των αεροπορικών κινητήρων απαιτεί την μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFC) και αύξησης της απόδοσής τους, ενώ το μέγεθος και το βάρος πρέπει να διατηρείται σταθερό. Οι βασικές θερμοδυναμικές παράμετροι βελτιστοποίησης του κύκλου λειτουργίας ενός αεροπορικού κινητήρα είναι η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο (T_{03}) και ο λόγος πίεσης του συμπιεστή (r_c). Η μέγιστη T_{03} καθορίζεται από την θερμική αντοχή του στρόβιλου και άρα περιορίζεται από τις κατασκευαστικές του παραμέτρους. Αύξηση της T_{03} οδηγεί σε αύξηση της ώσης, για δεδομένο μέγεθος κινητήρα, όμως η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου, με σταθερό λόγο πιέσεων, προκαλεί αύξηση της SFC καθώς η επιπλέον θερμότητα που απαιτείται, παρέχεται από τον καυστήρα στο εργαζόμενο μέσο. Με την αύξηση του λόγου πιέσεων, αυξάνεται και η θερμοκρασία εισαγωγής στον καυστήρα T_{02} , με αποτέλεσμα να απαιτείται λιγότερη πρόσδοση θερμότητας από τον καυστήρα και συνεπώς μείωση της κατανάλωσης [1].

2.3 Σχεδιαστικές Παράμετροι Πτερύγωσης

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός συμπιεστή είναι ο συντελεστής φόρτισης ψ , ο συντελεστής παροχής φ και ο βαθμός αντίδρασης R .

2.3.1 Συντελεστής Φόρτισης

Ο συντελεστής φόρτισης ψ επηρεάζει τον βαθμό διάχυσης και την αύξηση της πίεσης διαμέσου της πτερύγωσης. Μια χαμηλή τιμή του ψ θα οδηγήσει σε μεγάλο αριθμό βαθμίδων για την επιθυμητή αύξηση πίεσης, ενώ μεγάλη τιμή περιορίζει το εύρος λειτουργίας του συμπιεστή και μπορεί να τον οδηγήσει σε αποκόλληση.

$$\psi = \frac{c_{w2} - c_{w1}}{U} \quad 2.23$$

2.3.2 Συντελεστής Παροχής

Ο συντελεστής παροχής φ είναι ένα μέσο εκτίμησης της παροχής μάζας του ρευστού καθώς υπολογίζεται από την ταχύτητα εισόδου της ροής C_x και την περιστροφική ταχύτητα U .

$$\varphi = \frac{C_x}{U} \quad 2.24$$

Συνήθως ο συντελεστής παροχής παίρνει τιμές μεταξύ 0.4 και 0.8. Είναι επιθυμητό να επιλέγεται υψηλός συντελεστής παροχής διότι για δεδομένη παροχή μάζας η διάμετρος του δρομέα μικραίνει. Ωστόσο, στους αξονικούς συμπιεστές, υψηλή τιμή του φ μπορεί να οδηγήσει σε υψηλούς αριθμούς Mach και άρα σε αυξημένες απώλειες.

2.3.3 Βαθμός Αντίδρασης

Ο βαθμός αντίδρασης R προσδιορίζει τον λόγο της αύξησης στατικής ενθαλπίας στον δρομέα προς την αύξηση της στατικής ενθαλπίας βαθμίδας.

$$R = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_1} \quad 2.25$$

Σε μια βαθμίδα με βαθμό αντίδρασης 0.5 η δυσμενής κλίση πίεσης κατανέμεται μεταξύ του δρομέα και του στάτορα, ωστόσο η αύξηση του R είναι επιθυμητή σε βαθμίδες υψηλού φόρτου διότι αποφορτίζεται ο στάτορας καθώς είναι πιο επιρρεπής σε αποκολλήσεις.

2.3.4 Διάταμα Πτερυγίων

Το διάταμα του πτερυγίου AR (Aspect Ratio) ορίζεται ως ο λόγος του ύψους του πτερυγίου προς το μήκος της χορδής του:

$$AR = \frac{h_a}{C} \quad 2.26$$

Η επιλογή του διατάματος είναι κρίσιμος παράγοντας διότι επηρεάζει τις απώλειες των πτερυγίων και το περιθώριο ευστάθειας ενός συμπιεστή. Μικρό AR σημαίνει μεγάλο μήκος χορδής και άρα πιθανότητα αύξησης του πάχους των οριακών στρωμάτων. Ωστόσο μεγάλες τιμές του συντελεστή οδηγούν σε σμίκρυνση του περιθωρίου ευστάθειας του συμπιεστή.

2.3.5 Στερεότητα Πτερυγίου

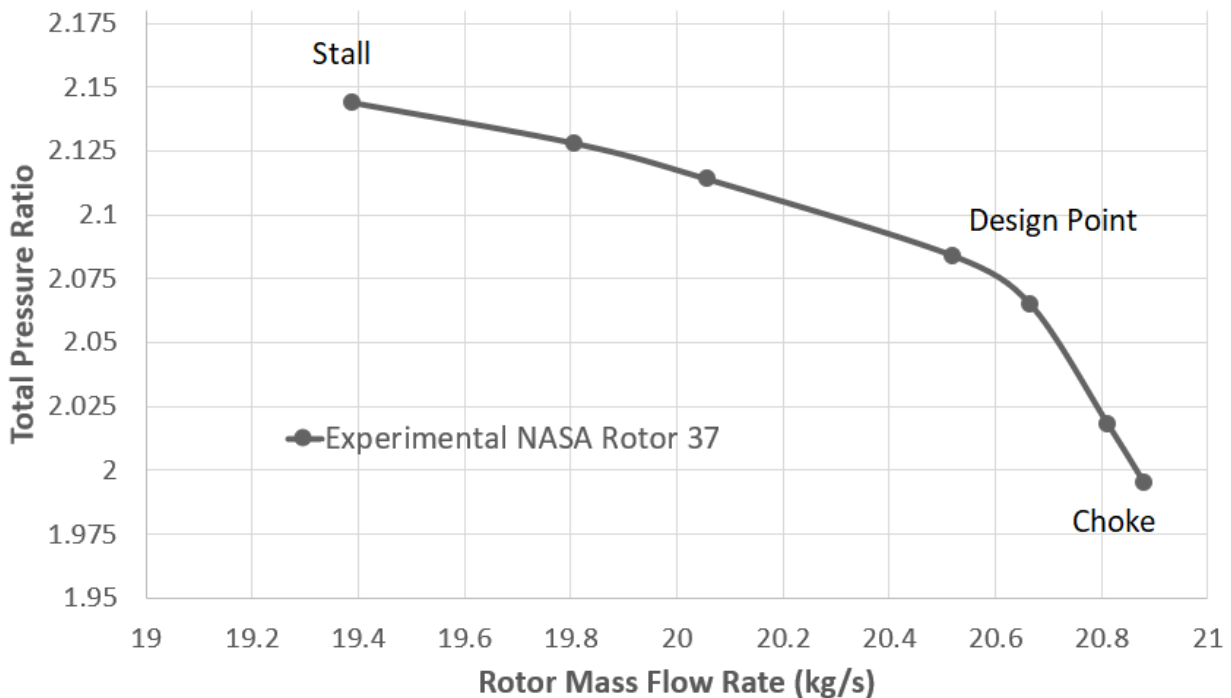
Η στερεότητα ορίζεται ως ο λόγος της χορδής ενός πτερυγίου προς την ακτίνα του ρότορα στο ύψος όπου μετράται η χορδή.

$$\sigma = \frac{C}{S} \quad 2.27$$

Η στερεότητα είναι σημαντικός παράγοντας κατά την σχεδίαση ενός συμπιεστή και σε συνδυασμό με το διάταμα καθορίζουν τον βασικό σχεδιασμό ενός δρομέα. Μια παραμετρική μελέτη των Britsch et al [14] έδειξε ότι η αύξηση της στερεότητας με σταθερό διάταμα οδηγεί σε μεγαλύτερο αριθμό πτερυγίων και χαμηλότερη παροχή μάζας. Ωστόσο, μικρότερη σ έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης στις συνθήκες σχεδιασμού.

2.3.6 Χαρακτηριστική Καμπύλη

Η χαρακτηριστική καμπύλη μιας βαθμίδας, προσδιορίζει την σχέση μεταξύ του λόγου πιέσεων και της παροχής μάζας σε διαφορετικές συνθήκες περιστροφικής ταχύτητας. Για την σχεδίαση της χαρακτηριστικής απαιτείται η μεταβολή της πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή ή της παροχής στην είσοδο με την χρήση βαλβίδας (Throttle). Με την αποτύπωση της μπορούν να βρεθούν οι περιοχές ασταθής λειτουργίας και να προσδιοριστεί το περιθώριο ευστάθειας του συμπιεστή. Η αστάθεια μπορεί να οφείλεται σε συνθήκες πάλμωσης ή ολικής αστάθειας (Surge) και σε συνθήκες αποκόλλησης (Stall).



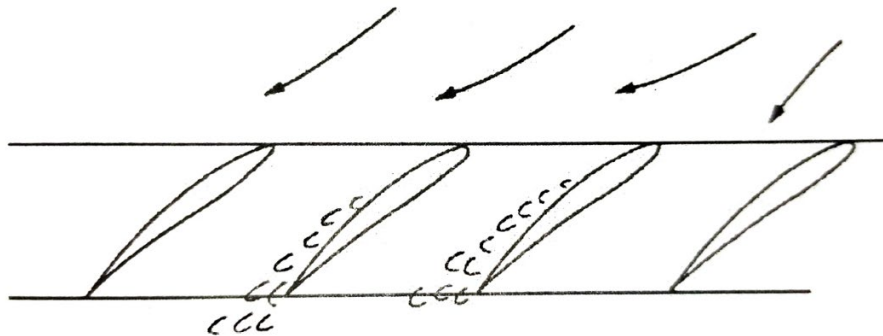
Σχήμα 3. Πειραματική Χαρακτηριστική Καμπύλη NASA Rotor 37 στο 100% της περιστροφικής ταχύτητας

Το περιθώριο ευστάθειας ΠΕ (Stall Margin) χαρακτηρίζει το εύρος της ασφαλούς λειτουργίας ενός συμπιεστή καθώς απομακρύνεται από το σημείο σχεδιασμού και είναι απαραίτητο για τον σχεδιασμό ενός αεροστροβίλου. Κατά τη λειτουργία ενός αεροστροβίλου εμφανίζονται φάσεις επιτάχυνσης, επιβράδυνσης και ρελαντί, όπου ο συμπιεστής δεν λειτουργεί κοντά στο σημείο σχεδιασμού του. Εάν το ΠΕ είναι περιορισμένο τότε ο συμπιεστής μπορεί να οδηγηθεί εύκολα σε συνθήκες αστάθειας (Surge) όπου προκαλούνται καταστροφικά φαινόμενα ταλάντωσης στο εσωτερικό του κινητήρα και είναι επικίνδυνο για την ασφάλεια της πτήσης ενός αεροσκάφους. Για τον υπολογισμό του, χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$ΠΕ = \left[\frac{\left(\frac{P3}{P1}\right)_{STALL} * \dot{m}_{REF}}{\left(\frac{P3}{P1}\right)_{REF} * \dot{m}_{STALL}} - 1 \right] * 100 \quad 2.28$$

Οι συνθήκες REF αντιπροσωπεύουν την συνθήκη σχεδιασμού και επιλέγονται κατά τους υπολογισμούς από το σημείο με τον μέγιστο βαθμό απόδοσης.

Η αποκόλληση προκαλείται από την πτώση της παροχής μάζας, λόγω της αύξησης πίεσης κατάντη του συμπιεστή. Για έναν δεδομένο αριθμό στροφών, καθώς η παροχή μάζας μειώνεται, η γωνία πρόσπτωσης της ροής στο πτερόγιο αυξάνεται με αποτέλεσμα τα πτερόγια να οδηγούνται σε συνθήκες αποκόλλησης της ροής. Η περιγραφή του φαινομένου αποκόλλησης δόθηκε αρχικά από τους Emmons, Kronauer και Rocket (1959), όπου βρέθηκε ότι η αποκόλληση δεν συμβαίνει σε όλα τα πτερόγια ταυτοχρόνως, αλλά αρχικοποιείται από μεμονωμένες κυψέλες αποκόλλησης οι οποίες περιστρέφονται στο εσωτερικό του συμπιεστή. Εάν οι κυψέλες αποκόλλησης μεταδοθούν σε όλο τον δρομέα τότε εμφανίζεται ολική περιστροφική αποκόλληση (Rotating Stall).



Σχήμα 4. Μεταβολή γωνίας προσβολής από μια κυψέλη αποκόλλησης. Dixon [1]

Καθώς η ροή ενός πτερυγίου αποκολλάται, δημιουργείται μια κυψέλη αποκόλλησης η οποία εκτρέπει την ροή γύρω από το πτερόγιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Η ροή στο προπορευόμενο πτερόγιο αντιλαμβάνεται μικρότερη γωνία προσβολής, ενώ το πτερόγιο που ακολουθεί δέχεται την ροή με αυξημένη γωνία προσβολής, με αποτέλεσμα η αποκολλημένη ροή να μετακινείται από πτερόγιο σε πτερόγιο. Η φόρτωση και αποφόρτιση των πτερυγίων προκαλεί συχνότητες αντίστοιχες του αριθμού των κυψελών και της ταχύτητάς τους. Εάν οι συχνότητες πλησιάσουν τις

φυσικές συχνότητες ταλάντωσης των πτερυγίων τότε μπορεί να προκληθεί αστοχία υλικού με καταστροφικές συνέπειες για έναν συμπίεστη. Dixon [1]

Σε συνθήκες αστάθειας στον συμπίεστη μπορεί να εμφανιστούν συνθήκες αποκόλλησης (Stall) και πάλμωσης (Surge). Η διαφορά μεταξύ των συνθηκών είναι η μονιμότητα ή μη της παροχής μάζας. Σε συνθήκες πάλμωσης παρατηρείται μια αξονική ταλάντωση της παροχής μάζας, ενώ σε συνθήκες αποκόλλησης παρατηρείται μια μόνιμη πτώση της παροχής. Η πάλμωση είναι ένα φαινόμενο που αφορά όλο το σύστημα της εξαγωγής και της εισαγωγής της ροής στον συμπίεστη καθώς και στα υπόλοιπα τμήματα του κινητήρα. Η αποκόλληση παρατηρείται πριν την πάλμωση του συμπίεστη, καθώς μπορεί να λειτουργήσει σε ένα εύρος όπου η παροχή μάζας να μειώνεται με την αύξηση πίεσης να παραμένει σταθερή. Εάν η ζήτηση για αύξηση της πίεσης συνεχιστεί, δημιουργούνται έντονα ταλαντωτικά φαινόμενα αντιστροφής της ροής με αποτέλεσμα να εμφανιστεί πάλμωση.

Οι ακριβείς συνθήκες στις οποίες ένας συμπίεστης εισέρχεται σε περιστροφική αποκόλληση ή πάλμωση δεν μπορούν να προβλεφθούν με υπολογιστικές μεθόδους, αλλά μόνον προσεγγιστικά, ωστόσο οι μηχανισμοί που οδηγούν στην κατάσταση αυτή έχουν αποτυπωθεί και αναλύονται στην επόμενη ενότητα. Στην μελέτη αυτή, εντοπίζεται η θέση στην γραμμή λειτουργίας από όπου ο συμπίεστης εισέρχεται σε ασταθή λειτουργία (Stall Inception) και όχι η θέση όπου βρίσκεται σε ολική περιστροφική αποκόλληση.

Λόγω της προσομοίωσης ενός πτερυγίου από τα 36 του NASA Rotor 37, δεν μπορεί να προσομοιωθεί η μετάδοση των κυψελών αποκόλλησης μεταξύ των πτερυγίων κατά την μερική αποκόλληση του δρομέα καθώς γίνεται η παραδοχή πως όλα τα πτερύγια έχουν την ίδια ακριβώς συμπεριφορά. Επίσης οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε χρονικά μη μεταβαλλόμενο πεδίο ροής (Steady State) και για αυτό δεν έγινε αποτύπωση των έντονων ασταθειών που εξαρτώνται από τον χρόνο όταν ο συμπίεστης εισέλθει σε αποκόλληση. Το σημείο αποκόλλησης στην χαρακτηριστική αποκτάται ως η τελευταία έγκυρη λύση του συμπίεστη με την ελάχιστη παροχή μάζας. Οι συνθήκες που εξετάζονται για να προσδιοριστεί αν επήλθε αποκόλληση, σε δεδομένες οριακές συνθήκες, παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3.3 Μοντελοποίηση.

2.4 Πηγές Απωλειών Συμπίεστών

Οι απώλειες σε έναν συμπίεστη οδηγούν σε αύξηση της εντροπίας και άρα σε πτώση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης μιας βαθμίδας. Η σχεδίαση των πτερυγίων μπορεί να μετριάσει την γένεση απωλειών, αλλά η ιδανική πτερύγωση δεν μπορεί να υπάρξει στην πραγματικότητα. Τα ροϊκά φαινόμενα που προκαλούν απώλειες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε Δισδιάστατα (2D) και Τρισδιάστατα (3D). Η γένεση των δισδιάστατων απωλειών μπορεί να μοιραστεί στις κάτωθι κατηγορίες:

- Ανάπτυξη οριακών στρωμάτων στα πτερύγια
- Αποκόλληση της ροής στην ακμή φυγής

- Κρουστικά κύματα

Για την ποσοτικοποίηση των απωλειών συνήθως δεν χρησιμοποιούνται σχέσεις υπολογισμού αλλά συνοψίζονται σε πτώση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης. Τα παραπάνω φαινόμενα εμφανίζονται σε όλο το εύρος λειτουργίας του συμπιεστή αλλά σε περιορισμένο μέγεθος και δεν αλληλεπιδρούν έντονα μεταξύ τους. Η ανάπτυξη των οριακών στρωμάτων στα πτερύγια και η αποκόλληση που δημιουργείται στην ακμή φυγής είναι φαινόμενα τα οποία εξαρτώνται από την σχεδίαση της πτερυγώσης. Στο σημείο σχεδιασμού του συμπιεστή δεν είναι αναμενόμενο να εμφανιστούν οι απώλειες αυτές, εάν πρόκειται για καλά σχεδιασμένα πτερύγια. Ωστόσο κατά την μετάβαση του συμπιεστή σε συνθήκες ασταθούς λειτουργίας, τα επίπεδα διάχυσης αυξάνονται δραματικά και η ροή μπορεί να αποκολληθεί με αποτέλεσμα ο συμπιεστής να μεταβεί σε κατάσταση περιστροφικής αποκόλλησης.

Οι κύριες τρισδιάστατες απώλειες σε έναν συμπιεστή κατατάσσονται σε:

- Απώλειες κελυφών
- Απώλειες διαρροών διακένου
- Απώλειες δευτερευουσών ροών

Οι απώλειες στα κελύφη προκαλούνται από τις αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις μεταξύ της κύριας ροής και του σταθερού μη περιστρεφόμενου κελύφους στο οποίο το πάχος των οριακών στρωμάτων είναι μεγαλύτερο. Από το οριακό στρώμα του κελύφους επηρεάζεται και η κορυφή του πτερυγίου η οποία βλέπει ρευστό χαμηλότερης ταχύτητας και άρα διαφορετικής γωνίας πρόσπτωσης, με αποτέλεσμα την παραγωγή απωλειών.

Η διαρροή στο ακτινικό διάκενο αλληλεπιδρά με την ροή των κελυφών και τη ροή στα περάσματα μεταξύ των πτερυγίων, δημιουργώντας περισσότερες απώλειες λόγω ανάμειξης και διάτμησης. Η διαρροή προκαλεί επίσης μείωση της ενεργού διατομής (blockage), μειώνοντας την ολική αναρροφητική ικανότητα των βαθμίδων του συμπιεστή και, κατά συνέπεια, του ευσταθούς εύρους λειτουργίας. Στόχος πάντοτε είναι η μείωση του ακτινικού διακένου για την βελτίωση του περιθωρίου ευστάθειας, ωστόσο το ελάχιστο διάκενο προσδιορίζεται από τις κατασκευαστικές και μηχανικές απαιτήσεις του πτερυγίου. Στην παρούσα μελέτη, το ακτινικό διάκενο είναι 0,4 mm, με βάση τον Suder [2] ο οποίος προτείνει ακτινικό διάκενο 0.5% της χορδής στην κορυφή του πτερυγίου.

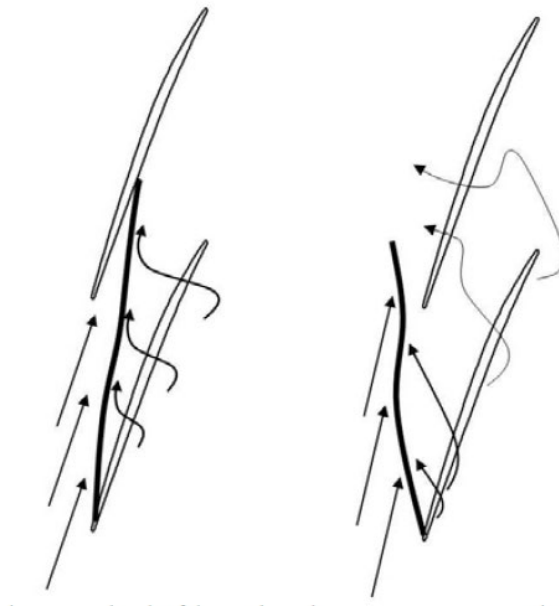
Η συνεισφορά των δισδιάστατων και τρισδιάστατων φαινομένων είναι ίση και συνήθως δεν γίνεται κάποια διάκριση μεταξύ των δύο καθώς τα φαινόμενα αυτά δεν εμφανίζονται μεμονωμένα εντός του συμπιεστή, αλλά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, αυξάνοντας το μέγεθος των συνολικών απωλειών που οδηγούν στην περιστροφική αποκόλληση του συμπιεστή. Οι πηγές γένεσης απωλειών μοιράζονται σε τρεις κατηγορίες που αναλύονται εκτενέστερα στις επόμενες υποενότητες.

- Δίνες Ακροπτερυγίου

- Απώλειες κρουστικών κυμάτων
- Έμφραξη της ροής

2.4.1 Δίνη Ακροπτερυγίου

Οι δίνες ακροπτερυγίου, σχηματίζονται από την ακμή προσβολής στην κορυφή του πτερυγίου, στο ακτινικό διάκενο. Οφείλονται στην διαφορά πίεσης μεταξύ της πλευράς αναρρόφησης και κατάθλιψης του πτερυγίου καθώς περιστρέφεται με αποτέλεσμα, η ροή διαπερνά από το ακτινικό διάκενο και σχηματίζεται δίνη. Η δέσμη της ροής ακτινικού διακένου, αναπτύσσει διατμητικές δυνάμεις με την κύρια ροή, με αποτέλεσμα την σκέδαση ενέργειας και την παραγωγή εντροπίας. Κατά την μετάβαση σε συνθήκες λειτουργίας με υψηλότερο λόγο πιέσεων, η διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών του πτερυγίου είναι υψηλότερη με αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους της δίνης.



Σχήμα 5. Αναπαράσταση δίνης ακροπτερυγίου. Πηγή: Dixon [1]

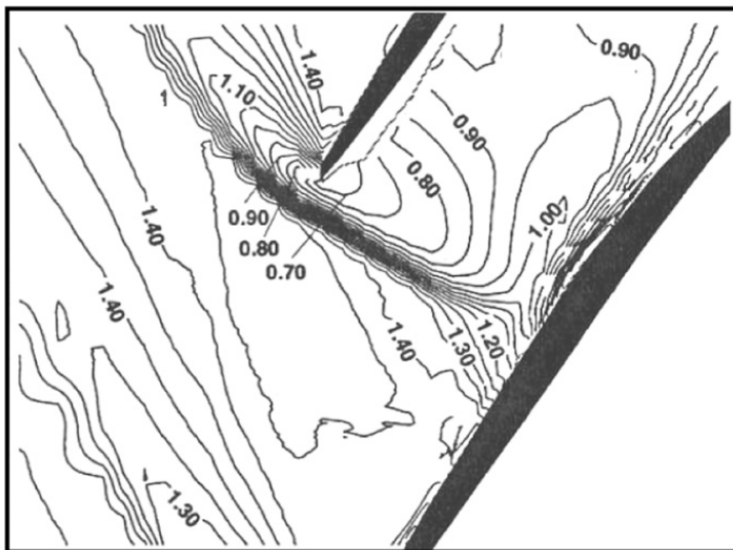
Η κατεύθυνση της ορμής στην δευτερεύουσα ροή που προκαλείται στο ακτινικό διάκενο, είναι κάθετη στην σχετική ταχύτητα του πτερυγίου και αντίθετη σε σχέση με την κύρια ροή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6. Είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση του ακτινικού διακένου ώστε να περιοριστούν τα φαινόμενα που προκαλούνται από την διαρροή, ωστόσο κατά την λειτουργία του συμπιεστή το πτερύγιο διαστέλλεται λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του και δέχεται εφελκυστικές τάσεις, λόγω περιστροφής, με κίνδυνο την επαφή του με το κέλυφος. Για τον λόγο αυτό, οι κατασκευαστές επιλέγουν το ελάχιστο δυνατό ακτινικό διάκενο σύμφωνα με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού ώστε να σιγουρευτεί ότι υπό όλες τις συνθήκες λειτουργίας, το πτερύγιο δεν θα έρθει σε επαφή με το κέλυφος του συμπιεστή.

2.4.2 Κρουστικά Κύματα

Η εμφάνιση κρουστικού κύματος Mach παρατηρείται σε διηχητικές και υπερηχητικές συνθήκες στην είσοδο του συμπιεστή. Οι συμπιεστές που λειτουργούν στην διηχητική περιοχή με αριθμούς Mach εισόδου 0.7-0.85 εμφανίζουν κύμα κρούσης λόγω του κρίσιμου αριθμού Mach του πτερυγίου στην πλευρά υποπίεσης. Στην περίπτωση του NASA Rotor 37, η λειτουργία του συμπιεστή είναι σε υπερηχητική περιοχή με σχετικούς αριθμούς Mach στην είσοδο του πτερυγίου > 1 κατά μήκος του εκπετάσματος. Το κρουστικό κύμα σχηματίζεται μπροστά από την ακμή προσβολής και συγκρούεται με την πλευρά υποπίεσης του προπορευόμενου γειτονικού πτερυγίου, αυξάνοντας το πάχος των οριακών στρωμάτων, λόγω της τοπικής αύξησης πίεσης κατάντη του κύματος. Η αλληλεπίδραση αυτή είναι πηγή γένεσης εντροπίας και προκαλεί αποκολλήσεις των οριακών στρωμάτων. Ο σχηματισμός των κρουστικών κυμάτων σε μια βαθμίδα πτερυγίων αποτυπώνεται στο Σχήμα 6.

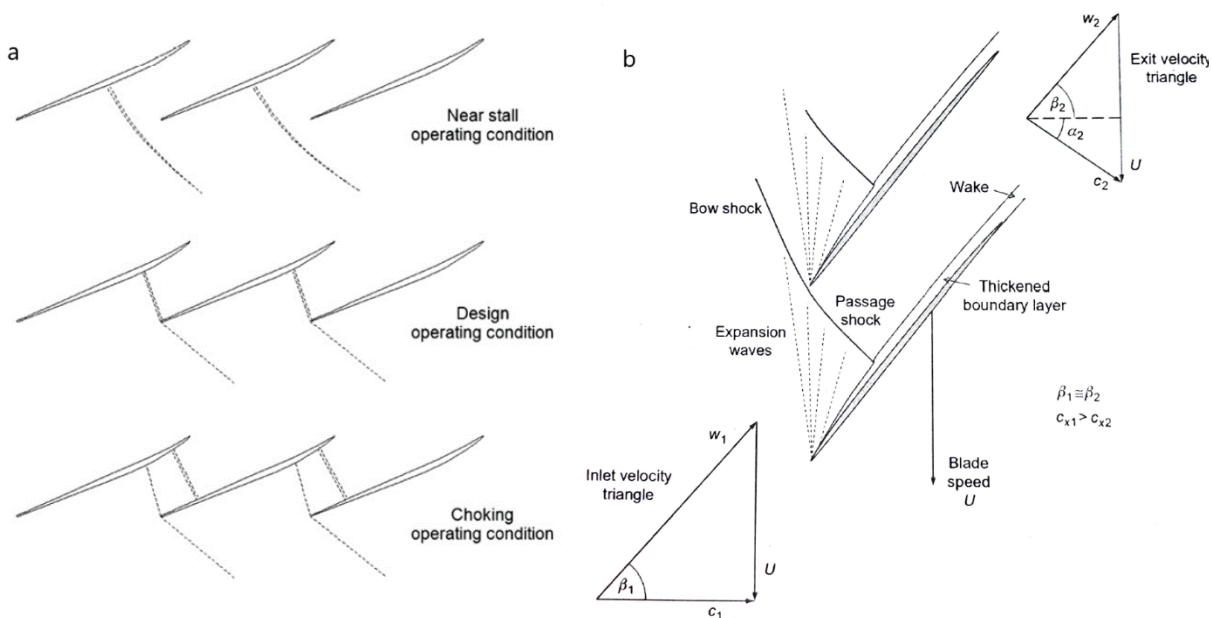
Σύμφωνα με τον Anderson [15], η αύξηση της εντροπίας διαμέσω ενός κρουστικού κύματος οφείλεται στην απότομη μεταβολή των συνθηκών της ροής σε μικρό χώρο και χρόνο καθώς το πάχος του κύματος είναι περίπου $1 * 10^{-4}$ mm. Λόγω του μικρού πάχους, προκαλείται υψηλή κλίση πίεσης και θερμοκρασίας εντός του κύματος, όπου τα φαινόμενα τύρβης λόγω ιξώδους είναι αρκετά έντονα προκαλώντας γένεση εντροπίας. Ο υπολογισμός της απόλυτης αύξησης εντροπίας από τις συνήθεις σχέσεις των κρουστικών κυμάτων και του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής περιγράφει την σκέδαση της ενέργειας λόγω τύρβης και θερμικής συναγωγής εντός του κύματος, όπως στην ακόλουθη σχέση:

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad 2.16$$



Σχήμα 6. Σχετικές ταχύτητες Mach στην ακμή προσβολής. Πηγή: Suder [2]

Τα κρουστικά κύματα που εμφανίζονται αλλάζουν θέση σε σχέση με τις συνθήκες λειτουργίας του δρομέα. Στο Σχήμα 7 (a) φαίνεται η διαφορά ανάμεσα σε συνθήκες σχεδιασμού, αποκόλλησης και στραγγαλισμού για μια σειρά πτερυγίων. Όταν ο δρομέας οδηγείται σε συνθήκες αποκόλλησης, το κύμα εμφανίζεται σε ένα σημείο ανάντη του πτερυγίου, καθώς η παροχή μάζας μειώνεται και η γωνία προσβολής της ροής με το πτερόγιο αυξάνεται. Στην περίπτωση των συνθηκών στραγγαλισμού, το κύμα κινείται κατάντη και μπορεί να σχηματιστεί δευτερεύον κύμα στο κανάλι μεταξύ των πτερυγίων [5].



Σχήμα 7. (a) Θέση Κρουστικού κύματος σε σχέση με τις συνθήκες λειτουργίας, Πηγή: Biollo, Benini [5]
(b) Τρίγωνα ταχυτήτων υπερηχητικής πτερόγωσης Πηγή: Dixon [1]

Παρά την δημιουργία απωλειών, η αύξηση πίεσης διαμέσω ενός κρουστικού κύματος είναι μεγάλη, ενώ οι απώλειες είναι σχετικά μικρές για σχετικούς αριθμούς Mach ≤ 1.5 . Η ανάπτυξη του κρουστικού κύματος είναι ένας αποδοτικός τρόπος αύξησης πίεσης, εάν είναι ελεγχόμενη η αποκόλληση της ροής, συμβάλλοντας στους υψηλούς βαθμούς απόδοσης των σύγχρονων αεροστροβίλων. Η πτώση της ταχύτητας στο σχετικό (W) και το απόλυτο (C) σύστημα αναφοράς λόγω του κρουστικού κύματος, μεταφράζεται σε στροφή της ροής, καθώς αυξάνεται η γωνία απόλυτης ροής στην έξοδο (α_2) όπως φαίνεται στο Σχήμα 7(b). Σε υποηχητικούς συμπιεστές, η στροφή της ροής οφείλεται μόνον στην συστροφή του πτερυγίου, ενώ σε μια υπερηχητική πτερυγωση στο κρουστικό κύμα και στην συστροφή.

Η εμφάνιση κρουστικού κύματος είναι επιθυμητή σε έναν διηχητικό συμπιεστή αρκεί να περιορίζονται τα φαινόμενα απωλειών με την χρήση κατάλληλα σχεδιασμένων αεροτομών. Τα πτερύγια συμπιεστών υψηλών αριθμών Mach, είναι λεπτόπαχα με αιχμηρή ακμή προσβολής και λιγιστή κυρτότητα η οποία εμφανίζεται μετά το μέσον της χορδής του πτερυγίου. Κατά αυτόν τον τρόπο μεγιστοποιείται η επιφάνεια του καναλιού ροής μεταξύ των πτερυγίων, ώστε να επιτευχθεί μέγιστη παροχή μάζας και να αποφευχθεί η εμφάνιση κύματος στο πέρασμα μεταξύ δύο διαδοχικών πτερυγίων (Throat Area) [1].

2.4.3 Μείωση της Ενεργού Διατομής

Η έμφραξη της ροής διαμέσω του συμπιεστή (Blockage), οφείλεται στην μείωση της ενεργού επιφάνειας διατομής της ροής του ρευστού λόγω της αύξησης του πάχους των οριακών στρωμάτων στα τοιχώματα του κελύφους, της πλήμνης και του πτερυγίου. Το πάχος των οριακών στρωμάτων αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης στην έξοδο του συμπιεστή λόγω της αντίθετης κλίσης πίεσης [16]. Στους πολυβάθμιους συμπιεστές, η εμφάνιση έμφραξης είναι εντονότερη στις κατάντη βαθμίδες του συμπιεστή λόγω της δυσμενέστερης κλίσης πίεσης και για αυτό συμβάλλει περισσότερο στην γένεση απωλειών.

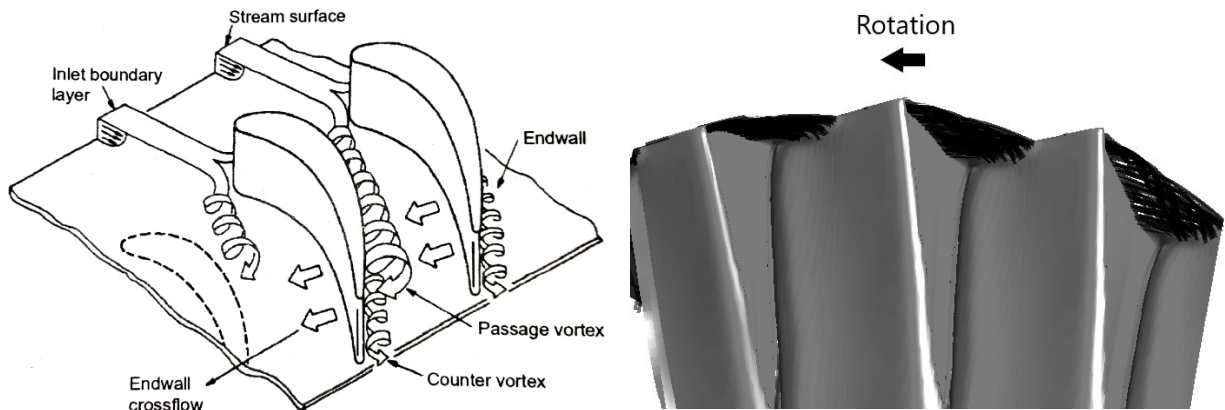
Λόγω της μειωμένης ταχύτητας της ροής εντός των οριακών στρωμάτων, η γωνία προσβολής της ροής σε σχέση με το πτερύγιο αυξάνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση του πτερυγίου και να προκαλούνται αποκολλήσεις στην πλευρά υποπίεσης. Η κατάσταση αυτή εμφανίζεται κοντά στην πλήμνη και το κέλυφος του πτερυγίου. Οι Xinqian, Heli [3] αποτύπωσαν το μέγεθος της έμφραξης (B) ως τον λόγο της διαθέσιμης φυσικής επιφάνειας διατομής A_{phy} με την ενεργό επιφάνεια A_{eff} .

$$B = 1 - \frac{A_{eff}}{A_{phy}} \quad 2.17$$

Στην ενεργό επιφάνεια διατομής η αξονική ταχύτητα του ρευστού ισούται με εκείνη της κύριας ροής και είναι κοντά στα επίπεδα της μέγιστης ταχύτητας.

Η εμφάνιση της έμφραξης δεν οφείλεται μόνο στα οριακά στρώματα αλλά και σε δευτερεύουσες ροές που εμφανίζονται λόγω των τρισδιάστατων φαινομένων της ροής όπως είναι οι δίνες και τα κρουστικά κύματα. Η δίνη από την κορυφή του περυγίου προκαλεί αύξηση της διάχυσης και μείωση στην αξονική ταχύτητα λόγω της περιστροφής της ροής, ενώ τα κρουστικά κύματα αυξάνουν το πάχος των οριακών στρωμάτων λόγω της απότομης αύξησης πίεσης και πτώσης της ταχύτητας κατάντη του κύματος. Παράλληλα, εμφάνιση δίνης λόγω αποκολλήσεων συναντάται και στον πόδα του περυγίου, όπου η έντασή της αυξάνεται με την μείωση της παροχής. Τα φαινόμενα αυτά αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, όπως γίνεται κατά την σύγκρουση της δίνης ακροπερυγίου με το κρουστικό κύμα, προκαλώντας πτώση της ταχύτητας και γένεση εντροπίας.

Στην αριστερή εικόνα στο Σχήμα 8 αποτυπώνεται η εμφάνιση δευτερογενούς ροής κοντά στην πλήμνη όπως συναντάται στο σύγγραμμα του Dixon [1], ενώ δεξιά παρουσιάζεται η ισοεπιφάνεια όπου $Mach = 1$ στην ακμή προσβολής μιας σειράς περυγίων και η αλληλεπίδρασή της με την δίνη ακροπερυγίου. Είναι εμφανές ότι σε μια περιοχή 40-60% της χορδής τα δύο φαινόμενα συγκρούονται προκαλώντας απώλειες. Οι Suder, Celestina [17] πραγματοποίησαν μια πειραματική και υπολογιστική μελέτη της ροής διακένου για τον Rotor 37, όπου παρατηρήθηκε ότι καθώς διέρχεται η δίνη από το κρουστικό κύμα, προκαλείται διάχυση της ροής λόγω της αύξησης πίεσης εντός του κύματος.



Σχήμα 8. Δευτερεύουσα Ροή σε Κανάλι Dixon [1] (αριστερά). Αλληλεπίδραση Δίνης με ισοεπιφάνεια $Mach=1$ στην ακμή προσβολής σειράς περυγίων. (δεξιά)

Οι μελετητές κατέληξαν ότι η αλληλεπίδραση δίνης-κύματος είναι σημαντική πηγή έμφραξης της ροής καθώς μειώνεται σημαντικά ο σχετικός αριθμός Mach και άρα προκαλείται τοπικά πτώση της ταχύτητας του ρευστού με αρνητικές συνέπειες στην αύξηση της ολικής πίεσης.

2.5 Μηχανισμοί Αντιμετώπισης Απωλειών

Τα φαινόμενα απωλειών που αναλύθηκαν παραπάνω απασχολούν τους μελετητές από τα πρώτα χρόνια μελέτης περυγώσεων συμπίεστων και στροβίλων. Η αύξηση του βαθμού απόδοσης και του λόγου πιέσεων είναι διαρκής στόχοι των σχεδιαστών καθώς προσφέρουν πολλά οφέλη αλλά κυρίως οδηγούν σε μείωση του μεγέθους ενός κινητήρα και κατά συνέπεια στον περιορισμό της

κατανάλωσης καυσίμου του αεροσκάφους και της παραγωγής ρύπων. Το περιθώριο ευστάθειας του συμπίεστη είναι σημαντικός παράγοντας της ασφαλούς λειτουργίας, ειδικά όταν πρόκειται για αεροπορικές εφαρμογές, καθώς ο συμπίεστης είναι πιθανότερο να οδηγηθεί σε ασταθή λειτουργία σε σχέση με τα υπόλοιπα τμήματα του κινητήρα. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά οι κύριοι μηχανισμοί βελτίωσης του εύρους λειτουργίας των διηχητικών συμπίεστών.

2.5.1 Σχήμα Διατομής Πτερυγίων

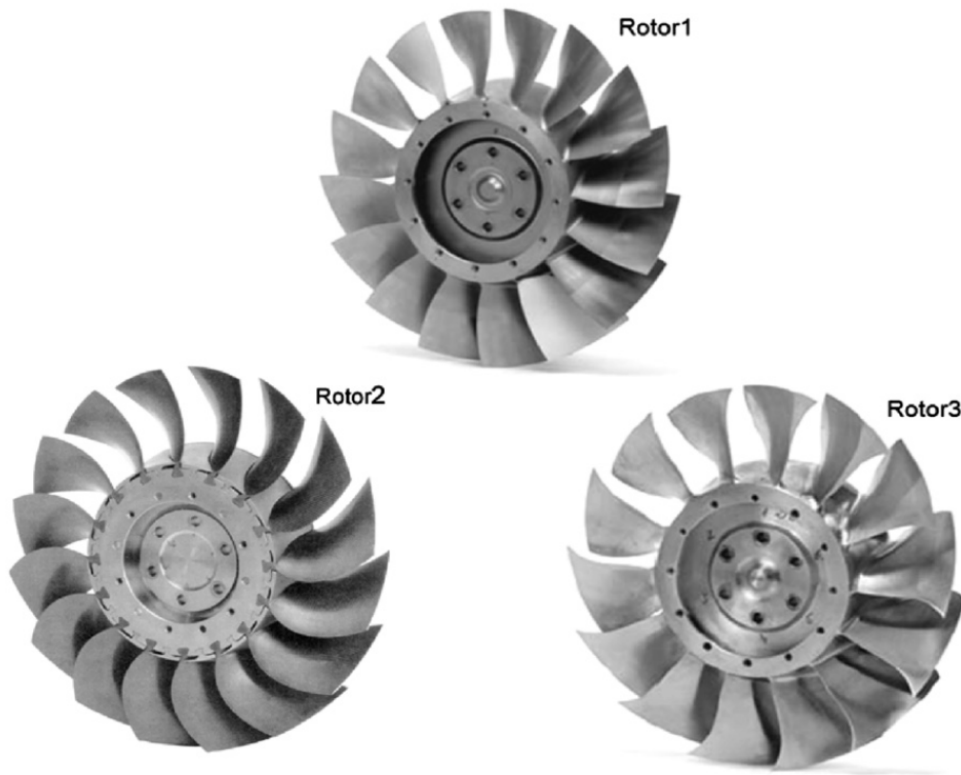
Για σχετικές ταχύτητες ροής με αριθμό Mach μεγαλύτερο του 1.3, μια πολύ σημαντική παράμετρος είναι η μείωση του σχετικού αριθμού Mach στην ακμή προσβολής του πτερυγίου, καθώς απομακρύνεται το κρουστικό κύμα από την ακμή προσβολής και μειώνεται η αλληλεπίδραση του κρουστικού κύματος με το οριακό στρώμα του γειτονικού πτερυγίου. Οι Wadia, Law[9] πραγματοποίησαν μια υπολογιστική και πειραματική διερεύνηση της θέσης του μέγιστου πάχους στο 40% και 55% της χορδής για έναν διηχητικό συμπίεστη, όπου αναδείχθηκε ότι η θέση του πάχους κοντά στην ακμή φυγής οδηγεί σε μείωση των απωλειών λόγω κρουστικού κύματος. Με την μετακίνηση του πάχους κατάντη, αποφορτίζεται η ακμή προσβολής του πτερυγίου.

Σε μια παραμετρική και υπολογιστική ανάλυση των Suder et all [27], χρησιμοποιήθηκε ο NASA Rotor 37 για την μελέτη της επίδρασης του πάχους στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του δρομέα. Ο Rotor 37 έχει μέγιστο πάχος 8% της χορδής στον πόδα και 3.2% στην κορυφή του πτερυγίου. Οι μελετητές χρησιμοποιώντας μια λεπτή επίστρωση μογιάς πάχους 0.025 mm σε ολόκληρη την επιφάνεια του πτερυγίου προκάλεσαν αύξηση του πάχους στην ακμή προσβολής κατά 10% στη βάση, 20% στην κορυφή του πτερυγίου και 1-2% στο συνολικό πάχος. Στο 100% της ταχύτητας περιστροφής ο βαθμός απόδοσης μειώθηκε κατά 2.5% στην περίπτωση μιας λείας επίστρωσης, ενώ με την αύξηση της τραχύτητας η πτώση έφτασε έως και 6%. Η αύξηση πίεσης σημείωσε πτώση 4% για την λεία επίστρωση και 9% για την τραχεία, στις συνθήκες σχεδιασμού. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στο αυξημένο πάχος του οριακού στρώματος στην πλευρά αναρρόφησης το οποίο αυξάνεται σημαντικά καθώς διαπερνά το κρουστικό κύμα του γειτονικού πτερυγίου προκαλώντας έμφραξη της ροής.

2.5.2 Τρισδιάστατη Σχεδίαση Πτερυγίων

Η τρισδιάστατη σχεδίαση πτερυγίων εφαρμόζεται σε όλο το εύρος των υπερηχητικών συμπίεστών καθώς μπορεί να μετριάσει τα φαινόμενα δευτερευουσών ροών και κρουστικών κυμάτων. Η γωνία σάρωσης των πτερυγίων (Sweep) μεταβάλλει την θέση του κρουστικού κύματος σε σχέση με την ακμή προσβολής και μειώνει την τοπική φόρτιση του πτερυγίου. Η ύπαρξη οπισθοκλινών (Back-Swept) πτερυγίων διηχητικών συμπίεστών μειώνει το εύρος ευσταθούς λειτουργίας, ενώ τα εμπροσθοκλινή πτερύγια έχουν αντίθετη συμπεριφορά. Οι σύγχρονοι στροβιλοαντιδραστήρες σχεδιάζονται με πτερύγια τα οποία έχουν ταυτόχρονα εμπροσθοκλινή και οπισθοκλινή σχεδίαση,

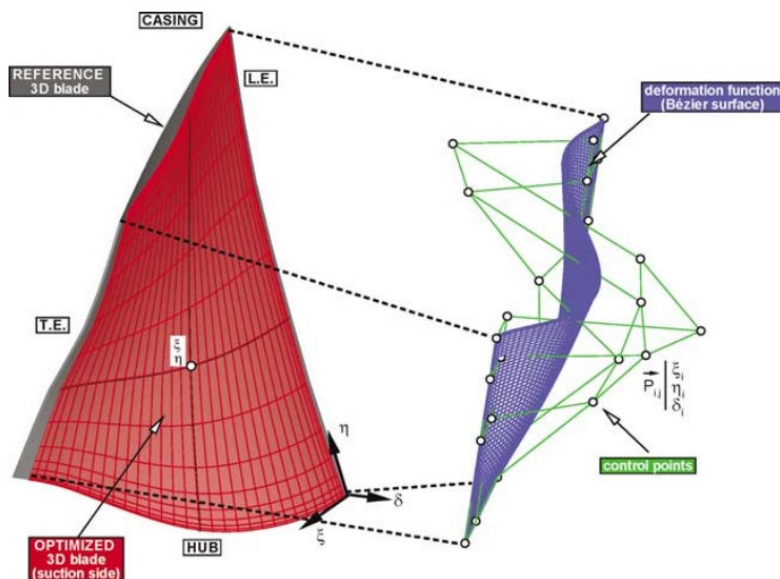
σε διαφορετικές ακτινικές θέσεις [1]. Επίσης η γωνία κλίσης των πτερυγίων σε σχέση με την ακτινική κατεύθυνση (Lean), κυρίως στα πτερύγια του στάτορα, επιδρά στην κλίση της πίεσης προς την ακτινική συνιστώσα με αποτέλεσμα να αντιμετωπίζονται τρισδιάστατα ακτινικά φαινόμενα ροής προς το κέλυφος. Οι παραπάνω παράμετροι μπορούν να συνδυαστούν σε μια υπολογιστική σχεδίαση ώστε να προκύψει μια βελτιστοποιημένη μορφή ενός δρομέα, όπως φαίνεται στις επόμενες εικόνες.



Σχήμα 9. Αναπαράσταση τρισδιάστατων πτερυγώσεων. Πηγή Biollo, Benini [5]

Ο Rotor 3 παρουσίασε βελτιωμένο βαθμό απόδοσης κατά 1.5% στις συνθήκες σχεδιασμού σε σχέση με τον Rotor 1. Τα πτερύγια του Rotor 3 είναι οπισθοκλινή από τον πόδα έως το μέσον του πτερυγίου και εμπροσθοκλινή στην κορυφή με αυξημένο μήκος χορδής.

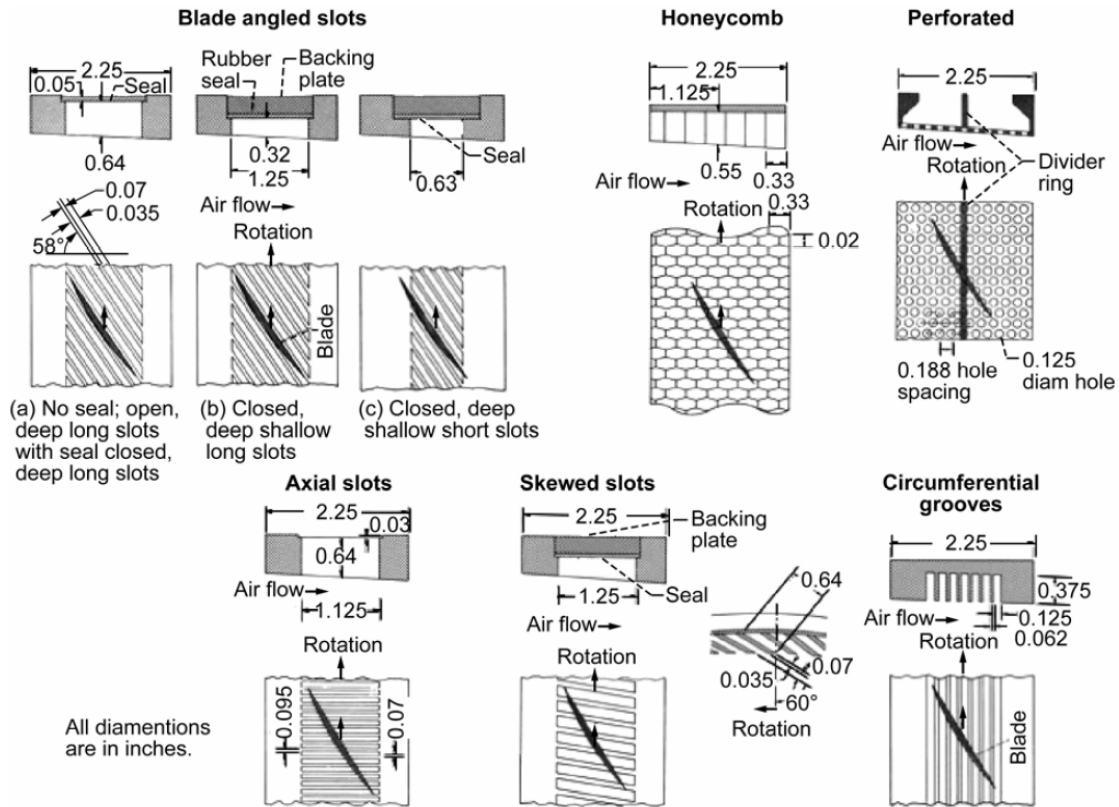
Η χρήση υπολογιστικών εργαλείων και μεθόδων βελτιστοποίησης προσφέρει βελτίωση στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των σύγχρονων συμπιεστών. Σε μια υπολογιστική μελέτη βελτιστοποίησης των Burguburu, Pape [28] ενός διηχητικού συμπιεστή, επιτεύχθηκε μείωση του σχετικού αριθμού Mach στην είσοδο της πτερυγώσης από 1.5 στο 1.3 και άρα πτώση της έντασης του κρουστικού κύματος με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης κατά 2.4%.



Εικόνα 2. Τρισδιάστατη Βελτιστοποίηση περυγίου. Πηγή: Burguburu, Pape [28]

2.5.3 Γεωμετρικές Τροποποιήσεις Κελύφους

Οι τροποποιήσεις που πραγματοποιούνται αφορούν κοιλότητες που εδράζονται στο κέλυφος των συμπιεστών ώστε να αντιμετωπίζονται τα τρισδιάστατα φαινόμενα ροής που προκαλούνται όταν ένας συμπιεστής λειτουργεί κοντά σε συνθήκες πάλμωσης ή αποκόλλησης. Χαρακτηρίζονται ως συστήματα παθητικού ελέγχου των οριακών στρωμάτων του κελύφους καθώς δεν απαιτείται κάποια εντολή για την λειτουργία τους αλλά λειτουργούν μέσω των τρισδιάστατων ροϊκών φαινομένων όταν ο δρομέας λειτουργεί σε περιοχές μακριά από το σημείο σχεδιασμού. Οι πρώτες έρευνες σχετικά με τα οριακά στρώματα στην κορυφή του περυγίου και τον τρόπο που επηρεάζουν την ευστάθεια του συμπιεστή πραγματοποιήθηκαν στο ερευνητικό κέντρο NASA Lewis Research Center στο Ohio της Αμερικής την δεκαετία του 1960. Μελετήθηκαν διάφορες γεωμετρίες κελύφους όπως, αξονικές και περιφερειακές αυλακώσεις, κυψελοειδή κέλυφη και απομάστευση ρευστού. Παρότι δεν ήταν ξεκάθαροι οι μηχανισμοί που συνέβαλαν στην καθυστέρηση της αποκόλλησης, ήταν προφανής η θετική επίδραση που είχαν οι γεωμετρίες στην λειτουργία του συμπιεστή [12].



Σχήμα 10. Παραδείγματα γεωμετριών κελύφους που μελετήθηκαν κατά την δεκαετία του 1970.
Πηγή: Hathaway [12]

Περιφερειακές Αυλακώσεις

Οι περιφερειακές αυλακώσεις (Circumferential Grooves) έχουν δείξει ότι μπορούν να αυξήσουν σημαντικά το περιθώριο ευστάθειας, με βελτίωση που μπορεί να φτάσει έως και το 50% σε κάποιες περιπτώσεις χωρίς να προκαλείται υψηλή πτώση του βαθμού απόδοσης. Η εισαγωγή αυλακώσεων επηρεάζει το πεδίο ροής στην κορυφή του πτερυγίου καθώς βοηθά στην ευθυγράμμιση της δίνης ακροπτερυγίου ώστε να απομακρυνθεί από το γειτονικό πτερύγιο και στην αποφόρτιση της κορυφής με την μεταφορά ορμής ρευστού μέσω της αυλάκωσης προς την πλευρά πίεσης. Οι μηχανισμοί αυτοί αναλύονται αναλυτικότερα στην ενότητα 5. Αποτελέσματα. Στα αρνητικά των γεωμετριών κελύφους περιλαμβάνονται οι απαιτήσεις σε εύρεση χώρου στο κέλυφος για την τοποθέτησή τους και η αύξηση του βάρους που προκαλείται στο κέλυφος, ενώ παρατηρείται συνήθως πτώση του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή όταν λειτουργεί στις συνθήκες σχεδιασμού.

Αξονικές Αυλακώσεις

Οι αυλακώσεις τοποθετούνται στο κέλυφος έχοντας αξονική κατεύθυνση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10 (Axial Slots) και μπορούν να είναι τοποθετημένες σε κάποια γωνία σε σχέση με τον

άξονα περιστροφής (Skewed Slots). Οι Amin et all [16] διεξήγαγαν μια παραμετρική μελέτη σχετικά με την επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αξονικών αυλακώσεων στην αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας του αξονικού συμπιεστή NASA 65 series, όπου η υψηλότερη αύξηση κατά 19.3% εμφανίζεται για αυλακώσεις βάθους 11% της χορδής και γωνίας 60°. Η ροή στην κορυφή του πτερυγίου οδηγείται από την πλευρά κατάθλιψης στην πλευρά αναρρόφησης μέσω της αυλάκωσης με αποτέλεσμα να μεταδίδεται ορμή στην αποκολλημένη ροή χαμηλής ενέργειας. Η βελτίωση που προσφέρουν οι αξονικές αυλακώσεις στο περιθώριο ευστάθειας είναι αντίστοιχη με τις περιφερειακές ωστόσο διαφορές μπορεί να εντοπιστούν ανάλογα με το είδος και την εφαρμογή του συμπιεστή στον οποίο εισάγονται.

Κυψελοειδές Κέλυφος

Τα κυψελοειδή κελύφη (Honeycomb, Perforated) είναι από τις πρώτες γεωμετρίες που μελετήθηκαν με στόχο την επέκταση της ευστάθειας των συμπιεστών. Φάνηκε πως είχαν μειωμένη απόδοση σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις κελύφους, ωστόσο χρησιμοποιήθηκαν ως διατάξεις απομάστευσης ρευστού χαμηλής ορμής ώστε να εγχυθεί σε κάποια θέση με την κατάλληλη ταχύτητα και κατεύθυνση.

Έγχυση Ροής (Bleed flow Injection)

Η έγχυση ρευστού (injection) κοντά στην ακμή προσβολής του πτερυγίου από διατάξεις τοποθετημένες στο κέλυφος έχει αποδειχτεί προκαλεί αποφόρτιση στην κορυφή του πτερυγίου καθώς μειώνεται η γωνία προσβολής του ρευστού από την αύξηση της παροχής μάζας λόγω της έγχυσης. Μέσω πειραματικής διάταξης φάνηκε ότι στο 70% του εύρους λειτουργίας η έγχυση ροής στο 1% της συνολικής παροχής, μπορεί να βελτιώσει το περιθώριο ευστάθειας κατά 30% [5]. Η απόσταξη ροής (Bleeding) πραγματοποιείται από περιοχές υψηλής πίεσης, όπως είναι το κέλυφος του πτερυγίου, προς περιοχές χαμηλότερης και μπορεί να αποτελεί είτε ένα παθητικό σύστημα ή να ενεργοποιείται με εντολή του χειριστή.

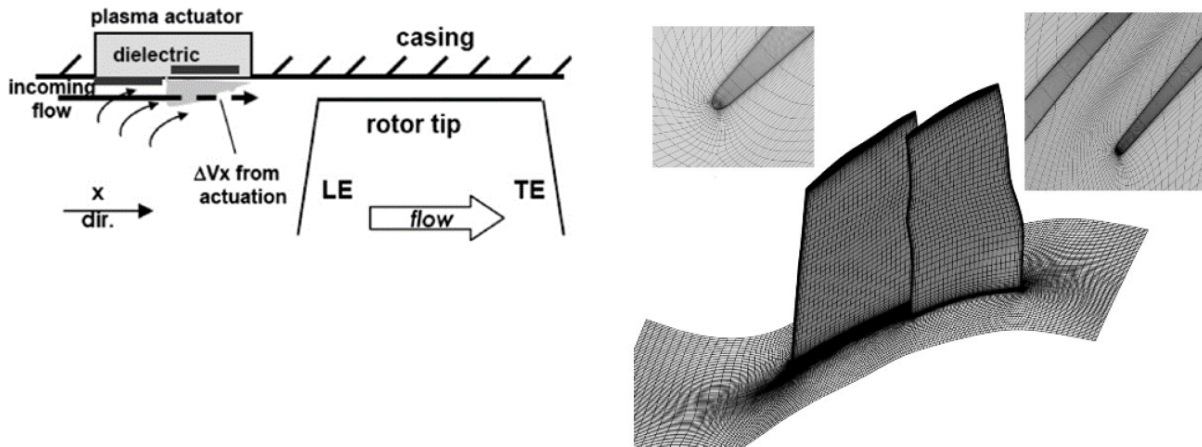
2.5.4 Σύγχρονες Μελέτες

Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής προσφέρει νέες δυνατότητες στην έρευνα νέων διατάξεων με στόχο την αύξηση της απόδοσης των συμπιεστών. Παρακάτω αναγράφονται περιληπτικά μερικές από αυτές.

Ενεργητικός Ελεγκτής μηδενικού ισοζυγίου μάζας

Οι διατάξεις αυτές λειτουργούν όπως η έγχυση ρευστού (Injection) κοντά στην ακμή προσβολής του πτερυγίου, ωστόσο δεν απομαστεύεται ροή από μια περιοχή υψηλής πίεσης και για αυτό δεν επηρεάζεται η παροχή μάζας (Zero net mass flux active control). Η ροή εισάγεται στην διάταξη

όπου επιταχύνεται μέσω ενός ηλεκτρικού ωθητήρα πλάσματος, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα 3. Το σύστημα αυτό είναι ενεργητικού ελέγχου και ενεργοποιείται μόνον όταν εντοπισθεί η αποκόλληση των οριακών στρωμάτων στο κέλυφος υπό συνθήκες υψηλού φορτίου. Καθώς τα δύο ηλεκτρόδια της συσκευής διαπερνώνται από τάση εναλλασσόμενου ρεύματος αρκετών KVolt προκαλείται ένα κυκλικό πλάσμα από το οποίο ωθείται μια δέση ρευστού υψηλής ταχύτητας.



Εικόνα 3. Εγχυτής Πλάσματος (αριστερά), Διαδοχικά Πτερύγια (δεξιά)

Διαδοχικά Πτερύγια

Οι διατάξεις διαδοχικών πτερυγίων (Tandem Blades) είχαν μελετηθεί αρχικά από την Pratt and Whitney την δεκαετία του 1970 με στόχο την βελτιστοποίηση ηχητικών και υποηχητικών συμπιεστών. Τα αποτελέσματα δεν ήταν καλύτερα από αυτά των συμβατικών πτερυγίων, ωστόσο από τότε έχουν βρεθεί διατάξεις διπλών υποηχητικών πτερυγώσεων με αυξημένο βαθμό απόδοσης και ευστάθεια. Η εύρεση αποδοτικών γεωμετριών έγκειται σε περιπτώσεις διηχητικών και υπερηχητικών συνθηκών. Οι Pan et all [22] πραγματοποίησαν μια υπολογιστική μελέτη του NASA Rotor 37 βελτιστοποιώντας μια γεωμετρία διπλών πτερυγίων, εικόνα 2, όπου βρέθηκε ότι σε σχέση με τον απλό δρομέα, υπήρξε βελτίωση στην απόδοση κατά 0.3 % και στο περιθώριο ευστάθειας κατά 5.6%. Η βελτίωση οφείλεται στο βελτιωμένο οριακό στρώμα του δεύτερου πτερυγίου, το οποίο συνεισφέρει στην συστροφή της ροής με λιγότερη αποκόλληση σε σχέση με το προπορευόμενο και η λειτουργία του είναι παρόμοια με τις υπεραντωτικές διατάξεις των πτερυγίων αεροσκαφών, όπως είναι τα flaps.

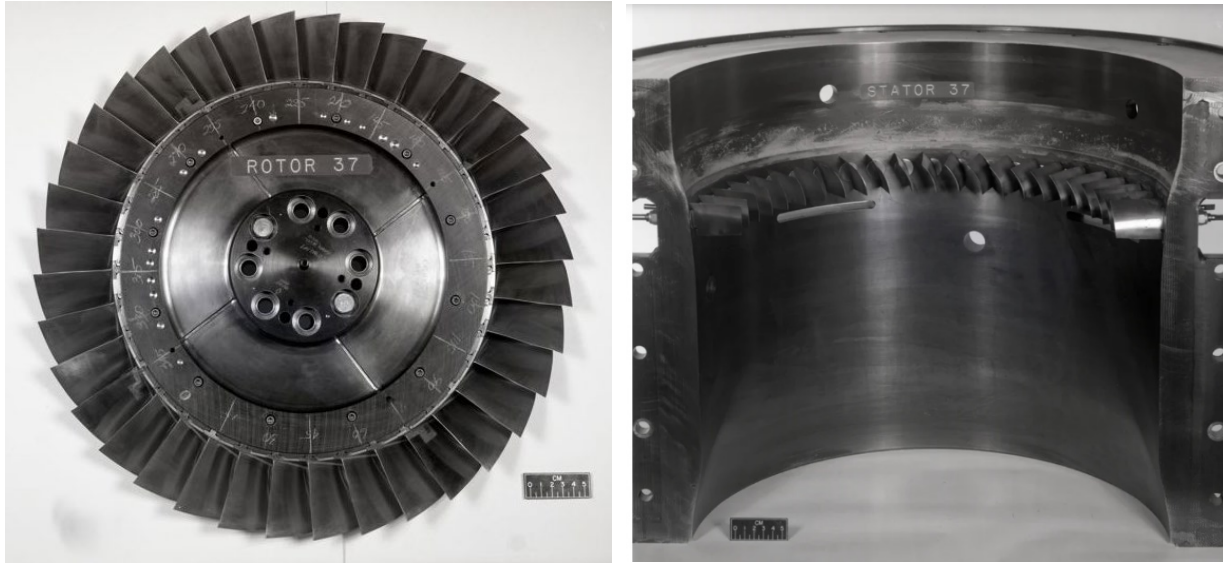
Κεφάλαιο 3. Αξονικός Συμπιεστής NASA Rotor 37

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ο αξονικός συμπιεστής NASA Rotor 37. Οι Reid και Moore στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος σύγχρονων συμπιεστών υψηλού λόγου πίεσεων στο ερευνητικό κέντρο Lewis Research Center της NASA το 1978, πλέον γνωστό ως Glenn Research Center, σχεδίασαν έναν συμπιεστή οκτώ βαθμίδων με λόγο πίεσεων 20:1. Ο Rotor 37 αποτελεί μία από τις τέσσερις βαθμίδες που σχηματίζουν την πρώτη από τις τρεις διατάξεις που συνθέτουν έναν αξονικό συμπιεστή με λόγο πίεσεων 20:1. Ο σχεδιασμός των πτερυγίων πραγματοποιήθηκε με στόχο την ελαχιστοποίηση της μέγιστης τιμής του σχετικού αριθμού Mach του πτερυγίου καθώς και του συντελεστή διάχυσης για δεδομένες συνθήκες ταχύτητας ροής στην είσοδο του συμπιεστή, χρησιμοποιώντας την μέθοδο σχεδιασμού Multiple Circular Arc [6]. Οι σχεδιαστικές παράμετροι αναγράφονται στον πίνακα 1:

Πίνακας 1. Σχεδιαστικές Παράμετροι NASA Rotor 37

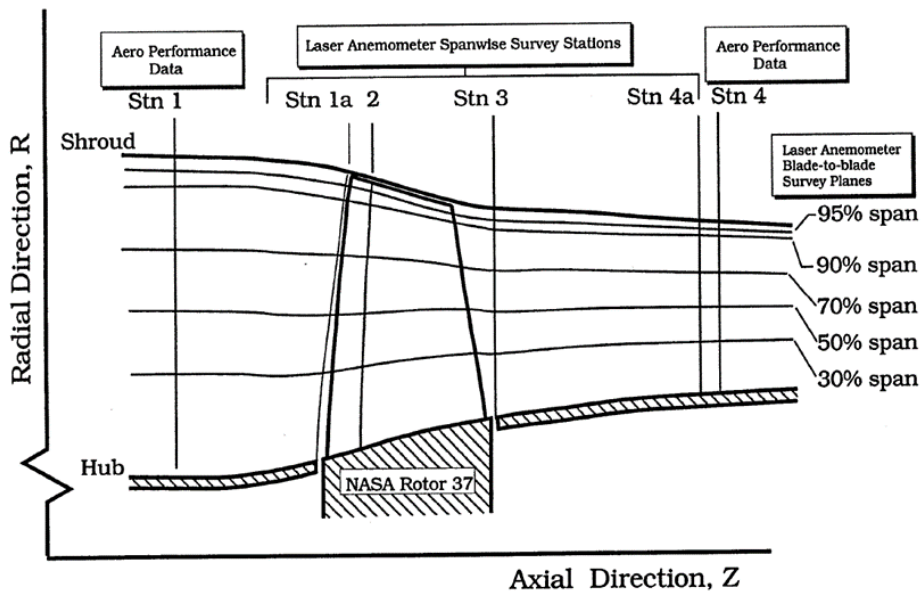
Παράμετρος	Τιμή Σχεδιασμού
Ολικός Λόγος Πίεσεων	2.106
Ολικός Λόγος Θερμοκρασιών	1.270
Ισεντροπικός Βαθμός Απόδοσης, %	87.7
Πολυτροπικός Βαθμός Απόδοσης, %	88.9
Συντελεστής αύξησης πίεσης	0.333
Συντελεστής Ροής	0.453
Παροχή Μάζας (Kg/s)	20.18
Περιστροφική Ταχύτητα (rad/s)	1800
Ταχύτητα Κορυφής Πτερυγίου (m/s)	454
Λόγος Ακτινών Κορυφή/Πόδα	0.7
Διάταμα Πτερυγίου	1.19
Αριθμός Πτερυγίων Δρομέα	36

Ο συμπιεστής μελετήθηκε πειραματικά από τους Reid και Moore [6] και Suder [2]. Οι Reid και Moore περιλαμβάνουν στην πειραματική διάταξη μια σειρά πτερυγίων στάτορα και για αυτό στην παρούσα μελέτη τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά του Suder [2]. Ο Rotor 37 χρησιμοποιείται συχνά για την αξιολόγηση κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής για την πρόβλεψη λειτουργικών χαρακτηριστικών διηχητικών συμπιεστών καθώς η σχεδίασή του δεν απέχει πολύ από τους σύγχρονους διηχητικούς συμπιεστές. Ο συμπιεστής λειτουργεί σε συνθήκες ηχητικής ροής καθώς στην κορυφή του πτερυγίου ο σχετικός αριθμός Mach ισούται με 1.48 και στον πόδα 1.13 με αποτέλεσμα την ύπαρξη κρουστικού κύματος σε όλο το ύψος του πτερυγίου. Τα πτερύγια είναι σχεδιασμένα με μικρό πάχος στο 8% της χορδής στον πόδα και 3.2% στην κορυφή ώστε να επιτυγχάνεται δομική αντοχή και η θέση του μέγιστου πάχους από 52% έως 68% αντίστοιχα. Η στερεότητα του πτερυγίου κυμαίνεται από 1.8 στον πόδα έως 1.3 στην κορυφή.



Σχήμα 11. NASA Rotor 37. Δρομέας (αριστερά) Στάτορας (δεξιά) <https://hal.science/hal-02281666/document>

Στην πειραματική διάταξη, οι μετρήσεις των ολικών θερμοκρασιών και πιέσεων πραγματοποιούνται στις αξονικές θέσεις 4.2 cm ανάντη της ακμής προσβολής (Stn 1) και 10.6 cm κατάντη (Stn4), για την εισαγωγή και έξοδο της ροής αντίστοιχα με τις θέσεις 1 και 4 στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12. Θέσεις Σταθμών μέτρησης αεροδυναμικών παραμέτρων.

Οι μετρήσεις της ολικής πίεσης και θερμοκρασίας καθώς και η γωνία της ροής ελήφθησαν με αισθητήρες τύπου Cobra τοποθετημένους σε εννέα ακτινικές θέσεις. Η στατική πίεση και δεύτερη

μέτρηση της γωνίας ροής μετρήθηκαν με αισθητήρες τύπου Wedge γωνίας 18°, Σχήμα 13 . Ο μέσος όρος των ολικών τιμών υπολογίστηκε ως προς την παροχή μάζας (mass averaging). Κατά αυτό τον τρόπο λαμβάνεται υπόψιν η ταχύτητα του ρευστού για την μέτρηση των ολικών τιμών, ενώ ο μέσος όρος των στατικών συνθηκών υπολογίζεται ως προς την επιφάνεια (area averaging). Ο μέσος όρος μιας ιδιότητας $\bar{\varphi}$ προκύπτει από τις σχέσεις :

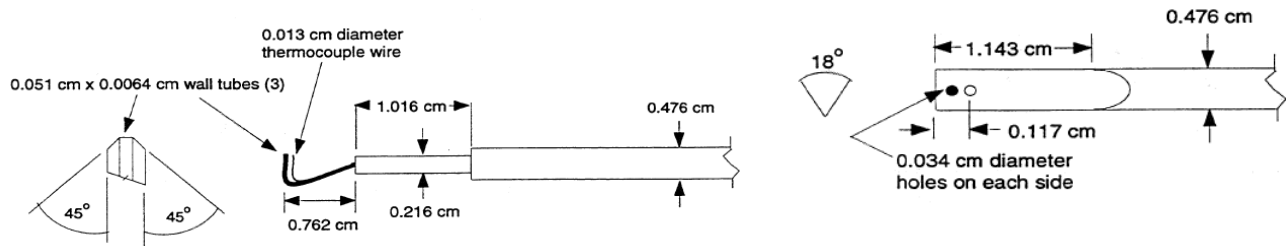
Μέσος όρος βάσει Παροχής Μάζας:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\dot{m}} \int_A \varphi \rho \vec{V} \cdot \hat{n} dA \quad 3.1$$

$$\dot{m} = \int_A \rho \vec{V} \cdot \hat{n} dA \quad 3.2$$

Μέσος όρος βάσει Επιφάνειας Διατομής

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{A} \int_A \varphi dA \quad 3.3$$



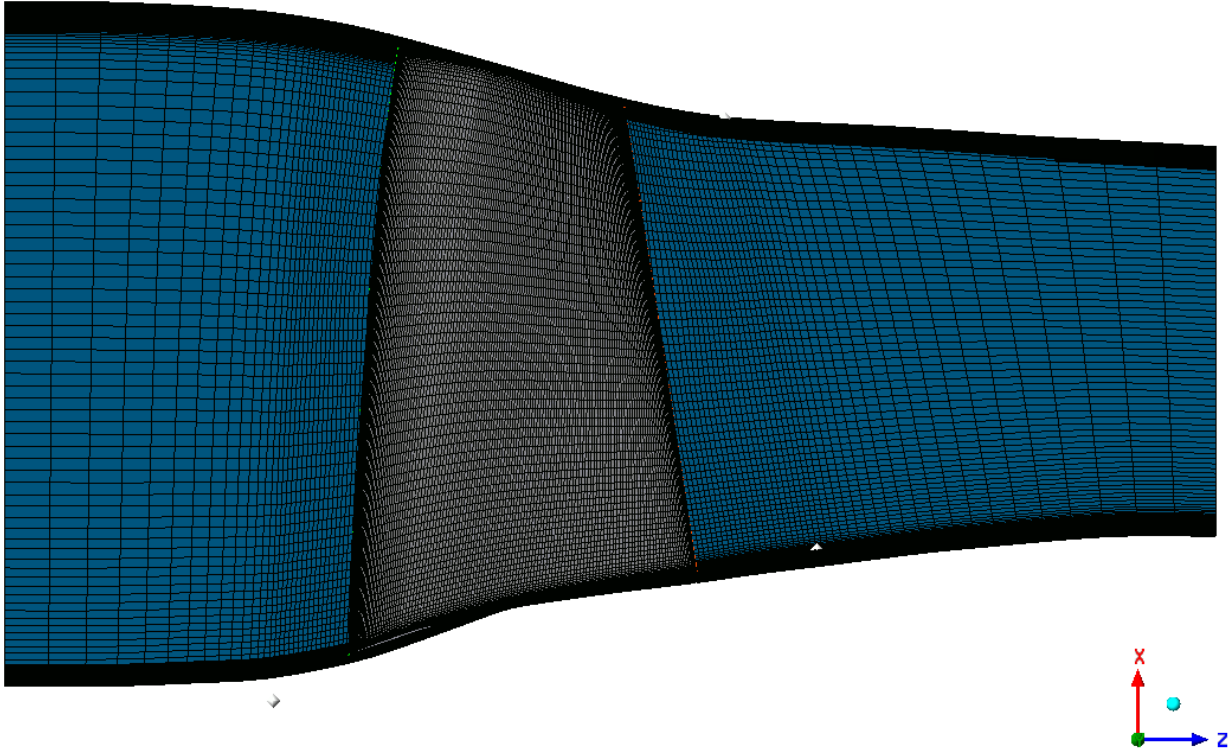
Σχήμα 13. Μετρητικά Όργανα πειράματος, Αριστερά: Cobra Probe, Δεξιά: Wedge Probe. Πηγή: Suder [2]

3.1 Υπολογιστικό Χωρίο

Η γεωμετρία και το υπολογιστικό πλέγμα του δρομέα κατασκευάζονται στο περιβάλλον του TURBOGRID, ενώ οι γεωμετρίες κελύφους σχεδιάζονται στο Design Modeler και έπειτα πλεγματοποιούνται στο ANSYS. Οι αναλύσεις επιλύονται στο ANSYS CFX 23.1 καθώς είναι κατάλληλο για αναλύσεις στροβιλομηχανών, σε συνθήκες μόνιμης ροής (Steady State). Αρχικά μελετάται η γεωμετρία με το απλό κέλυφος ώστε να επιβεβαιωθεί η πιστότητα των αποτελεσμάτων και έπειτα τοποθετούνται οι γεωμετρίες κελύφους στο ήδη υπάρχον πλέγμα. Για τις ανάγκες της ανάλυσης, μοντελοποιείται ένα πτερύγιο ρότορα από τα 36 του NASA Rotor 37, χωρίς την ύπαρξη οδηγητικών πτερυγίων και στάτορα. Η γεωμετρία εισάγεται στο TURBOGRID με την μορφή τριών αρχείων καρτεσιανών συντεταγμένων, ένα για το κέλυφος, το προφίλ των πτερυγίων και της πλήμνης. Το σχήμα του πτερυγίου προκύπτει από έξι προφίλ αεροτομών

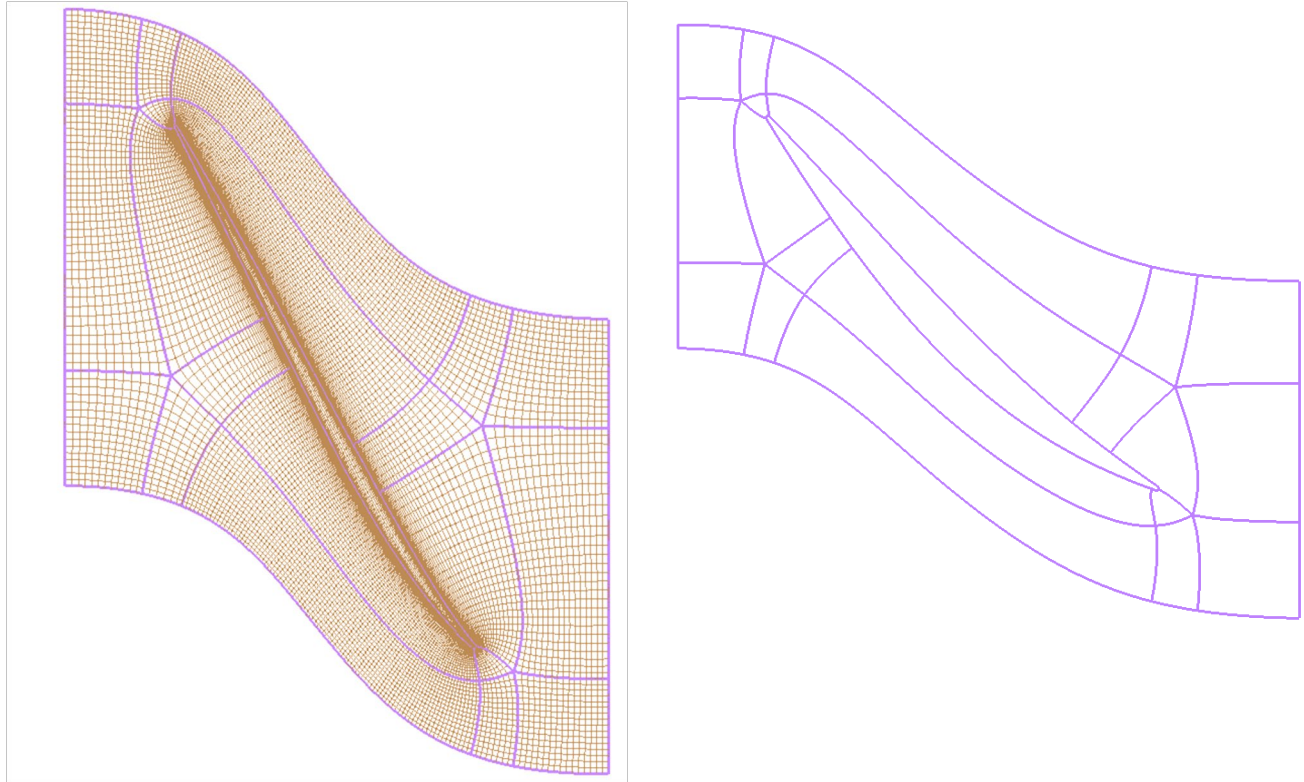
στοιχισμένα σε διαφορετικές ακτινικές θέσεις και το ακτινικό διάκενο μεταξύ πτερυγίου και κελύφους επιλέγεται με βάση την πειραματική ανάλυση του Suder [2] ίσο με 0.4 mm.

Οι θέσεις της εισόδου (Inlet) και εξόδου (Outlet) της ροής βρίσκονται στα όρια του υπολογιστικού χωρίου και τοποθετούνται 4.2 cm ανάντη και 10.67 cm κατόντη της ακμής προσβολής του πτερυγίου, ώστε να ταιριάζουν στην πειραματική διάταξη.



Σχήμα 14 .Αναπαράσταση Πλέγματος Ρότορα

Το πλέγμα του ρότορα αποτελείται από διαφορετικά κομμάτια (Multi-Block) που χωρίζονται από τον χάρτη της δισδιάστατης τοπολογίας η οποία σχηματίζεται για την πλήμνη, το κέλυφος και σε τέσσερις ακτινικές θέσεις του πτερυγίου ώστε το τρισδιάστατο πλέγμα να έχει κομμάτια (Blocks) αποτελούμενα από εξαεδρικά κελιά υψηλής ποιότητας δομημένου πλέγματος. Η δομή της τοπολογίας κατασκευάζεται από το TurboGrid και ο τύπος που επιλέχθηκε είναι: Single Round Round Symmetric. Διατηρήθηκε η προεπιλογή αυτή καθώς το πλέγμα στις ακμές προσβολής και φυγής του πτερυγίου εμφάνισε ικανοποιητική ποιότητα.



Σχήμα 15. Χάρτες τοπολογίας των Block στην κορυφή του πτερυγίου (αριστερά) και στην βάση του (δεξιά)

3.2 Κατασκευή Γεωμετρικών Τροποποιήσεων Κελύφους

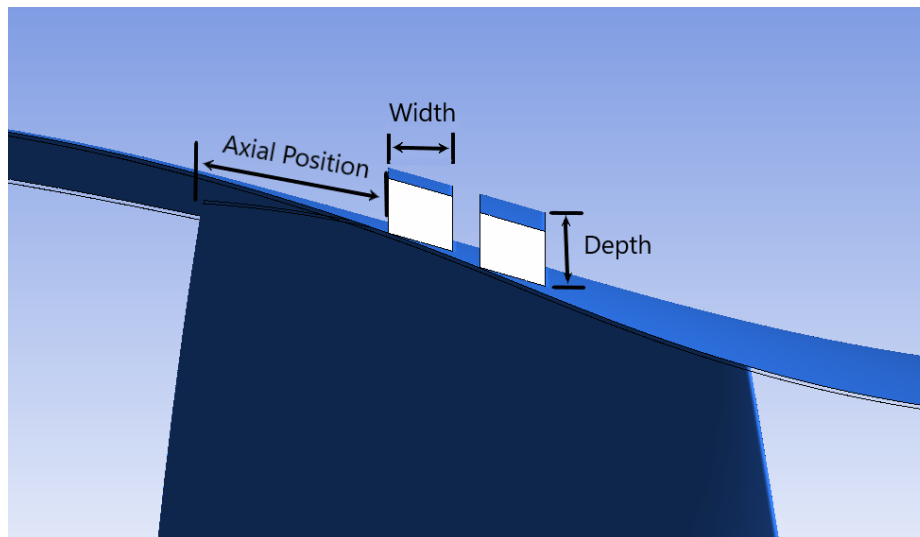
Οι γεωμετρίες κελύφους της παρούσας μελέτης είναι περιφερειακές αυλακώσεις (CGCT), τοποθετημένες σε διαφορετικές αξονικές θέσεις πάνω από το πτερύγιο. Στόχος της εργασίας ήταν η επέκταση του εύρους λειτουργίας του συμπιεστή, ωστόσο η τοποθέτηση μια γεωμετρίας κελύφους μπορεί να μην έχει πάντα θετικό αποτέλεσμα. Για τον λόγο αυτό στην παρούσα εργασία οι γεωμετρίες προέκυψαν από τις παρατηρήσεις που έχουν γίνει στο παρελθόν από ερευνητές όπως ο Hathaway [12], οι Hembera et all [10], οι Chen et all [4] και οι Kawase, Rona [21] με στόχο να κατασκευαστούν γεωμετρίες που να έχουν θετική επίδραση στο περιθώριο ευστάθειας και την λειτουργία του συμπιεστή.

Οι Hembera et all [10] πραγματοποίησαν μια σύνοψη των μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί για τις γεωμετρίες κελύφους αξονικών συμπιεστών και καταλήγουν σε μερικές διαπιστώσεις σχετικά με την επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αυλακώσεων στην επέκταση του περιθωρίου ευστάθειας.

1. Διαφορετικά βάθη και θέσεις των αυλακώσεων έχουν διαφορετική επιρροή στην μεταβολή της γραμμής ευστάθειας και στον βαθμό απόδοσης

2. Περισσότερες αυλακώσεις είναι πιο πιθανό να αυξήσουν το περιθώριο ευστάθειας και να μειώσουν τον βαθμό απόδοσης
3. Ο διαμερισμός του εσωτερικού των αυλακώσεων με διαφράγματα (Baffles) επηρεάζει την θέση του περιθωρίου ευστάθειας
4. Η σχετική θέση μεταξύ των αυλακώσεων και σε σχέση με την χορδή του πτερυγίου έχει σημαντική επίδραση στα φαινόμενα που εμφανίζονται ανάμεσα στο κέλυφος και το πτερύγιο
5. Η εσωτερική γεωμετρία των αυλακώσεων, παραδείγματος χάριν το βάθος της κάθε αυλάκωσης, είναι όσο σημαντική είναι η αξονική της θέση και ο αριθμός τους, στην μεταβολή του περιθωρίου ευστάθειας και του βαθμού απόδοσης

Ο συγγραφέας καταλήγει ότι η τελική γεωμετρία του κελύφους είναι μια διαδικασία δοκιμής και επαλήθευσης για τις περισσότερες περιπτώσεις, καθώς ακόμη δεν έχουν αποτυπωθεί πλήρως τα φαινόμενα ροής που προκαλούν επέκταση της ευστάθειας από τα κελύφη. Τα μεγέθη βάθος (Depth) πλάτος (Width) και αξονική θέση (Axial Position) παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



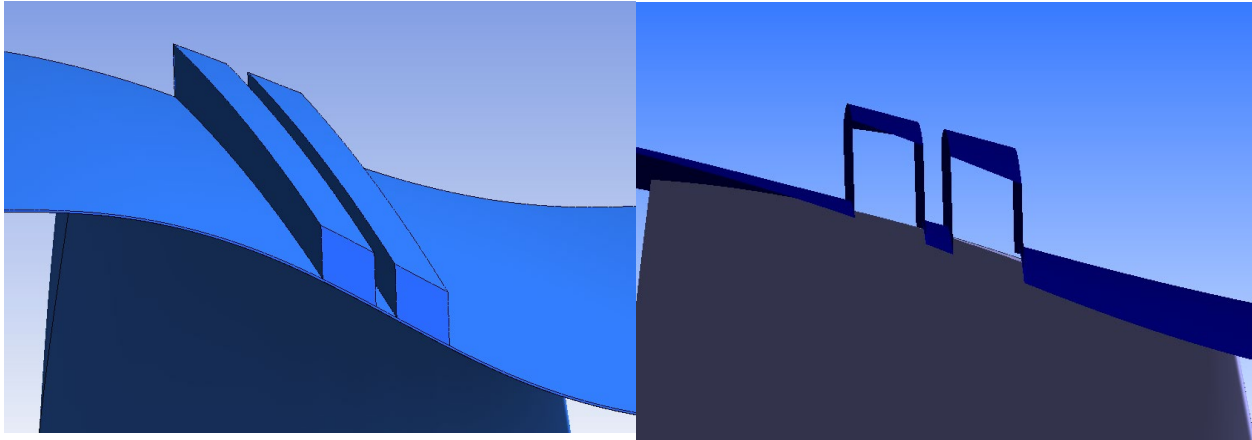
Σχήμα 16. Αναπαράσταση Μεγεθών σχεδίασης των αυλακώσεων

Οι Chen et al[6] μελέτησαν την επίδραση του αριθμού των αυλακώσεων, του βάθους και του πλάτους σε σχέση με την αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας και του βαθμού απόδοσης για τον NASA Rotor 37.

Βρέθηκε ότι το βάθος της αυλάκωσης δεν επηρεάζει σημαντικά τον μέγιστο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης ενώ συμβάλλει στην αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας για μια βέλτιστη τιμή 1.5 φορές το ακτινικό διάκενο. Το μέγιστο πλάτος επιδρά θετικά στην αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας, όπως και η αύξηση του αριθμού των αυλακώσεων. Οι μελετητές καταλήγουν ότι η θέση των αυλακώσεων με την μέγιστη επίδραση στην αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας είναι από το 10% έως το 90% της χορδής.

Ορθογωνικές Αυλακώσεις

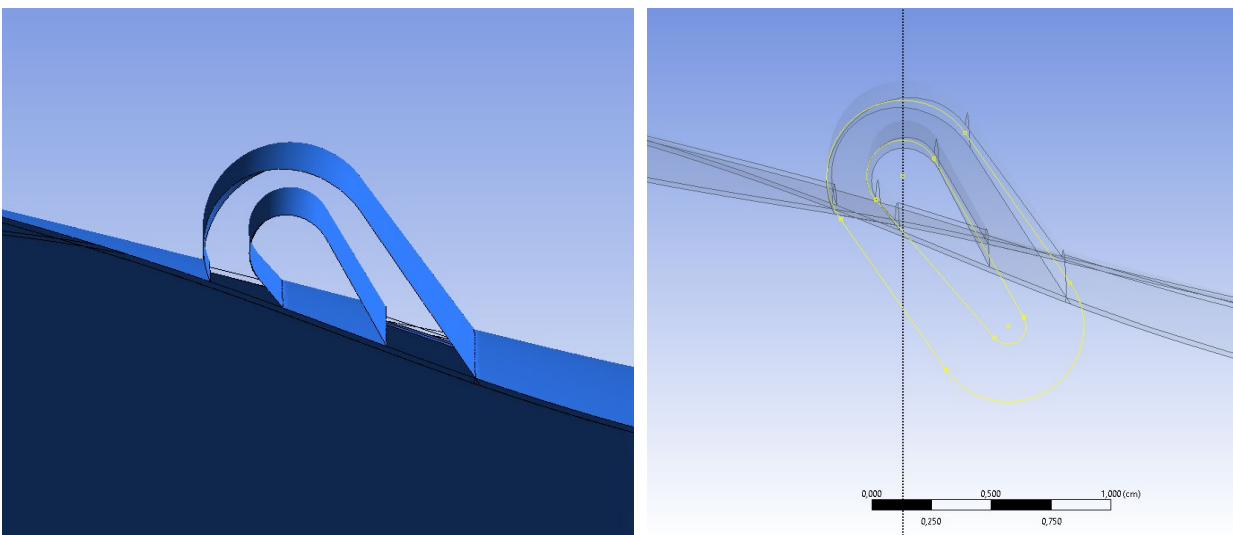
Η πρώτη γεωμετρία της μελέτης περιλαμβάνει δύο περιφερειακές ορθογωνικές αυλακώσεις (Circumferential Grooves) στο μέσο του πτερυγίου, με βάθος 12 φορές το ακτινικό διάκενο, πλάτος 12% της χορδής και απόσταση μεταξύ των αυλακώσεων 5% της χορδής. Η χορδή στην κορυφή του πτερυγίου ισούται με 2.77 cm. Οι αυλακώσεις τοποθετούνται στο μέσο του πτερυγίου καθώς, βάσει του Chen [4] μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας με την ελάχιστη δυνατή επίδραση στον βαθμό απόδοσης του συμπιεστή.



Σχήμα 17. Ορθογωνικές Αυλακώσεις

Γεωμετρία Ανακυκλοφορίας

Η δεύτερη γεωμετρία που μελετάται είναι παρόμοια με εκείνη των Kawase και Rona[11]. Η αυλάκωση έχει δύο ανοίγματα που χωρίζονται μεταξύ τους με τοίχωμα. Κατά αυτό τον τρόπο η ροή εισάγεται στο κατάντη άνοιγμα και εξέρχεται από το ανάντη με αποτέλεσμα να υπάρχει ένας διαχωρισμός της ροής στην είσοδο με την έξοδο και να δημιουργείται ένα φαινόμενο ανακυκλοφορίας (Recirculating).



Σχήμα 18. Γεωμετρία Ανακυκλοφορίας

Η γεωμετρία σχηματίζεται από δύο ελλείψεις. Η ακτίνα της εξωτερικής έλλειψης είναι 0.32 cm και η γωνία της σε σχέση με την οριζόντιο είναι 55 μοίρες. Εσωτερικά δύο κύκλοι ακτινών 0.3 και 0.15 cm, ενώνονται με εφαπτόμενες ώστε η έλλειψη που σχηματίζεται να είναι μικρότερης διαμέτρου στην μία πλευρά με αποτέλεσμα το κατάντη άνοιγμα να είναι μεγαλύτερο από το ανάντη. Ο στόχος της σχεδίασης αυτής είναι η ακτινική ροή που εμφανίζεται σε συνθήκες αποκόλλησης να παραλαμβάνεται από το κατάντη άνοιγμα και να εξέρχεται με αξονική και ακτινική συνιστώσα ταχύτητας ανάντη. Η ανάλυση της συμπεριφοράς της γεωμετρίας βρίσκεται στο Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα.

3.3 Μοντελοποίηση

Η μοντελοποίηση πραγματοποιείται στο περιβάλλον του CFX-Pre, όπου ορίζονται οι οριακές συνθήκες και οι παράμετροι της επίλυσης. Η ανάλυση του συμπιεστή γίνεται σε συνθήκες χρονικά μόνιμης ροής (Steady State) ώστε να προκύψει η γραμμή λειτουργίας και να μελετηθεί η επίδραση των αυλακώσεων σε δεδομένες συνθήκες λειτουργίας. Στο τέλος πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση σε χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο ροής (Transient analysis) ώστε να αποτυπωθούν το πεδίο ροής κατά την αποκόλληση του ρότορα.

Χρονικά Μόνιμο πεδίο ροής

Τρεις είναι οι διαθέσιμοι συνδυασμοί για τον ορισμό των οριακών συνθηκών (Boundary Conditions):

1. Ολική πίεση στην εισαγωγή και στατική πίεση στην εξαγωγή
2. Ολική πίεση στην εισαγωγή και παροχή μάζας στην εξαγωγή
3. Παροχή μάζας στην εισαγωγή και στατική πίεση στην εξαγωγή

Στην μελέτη αυτή χρησιμοποιείται η πρώτη επιλογή καθώς διαπιστώθηκε από δοκιμές ότι είναι η πιο στιβαρή για την επίλυση του πεδίου ροής. Η ολική πίεση εισόδου (P-Total Inlet) επιλέγεται 101325 Pa με ολική θερμοκρασία (T-Total) 288.15 Kelvin [5]. Στην έξοδο της ροής (Outlet) η στατική πίεση μεταβάλλεται ώστε να σχηματιστεί η χαρακτηριστική καμπύλη του συμπιεστή και να βρεθούν τα σημεία αποκόλλησης και πάλμωσης. Ο λόγος της στατικής πίεσης στην έξοδο σε σχέση με την ατμοσφαιρική κυμάνθηκε ανάμεσα σε 1.17 για συνθήκες στραγγαλισμού έως 1.29 για αποκόλληση. Ο δρομέας και το κέλυφος περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα $\omega = 1800 \text{ rad/s}$ ή 17188 rpm που αντιστοιχεί στο 100% των στροφών λειτουργίας ώστε να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του συμπιεστή υπό πλήρες φορτίο.

Οι στατικές και ολικές πιέσεις υπολογίζονται ως προς το ακίνητο σύστημα αναφοράς (Stationary Frame), καθώς με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται και στις πειραματικές διατάξεις, όπου τα μετρητικά όργανα είναι ακίνητα. Το μέγεθος της τύρβης στην είσοδο επιλέχθηκε ως μέτριο με ένταση 5% (Turbulence Intensity), καθώς είναι μια καλή προσέγγιση για μια γενική ανάλυση συμπιεστών.

Στα αποτελέσματα της επίλυσης για κάθε στατική πίεση εξόδου, παρέχονται οι τιμές της παροχής μάζας και του ολικού λόγου πιέσεων από τα οποία σχηματίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη του συμπιεστή. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα μελέτη βρέθηκε το σημείο στην γραμμή λειτουργίας του συμπιεστή από όπου ξεκινά να εμφανίζεται αποκόλληση (Stall Inception) και όχι η θέση όπου ο συμπιεστής έχει μεταβεί σε συνθήκες ολικής περιστροφικής αποκόλλησης. Για τον λόγο αυτό, στα αποτελέσματα το σημείο ελάχιστης παροχής μάζας θα χαρακτηρίζεται ως συνθήκες λειτουργίας κοντά σε αποκόλληση, ενώ για λόγους συντομογραφίας, το σημείο αυτό μπορεί να αναφέρεται και ως σημείο αποκόλλησης.

Η σχεδίαση της χαρακτηριστικής καμπύλης και ο υπολογισμός του περιθωρίου ευστάθειας απαιτούν την εύρεση του σημείου πάλμωσης, αποκόλλησης και μέγιστου βαθμού απόδοσης. Για τον λόγο αυτό έγινε πύκνωση των αναλύσεων γύρω από αυτά τα σημεία. Η αρχικοποίηση πραγματοποιήθηκε με οριακές συνθήκες κοντά στο σημείο μέγιστου βαθμού απόδοσης όπου η σύγκλιση της ανάλυσης επιτεύχθηκε ταχύτερα και εν συνεχεία η στατική πίεση στην έξοδο αυξήθηκε για την εύρεση του σημείου αποκόλλησης και μειώθηκε για την εύρεση του σημείου πάλμωσης, χρησιμοποιώντας ως αρχικές συνθήκες την λύση της τελευταίας ανάλυσης. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε ταχύτερη σύγκλιση των αναλύσεων. Η πίεση στην έξοδο μεταβάλλεται κατά 2 KPa έως ότου η λύση να μην συγκλίνει. Μόλις εμφανιστεί αποκόλληση η επόμενη πίεση εξόδου ορίζεται ως η ενδιάμεση απόσταση των δύο τελευταίων.

$$P_{out}(n + 1) = P_{out}(n) \pm 2 \text{ KPa} \quad 3.4$$

Εάν η ανάλυση δεν συγκλίνει τότε η νέα πίεση στην έξοδο επιλέγεται ως:

$$P_{out}(n + 1) = P_{out}(n - 1) + \frac{P_{out}(n) - P_{out}(n - 1)}{2} \text{ KPa} \quad 3.5$$

Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν η μεταβολή της πίεσης είναι μικρότερη από 0.1 KPa.

Ο υπολογισμός του Ισεντροπικού και Πολυτροπικού βαθμού απόδοσης στο CFX υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις αντίστοιχα:

$$n_c = \frac{h_{02'} - h_{01}}{h_{02} - h_{01}} \quad 3.6$$

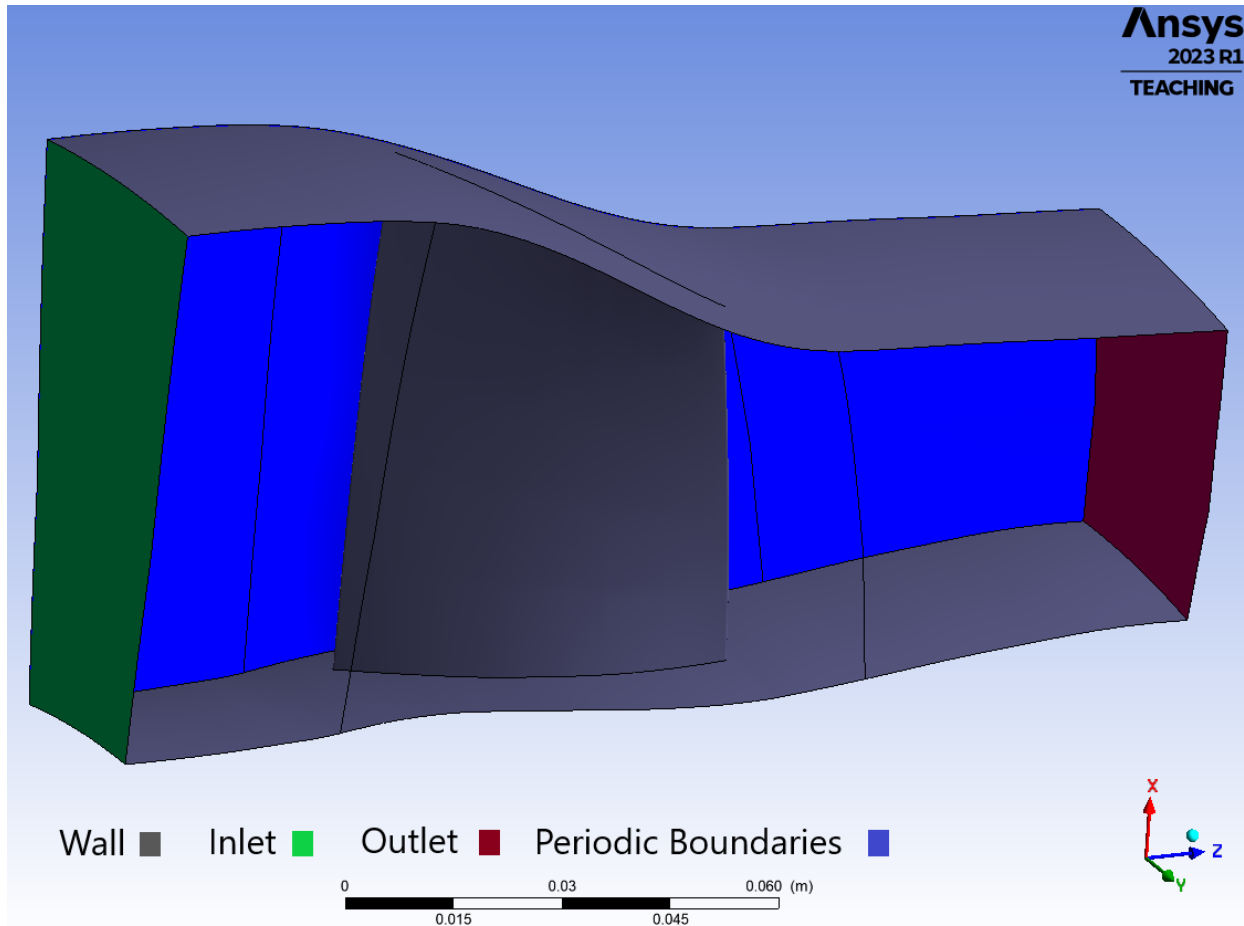
$$n_{cp} = \frac{h_{poly}}{h_{02} - h_{01}} \quad 3.7$$

$$h_{poly} = (h_{02} - h_{01}) - \frac{(s_2 - s_1)(T_{02} - T_{01})}{\ln(T_{02}/T_{01})} \quad 3.8$$

Όπου $h_{02'}$: Ισεντροπική ενθαλπία κατά την συμπίεση

Στις πλευρές του χωρίου ορίζεται περιστροφική περιοδικότητα (Rotational Periodicity) ώστε να προσομοιωθεί η ύπαρξη της σειράς πτερυγίων. Τα τοιχώματα του πτερυγίου, της πλήμνης και του

κελύφους αντιμετωπίζονται ως ομαλά και αδιαβατικά χωρίς τραχύτητα και εφαρμόζεται η συνθήκη μη ολίσθησης (Smooth no Slip Wall). Το τοίχωμα του κελύφους επιλέχθηκε ως αντιστρόφως περιστρεφόμενο (Counter Rotating Wall) ώστε να παραμένει ακίνητο σε σχέση με το σταθερό σύστημα αναφοράς (Stationary Frame), ενώ το υπόλοιπο χωρίο περιστρέφεται με 1800 rad/s.



Σχήμα 19. Όρια υπολογιστικού χωρίου

Μεταξύ κελύφους και δρομέα, τα δύο χωρία ενώθηκαν με μια συνθήκη ελεύθερης μεταφοράς μάζας (Conservative Interface Flux) και ως Stage – Mixing Plane καθώς περιστρέφονται και τα δύο χωρία. Χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία τομής δύο πλεγμάτων (Mesh Intersection Control), καθώς τα δύο πλέγματα δεν έχουν την ίδια τοπολογία και μέγεθος κελιών. Η βέλτιστη περίπτωση θα ήταν τα κελιά των δύο χωρίων να ενώνονται 1-1 και να έχουν το ίδιο μέγεθος, ωστόσο αυτό δεν ήταν δυνατό, οπότε έγινε ένας συμβιβασμός για την ένωση των δύο πλεγμάτων. Η επιρροή που ασκεί, η διαφορά των πλεγμάτων, στην ποιότητα των αποτελεσμάτων του συμπιεστή αναλύεται στο Κεφάλαιο 4.2 Τοποθέτηση Πλέγματος Κελύφους.

Χρονικά Μεταβαλλόμενο πεδίο ροής

Η ανάλυση του συμπιεστή σε χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο ροής (Transient) πραγματοποιήθηκε με στόχο την εικονική αποτύπωση του πεδίου ροής καθώς το πτερύγιο οδηγείται προς συνθήκες αποκόλλησης και γίνονται έντονα τα φαινόμενα απωλειών. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με βάση τον ολικό χρόνο επίλυσης (Total Time), ο οποίος υπολογίστηκε ώστε να πραγματοποιηθεί μια πλήρης περιστροφή του δρομέα.

Ο δρομέας περιστρέφεται με 17188 RPM ή 286.46 περιστροφές ανά δευτερόλεπτο. Μία πλήρης περιστροφή πραγματοποιείται σε χρόνο: 0.0034908 s και κάθε πτερύγιο από τα 36 του ρότορα κινείται από την μια θέση στην επόμενη σε χρόνο:

$$\text{Χρόνος ανά χωρίο πτερυγίου} = \frac{0.0034908}{36} = 9.69669E - 05 \text{ sec}$$

Το μέγεθος του χρονικού βήματος επιλέχθηκε ώστε να διαιρεθεί ο παραπάνω χρόνος σε 10 τμήματα και άρα το χρονικό βήμα ισούται με: $9.69669 * 10^{-6}$ δευτερόλεπτα. Κάθε χρονικό βήμα επιλύθηκε με μέγιστο αριθμό 30 επαναλήψεων.

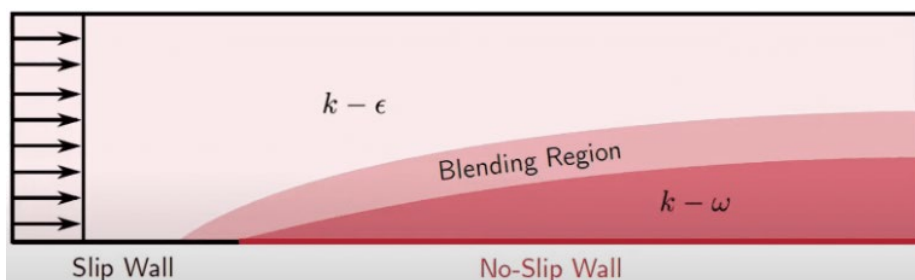
Η ανάλυση αρχικοποιήθηκε με το πεδίο ροής που προέκυψε ως αποτέλεσμα μιας steady state επίλυσης, σε παροχή μάζας 0.95 της παροχής στραγγαλισμού, καθώς η αποκόλληση ξεκινά όταν μειωθεί στο 0.92 της συνολικής παροχής. Οι οριακές συνθήκες στα πλευρικά όρια διατηρήθηκαν ίδιες με τις υπόλοιπες αναλύσεις, με μόνη διαφορά την επιλογή μιας υψηλής στατικής πίεσης εξόδου, αυξημένη κατά 1 KPa σε σχέση με την πίεση στο σημείο κοντά σε αποκόλληση και η οποία διατηρήθηκε σταθερή κατά την διάρκεια της ανάλυσης. Επομένως δημιουργήθηκε μια συνθήκη ροής όπου καθώς ο συμπιεστής λειτουργεί στο 0.95 της παροχής, ξαφνικά εμφανίζεται η απαίτηση για μια απότομη αύξηση της πίεσης εξόδου.

Η επίλυση αυτού του είδους θα ήταν αρκετά κοστοβόρα από πλευράς μνήμης και χρόνου εάν έπρεπε να χρησιμοποιηθεί το πλέγμα που κατασκευάστηκε για τις αναλύσεις τύπου Steady State, για αυτό φτιάχτηκε ένα πλέγμα με μικρότερο αριθμό κελιών το οποίο παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.1 Πλέγμα ρότορα.

3.4.1 Μοντέλο Τύρβης

Για την πρόβλεψη των λειτουργικών χαρακτηριστικών του συμπιεστή πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις μόνιμης κατάστασης ροής (Steady State) με την επίλυση των εξισώσεων RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) που αποτελούν μια απλοποιημένη μορφή των εξισώσεων Navier Stokes. Το μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκε είναι το $k - \omega$ SST το οποίο χρησιμοποιείται συχνά για αναλύσεις στροβιλομηχανών καθώς προσομοιώνονται αρκετά καλά τα περίπλοκα χαρακτηριστικά της ροής των συμπιεστών όταν λειτουργούν σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού. Οι μελετητές Ameri [7], Boretti [26] και Chima [25] έχουν χρησιμοποιήσει το μοντέλο αυτό για την ανάλυση του NASA Rotor 37 παρατηρώντας ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Το μοντέλο αυτό συνδυάζει την στιβαρότητα της επίλυσης μακριά από τα τοιχώματα με την εφαρμογή του μοντέλου $k - \epsilon$, με την επίλυση των εξισώσεων του $k - \omega$ κοντά στο τοίχωμα το οποίο προβλέπει καλύτερα την έναρξη της αποκόλλησης σε ένα ροϊκό πεδίο με αντίθετη κλίση πίεσης όπως είναι οι συμπιεστές. Ο συνδυασμός των εξισώσεων πραγματοποιείται με τις συναρτήσεις ανάμιξης (Blending Functions) οι οποίες εγγυώνται την ομαλή ένωσή τους. Το μοντέλο μπορεί να επιλύσει την λογαριθμική περιοχή και το τυρβώδες υπόστρωμα όταν ο αδιάστατος αριθμός y^+ είναι κοντά στο 1 ενώ στην περίπτωση όπου δεν επιλύεται το οριακό στρώμα το μοντέλο χρησιμοποιεί τις αυτόματες συναρτήσεις τοιχώματος (Automatic Wall Functions) για να προβλέψει το μέγεθος των διατμητικών τάσεων στο οριακό στρώμα.



Σχήμα 20. K Omega Turbulence model blending function, <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-omega-sst/>

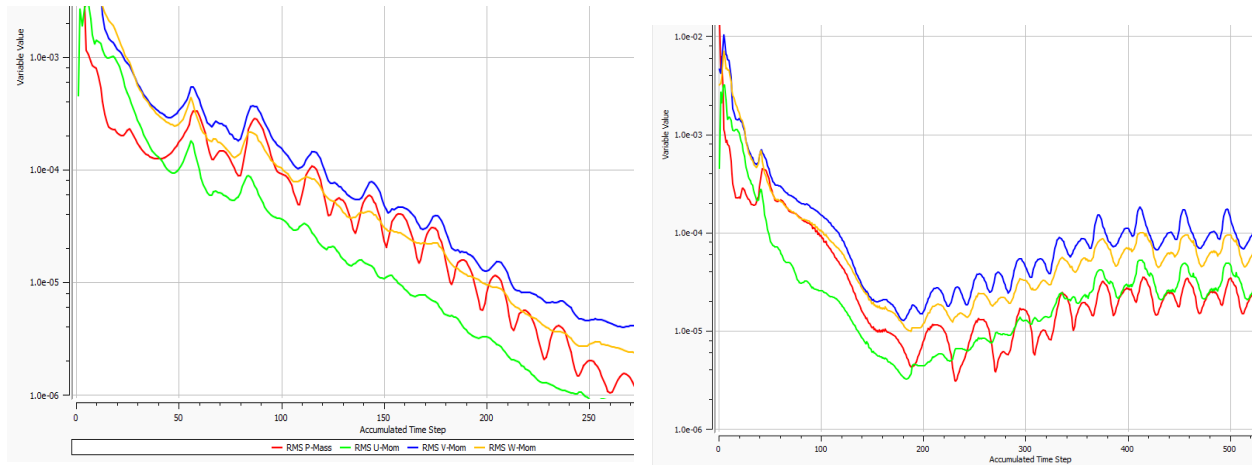
3.4.2 Κριτήρια Σύγκλισης

Τα κριτήρια σύγκλισης είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης του συμπιεστή, καθώς από αυτά, διακρίνεται η αστάθεια της ανάλυσης και άρα τα σημεία όπου εμφανίζεται αποκόλληση. Η επιλογή των κριτηρίων πραγματοποιήθηκε με βάση τους Chen, Fu[11] οι οποίοι έλεγξαν τις διακυμάνσεις του βαθμού απόδοσης, του λόγου της παροχής μάζας εισόδου-εξόδου και της ολικής παροχής μάζας. Οι μελετητές χαρακτήρισαν ως έγκυρες τις αναλύσεις μόνιμης κατάστασης για δεδομένες οριακές συνθήκες, όταν οι μεταβολές των παραπάνω παραμέτρων διατηρούνται κάτω από 0.5% για 100 επαναλήψεις.

Ο επιλυτής του CFX υπολογίζει τα υπόλοιπα ως προς την μέση τετραγωνική ρίζα (Root Mean Square) και για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν διαφορετικά όρια για κάθε περίπτωση, καθώς η εισαγωγή του πλέγματος κελύφους αύξησε το μέσο επίπεδο των υπολοίπων λόγω σφαλμάτων στην ένωση των πλεγμάτων του κυρίως χωρίου με το κέλυφος. Στην παρούσα εργασία για τον απλό ρότορα επιλέχθηκε το όριο των $1e-05$ ενώ για τις γεωμετρίες κελύφους $1e-04$. Η μεταβολή της παροχής μάζας δεν πρέπει να ξεπερνά το 0,01 kg/s, ο λόγος των παροχών εισόδου εξόδου δεν πρέπει να διακυμαίνεται πάνω από 0.01 και ο λόγος πιέσεων 0.01. Εάν οι παραπάνω μεταβολές διατηρούνται για 50 επαναλήψεις θεωρήθηκε ότι η ανάλυση έχει συγκλίνει.

Κατά την λειτουργία του συμπιεστή κοντά στο σημείο αποκόλλησης (Stall) η συμπεριφορά του βαθμού απόδοσης ήταν ασταθής και οδηγούσε είτε σε πλήρη αποτυχία του επιλυτή και τερματισμό της ανάλυσης είτε σε μια μόνιμη ταλάντωση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η σύγκλιση

επιτεύχθηκε ύστερα από 150 επαναλήψεις, στην περιοχή κοντά στο σημείο σχεδιασμού και σε 300 επαναλήψεις σε σημεία κοντά σε αποκόλληση και στραγγαλισμό. Σε περιπτώσεις όπου οι οριακές συνθήκες δεν οδηγούν σε πιθανά σημεία λειτουργίας τότε ο λόγος των παροχών εισόδου-εξόδου δεν ισούταν με 1 και ο λόγος πιέσεων παρουσίαζε υψηλές διακυμάνσεις μεταξύ των επαναλήψεων.



Σχήμα 21. Υπόλοιπα ανάλυσης, Σύγκλιση επίλυσης (αριστερά), Απόκλιση (δεξιά)

Κεφάλαιο 4. Ανάλυση Ευαισθησίας Πλέγματος

Μια κοινή πρακτική, για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων στην υπολογιστική ανάλυση στροβιλομηχανών, είναι η πύκνωση του πλέγματος και η επίλυση του οριακού στρώματος. Για τον Rotor 37, ο Chima [25] χρησιμοποίησε πλέγμα 880.000 κελιών και επίλυσε το οριακό στρώμα με y^+ στο περύγιο 2 έως 4. Ο Ameri [7] κατασκεύασε πλέγμα 1.8 εκατομμυρίων κελιών για την ανάλυση του ρότορα. Η αύξηση του αριθμού των κελιών είναι επιθυμητή, ωστόσο πολύ πυκνά πλέγματα οδηγούν σε υψηλούς χρόνους ανάλυσης. Για τον λόγο αυτό συγκρίθηκαν τέσσερα πλέγματα διαφορετικού μεγέθους ώστε να επιλεγθούν τα τελικά χαρακτηριστικά.

4.1 Πλέγμα Δρομέα

Τα πλέγματα διαφέρουν ως προς τον αριθμό των κελιών και το πάχος του πρώτου κελιού κοντά στα τοιχώματα, με βάση τον αδιάστατο αριθμό y^+ . Η πύκνωση του πλέγματος αυξάνεται κοντά στα τοιχώματα και στο περύγιο ώστε να προκύπτουν ακριβή αποτελέσματα επίλυσης στο οριακό στρώμα και να προσομοιωθούν τα φαινόμενα ανάπτυξης αποκόλλησης. Στις αναλύσεις των Boretti [5], Chen[6] και Chima[27] ο αριθμός y^+ ισούται με 1 καθώς εφαρμόζονται οι εξισώσεις χαμηλού αριθμού Reynolds με την χρήση του μοντέλου τύρβης δύο εξισώσεων $k-\omega$ SST του Menter. Η επίλυση του οριακού στρώματος, οδηγεί σε συμβάλλει στην ακριβέστερη πρόβλεψη των αποκολλήσεων και για αυτό συστήνεται για τον σχεδιασμό της χαρακτηριστικής καμπύλης.

Το πάχος του πρώτου κελιού για την επίτευξη $y^+ \leq 2$ αρχικά επιλέχθηκε από την δημοσίευση του Chima όπου χρησιμοποιείται πάχος $4 * 10^{-4}$ cm. Από τα αποτελέσματα των πρώτων αναλύσεων του ρότορα λαμβάνεται το μέσο y^+ και εν συνεχεία μέσω δοκιμών το τελικό πάχος πρώτου κελιού επιλέχθηκε $1.5 * 10^{-4}$ cm ώστε το μέσο y^+ να είναι μικρότερο του 2. Το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του περυνγίου εμφανίζει y^+ μικρότερο του 1 εκτός από μια περιοχή κοντά στην ακμή προσβολής. Για την επίλυση του οριακού στρώματος επιλέχθηκε όριο 1.3 για τον μέγιστο ρυθμό αύξησης του πάχους των κελιών (Expansion Rate), ώστε να τοποθετηθεί επαρκής αριθμός κελιών εντός του οριακού στρώματος.

Στον οδηγό του CFX (CFX modeling guide) αναφέρεται ότι για την επίλυση του οριακού στρώματος με το μοντέλο $k-\omega$ SST πρέπει ο αδιάστατος αριθμός y^+ να λαμβάνει τιμές στο εύρος 2 έως 4.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά Πλεγμάτων

Αριθμός Πλέγματος	Αριθμός κελιών	Αριθμός Κόμβων	Μέσο y^+ πτερυγίου
1	1,015,002	1,063,147	5.7
2	2,077,523	2,159,456	1.12
3	2,549,684	2,638,900	2.63
4	2,975,428	3,077,064	1.08

Για την μέτρηση της ποιότητας του πλέγματος συγκρίθηκαν οι τιμές τριών συντελεστών.

1. Λοξότητα (Skewness)

Ορίζεται ως η απόκλιση ενός στοιχείου από ένα βέλτιστο ορθογωνικό εξαεδρικό κελί. Το εύρος της λοξότητας είναι από 0 έως 1.

$$\text{Λοξότητα} = \max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad 4.1$$

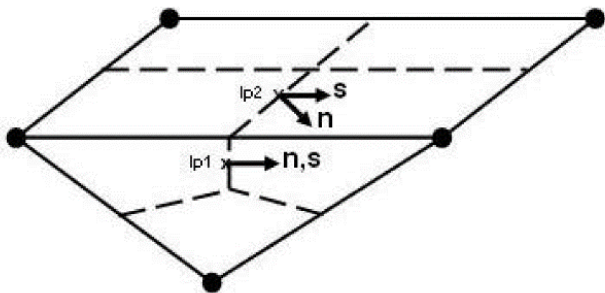
2. Λόγος Μήκους Πλευρών (Edge Length Ratio)

Ορίζεται ως ο λόγος της μεγαλύτερης πλευράς μιας έδρας (Face) σε σχέση με την μικρότερη. Η προεπιλεγμένη αποδεκτή τιμή είναι 800 και η μέγιστη 1000.

$$\text{Λόγος Διαστάσεων} = \frac{\max(l_1, l_2)}{\min(l_1, l_2)} \quad 4.2$$

3. Ορθογωνική Ποιότητα (Orthogonality Angle)

Ως ορθογωνική ποιότητα ορίζεται ως η γωνία των ευθειών που σχηματίζονται από τις δύο πλευρές ($lp1, lp2$) γειτονικών κελιών όπως φαίνεται στο σχήμα.



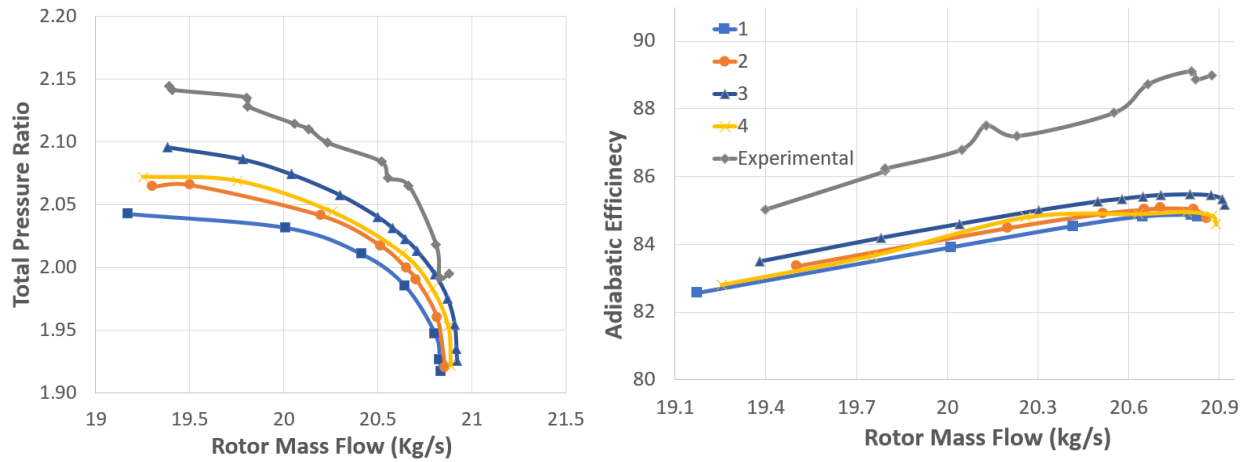
Στον επόμενο πίνακα αναγράφονται τα όρια για κάθε μέτρο ποιότητας που θέτει το Turbogrid και τα ποσοστά των κελιών για κάθε πλέγμα που τηρούν τα όρια αυτά.

Πίνακας 3. Ποιότητα πλέγματος περυγίου

	Λοξότητα	Λόγος Πλευρών	Ορθογωνική Ποιότητα
Όριο	0.75	800	50 μοίρες
Αριθμός Πλέγματος	%	%	%
1	99.98	99.89	99.99
2	99.97	93.77	100.00
3	100.00	98.73	100.00
4	99.97	95.30	100.00

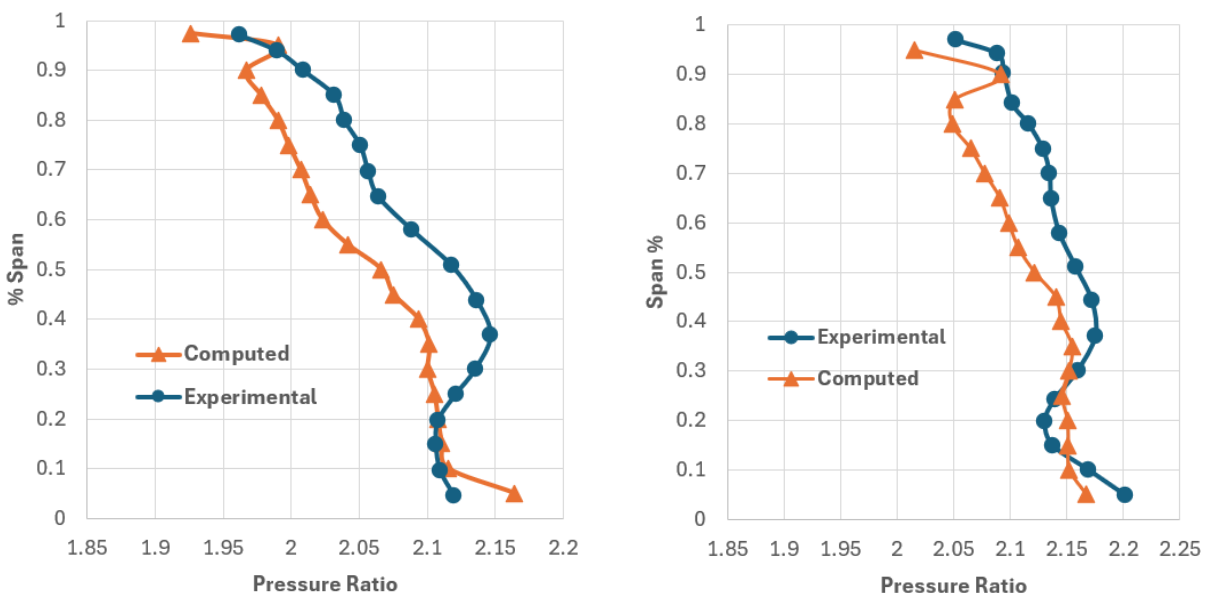
Τα πειραματικά αποτελέσματα με τα οποία συγκρίνονται τα πλέγματα λαμβάνονται από τον Suder [2]. Το πλέγμα που έρχεται πιο κοντά στα πειραματικά είναι το 3^ο με αριθμό κελιών 2,5

εκατομμυρίων, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Η υπολογιστική πρόβλεψη των λειτουργικών χαρακτηριστικών παρέχεται από τον Ameri [7], όπου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τύρβης $k - \omega$ του Wilcox χαμηλού αριθμού Reynolds. Παρατηρείται ότι το μοντέλο τύρβης εκτιμά σωστά τον ολικό λόγο θερμοκρασιών αλλά παρέχει μικρότερες τιμές για τον λόγο ολικών πιέσεων και τον αδιαβατικό βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 22. Χαρακτηριστικές Καμπύλες Ολικού λόγου πιέσεων (αριστερά) και Βαθμού Απόδοσης (δεξιά)

Είναι εμφανής η βελτίωση των αποτελεσμάτων καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κελιών, ωστόσο το καλύτερο αποτέλεσμα εμφανίζεται στο 3^ο πλέγμα. Το πλέγμα αυτό έχει μεγαλύτερο αριθμό κελιών τοποθετημένο ως προς την ακτινική διεύθυνση από τον πόδα έως την κορυφή του πτερυγίου, σε σχέση με τα υπόλοιπα. Η διαφορά αυτή βελτιώνει την ποιότητα του πλέγματος και φάνηκε πως έχει σημαντικότερο ρόλο από τον αριθμό των κελιών, καθώς το πυκνότερο πλέγμα δεν προσέφερε το καλύτερο αποτέλεσμα. Η μέγιστη απόκλιση του λόγου πιέσεων μεταξύ του πειράματος και του 3^{ου} πλέγματος είναι 2.12% και εμφανίζεται στο σημείο αποκόλλησης της ροής.



Σχήμα 23. Διαγράμματα Εκπετάσματος – Λόγου Πίεσεων στην έξοδο του πτερυγίου. Μέγιστος βαθμούς Απόδοσης (αριστερά) και Μέγιστος λόγος πίεσεων (δεξιά)

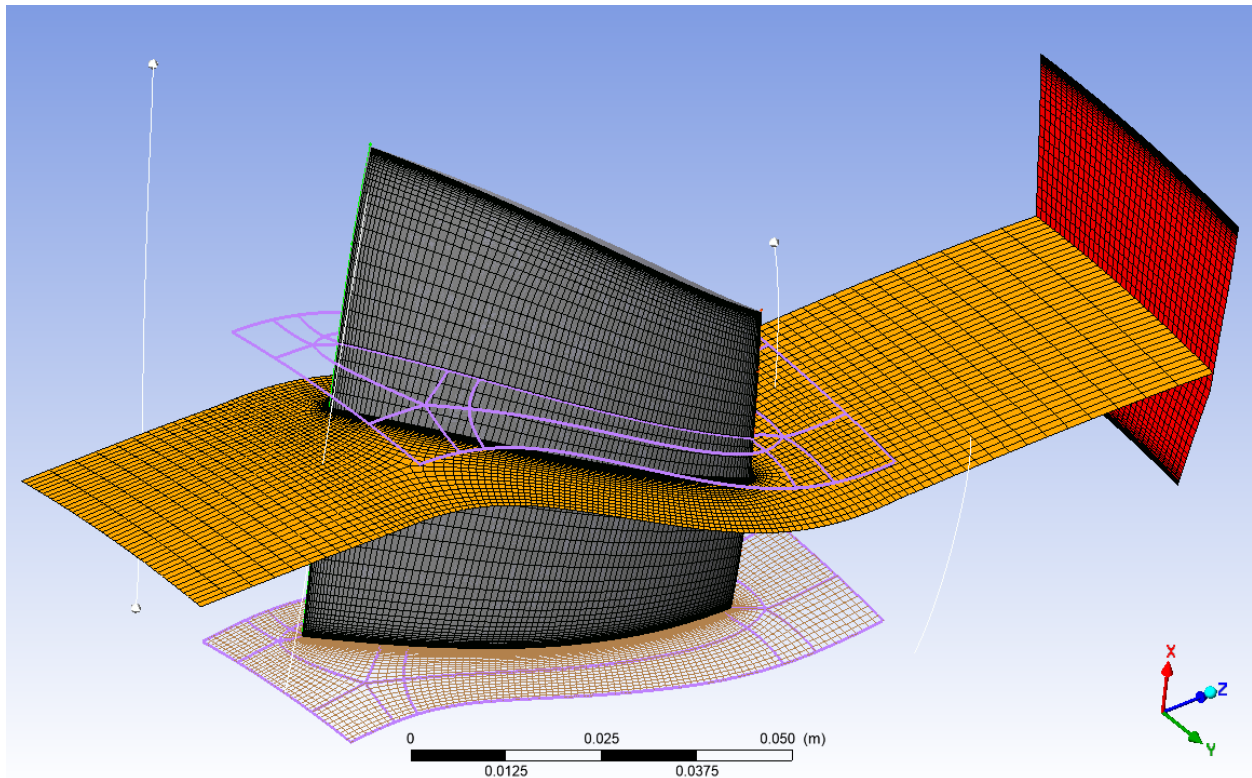
Τέλος συγκρίνεται η μέση αύξηση της ολικής πίεσης στην έξοδο του πτερυγίου σε σχέση με το διάταμα. Παρατηρείται ότι το υπολογιστικό μοντέλο υποεκτιμά την αύξηση πίεσης στο μέσο του πτερυγίου ωστόσο υπάρχει καλή συμφωνία στα άκρα και για τις δύο περιπτώσεις. Από το προφίλ της ολικής πίεσης μπορεί να προσδιοριστεί η ύπαρξη αποκόλλησεων στο πτερύγιο. Στις συνθήκες αποκόλλησης, είναι εμφανής η πτώση της πίεσης στα άκρα του πτερυγίου και ειδικότερα στον πόδα, όπου η πτώση πίεσης σημαίνει την ύπαρξη μιας περιοχής ανακυκλοφορίας η οποία όταν αναπτυχθεί πλήρως οδηγείται ακτινικά προς το κέλυφος λόγω της φυγοκέντρου, διαταράσσοντας την ροή στο υπόλοιπο πτερύγιο. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκαλέσει την πλήρη αποκόλληση του πτερυγίου. Αντίστοιχη σημασία έχει και η κορυφή του πτερυγίου όπου η δίνη ακροπτερυγίου αποκολλά την ροή στην κορυφή και συμβάλλει στην γένεση απωλειών.

Πλέγμα Χρονικά Μεταβαλλόμενης Ανάλυσης

Τα πλέγματα που παρουσιάζονται παραπάνω μελετήθηκαν με στόχο την επίτευξη καλής συμφωνίας με τα πειραματικά αποτελέσματα σε όλο το εύρος λειτουργίας του συμπιεστή. Η χρήση αυτών των πλεγμάτων σε μια χρονικά μεταβαλλόμενη ανάλυση θα απαιτούσε υψηλά ποσά υπολογιστικής ισχύος και κατά συνέπεια χρόνου επίλυσης για την ανάλυση του ρότορα. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε με στόχο την αποτύπωση του πεδίου ροής και όχι για την απόκτηση αποτελεσμάτων υψηλής πιστότητας. Λόγω των παραπάνω, κατασκευάστηκε ένα πλέγμα με μικρότερο αριθμό κελιών το οποίο θα είναι ικανοποιητικό για τις ανάγκες της επίλυσης.

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά Πλέγματος

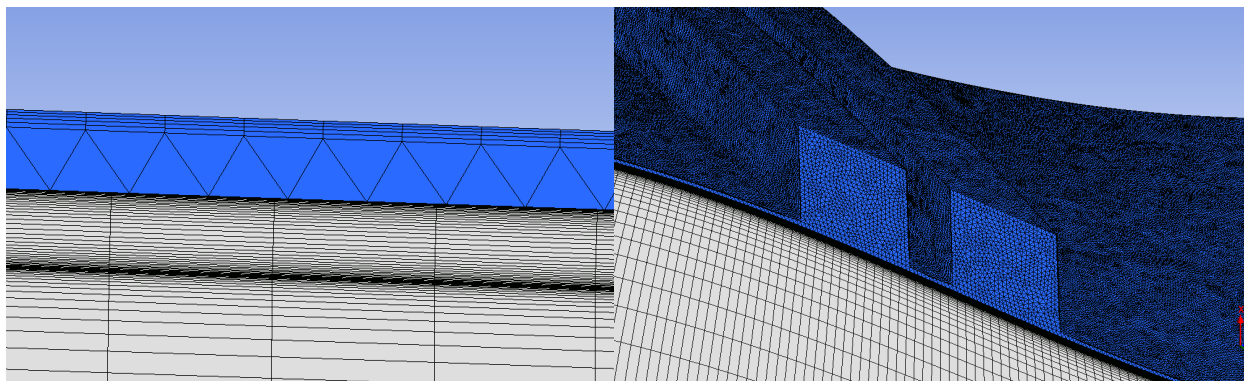
Κατηγορία	Τιμή
Αριθμός Κελιών	980,876
Αριθμός Κόμβων	1,028,114
Υplus	5
Μέγιστος Ρυθμός Διαστολής	1.3
Ποιότητα	% OK
Λοξότητα	99.98%
Λόγος Πλευρών	99.73%
Ορθογωνική Ποιότητα	99.99%



Σχήμα 24. Πλέγμα ανάλυσης *Transient*

4.2 Τοποθέτηση Πλέγματος Κελύφους

Με την επιλογή του πλέγματος για το κυρίως χωρίο, που περιλαμβάνει το πτερύγιο, ακολουθεί ο έλεγχος του πλέγματος που τοποθετείται στο κέλυφος. Οι γεωμετρίες κελύφους τοποθετούνται πάνω σε μια λεπτή στρώση πλέγματος η οποία καλύπτει όλο το κέλυφος του ρότορα και κατασκευάζεται ξεχωριστά από το περιβάλλον του Turbogrid. Η ιδέα για την τοποθέτηση ξεχωριστού πλέγματος για το χωρίο του κελύφους πάρθηκε από την εργασία του Ghila [29]. Το πλέγμα αυτό έχει πάχος (ακτινική διάσταση) 0.2 mm, ίσο με το μισό του ακτινικού διακένου 0.4 mm. Η διεπαφή των δύο χωρίων (Interface) είναι της μορφής GGI (General Grid Interface) καθώς τα δύο πλέγματα δεν έχουν όμοια τοπολογία και η ένωσή τους δεν είναι ακριβής, για αυτό χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος τομής πλεγμάτων του CFX Mesh Intersection Control. Οι εντολές ένωσης των δύο πλεγμάτων διασφάλισαν τυχόν επικαλύψεις κελιών ή κενά, ενώ διορθώσεις γίνανε ως προς την ευθυγράμμιση των δύο χωρίων. Η λεπτή στρώση πλέγματος μελετάται για την περίπτωση του απλού κελύφους ώστε να διαπιστωθεί η επιρροή που ασκεί στην στιβαρότητα της ανάλυσης και στην πιστότητα των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 25. Πλέγμα Γεωμετριών Κελύφους

Για να κατασκευαστεί το κέλυφος, έγινε εξαγωγή ενός αρχείου συντεταγμένων από το CFX-Pre που περιλαμβάνει τις θέσεις των κελιών του κελύφους που έχει κατασκευάσει το Turbogrid. Με την επεξεργασία του αρχείου στο EXCEL λήφθηκε η μέση καμπύλη του κελύφους με συντεταγμένες X (ακτινική διεύθυνση) και Z (αξονική διεύθυνση) όπου έπειτα εισήχθη στο Design Modeler για την κατασκευή της γεωμετρίας. Το πλέγμα είναι μη δομημένο και αποτελείται από τετραεδρικά κελιά μεγέθους 0.2 mm. Η πυκνωση του πλέγματος στο τοίχωμα γίνεται μέσω της εντολής Inflation με ορισμό πάχους πρώτου κελιού 0.012 mm. Τα στρώματα του Inflation είναι 5 και ο ρυθμός διαστολής 1.2 . Το πάχος του πρώτου κελιού οδηγεί σε ένα μέσο yplus 4.52.

Λόγω του περιορισμένου πάχους του πλέγματος είναι δύσκολη η τοποθέτηση αρκετών κελιών με την χρήση του Inflation ώστε να επιλυθεί πλήρως το οριακό στρώμα. Ταυτόχρονα, η διεπαφή των δύο πλεγμάτων δεν είναι ακριβής, ως προς την ακτινική διεύθυνση, οπότε τυχόν επικαλύψεις κελιών θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με ένα επαρκές μέγεθος κελιού στο κέλυφος όπου εφαρμόζονται οι εντολές τομής στο CFX (Intersection Control). Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε ένα πλέγμα το οποίο επηρεάζει όσο το δυνατόν λιγότερο την στιβαρότητα της επίλυσης χωρίς να έχει πολύ μεγάλο μέγεθος. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ ενός πλέγματος κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου στο Turbogrid και ενός με κέλυφος, τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στο Σχήμα 24.

Στον επόμενο πίνακα αναγράφονται τα μεγέθη των πλεγμάτων κελύφους για τις τρεις περιπτώσεις γεωμετριών.

Πίνακας 5. Μέγεθος Πλεγμάτων Κελύφους

Πλέγμα	Ομαλό Κέλυφος	Ορθογωνικές Αυλακώσεις	Γεωμετρία Ανακυκλοφορίας
Αριθμός Κελιών	2,704,088	3,575,627	2,808,220
Αριθμός Κόμβων	1,184,406	1,419,843	1,041,600

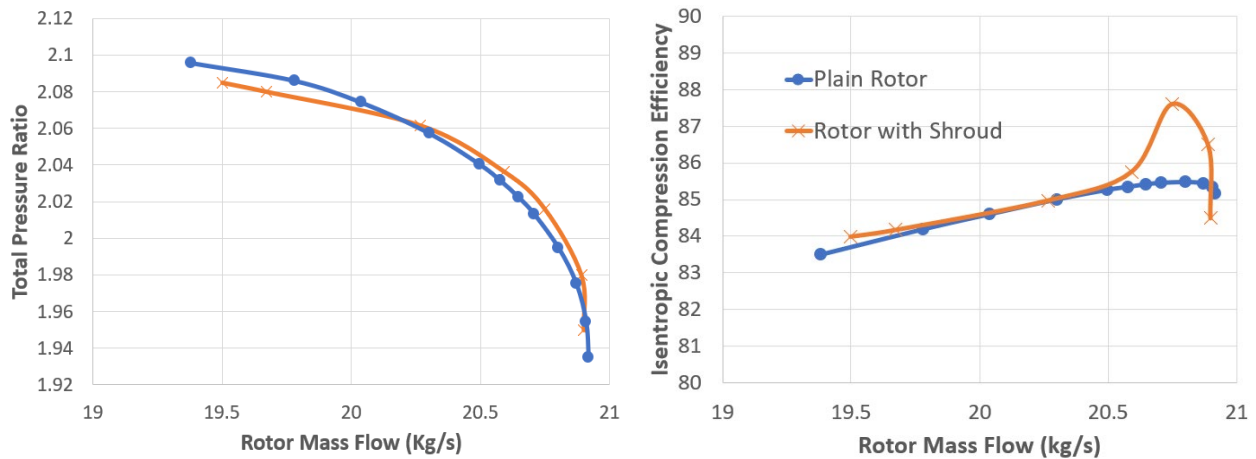
Το τελικό μέγεθος των πλεγμάτων, όταν εισήχθησαν οι γεωμετρίες κελύφους είναι 5,253,772 κελιά για το ομαλό κέλυφος, 6,125,311 κελιά για τις ορθογωνικές αυλακώσεις και 5,357,904 για την ανακυκλοφορία. Η εκτέλεση των αναλύσεων μόνιμης ροής πραγματοποιήθηκε από έναν υπολογιστή με 15 πυρήνες CPU με τον χρόνο εκτέλεσης για δεδομένες οριακές συνθήκες να είναι περίπου 2,5 ώρες. Για τον σχηματισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης χρειάστηκαν περίπου 15 εκτελέσεις για κάθε γεωμετρία, ωστόσο με την χρήση των αρχικών τιμών της ανάλυσης να προέρχεται από τα αποτελέσματα της τελευταίας επίλυσης, ο χρόνος σύγκλισης μειώθηκε στο μισό σε κάποιες περιπτώσεις.

Η ποιότητα του πλέγματος κελύφους αποτυπώνεται στον παρακάτω πίνακα ως προς τις μέσες τιμές των διαφορετικών συντελεστών ποιότητας για όλα τα κελιά του πλέγματος. Φαίνεται ότι σε σχέση με το πλέγμα του πτερυγίου, η ποιότητα είναι αρκετά μειωμένη. Οι τιμές του ορίου στον πίνακα είναι το όριο της τιμής για κάθε συντελεστή για τον οποίο το πλέγμα θεωρείται καλό (Good).

Πίνακας 6. Ποιότητα Πλεγμάτων Κελύφους

	Λοξότητα	Λόγος Πλευρών	Ορθογωνική Ποιότητα	Ποιότητα Πλέγματος
Όριο	< 0.5	< 800	> 0.7	> 0.5
Ομαλό Κέλυφος	0.2	17.9	0.79	0.36
Ορθογωνικές Αυλακώσεις	0.20	15.75	0.79	0.43
Ανακυκλοφορία	0.22	6.37	0.77	0.54

Για την ευκολία διαχωρισμού των δύο περιπτώσεων στο εξής ο δρομέας χωρίς κέλυφος θα ονομάζεται απλός ρότορας AP (Plain Rotor) και ο δρομέας με κέλυφος MK (Rotor with Shroud). Στο Σχήμα 24 αποτυπώνονται οι γραμμές λειτουργίας όπου φάνηκε καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις, ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι ο MK εμφάνισε αποκόλληση νωρίτερα από τον AP με ελάχιστη παροχή 19.5 kg/s και 19.38 kg/s αντίστοιχα. Το περιθώριο ευστάθειας για τον AP είναι 10.4% ενώ για τον MK 10.06%, διαφορά η οποία οφείλεται στον μειωμένο λόγο πιέσεων του MK 2.085, έναντι 2.095 για τον AP.



Σχήμα 26. Χαρακτηριστικές Καμπύλες Απλού Ρότορα AP (Plain Rotor) (αριστερά) και Με Κέλφος (Rotor with Shroud) (δεξιά)

Παρατηρήθηκε καλή συμφωνία των βαθμών απόδοσης για τις δύο περιπτώσεις, ωστόσο ο MK παρουσίασε μια υπερεκτίμηση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με τον AP με μια απότομη αύξηση κατά 2% στο σημείο σχεδιασμού. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην έλλειψη σταθερότητας κατά την επίλυση καθώς ο βαθμός απόδοσης παρουσίαζε διακυμάνσεις κατά 1-2% και δεν σταθεροποιήθηκε. Το φαινόμενο αυτό αποδεικνύει ότι η εισαγωγή του πλέγματος κελύφους αύξησε την εμφάνιση σφαλμάτων κατά την επίλυση λόγω της κακής ένωσης των δύο πλεγμάτων μεταξύ τους. Το επίπεδο των υπολοίπων κυμαίνονταν σε διαφορετική τάξη μεγέθους για τις δύο περιπτώσεις. Ο AP έφτασε μέχρι το $1e-06$ ενώ για τον MK τα υπόλοιπα δεν έπεσαν σε χαμηλότερο επίπεδο από το $1e-04$.

Λόγω των παραπάνω, οι υπόλοιπες γεωμετρίες κελύφους κατασκευάστηκαν με αντίστοιχες εντολές στα πλέγματά τους, ώστε να είναι αντίστοιχης ποιότητας και να εισάγουν το ίδιο επίπεδο σφαλμάτων στην επίλυση. Οι γεωμετρίες με αυλακώσεις συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του MK ώστε να φανεί με ευκρίνεια η επίδραση που έχουν οι αυλακώσεις στο πεδίο ροής και στην αύξηση πίεσης στον συμπιεστή.

Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογιστικών αναλύσεων του NASA Rotor 37, αρχικά με το απλό κέλυφος και εν συνεχεία με γεωμετρικές κελύφους. Στόχος της ενότητας αυτής είναι η διατύπωση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών του ρότορα, όταν λειτουργεί κοντά στο σημείο αποκόλλησης, και η σύγκρισή τους μεταξύ των διαφορετικών γεωμετριών κελύφους ώστε να αποτυπωθούν οι μηχανισμοί που συμβάλλουν στην επέκταση του περιθωρίου ευστάθειας.

5.1 Ομαλό Κέλυφος NASA Rotor 37

Η εξέταση του ομαλού κελύφους ξεκινά με την χαρακτηριστική καμπύλη, το περιθώριο ευστάθειας και το προφίλ των ολικών πιέσεων στην έξοδο του πτερυγίου. Εν συνεχεία αποτυπώνονται τα αεροδυναμικά φαινόμενα στην κορυφή του πτερυγίου, η οποία επηρεάζεται από τις γεωμετρικές κελύφους. Στην ενότητα 5.1 συγκρίνονται τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, ώστε να αποτυπωθούν τα φαινόμενα που εμφανίζονται καθώς ο συμπιεστής μεταβαίνει προς συνθήκες αποκόλλησης. Οι παράμετροι προς μελέτη αφορούν τα εξής αεροδυναμικά χαρακτηριστικά:

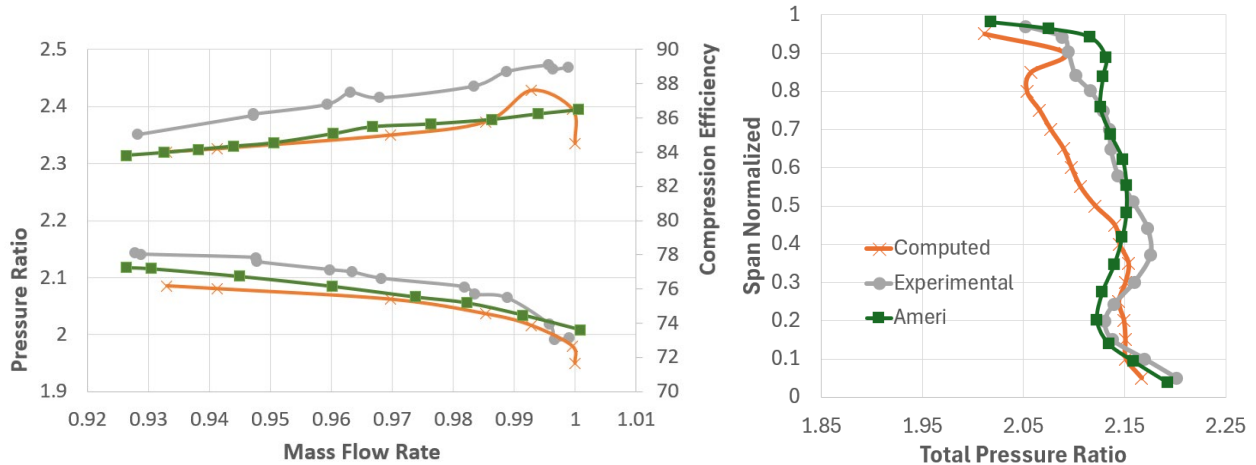
- Μέγεθος και κατεύθυνση δίνης ακροπτερυγίου
- Προφίλ πίεσης πτερυγίου
- Κρουστικό κύμα στην ακμή προσβολής του πτερυγίου.
- Ροή ακτινικού διακένου
- Συσσώρευση ρευστού χαμηλής ταχύτητας κοντά στο κέλυφος

Περιθώριο Ευστάθειας

Το περιθώριο ευστάθειας του ομαλού κελύφους είναι 10.06% με διαφορά 1.13% σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα όπου βρέθηκε 8.87%. Στο Σχήμα 25 γίνεται σύγκριση της χαρακτηριστικής καμπύλης και του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή με τα πειραματικά αποτελέσματα του Suder [2] και με την υπολογιστική ανάλυση του Ameri [7]. Η υπολογισμένη παροχή μάζας στραγγαλισμού είναι 20.9 kg/s, με την αντίστοιχη παροχή του πειράματος να είναι 20.93 kg/s. Η υπολογισμένη χρησιμοποιήθηκε για την αδιαστατοποίηση της παροχής στο σχήμα. Η μέγιστη απόκλιση του λόγου πιέσεων στην χαρακτηριστική καμπύλη μεταξύ πειράματος και υπολογισμών είναι 2.8% και εμφανίζεται στο σημείο αποκόλλησης. Παρατηρήθηκε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Η υποεκτίμηση του λόγου πίεσης και του βαθμού απόδοσης από το μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων $k - \omega$ σημειώθηκε από τον Ameri [7] σε μια αντίστοιχη υπολογιστική μελέτη του NASA Rotor 37 με ομαλό κέλυφος. Στο Σχήμα 25 αποτυπώνεται η τάση αυτή και φαίνεται να υπάρχει καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής.

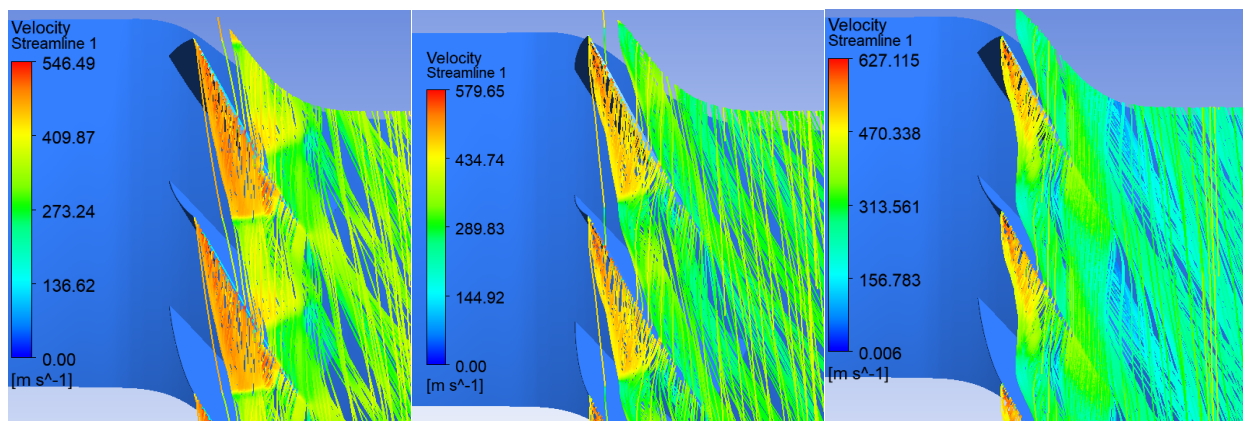
Παρόμοια συμπεριφορά έχει το προφίλ της ολικής πίεσης στην έξοδο του πτερυγίου για συνθήκες κοντά σε αποκόλληση, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 25. Παρατηρήθηκε μια υποεκτίμηση του λόγου πίεσης από το 50% έως 80% του εκπετάσματος με μέγιστη απόκλιση 2%, ωστόσο στα άκρα η συμφωνία είναι ικανοποιητική.



Σχήμα 27. Χαρακτηριστικές Καμπύλες (αριστερά) και Κατανομή Λόγου Ολικής Πίεσης κοντά σε Αποκόλληση (δεξιά)

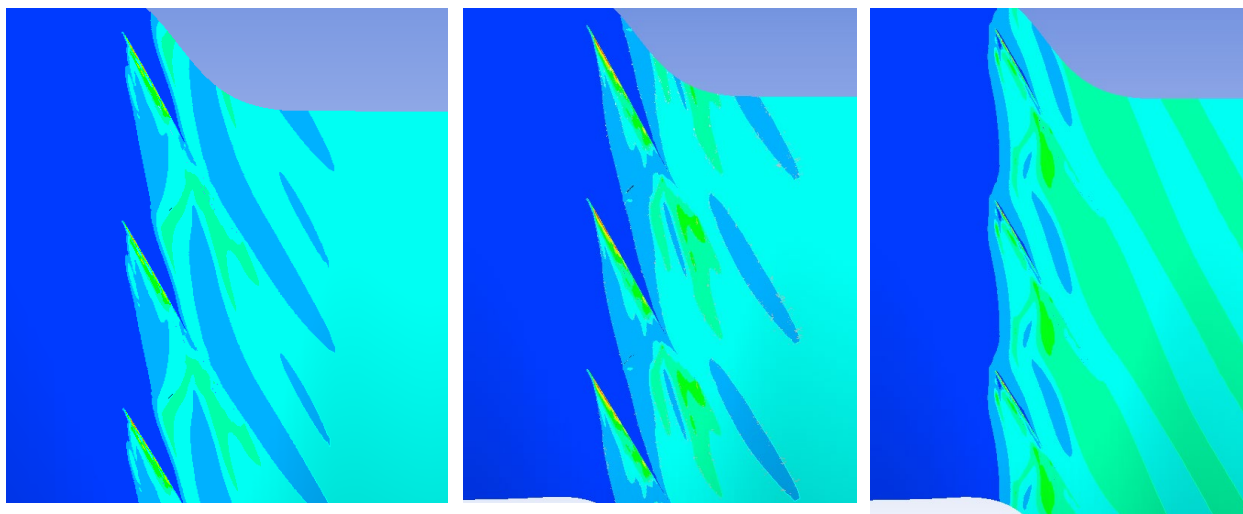
Δίνη Ακροπτερυγίου

Η δίνη ξεκινά από την ακμή προσβολής της κορυφής του πτερυγίου (Blade Tip Leakage Vortex) BTLV και προκαλείται από την μάζα του ρευστού που διαπερνά το ακτινικό διάκενο από την πλευρά κατάθλιψης προς την πλευρά αναρρόφησης. Καθώς ο συμπιεστής μεταβαίνει σε συνθήκες αποκόλλησης, η μέγιστη ταχύτητα της ροής αυξάνεται εντός της δίνης από 546 m/s σε 580 και τελικά σε 627 m/s. Η γωνία της δίνης σε σχέση με την κύρια ροή επίσης παρουσιάζει αυξητική συμπεριφορά και καθώς αναπτύσσεται, τέμνεται με την πλευρά κατάθλιψης του γειτονικού πτερυγίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 26. Η σύγκρουση της δίνης με το γειτονικό πτερύγιο αποτελεί μια σημαντική αιτία γένεσης απωλειών.



Σχήμα 28. Αποτύπωση Δίνης Ακροπτερυγίου σε κάτοψη κοντά σε συνθήκες Στραγγαλισμού (αριστερά) Σημείου Σχεδιασμού (κέντρο) και Αποκόλλησης (Δεξιά)

Η παραγωγή εντροπίας χρησιμοποιείται από μελετητές για την αποτύπωση της τροχιάς της δίνης στο ύψος της κορυφής του πτερυγίου [2]. Παρατηρήθηκε ότι σε συνθήκες αποκόλλησης, παράγεται εντροπία σε όλη την επιφάνεια του καναλιού κοντά στο κέλυφος και η πλευρά πίεσης των γειτονικών πτερυγίων αλληλοεπιδρά με την δίνη. Πλησιάζοντας τις συνθήκες πάλμωσης, η τροχιά της δίνης γίνεται περισσότερο καμπυλόγραμμη, καθώς κινείται μεταξύ των πτερυγίων, παρατήρηση την οποία εξέτασαν και οι Chen et all [4].

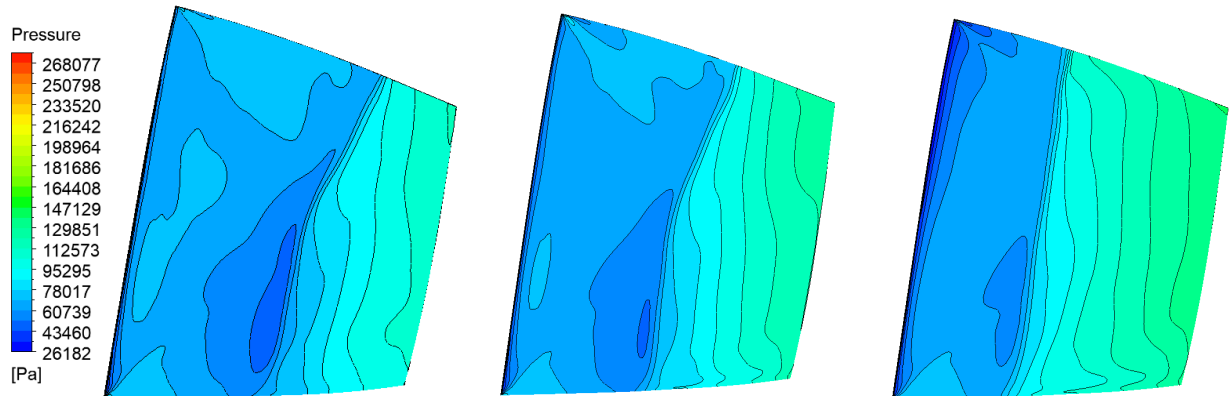


Σχήμα 29. Παραγωγή Εντροπίας από την δίνη ακροπτερυγίου. Συνθήκες Στραγγαλισμού (αριστερά), Σχεδιασμού (κέντρο), Αποκόλλησης (δεξιά)

Κατανομή Πίεσης

Η παράμετρος της στατικής πίεσης στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου, μπορεί να αναδείξει περιοχές αποκόλλησης, όπως μια περιοχή υψηλής πίεσης. Στο επόμενο σχήμα προβάλλονται τα

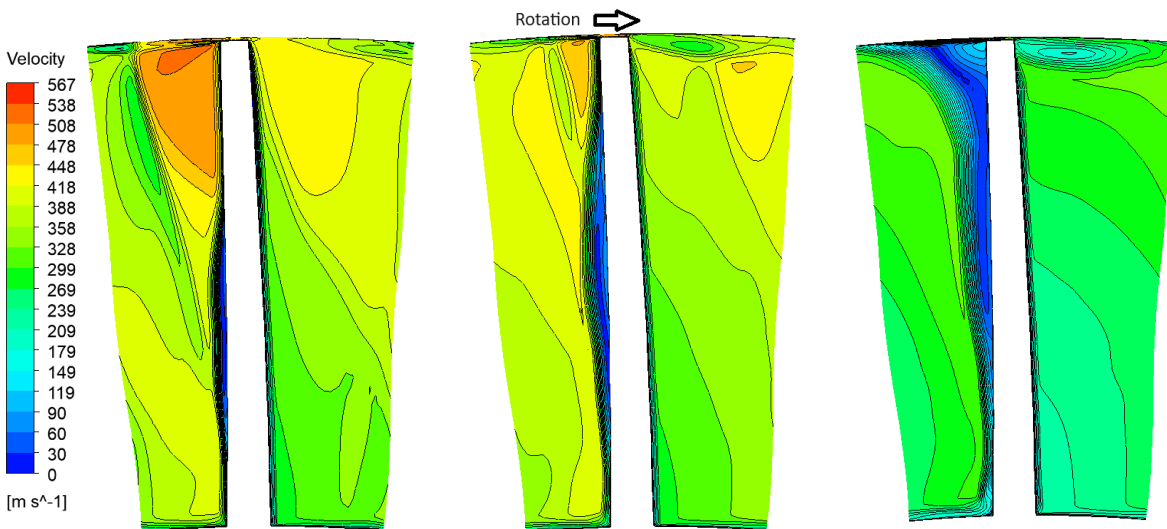
προφίλ της στατικής πίεσης στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου, για τρεις περιπτώσεις συνθηκών λειτουργίας.



Σχήμα 30. Προφίλ πίεσης στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Στραγγαλισμού (Αριστερά), Σημείο Σχεδιασμού (κέντρο) και Αποκόλλησης(δεξιά)

Για την αποτύπωση της κατανομής πίεσης, μετράται η αξονική θέση μέχρι όπου εμφανίζεται η πίεση των 78 Kpa κοντά στην κορυφή του πτερυγίου, για κάθε περίπτωση. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη πίεση διότι στην περίπτωση των συνθηκών σχεδιασμού, εμφανίζεται στην μεγαλύτερη επιφάνεια του πτερυγίου. Ξεκινώντας από τις συνθήκες μέγιστης παροχής, η περιοχή των 78 Kpa φτάνει έως την αξονική θέση $z = 2.5$ cm, ενώ για τις συνθήκες σχεδιασμού και αποκόλλησης οι θέσεις είναι $z = 2.25$ και $z = 1.65$ cm, αντίστοιχα. Επομένως κατά την μείωση της παροχής μάζας και αύξησης του λόγου πιέσεων του συμπιεστή, αναπτύσσονται περιοχές υψηλής πίεσης που κινούνται ανάντη, στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου.

Στο επόμενο σχήμα αποτυπώνεται το προφίλ της ταχύτητας σε ένα επίπεδο XY κάθετο στην διεύθυνση της ροής με απόσταση $Z = 2.25$ cm από την αρχή των αξόνων, που αντιστοιχεί σε θέση 58% ως προς την χορδή της κορυφής του πτερυγίου. Σε αυτή την αξονική θέση τοποθετείται γεωμετρία κελύφους.

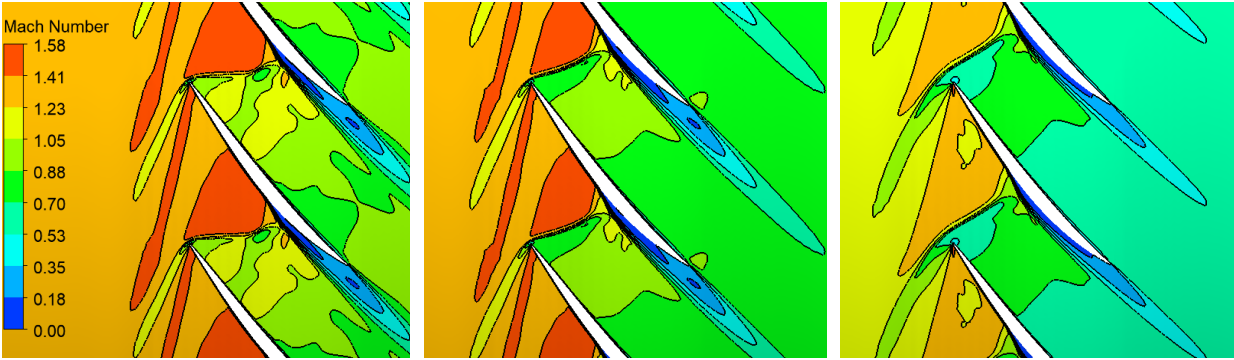


Σχήμα 31. Σχήματα ταχυτήτων ροής σε επίπεδο XY στο 58% του πτερυγίου. Συνθήκες Στραγγαλισμού (αριστερά), Σχεδιασμού (κέντρο), Αποκόλλησης (δεξιά)

Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο λόγος πιέσεων του συμπιεστή, αυξάνεται το πάχος του οριακού στρώματος στην πλευρά αναρρόφησης, το οποίο φανερώνεται από την ύπαρξη περιοχής με χαμηλές ταχύτητες ρευστού περίπου 60 m/s, καθώς η μέση αξονική ταχύτητα στο επίπεδο αυτό είναι 300 m/s σε συνθήκες αποκόλλησης. Η ύπαρξη του φαινομένου είναι πιο έντονη κοντά στην κορυφή του πτερυγίου. Η επίδραση της δίνης ακροπτερυγίου, καθώς πλησιάζει το γειτονικό πτερύγιο φανερώνεται από μια κυκλική περιοχή χαμηλής ταχύτητας κοντά στην κορυφή. Συνέπεια των παραπάνω φαινομένων είναι η μείωση της διαθέσιμης διατομής της ροής όπου η ταχύτητα του ρευστού ισούται με την μέση ταχύτητα της ροής και άρα εμφανίζεται έμφραξη (Blockage), η οποία προκαλεί απώλειες και άρα μείωση της απόδοσης του συμπιεστή.

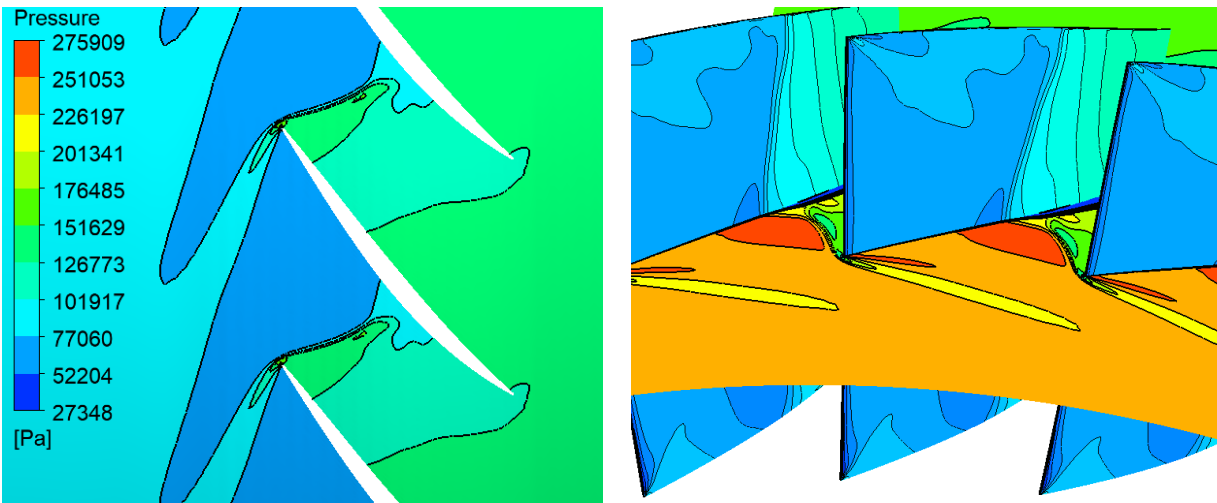
Σχετικός Αριθμός Mach μεταξύ των πτερυγίων

Ένα ακόμη φαινόμενο το οποίο επηρεάζει το πάχος των οριακών στρωμάτων είναι τα πλάγια κρουστικά κύματα που σχηματίζονται από την ακμή προσβολής και αλληλοεπιδρούν με το οριακό στρώμα του γειτονικού πτερυγίου. Το φαινόμενο αυτό δεν σχετίζεται απόλυτα με τις γεωμετρικές κελύφους καθώς δεν επηρεάζεται από αυτές, ωστόσο αξίζει να σημειωθεί διότι τα κρουστικά κύματα είναι πηγή απωλειών. Στο επόμενο σχήμα αποτυπώνεται ο αριθμός Mach στο μέσον του πτερυγίου για τρεις συνθήκες λειτουργίας.



Σχήμα 32. Αριθμός Mach σε επίπεδο YZ στο μέσον του πτερυγίου. Συνθήκες Στραγγαλισμού (αριστερά), Σχεδιασμού (κέντρο), Αποκόλλησης (δεξιά)

Παρατηρήθηκε ότι το κρουστικό κύμα προκαλεί αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος και της πίεσης στο σημείο εκείνο ενώ η ταχύτητα μειώνεται. Καθώς ο συμπιεστής μεταβαίνει σε συνθήκες χαμηλότερης παροχής μάζας, το κρουστικό κύμα κινείται ανάντη και μαζί το σημείο αλληλεπίδρασης με το γειτονικό πτερύγιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 30.

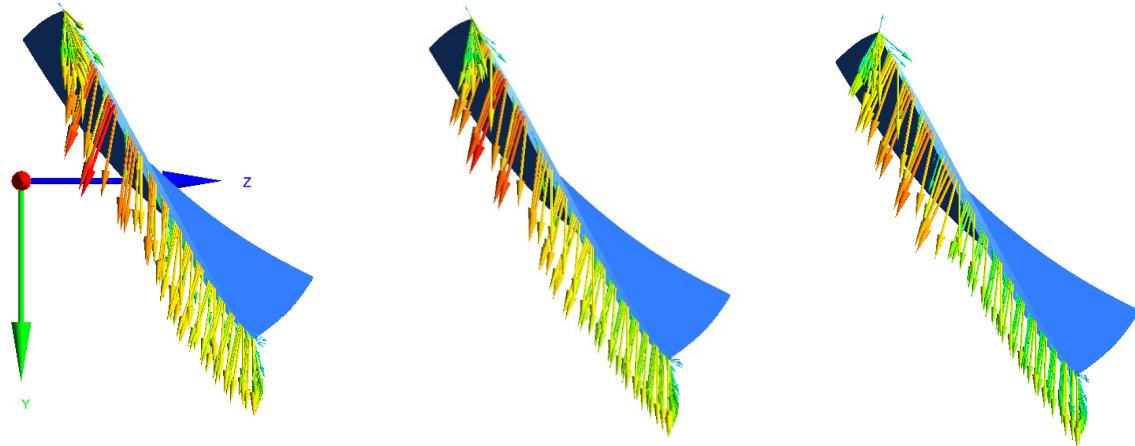


Σχήμα 33. Αριθμός Mach στο μέσον του πτερυγίου (αριστερά) Κατανομή πίεσης στην πλευρά αναρρόφησης σε συνδυασμό με τον αριθμό Mach (δεξιά)

Η μετακίνηση του κρουστικού κύματος επηρεάζει το προφίλ πίεσης του πτερυγίου και προκαλεί αύξηση του πάχους των οριακών στρωμάτων λόγω της αντίθετης κλίσης πίεσης κατάντη του κύματος. Το φαινόμενο αυτό είναι μια πηγή δευτερευουσών απωλειών του συμπιεστή.

Ροή ακτινικού διακένου

Η κατεύθυνση της ροής στο ακτινικό διάκενο είναι κάθετη στην ροή γύρω από το πτερύγιο και αντίθετη στην κύρια ροή εντός του συμπιεστή. Ο δρομέας περιστρέφεται γύρω από τον άξονα Z, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τον οπτικό προσδιορισμό την κατεύθυνσης της ροής στο διάκενο. Στο επόμενο σχήμα αποτυπώνονται τα διανύσματα κατεύθυνσης της ροής διακένου στην κορυφή του πτερυγίου, για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

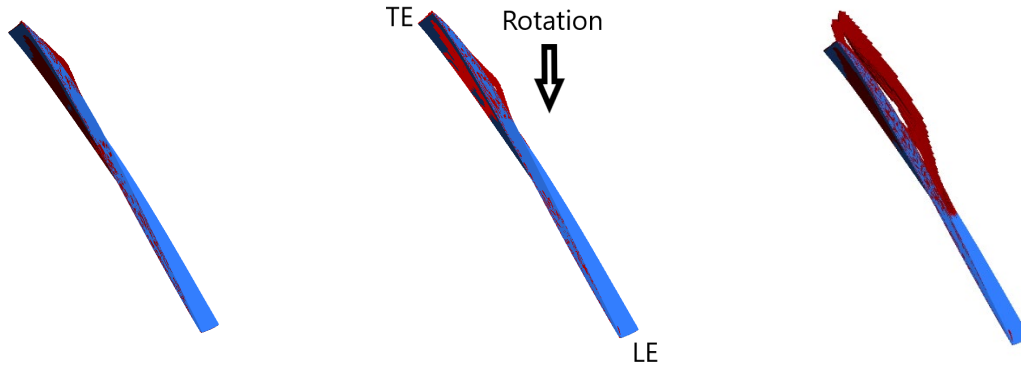


Σχήμα 34. Κατεύθυνση ροής ακτινικού διακένου σε τρεις συνθήκες λειτουργίας. Στραγγαλισμού (αριστερά) Σημείο Σχεδιασμού (κέντρο) Αποκόλλησης (δεξιά)

Παρατηρήθηκε ότι σε όλες τις συνθήκες η γωνία της ροής του ακτινικού διακένου έχει αρνητική συνιστώσα ταχύτητας ως προς τον άξονα Z, ειδικά στην περιοχή 10 % – 50 % της χορδής. Η αρνητική συνιστώσα Z είναι αντίθετη στην κατεύθυνση της κύριας ροής και για αυτό η προσπάθεια ελαχιστοποίησης του ακτινικού διακένου είναι επιθυμητή καθώς μειώνεται η διαθέσιμη επιφάνεια από την οποία μπορεί το ρευστό να διαπεράσει.

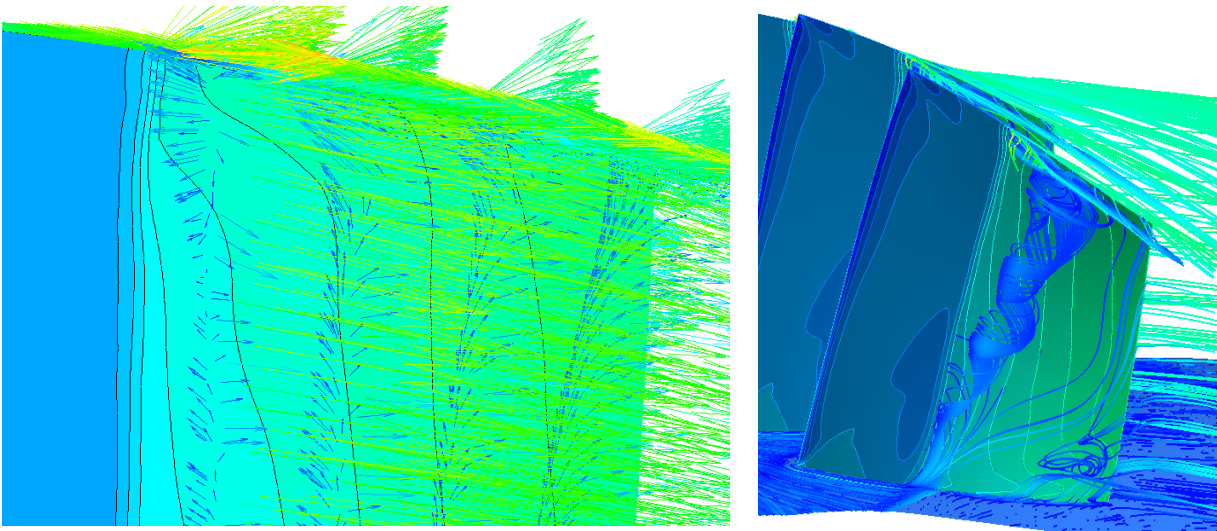
Ακτινικά Κινούμενη Ροή

Η αποκόλληση των οριακών στρωμάτων που παρατηρείται στις προηγούμενες παραγράφους σε συνδυασμό με τις φυγοκεντρικές δυνάμεις που επενεργούν στο ρευστό, είναι η αιτία γένεσης ακτινικής κίνησης ρευστού από τον πόδα προς την κορυφή του πτερυγίου. Ακτινική κίνηση του ρευστού παρατηρήθηκε σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Στο σημείο σχεδιασμού το φαινόμενο περιορίζεται κοντά στην ακμή φυγής, αλλά κοντά σε συνθήκες αποκόλλησης φτάνει έως το μέσον του πτερυγίου, με αποτέλεσμα την συσσώρευση ρευστού χαμηλής ταχύτητας κοντά στην κορυφή του πτερυγίου όπου αλληλεπιδρά με τα οριακά στρώματα του κελύφους και την δίνη ακροπτερυγίου. Η ακτινικά κινούμενη ροή παραλαμβάνεται από τις γεωμετρικές κελύφους και για αυτό μελετάται στην παράγραφο αυτή. Στο Σχήμα 33 αναπαρίσταται ο όγκος του ρευστού με ταχύτητα 35 m/s στην κορυφή του πτερυγίου για τρεις συνθήκες λειτουργίας.



Σχήμα 35. Όγκος ρευστού ταχύτητας 35 m/s στην κορυφή του πτερυγίου. Συνθήκες Στραγγαλισμού (αριστερά), Σχεδιασμού (κέντρο), Αποκόλλησης (δεξιά)

Παρατηρήθηκε ότι σε συνθήκες αποκόλλησης συσσωρεύεται ποσότητα ρευστού χαμηλής ταχύτητας κοντά στο κέλυφος του πτερυγίου, ενώ η απόλυτη ταχύτητα της κύριας ροής είναι 252 m/s στη περιοχή κοντά στο κέλυφος. Η συσσώρευση ρευστού χαμηλής ταχύτητας, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω είναι η αιτία της έμφραξης της ροής.



Σχήμα 36. Κατεύθυνση ροής κοντά στην ακμή φygής στην κορυφή του πτερυγίου (αριστερά) Τροχιά ρευστού με αφετηρία την πλήμνη του δρομέα (δεξιά)

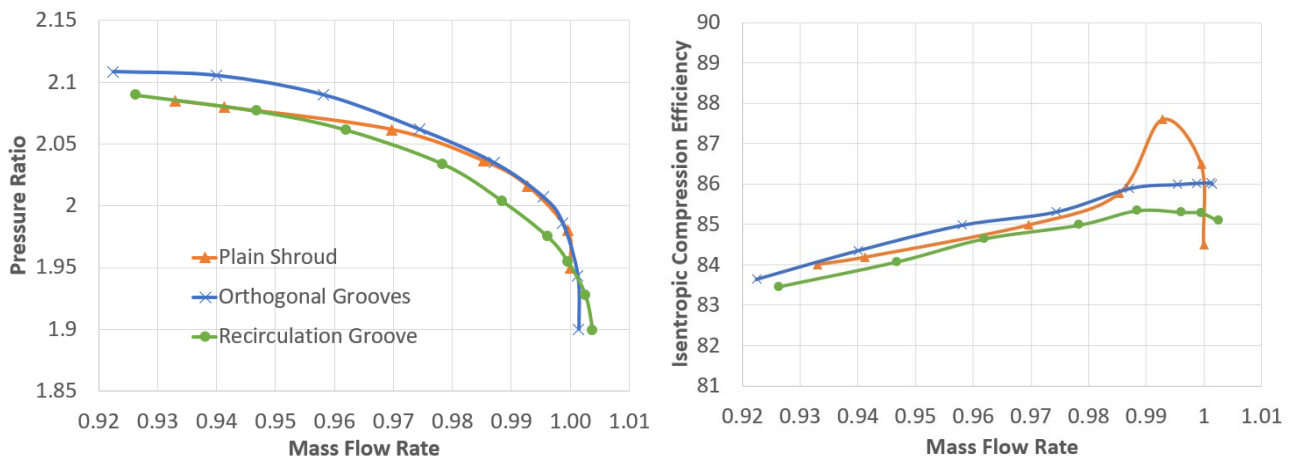
Η ακτινικά κινούμενη ροή που συσσωρεύεται στο κέλυφος είναι συνέπεια της αποκόλλησης των οριακών στρωμάτων της πλευράς υποπίεσης του πτερυγίου και της δίνης που ξεκινά από τον πόδα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 35. Στο σχήμα επίσης φαίνεται η ακτινική κατεύθυνση των διανυσμάτων ταχύτητας προς το κέλυφος στην πλευρά υποπίεσης του πτερυγίου. Τα φαινόμενα που εξετάστηκαν στην ενότητα αυτή φαίνεται πως συνεργάζονται μεταξύ τους και προκαλούν μια αλυσιδωτή γένεση τρισδιάστατων απωλειών, όπως είναι η έμφραξη του ρότορα από περιοχές ρευστού χαμηλής ταχύτητας, οδηγώντας τελικά στην πλήρη περιστροφική αποκόλληση.

5.2 Τροποποιημένες Γεωμετρίες Κελύφους

Η εισαγωγή αυλακώσεων στο κέλυφος είναι μια τεχνική παθητικού σχεδιασμού η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας και του μέγιστου λόγου πιέσεων ενός συμπιεστή. Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται μια σύγκριση των γεωμετριών σε συνθήκες κοντά σε αποκόλληση σε σχέση με τα αποτελέσματα του ομαλού κελύφους σε συνθήκες αποκόλλησης. Αρχικά παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα και εν συνεχεία με την λήψη στιγμιότυπων της ροής, αποτυπώνονται εικονικά οι μηχανισμοί που συμβάλλουν στην επέκταση του περιθωρίου ευστάθειας του συμπιεστή.

Αριθμητικά Αποτελέσματα

Η επίδραση των γεωμετριών είναι εμφανής στην χαρακτηριστική καμπύλη του συμπιεστή. Η παροχή μάζας κατά την αποκόλληση μειώνεται κατά 0.25 kg/s και επιτυγχάνεται αύξηση του λόγου πιέσεων και για τις δύο γεωμετρίες. Σε συνθήκες στραγγαλισμού, η παροχή για το απλό κέλυφος είναι 20.9 kg/s, βάση της οποίας κανονικοποιείται η χαρακτηριστική καμπύλη. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης στο σημείο σχεδιασμού μειώθηκε με την εισαγωγή αυλακώσεων, όπως έχει παρατηρηθεί από αρκετούς μελετητές, ωστόσο σε σημεία λειτουργίας εκτός σχεδιασμού οι γεωμετρίες κελύφους δεν προκαλούν σημαντική πτώση του βαθμού απόδοσης καθώς η διαφορά με το ομαλό κέλυφος είναι 0.4%. Οι ορθογωνικές αυλακώσεις παρουσιάζουν αυξημένη απόδοση σε σχέση με την γεωμετρία ανακυκλοφορίας και από το ομαλό κέλυφος σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού, ωστόσο η τελευταία παρατήρηση δεν έγινε με βεβαιότητα, καθώς η τιμή του βαθμού απόδοσης παρουσίασε διακύμανση από 0.5% έως 1% κατά την διάρκεια της επίλυσης. Η πτώση του βαθμού απόδοσης, σε μικρές παροχές μάζας, είναι εμφανής για όλες τις περιπτώσεις, συμπεριφορά η οποία είναι αναμενόμενη καθώς ο συμπιεστής απομακρύνεται από το σημείο σχεδιασμού.



Σχήμα 37. Χαρακτηριστικές Λειτουργίας Γεωμετριών Κελύφους

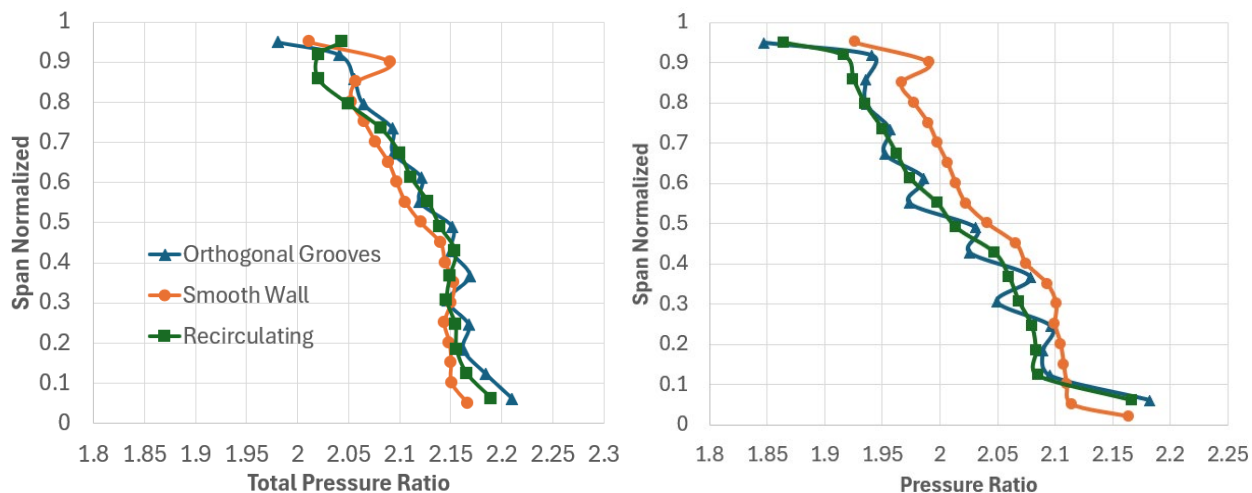
Το περιθώριο ευστάθειας (ΠΕ) αυξήθηκε με την εισαγωγή των αυλακώσεων. Η τιμή του ΠΕ έχει τιμή 10.06% για το απλό κέλυφος, 14.95% για τις ορθογωνικές αυλακώσεις και 13.8% για την αυλάκωση ανακυκλοφορίας. Η βελτίωση του ΠΕ οφείλεται κυρίως στην πτώση της παροχής

μάζας σε συνθήκες αποκόλλησης και στην αύξηση του λόγου πιέσεων. Σε αντίστοιχες μελέτες του NASA Rotor 37, οι Kawase, Rona [21] εντόπισαν αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας κατά 5% με την χρήση μιας αντίστοιχης γεωμετρίας ανακυκλοφορίας παρόμοιας με την παρούσα μελέτη, ενώ τοποθετώντας μια ορθογωνική αυλακώση στο μέσον του πτερυγίου το ΠΕ αυξήθηκε κατά 2.85%. Οι Chen et all [4] παρατήρησαν βελτίωση του περιθωρίου ευστάθειας κατά 3% τοποθετώντας 7 αυλακώσεις με βάθος 1.5 φορές το ακτινικό διάκενο καλύπτοντας σχεδόν όλη την χορδή του πτερυγίου. Η αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας, από 10% για το ομαλό κέλυφος, σε 15% για το τροποποιημένο, είναι αρκετά ικανοποιητική και συγκρίσιμη με άλλες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στον NASA Rotor 37. Οι υπερηχητικοί συμπίεστες έχουν περιορισμένο περιθώριο ευστάθειας, επομένως μια μεταβολή κατά σχεδόν 5% είναι σημαντική.

Πίνακας 7. Λειτουργικά χαρακτηριστικά γεωμετριών κελύφους

Γεωμετρία	Περιθώριο Ευστάθειας	Μέγιστος Βαθμός Απόδοσης	Λόγος Πιέσεων	Ελάχιστη Παροχή Μάζας (Kg/s)
Ομαλό Κέλυφος	10.06 %	87.60%	2.016	19.49
Ορθογωνικές Αυλακώσεις	14.95 %	86.03%	2.113	19.27
Ανακυκλοφορία	13.80%	85.34%	2.098	19.35

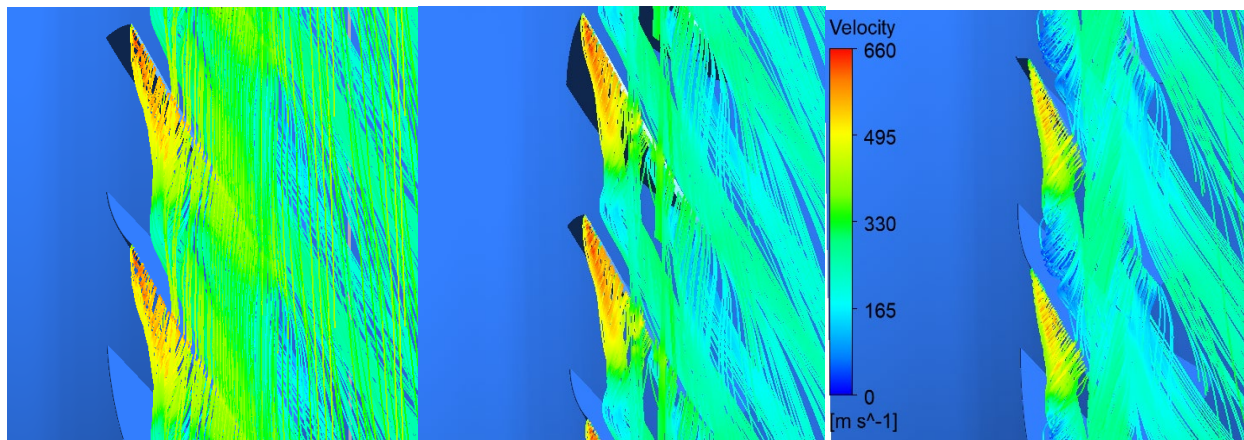
Η κατανομή των ολικών πιέσεων αποτυπώνεται σε ένα επίπεδο XY κάθετο στην διεύθυνση της ροής στην έξοδο του πτερυγίου. Παρατηρείται ότι σε συνθήκες αποκόλλησης, οι γεωμετρίες κελύφους παρουσίασαν μια μικρή αύξηση της ολικής πίεσης στο μέσον του πτερυγίου σε σχέση με το ομαλό κέλυφος. Σε συνθήκες σχεδιασμού, η αύξηση της ολικής πίεσης είναι υψηλότερη για το απλό κέλυφος σε όλο το μήκος του εκπετάσματος, γεγονός που υποδηλώνει την εμφάνιση απωλειών με την εισαγωγή αυλακώσεων, ωστόσο το μέγεθος της μέγιστης μεταβολής του λόγου συμπίεσης είναι μόλις 0.04 που αντιστοιχεί σε πτώση 1.9%.



Σχήμα 38. Κατανομή ολικού λόγου πιέσεων σε επίπεδο XY στην έξοδο του πτερυγίου σε συνθήκες Σχεδιασμού (Δεξιά) Αποκόλλησης (αριστερά)

Δίνη Ακροπτερυγίου

Στην προηγούμενη ενότητα φάνηκε πως η σύγκρουση της δίνης ακροπτερυγίου με την πλευρά πίεσης του γειτονικού πτερυγίου είναι μια πηγή απωλειών. Στο επόμενο σχήμα αποτυπώνεται η δίνη ακροπτερυγίου για τις τρεις γεωμετρίες κοντά σε συνθήκες αποκόλλησης.

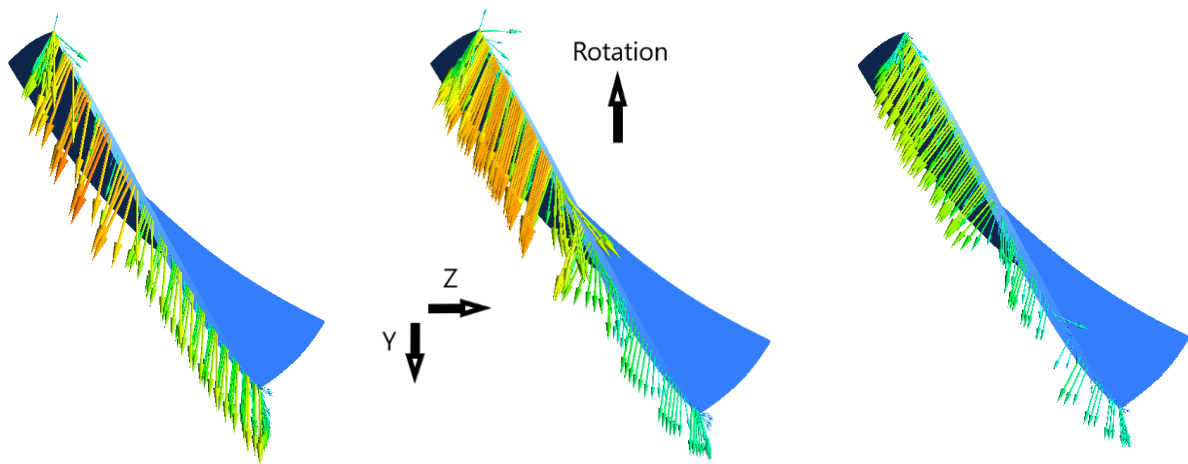


Σχήμα 39. Δίνη Ακροπτερυγίου για διαφορετικές γεωμετρίες. Ομαλό Κέλυφος(αριστερά) Ορθογωνικές Αυλακώσεις (Κέντρο) Γεωμετρία Ανακυκλοφορίας (δεξιά)

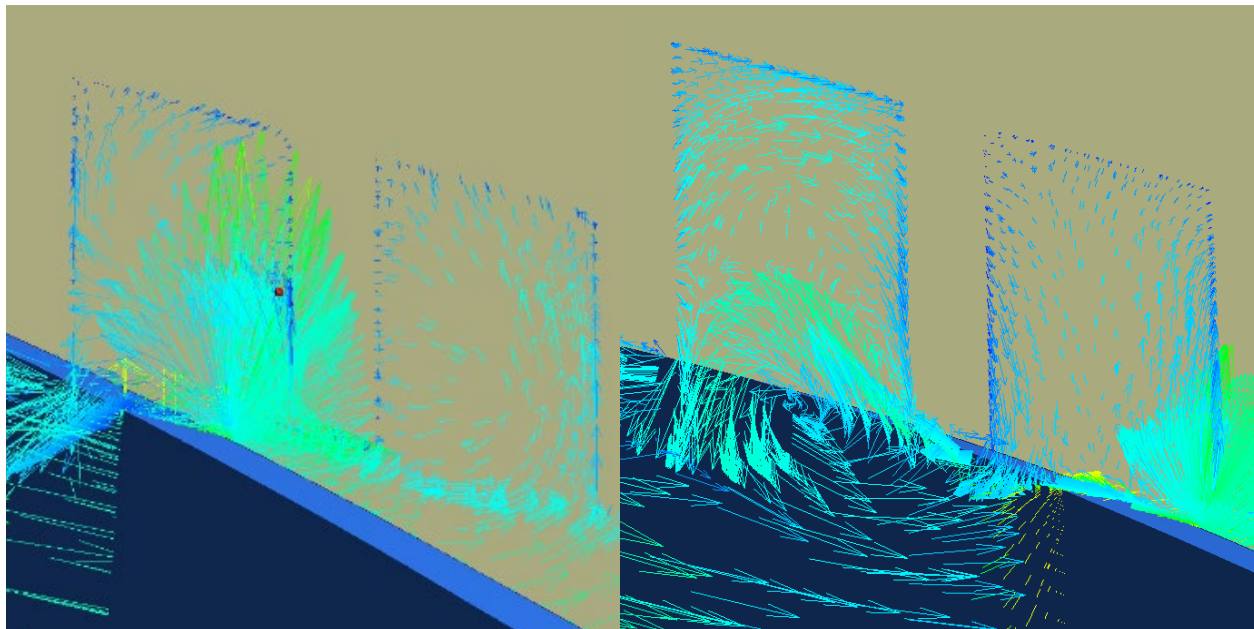
Με την εισαγωγή ορθογωνικών αυλακώσεων, παρατηρήθηκε ότι η δίνη ευθυγραμμίζεται ελαφρώς και απομακρύνεται από το γειτονικό πτερύγιο, ωστόσο το αποτέλεσμα αυτό δεν είναι εμφανές για την γεωμετρία ανακυκλοφορίας. Σε μια μελέτη περιφερειακών αυλακώσεων από τους Chen et al [4] οι μελετητές κατέληξαν ότι οι αυλακώσεις συμβάλλουν στην ευθυγράμμιση και αποδυνάμωση της δίνης στην κορυφή του πτερυγίου.

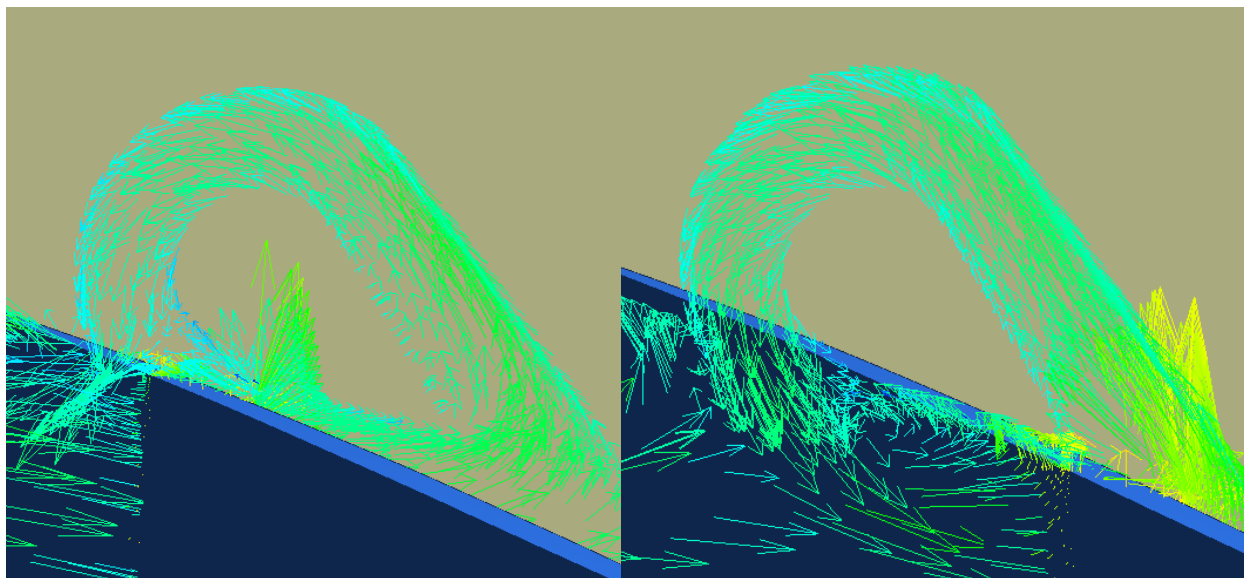
Ροή Ακτινικού διακένου

Με την εισαγωγή αυλακώσεων, η ροή ακτινικού διακένου απέκτησε περιφερειακή συνιστώσα ταχύτητας (διεύθυνση Y) στις θέσεις τοποθέτησης των αυλακώσεων και στις δύο περιπτώσεις. Η αλλαγή της κατεύθυνσης οφείλεται στην αλληλεπίδραση της παροχής ρευστού εντός της αυλάκωσης, όπου η κατεύθυνσή της είναι κυρίως περιφερειακή, με την ροή ακτινικού διακένου, η οποία εμφανίζει αρνητική συνιστώσα ταχύτητας στην διεύθυνση Z και επομένως είναι αντίθετη στην κύρια ροή.



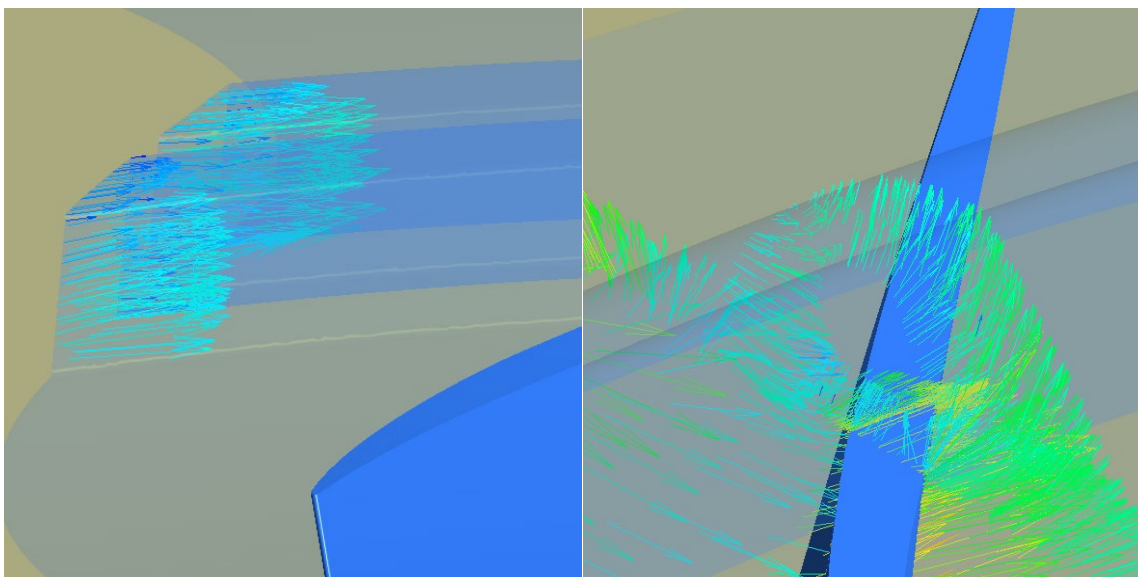
Σχήμα 40. Διανύσματα Ταχύτητας της ροής διακένου σε συνθήκες αποκόλλησης. Ομαλό Κέλυφος (αριστερά) Ορθογωνικές Αυλακώσεις (κέντρο) Ανακυκλοφορίας (δεξιά)





Σχήμα 41. Διανύσματα Κατεύθυνσης ροής Γεωμετριών Κελύφους

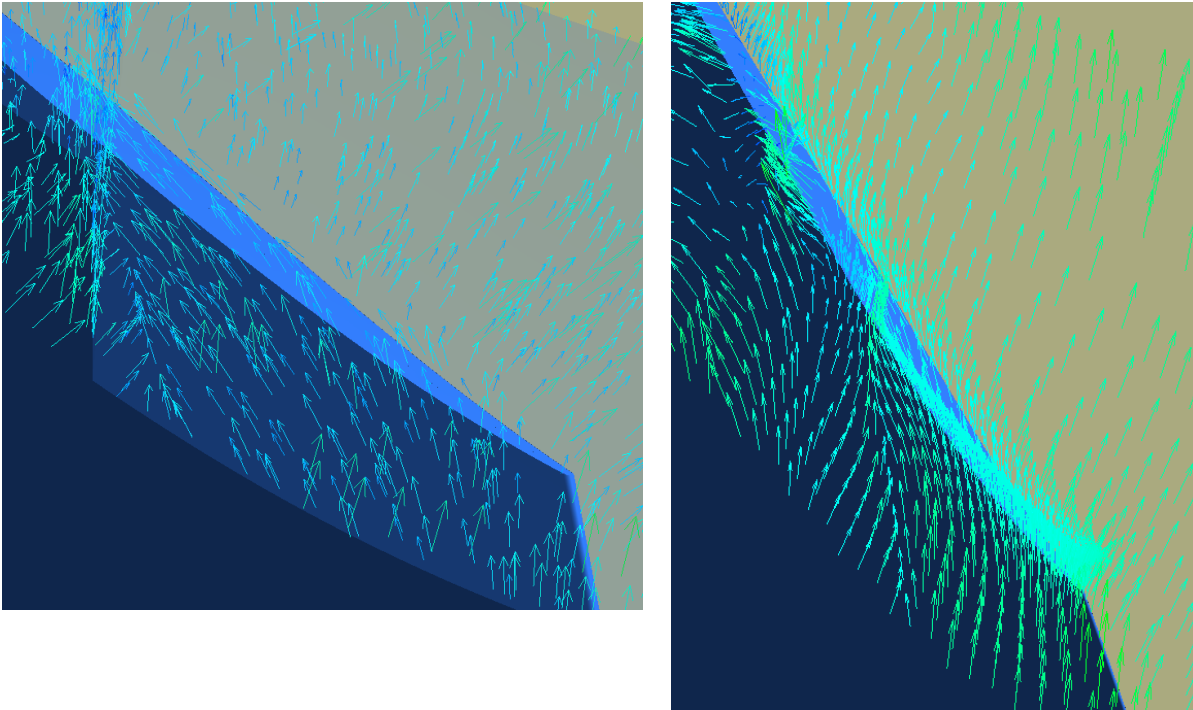
Εντός των αυλακώσεων, η κύρια κατεύθυνση της ροής είναι περιφερειακή και παράλληλη με τα τοιχώματα των αυλακώσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 41. Το ρευστό εισέρχεται στις αυλακώσεις από την πλευρά πίεσης του πτερυγίου και εξέρχεται στην πλευρά αναρρόφησης.



Σχήμα 42. Κατεύθυνση Διανυσμάτων Ταχύτητας εντός των αυλακώσεων

Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στις δύο περιπτώσεις, ωστόσο η γεωμετρία ανακυκλοφορίας έχει σχεδιαστεί με αυτόν τον στόχο. Από το παραπάνω Σχήμα 40 είναι εμφανής η είσοδος της ακτινικά κινούμενης ροής από το κατάντη άνοιγμα της γεωμετρίας και η έξοδος της ανάντη, με κατεύθυνση κάθετη προς το μέσον του πτερυγίου και παράλληλη στην κύρια ροή. Η λειτουργία της γεωμετρίας ανακυκλοφορίας έχει ως στόχο την ανακατεύθυνση της δευτερεύουσας ροής με

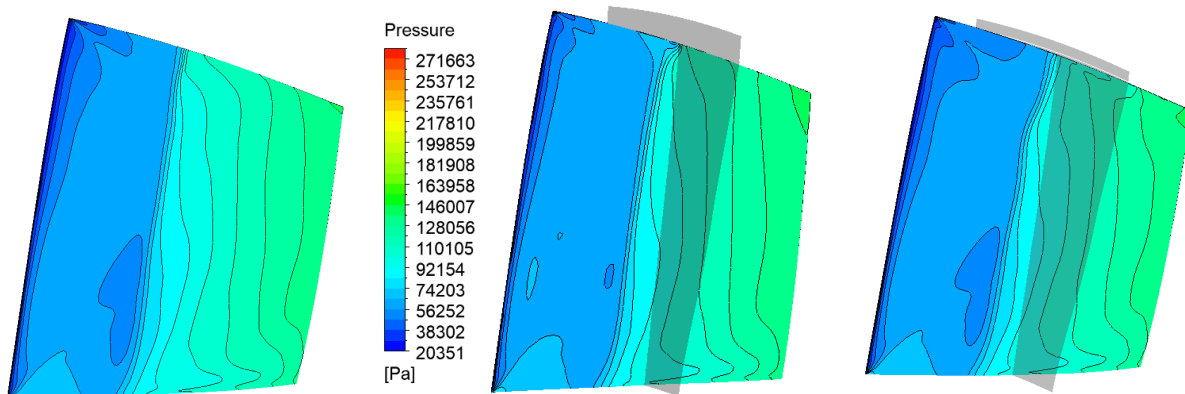
τέτοιον τρόπο ώστε να αποκτά ευνοϊκές συνιστώσες ταχύτητας σε σχέση με την κύρια ροή. Παράλληλα, διακόπτεται η αντίστροφη κίνηση της ροής από την έξοδο προς την είσοδο, διαμέσω του ακτινικού διακένου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 43. Η κίνηση αυτή έχει παρατηρηθεί σε συνθήκες αποκόλλησης και είναι μια αναπόφευκτη πηγή απωλειών λόγω της ύπαρξης του διακένου.



Σχήμα 43. Διανόσματα κατεύθυνσης ροής εντός ακτινικού διακένου κοντά σε συνθήκες αποκόλλησης

Κατανομή Πίεσης Πτερυγίου

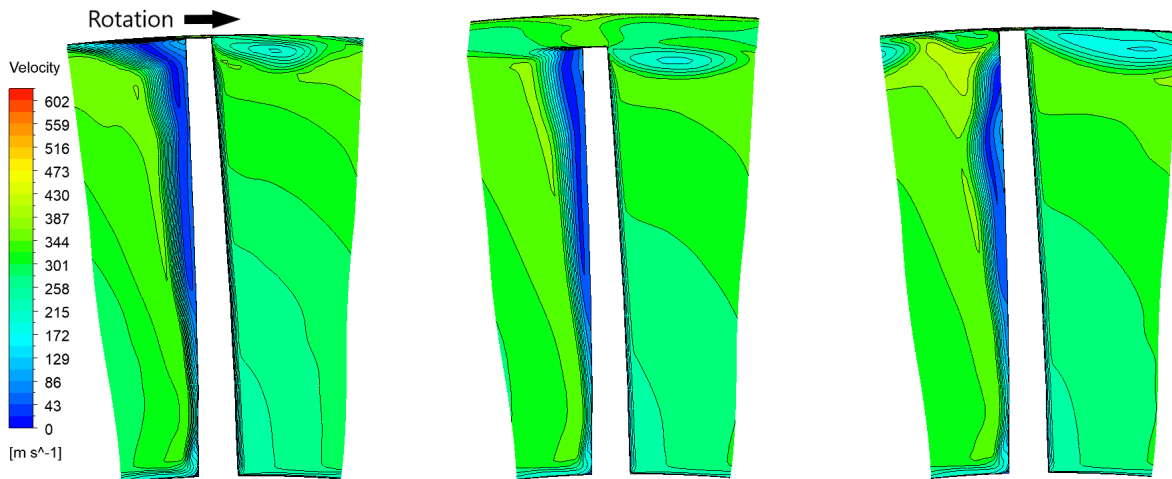
Στην ενότητα αυτή συγκρίνονται οι αξονικές θέσεις όπου εμφανίζεται χαμηλή πίεση στην κορυφή του πτερυγίου, ενώ παράλληλα εξετάζεται το πάχος του οριακού στρώματος στην κορυφή. Οι ημιδιαφανείς επιφάνειες στα επόμενα γραφήματα εκπροσωπούν την θέση των αυλακώσεων.



Σχήμα 44 . Προφίλ πίεσης στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου σε συνθήκες αποκόλλησης. Ομαλό κέλυφος (αριστερά) Ορθογωνικές Αυλακώσεις (κέντρο) Γεωμετρία Ανακυκλοφορίας (Δεξιά)

Η θέση της πίεσης των 78 Kpa μετακινείται κατάντη με την εισαγωγή των γεωμετριών κελύφους και φτάνει έως την θέση της αυλάκωσης. Για το ομαλό κέλυφος, η αξονική θέση είναι $z = 1.65$ cm, ενώ για την ορθογωνική αυλάκωση και την ανακυκλοφορία 1.85 cm και 1.8 cm αντίστοιχα. Επομένως εμφανίζεται μια βελτίωση του προφίλ πίεσης στην πλευρά αναρρόφησης και περιορίζεται η περιοχή της αποκολλημένης ροής, προσφέροντας βελτίωση στην αύξηση της ολικής πίεσης στην έξοδο του πτερυγίου.

Σε ένα επίπεδο XY με αξονική θέση $z = 2.25$ cm, που αντιστοιχεί σε θέση 58% της χορδής του πτερυγίου, αποτυπώνεται η αύξηση της ταχύτητας κοντά στο κέλυφος όταν εισάγονται γεωμετρίες κελύφους.



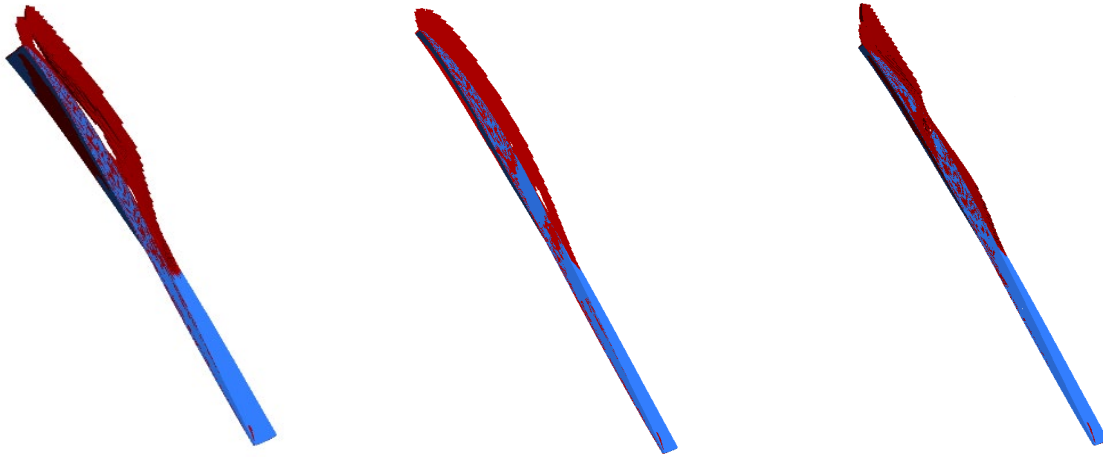
Σχήμα 45. Ταχύτητες ροής σε επίπεδο XY στο 58% του πτερυγίου. Ομαλό Κέλυφος (αριστερά) Ορθογωνικές Αυλακώσεις (κέντρο) Γεωμετρία Ανακυκλοφορίας (δεξιά)

Στην περίπτωση των ορθογωνικών αυλακώσεων, στο 58% της χορδής έχει τοποθετηθεί αυλάκωση. Εντός της αυλάκωσης παρατηρείται ότι η ροή έχει υψηλή ταχύτητα και μειώνεται το πάχος των οριακών στρωμάτων. Στην περίπτωση της ανακυκλοφορίας, το επίπεδο βρίσκεται κατάντη της εξόδου της ροής από το αυλάκι, όπου φαίνεται η ύπαρξη ρευστού υψηλής ταχύτητας με αποτέλεσμα την μείωση του πάχους των οριακών στρωμάτων και άρα της έμφραξης της ροής. Η μεταβολή αυτή είναι διπλής σημασίας καθώς, βελτιώθηκε το προφίλ πίεσης του πτερυγίου στην πλευρά αναρρόφησης και μειώθηκε η έμφραξη οδηγώντας σε προσκόλληση της ροής και βελτίωση της αναρροφητικής ικανότητας του συμπιεστή.

Ακτινικά Κινούμενη Ροή

Κατά την λειτουργία του συμπιεστή σε συνθήκες αποκόλλησης, αποτυπώθηκε στο ομαλό κέλυφος η κίνηση του ρευστού από την πλήμνη προς το κέλυφος. Η ύπαρξη ρευστού χαμηλής ταχύτητας

παρατηρείται στο επόμενο σχήμα όπου η κόκκινη περιοχή συμβολίζει την εμφάνιση ρευστού ταχύτητας 35 m/s. Ο όγκος του ρευστού είναι μικρότερος στην περίπτωση των γεωμετριών κελύφους.

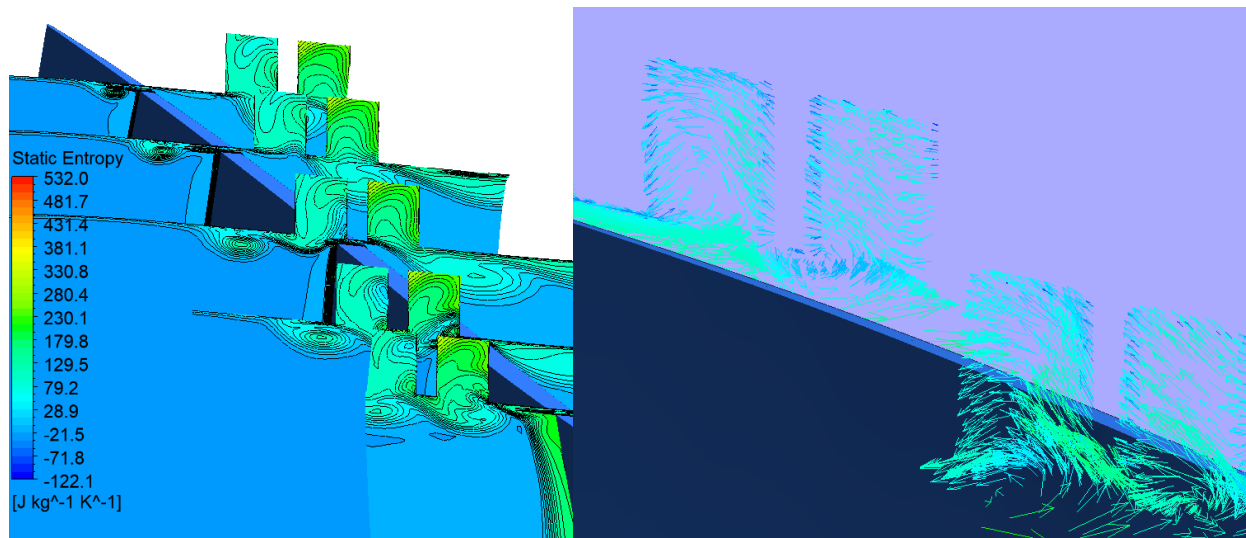


Σχήμα 46. Αποτύπωση Ισοεπιφάνειας ταχύτητας 35 m/s στην κορυφή του πτερυγίου κοντά σε συνθήκες αποκόλλησης. Ομαλό Κέλυφος (αριστερά) Ορθογωνική Αυλάκωση (κέντρο) Γεωμετρία Ανακυκλοφορίας (δεξιά)

Η μείωση του ρευστού χαμηλής ταχύτητας με την εισαγωγή αυλακώσεων, οφείλεται στην εκτόνωση του συσσωρευμένου ρευστού στις γεωμετρίες κελύφους. Όπως φάνηκε στα σχήματα 40 και 41, το ρευστό εισέρχεται στην αυλάκωση από την πλευρά πίεσης του πτερυγίου και εξέρχεται στην πλευρά αναρρόφησης συμπαρασύροντας το ρευστό χαμηλής ταχύτητας που συσσωρεύεται κοντά στο κέλυφος. Ο μηχανισμός αυτός είναι εντονότερος στην περίπτωση της γεωμετρίας ανακυκλοφορίας, καθώς η ροή εξέρχεται από το ανάντη άνοιγμα με κατεύθυνση ευνοϊκή ως προς την κύρια ροή.

Απώλειες Γεωμετριών Κελύφους

Οι γεωμετρίες κελύφους χαρακτηρίζονται ως μέσο παθητικού ελέγχου της ροής καθώς η ροή εισέρχεται στις αυλακώσεις όταν ο συμπιεστής λειτουργεί σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού όπου εμφανίζεται ακτινική κίνηση του ρευστού προς το κέλυφος. Στις συνθήκες σχεδιασμού οι αυλακώσεις προκαλούν απώλειες καθώς η ροή κοντά στο κέλυφος συναντά ένα σκαλοπάτι εντός του οποίου μπορεί να περιδινηστεί και να προκληθεί πτώση του βαθμού απόδοσης. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η παραγωγή εντροπίας εντός των αυλακώσεων και τα διανύσματα ταχύτητας της ροής σε επίπεδα XZ στις συνθήκες σχεδιασμού του συμπιεστή.



Σχήμα 47. Σχήμα Στατικής Εντροπίας (αριστερά) και Διανυσμάτων κατεύθυνσης εντός των αυλακώσεων (δεξιά)

Η γένεση απωλειών εντός των αυλακώσεων είναι εμφανής από τα υψηλά επίπεδα εντροπίας σε διαφορετικές θέσεις σε σχέση με το πτερύγιο ακόμα και όταν ο συμπιεστής λειτουργεί στο σημείο σχεδιασμού. Το γεγονός αυτό οφείλεται για την πτώση του βαθμού απόδοσης των γεωμετριών κελύφους όταν ο συμπιεστής λειτουργεί στις συνθήκες σχεδιασμού. Στα σημεία λειτουργίας όπου δεν εμφανίζονται φαινόμενα αποκόλλησης η εισαγωγή αυλακώσεων μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στην λειτουργία του συμπιεστή.

Παρά την γένεση απωλειών εντός των αυλακώσεων, η τοποθέτησή τους προσφέρει σημαντική βελτίωση του εύρους λειτουργίας καθώς, παρά την 4.9% βελτίωση του περιθωρίου ευστάθειας, η μεταβολή αυτή είναι σημαντική, διότι πριν τις τροποποιήσεις, το ΠΕ ήταν μόλις 10% και έφτασε το 14.9%. Η παθητική λειτουργία των αυλακώσεων σημαίνει πως σε συνθήκες όπου δεν εμφανίζονται έντονα φαινόμενα δευτερογενούς ροής, η εισαγωγή ρευστού εντός των αυλακώσεων είναι περιορισμένη και άρα η επίδρασή τους στην κύρια ροή μειώνεται.

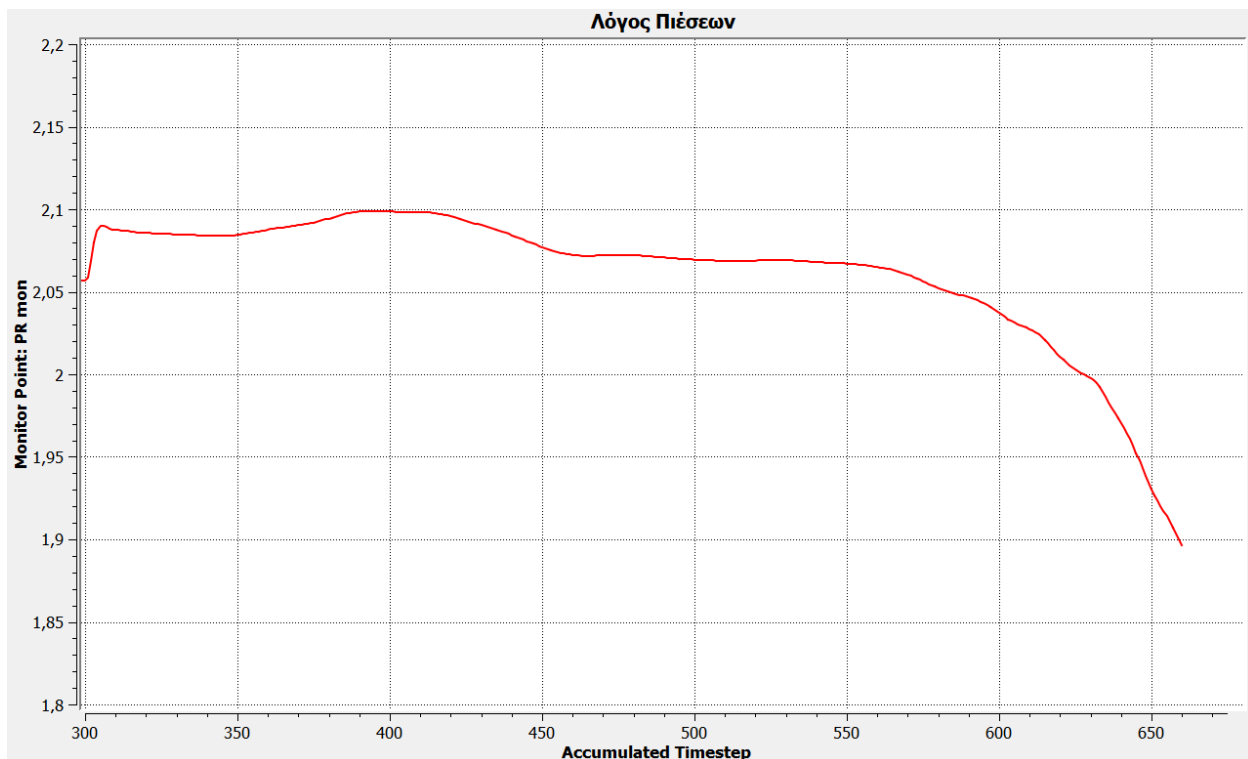
5.3 Χρονικά Μεταβαλλόμενο Πεδίο Ροής

Μέχρι το σημείο αυτό, ως αποκόλληση του συμπιεστή θεωρούνταν ένα σημείο στην γραμμή λειτουργίας από όπου ξεκινούν να εμφανίζονται φαινόμενα αποκόλλησης (Inception of Stall) καθώς το πεδίο ροής θεωρείται ότι διατηρείται σταθερό στον χρόνο και δεν μεταβάλλεται. Ο χαρακτηρισμός της αποκόλλησης προέκυπτε από την εμφάνιση διακυμάνσεων στην παροχή μάζας, τον λόγο πιέσεων και των υπολοίπων της επίλυσης μεταξύ των επαναλήψεων. Η ασταθής φύση της αποκολλημένης ροής δεν μπορεί να περιγραφεί με αυτόν τον τρόπο και άρα για να γίνει αποτύπωσή της πρέπει να εισαχθεί η παράμετρος του χρόνου. Στην ενότητα αυτή του κεφαλαίου

5, πραγματοποιείται μια αποτύπωση του πεδίου ροής όταν ο συμπιεστής βρεθεί σε συνθήκες αποκόλλησης.

Η αρχικοποίηση της ανάλυσης έγινε με την χρήση ενός πεδίου ροής, από μια επίλυση Steady State με παροχή μάζας 0.95 της μέγιστης, ως αρχικές συνθήκες. Έχει βρεθεί ότι η αρχή της αποκόλλησης εντοπίζεται σε παροχή 0.93 της παροχής στραγγαλισμού. Οι οριακές συνθήκες στην είσοδο του χωρίου διατηρήθηκαν οι ίδιες με προηγούμενες αναλύσεις, ολική θερμοκρασία 288.15 Kelvin και ολική πίεση 101,325 Pa. Στην έξοδο τέθηκε στατική πίεση 132 KPa, υψηλότερη κατά 1 KPa σε σχέση με την αντίστοιχη πίεση όπου εμφανίστηκε αποκόλληση σε συνθήκες χρονικά μη μεταβαλλόμενου πεδίου ροής.

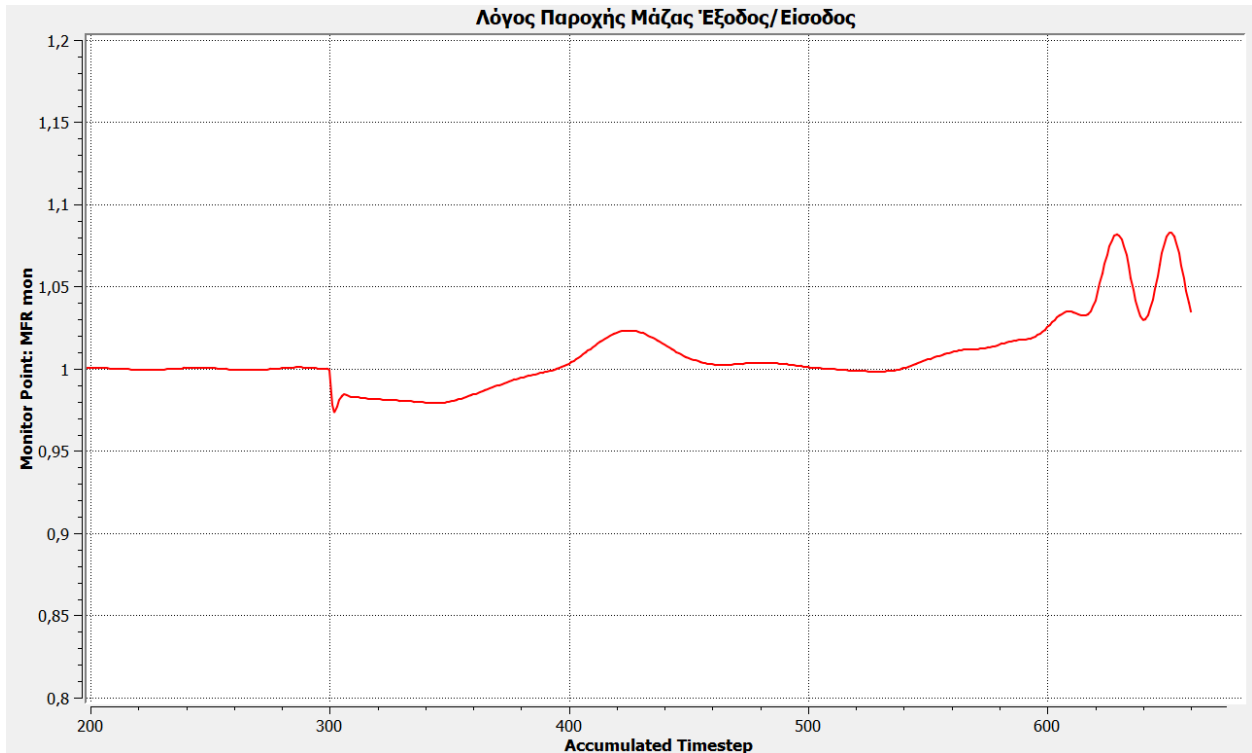
Παρακάτω παρουσιάζονται οι συντελεστές του λόγου πιέσεων και του λόγου της παροχής μάζας μεταξύ εισόδου και εξόδου από το χωρίο. Οι αρχικές συνθήκες της ροής φτάνουν έως το 300^ο χρονικό βήμα από όπου ξεκινά η επίλυση τύπου Transient. Με την πάροδο των χρονικών βημάτων ο λόγος πιέσεων που παράγεται από τον συμπιεστή μειώνεται.



Σχήμα 48. Λόγος Πιέσεων ανά Χρονικό Βήμα

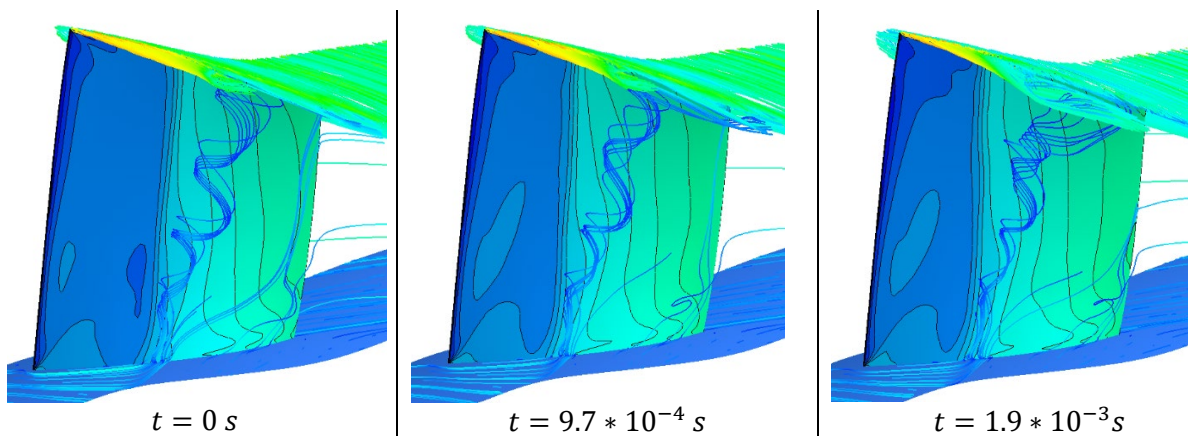
Η ασταθής λειτουργία του ρότορα παρατηρήθηκε από τον λόγο της παροχής μάζας της εξόδου προς την είσοδο στο χωρίο, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 49. Από το 200^ο έως το 300^ο βήμα, η μεταβολή του λόγου είναι αρκετά μειωμένη, καθώς η επίλυση στις συνθήκες εκείνες είχε σταθεροποιηθεί σε μια λύση. Με την αύξηση της πίεσης στην έξοδο, παρατηρήθηκε μια απότομη μεταβολή του λόγου, ο οποίος προς το τέλος της επίλυσης είχε ταλαντωτική συμπεριφορά. Η

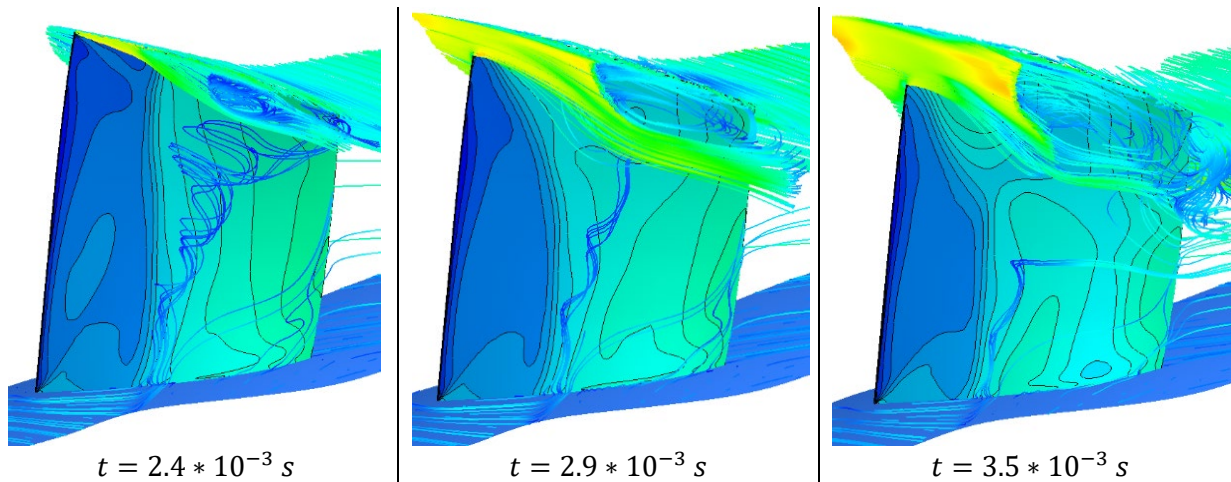
διακύμανση του λόγου αποδεικνύει ότι ο συμπιεστής εισήλθε σε μια κατάσταση ασταθούς λειτουργίας.



Σχήμα 49. Λόγος Παροχών Εισόδου – Εξόδου

Εν συνεχεία αποτυπώνεται το ροϊκό πεδίο του περυγίου καθώς επέρχεται αποκόλληση στον συμπιεστή σε 6 στιγμιότυπα. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση του πεδίου είναι η κατανομή πίεσης στην επιφάνεια του περυγίου, οι γραμμές ροής που ξεκινούν από το ακτινικό διάκενο και γραμμές ροής που ξεκινούν από την πλήμνη.





Σχήμα 50. Διαδοχικές εικόνες του πεδίου ροής σε συνθήκες αποκόλλησης

Από τις εικόνες του πεδίου ροής είναι εμφανής η αύξηση της πίεσης στην πλευρά υποπίεσης του πτερυγίου και παράλληλα η αύξηση του μεγέθους της δίνης ακροπτερυγίου η οποία καλύπτει όλη την κορυφή του πτερυγίου. Η μεταβολή του μεγέθους της δίνης και η αστάθεια του ροϊκού πεδίου καθώς ο συμπιεστής οδηγείται σε αποκόλληση, αποδεικνύουν ότι η στις συνθήκες αυτές τα φαινόμενα που εμφανίζονται εξαρτώνται από τον χρόνο και δεν αποτυπώνονται με ένα μόνιμο πεδίο ροής. Για αυτόν τον λόγο η παραπάνω αναφορές σε αποκόλληση αφορούν την έναρξή της και όχι το σημείο όπου εμφανίζεται πλήρης αποκόλληση. Η μελέτη των γεωμετριών κελύφους σε μια Transient ανάλυση θα προσέφερε καλύτερη αποτύπωση του πεδίου ροής και πιθανότατα θα επέστρεφε αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με την Steady πρόβλεψη της χαρακτηριστικής καμπύλης.

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα και Προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε υπολογιστική μελέτη δύο γεωμετριών κελύφους στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του NASA Rotor 37 κατά την λειτουργία του σε πλήρη περιστροφική ταχύτητα. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS CFX για την επίλυση των εξισώσεων RANS που αποτελούν μια απλοποιημένη μορφή των εξισώσεων Navier Stokes. Με την χρήση του μοντέλου τύρβης $k - \omega$ SST προέκυψε ικανοποιητική πρόβλεψη του πεδίου ροής και των λειτουργικών χαρακτηριστικών σε σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα. Τα πλέγματα των πτερυγίων κατασκευάστηκαν στο Turbogrid, ένα εξειδικευμένο εργαλείο κατασκευής πλεγμάτων υψηλής ποιότητας για πτερυγώσεις συμπιεστών και στροβίλων.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των γεωμετριών συνοψίζονται ως εξής:

1. Η τοποθέτηση δύο περιφερειακών ορθογωνικών αυλακώσεων στο μέσον της χορδής, με πλάτος 12% της χορδής και βάθος 12 φορές το ακτινικό διάκενο, προσφέρουν αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας από 10% για το ομαλό κέλυφος σε 14.9%.
2. Η τοποθέτηση μιας περιφερειακής αυλάκωσης ελλειπτικής διατομής, σχήματος ανακυκλοφορίας, με ακτίνα 11.5% της χορδής και γωνία τοποθέτησης 55° οδηγεί σε αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας κατά 3.74%
3. Η εφαρμογή των γεωμετριών κελύφους προκάλεσε μείωση του βαθμού απόδοσης του συμπιεστή κατά 2% στο σημείο σχεδιασμού

Οι κύριοι μηχανισμοί των γεωμετριών κελύφους που επιδρούν κατά την λειτουργία του συμπιεστή είναι:

1. Ανακατεύθυνση της δίνης ακροπτερυγίου μακριά από το γειτονικό πτερύγιο
2. Ελάττωση της αξονικής συνιστώσας ταχύτητας της παροχής μάζας διακένου στις θέσεις τοποθέτησης των αυλακώσεων
3. Εκτόνωση της ακτινικά κινούμενης ροής από τις αυλακώσεις
4. Μείωση της έμφραξης που προκαλείται από την συσσώρευση ρευστού χαμηλής ταχύτητας κοντά στο κέλυφος

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κατά την πραγματοποίηση της μελέτης προέκυψαν κάποιοι προβληματισμοί οι οποίοι ενδεχομένως να αποτελούν ιδέες για μελλοντική έρευνα στο αντικείμενο των γεωμετριών κελύφους. Λαμβάνοντας υπόψη τα θέματα αυτά δίνονται παρακάτω μερικές προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση κάποιων γεωμετριών κελύφους και μοντελοποίησης του προβλήματος:

- Ανάπτυξη πλέγματος κελύφους με καλύτερη ποιότητα, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές πλεγματοποίησης ώστε να επιτευχθεί ένωση των κελιών 1-1 μεταξύ πτερυγίου και κελύφους
- Μελέτη των γεωμετριών σε συνθήκες μερικού φορτίου και χαμηλότερων στροφών λειτουργίας ώστε να μελετηθεί η επίδραση των αυλακώσεων σε συνθήκες μειωμένης παροχής μάζας και φόρτου
- Διερεύνηση του αριθμού των αυλακώσεων και των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών στην επέκταση του εύρους λειτουργίας του συμπιεστή. Μπορεί να διερευνηθεί η εισαγωγή κλίσης στις αυλακώσεις σε σχέση με το κέλυφος
- Μελέτη αξονικών αυλακώσεων και διερεύνηση των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών στην επέκταση του περιθωρίου ευστάθειας
- Προσομοίωση ολόκληρου του ρότορα χρησιμοποιώντας την δυνατότητα ταχύτερης επίλυσης των εξισώσεων με την χρήση κάρτας γραφικών (GPU solvers) ώστε να προσομοιωθεί η πλήρης περιστροφική αποκόλληση του συμπιεστή
- Εφαρμογή αυλακώσεων παρόμοιας γεωμετρίας σε διαφορετικούς συμπιεστές
- Μελέτη των γεωμετριών κελύφους και σχεδίαση της χαρακτηριστικής καμπύλης με ανάλυση τύπου Transient καθώς, τα φαινόμενα που εμφανίζονται κοντά σε αποκόλληση είναι ασταθή και μεταβάλλονται χρονικά

Βιβλιογραφία

- [1] Dixon S.L., Hall C.A., *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, 2014
- [2] Suder Kenneth L., *Experimental Investigation of the Flow Field in a Transonic Axial Flow Compressor With Respect to the Development of Blockage and Loss*, NASA-TM-107310, 1996
- [3] Xinqian Zheng, Heli Yang, *End-Wall Boundary Layers and Blockages of Multistage Axial Compressors Under Different Conditions*, Journal of Propulsion and Power, Vol.33 No.4, 2017
- [4] Haixin Chen, Xudong Huang, Ke Shi, Song Fu, *A CFD Study of Circumferential Groove Casing Treatments in a Transonic Axial Compressor*, Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2010-23606, 2010
- [5] Roberto Biollo, Ernesto Benini, *Recent advances in transonic Axial compressor aerodynamics*, Progress in Aerospace Sciences, 56 1-18, 2013
- [6] Reid Lonnie, Moore Royce D., *Design and Overall Performance of Four Highly Loaded High Speed Inlet Stages for an Advanced High-Pressure-Ratio Core Compressor*, NASA-TP-1337, 1978
- [7] Ameri Ali A., *NASA Rotor 37 CFD Code Validation*, NASA/CR-2010-216235, 2009
- [8] Moore Royce D., Reid Lonnie, *Performance of Single-Stage Axial-Flow Transonic Compressor With Rotor and Stator Aspect Ratios of 1.19 and 1.26 respectively and With Design Pressure Ratio of 2.05*, NASA-TP-1659, 1980
- [9] Wadia A.R., Law C.H., *Low aspect ratio transonic rotors : Part 2 – Influence of location of Maximum Thickness on Transonic Compressor Performance*, ASME Journal of Turbomachinery, 1993
- [10] Hembera M., Danner F., Kau H.-P., Butzeck C., Johann E., *Development of Circumferential Grooves for Axial Compressors based on Flow Mechanisms*, 44th Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2008-4988, 2008
- [11] Haixin Chen, Song Fu, *CFD investigation on the Circumferential Grooves Casing Treatment of Transonic Compressor*, Proceedings of ASME Turbo Expo, 2008
- [12] Hathaway Michael D., *Passive Endwall Treatments for Enhancing Stability*, NASA/TM-2007-214409, 2007
- [13] Gautham A. Amin, Pramod B. Salunkhe, Chandrakanth R. Kini, *A Parametric Study on the Effect of Casing Treatment Slots on Performance Enhancement of a Single Stage Axial Flow Compressor*, Proceedings of the ASME, GTINDIA2021-76007, 2021

- [14] Werner R. Britsch, Walter M. Osborn, Mark R. Laessig, *Effects of Diffusion Factor Aspect Ratio and Solidity on Overall Performance of 14 Compressor Middle Stages*, NASA-TP-1523, 1979
- [15] John D. Anderson, Jr, *Modern Compressible Flow*, McGraw-Hill, 2003
- [16] Frederick H. Abernathy, *Film Notes for Fundamentals of Boundary Layers*, National Committee for Fluid Mechanics Films, 1970
- [17] Suder L. Kenneth, Mark L. Celestina, *Experimental and Computational Investigation of the Tip Clearance Flow in a Transonic Axial Compressor Rotor*, NASA-TM-106711, 1994
- [18] Suder Kenneth L., Rodrick V. Chima, Anthony J. Strazisar, *The Effect of Adding Roughness and Thickness to a Transonic Axial Compressor Rotor*, NASA TM-106958, 1994
- [20] Dunham J., *CFD Validation for Propulsion System Components*, AGARD-AR-355, 1998
- [21] Kawase Motoyuki, Rona Aldo, *Effect of Recirculation Type Casing Treatment on a Highly Loaded Axial Compressor Rotor*, International Journal Turbomachinery and Power, 2019
- [22] Ruochi Pan, Zhaoyun Song, Bo Liu, *Optimization Design and Analysis of Supersonic Tandem Rotor Blades*, Energies, 2020
- [23] Ansys CFX – Solver Theory Guide, Release 2021 R2
- [24] Saravanamuttoo H.I.H., Rogers G.F.C., Cohen H., Straznicki P.V., Nix A.C., *Gas Turbine Theory 7th Edition*, ISBN-1292093099
- [25] Rodrick V. Chima, *SWIFT Code Assessment for two Similar Transonic Compressors*, NASA/TM – 2009 – 215520, 2009
- [26] Boretti A., *Experimental and Computational Analysis of a Transonic Compressor Rotor*, 17th Australian Fluid Mechanics Conference, 2010
- [27] Kenneth L. Suder, Rodrick V. Chima, Anthony J. Strazisar, William B. Roberts, *The Effect of Adding Roughness and Thickness to a Transonic Axial Compressor Rotor*, NASA-TM-106958, 1994
- [28] Stephane Burguburu, Arnaud le Pape, *Improved aerodynamic design of Turbomachinery bladings by numerical optimization*, Aerospace Science and Technology 7 277-287, 2003
- [29] Ghila M. Abduragaz, *Numerical Investigation of Recess Casing Treatments in Axial Flow Fans*, Ph.D Thesis, Cranfield University, 2003