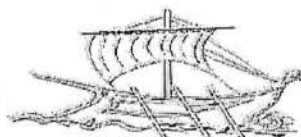


ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

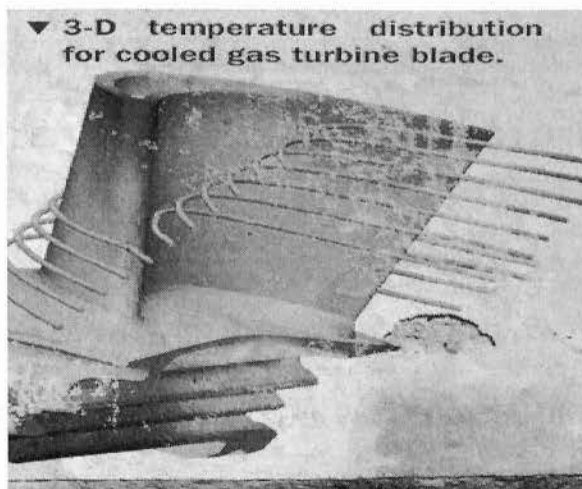
ΜΗΧ
616



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΘΕΡΜΟ-
ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΤΩΝ ΨΥΚΤΙΚΩΝ
ΔΙΟΔΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ**



ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:
ΚΡΙΚΩΝΑΣ ΓΙΩΡΓΟΣ (Α.Μ:32942)
ΤΣΩΝΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ (Α.Μ:32472)

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:
ΝΙΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2019

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ.....	1
SUMMARY	1
KEY WORDS.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	4
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (COMPUTATION FLUID DYNAMICS – CFD)	4
2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	8
2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΙΜΑΤΑ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ	9
2.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ.....	10
2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ.....	11
2.6 GAMBIT.....	15
2.6 FLUENT	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	25
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΓΚΗ ΨΥΞΗΣ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ.....	25
3.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ.....	25

3.2 ΑΝΑΓΚΗ ΨΥΞΗΣ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	28
3,2.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΡΟΣΙΣΜΟΥ	30
·Εσωτερική ψύξη	30
·Εξωτερική ψύξη	31
Τυπικό σύστημα ψύξης του στροβίλου	33
3.2.2 ΡΟΕΣ ΨΥΞΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	40
ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΨΥΞΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	40
Επιφανειακή ψύξη πτερυγίων	42
3.3 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΨΥΞΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΕΡΙΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	43
3.4 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΨΥΞΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΕΡΙΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ.....	49
3.4.1 Η επίδραση της περιστροφής στην ψύξη	49
3.4.2 Η επίδραση της περιστροφής στο πεδίο ροής	50
Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	63
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	63
4.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΙΟΔΟΥ.....	63
4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	65
4.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	65
4.3.1 ΠΡΟΤΥΠΟ ΜΟΝΤΕΛΟ Κ-Ε	66
4.3.2 ΠΡΟΤΥΠΟ ΜΟΝΤΕΛΟ Κ-Ε ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ.....	68
Μέθοδος δύο στρωμάτων για τη βελτίωση της επεξεργασίας κοντά στο τοίχωμα.....	68
4.3.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ Κ-Ε (REALIZABLE)	70
4.3.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΤΥΡΒΗΣ	72

4.3.5	ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΝΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΥΡΒΩΔΗ ΡΟΗ	73
4.3.6	ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΤΥΡΒΩΔΗ ΡΟΗ	74
4.4	ΡΟΗ ΣΕ ΜΗ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗ ΔΙΟΔΟ ΣΧΗΜΑΤΟΣ U ($Re=100000$, $Ro=0.0$).....	75
4.4.1	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ	75
4.5	ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	78
	Διαγράμματα	78
4.6	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	81
	Κατανομές ταχυτήτων κατά τη διεύθυνση της ροής	81
	Διαγράμματα	82
	Vectors.....	84
	Contours.....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....		89
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΤΥΧΙΑΚΗ.....	90
5.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	90
5.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΤΥΧΙΑΚΗ.....	91
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η ενασχόληση με λογισμικά προγράμματα σχεδιασμού και επίλυσης ρευστοδυναμικών εφαρμογών . Στόχος είναι να σχεδιάσουμε μία δίοδο ενός αεριοστροβίλου (σε λογισμικό GAMBIT) και να την προσομοιώσουμε σε συνθήκες λειτουργίας (μέσω FLUENT) για να συγκρίνουμε τις θεωρητικές τιμές αυτές με πειραματικές που έχουν γίνει στο παρελθόν . Ακόμα εξετάζουμε τις διαφορές στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αλλαγές των μοντέλων προσομοίωσης . Τέλος θα παρατηρήσουμε και τις αλλαγές που επιφέρει η αύξηση της θερμοκρασίας στην δίοδο που μελετάμε .

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Υπολογιστική Ρευστομηχανική , Αεριοστρόβιλοι , Πτερύγια , Ψυκτική δίοδος , Θερμότητα , Μοντελοποίηση , Πλέγμα , Κατανομή θερμοκρασίας , Κατανομή ταχύτητας , Τύρβη , Συντελεστής θερμικής αγωγημότητας .

SUMMARY

The purpose of this project is the avocation with software referring to design and fluid dynamics application solving . The goal is to design standard geometry of a U-bend cooling passage of a gas turbine (using Gambit software) and simulate it under operating conditions (using Fluent software) in order to compare the theoretical values with the equivalent experimental values of former experiments . Furthermore we will examine the differences that occur from the changes of the simulation models . Finally we will observe the changes that the increase of total temperature induces in the given U-bend geometry

KEY WORDS

Computational Fluid Dynamics (CFD) , Gas turbines , Winds , Cooling passage , Heat , Modeling , Grid , Temperature distribution , Vortex , Heat transfer coefficient .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamic – CFD) αναφέρεται σε προσομοίωση ρευστοδυναμικών εφαρμογών μέσω υπολογιστή και στην ανάλυση των συστημάτων αυτών , δίνοντας μας πάρα πολλές δυνατότητες επιλογής συνθηκών και μας παρέχει πολλά αποτελέσματα μετρήσεων για φαινόμενα που μας ενδιαφέρουν . Με την εξέλιξη των υπολογιστών γίνεται ακόμα ευκολότερη και χρησιμότερη για αναλύσεις φαινομένων ροής και μετάδοσης θερμότητας κυρίως σε βιομηχανικούς τομείς. Μπορούμε δηλαδή προσομοιώνοντας μια εφαρμογή που σκοπεύουμε να λειτουργήσουμε , να εξετάσουμε αν θα έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα ή να δούμε κατά πόσο μπορούμε να βελτιώσουμε την εφαρμογή μας .

Στην συνέχεια αυτής της πτυχιακής εργασίας γίνεται συνοπτική αναφορά στο περιεχόμενο των επακόλουθων κεφαλαίων . Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται η χρήση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και της αριθμητικής ανάλυσης . Ακόμα θα δούμε τις κατηγορίες εφαρμογών της καθώς και τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της . Επίσης γίνεται αναφορά στην διαχρονική εξέλιξη του τρόπου που μελετάμε τα ρευστοδυναμικά φαινόμενα , αλλά και των λογισμικών που θα χρησιμοποιήσουμε .

Στο κεφάλαιο 3 θα δούμε την αρχή λειτουργίας των αεριοστροβίλων αλλά και τις συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό τους , έτσι ώστε να φανεί η ανάγκη ψύξης των πτερυγίων που πραγματοποιείται με τις ψυκτικές δίοδους . Ο βαθμός απόδοσης ενός αεριοστροβίλου εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία λειτουργίας του η οποία όμως περιορίζεται από την αντοχή των υλικών των πτερυγίων . Έτσι με την χρήση των δίοδων δημιουργούνται περιθώρια βελτίωσης του βαθμού απόδοσης . Στην συνέχεια παρουσιάζονται τεχνολογίες που ήδη έχουν χρησιμοποιηθεί .

Αναφορά σε θεωρητικά μοντέλα επίλυσης ρευστοδυναμικών εφαρμογών γίνεται στο κεφάλαιο 4 . Αναλύεται η γεωμετρία της δίοδου , η κατανομή

θερμοκρασίας και συγκρίνονται οι θεωρητικές τιμές της κατανομής της ταχύτητας με πειρατικές που έχουν γίνει στο παρελθόν .

Τέλος , στο κεφάλαιο 5 παραθέτονται σχόλια και συμπεράσματα για την χρήση της cfd και για την επίδραση που έχει η θερμοκρασία στην μελέτη μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (Computation Fluid Dynamics – CFD)

Στο δεύτερο κεφάλαιο έχουμε μία ανάλυση του σκοπού και της λειτουργίας της CFD καθώς και αναφορά της διαδικασίας με την οποία προσομοιώνουμε μια ρευστοδυναμική εφαρμογή . Ακόμα θα δούμε τα πλεονεκτήματά της , τους περιορισμούς της καθώς και τους τομείς στους οποίους εφαρμόζεται . Τέλος ακολουθεί μια περιληπτική παρουσίαση των προγραμμάτων (Gambit και Fluent) που χρησιμοποιήσαμε για την δική μας εφαρμογή .

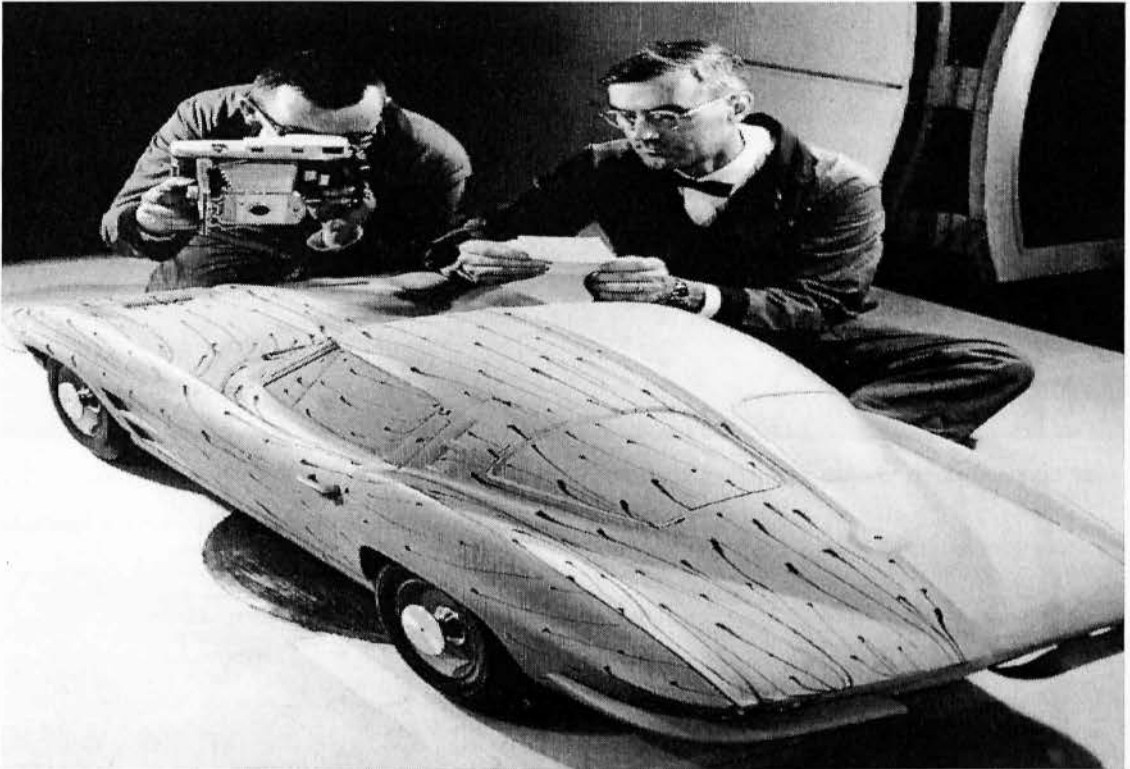
2.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ Η ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι η μελέτη ρευστών (μη στέρεα ουσία η οποία δεν μπορεί να παραμείνει ακίνητη υπό διατμητική τάση) που βρίσκονται σε κίνηση και υπάρχει εμπλοκή στις δυνάμεις που επιδρούν επάνω τους . Πραγματοποιείται μέσω της χρησιμοποίησης υπολογιστών για την επίλυση (υπολογισμούς) των εξισώσεων οι οποίες οδηγούν στα επιθυμητά αποτελέσματα για την εκάστοτε ρευστοδυναμική εφαρμογή .

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική βασίζεται στους υπολογιστές . Είναι μια τεχνική ανάλυση η οποία εκμεταλεύεται την ταχύτητα με την οποία οι υπολογιστές μπορούν να λύνουν εξισώσεις και να μας δίνουν αποτελέσματα για φαινόμενα όπως η μετάδοση θερμότητας , μεταφοράς μάζας και να μας προβλέπει ροές ρευστων σε εφαρμογές που είτε υπάρχουν και θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε την υπάρχουσα εφαρμογή , είτε σε μελλοντικές εφαρμογές που σκοπεύουμε να κάνουμε ώστε να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα .

Παλαιότερα , στις δεκαετίες του 60 και του 70 κάθε εφαρμογή που θέλαμε να εξετάσουμε ως προς τα ρευστοδυναμικά φαινόμενα τα οποία εξελύσσονταν σε αυτή , είτε φτιαχνόταν υπο κλίμακα , είτε έμπνευε εξ' ολοκλήρου σε αεροδυναμικές σήραγγες . Η μέθοδος όμως αυτή ήταν εξαιρετικά χρονοβόρα αλλά είχε και μεγάλο κόστος , μιας και κάθε τι το οποίο θέλαμε να

μελετήσουμε , έπρεπε να είναι κατασκευασμένο στην τελική του μορφή (κανονικό ή υπό κλίμακα) .Στην συνέχεια έμπαινε σε αεροδυναμική σήραγγα και εκεί πέραμε τα αποτελέσματα τα οποία μας ενδιέφεραν με τρόπους όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1 . Αν στην υπάρχουσα εφαρμογή δεν είχαμε τα επιθυμητά αποτελέσματα τότε θα έπρεπε να βελτιστοποιήθει κάποιο μέρος της ή να ξανακατασκευαστεί εξολοκλήρου από την αρχή , για να δοκιμαστεί και πάλι στην αεροδυναμική σήραγγα .



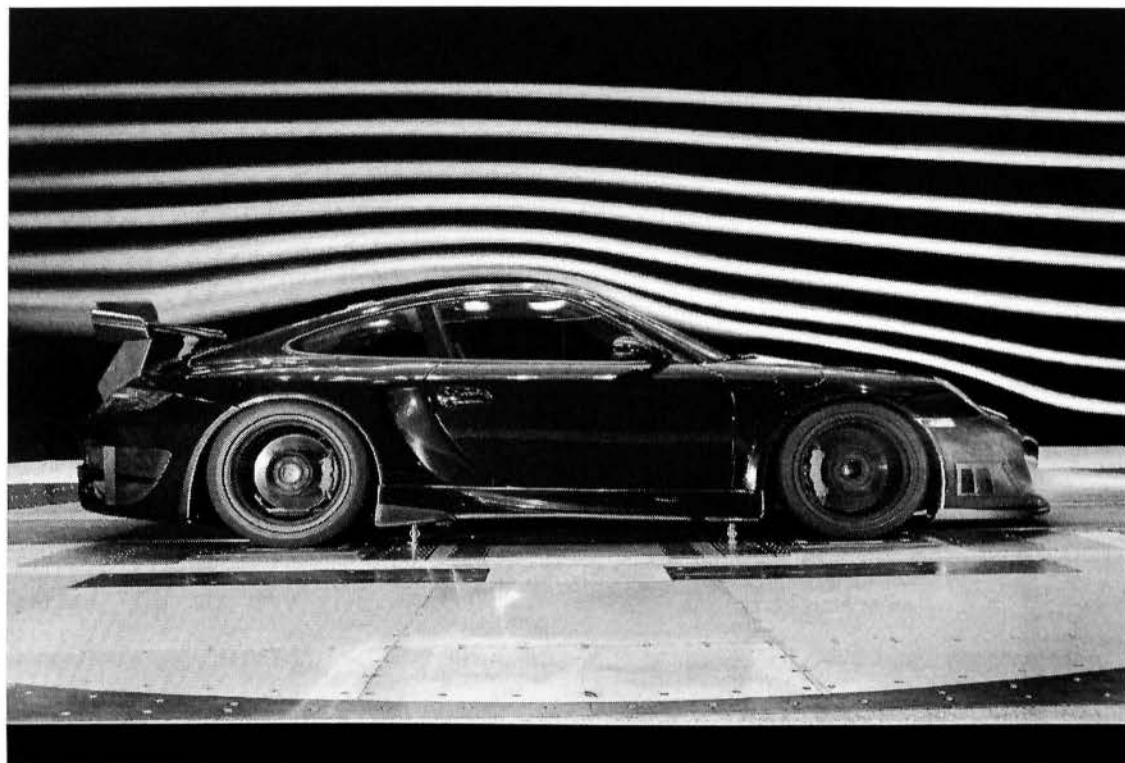
2.1 Τρόπος με τον οποίο μελετούσαν τις πιέσεις πάνω σε ένα μελλοντικό αυτοκίνητο το οποίο είναι φτιαγμένο υπό κλίμακα με ξύλο , για να υπολογίζουν τον συντελεστή οπισθέλκουσας .

Αργότερα , με την εξέλιξη της τεχνολογίας φτάνουμε σε μια μορφή δοκιμών όπως αυτήν στο σχήμα 2.2 όπου πάνω στο υπό μελέτη αντικείμενο τοποθετούνται όργανα μέτρησης για να πάρουμε μετρήσεις και να βγάλουμε αποτελέσματα , με ότι συνεπάγεται αυτό για τα εξαγώμενα αποτελέσματα λόγω και των οργάνων της εποχής .

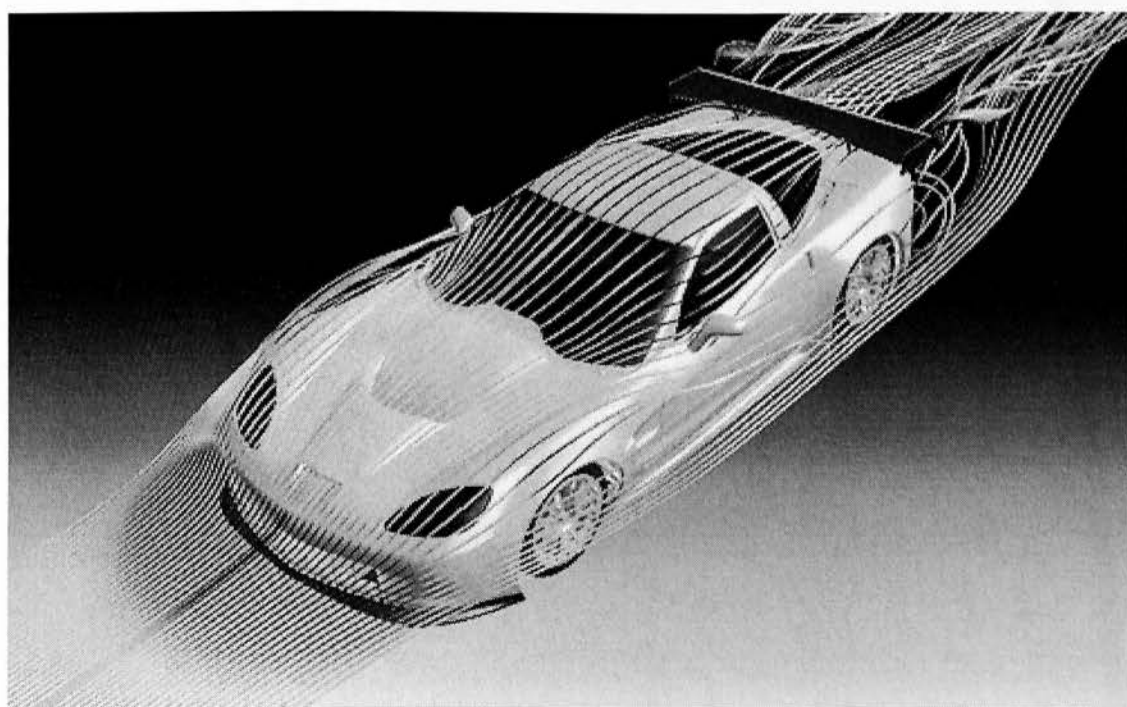


2.2 Τοποθέτηση αισθητήρων στο υπό μελέτη αυτοκίνητο στα επιθυμητά σημεία όπου θέλουμε να πάρουμε μετρήσεις πίεσης θερμοκρασίας κτλ.

Βέβαια , σήμερα με την εξέλιξη των υπολογιστών και της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής μπορούμε πριν καν φτιάξουμε το οτιδήποτε , να το σχεδιάσουμε αρχικά σε κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα στον υπολογιστή και έπειτα να το τρέξουμε σε άλλο πρόγραμμα το οποίο θα μας δώσει όλες τις πληροφορίες που αναζητάμε ώστε να δούμε αν αυτό που έχουμε σχεδιάσει πληρεί τις προηποθέσεις με τις οποίες το φτιάξαμε . Για παράδειγμα , σήμερα πριν ένα αμάξι μοντελοποιηθεί στην τελική του μορφή για να μπει σε αεροσήραγγα , σχεδιάζεται και εξετάζεται με τον τρόπο που μόλις αναφερθηκε προηγουμένως . Έτσι από την εικόνα 2.1 του 1960 πάμε στην εικόνα 2.2 που αντικατοπτρίζει το σήμερα .



2.3 Δοκιμαζόμενο αυτοκίνητο σε σύγχρονη αεροσήραγγα με όλα του τα κινούμενα μέρη σε λειτουργία.



2.4 Αυτοκίνητο πριν καν φτιαχτεί στην πραγματικότητα , έχει σχεδιαστεί στον υπολογιστή και μελετάται ως προς την αεροδυναμική του .

2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η εξαγωγή αποτελεσμάτων και τα συμπεράσματα που βγάζουμε μετά από μελέτη φαινομένων (στην περίπτωση μας ρευστομηχανικών) προέρχεται από την λύση των μαθηματικών εξισώσεων που τα περιγράφει . Η αριθμητική ανάλυση έρχεται να κάνει την λύση των μαθηματικών αυτών εξισώσεων ευκολότερη βρίσκοντας εύχρηστες μεθόδους , προσομοιώνοντας τα χρησιμοποιούμενα ρευστομηχανικά μοντέλα . Η λύσεις που προκρίπτον από τις εξισώσεις αν και είναι ακριβείς , ωστόσο μπορεί να μην είναι σε εύχρηστη μορφή και να μην είναι συνατή η αριθμητική επεξεργασία . Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να δημιουργηθεί μια μεθοδολογία με σκοπό την περαιτέρω αριθμητική επεξεργασία της λύσης . Η μεθοδολογία αυτή που ακολουθεί ο αναλυτής δεν σκοπεύει στην ακριβή λύση του προβλήματος αλλά προσεγγιστικά σε αυτή με μια ορισμένη ανοχή . Στην περίπτωση που υπάρχουν πληροφορίες οι οποίες δεν είναι ακριβής , τότε η λύση αποκτά ένα μέτρο αβεβαιότητας συγκρίσιμο με την ανακρίβεια της αρχικής πληροφορίας από το οποίο οφείλεται . Ένα από τα αυξανόμενα πεδία ανάλυσης είναι αυτό που ασχολείται με την προσεγγιστική επίλυση διαφορικών εξισώσεων χρησιμοποιώντας καινούριους αλγόριθμους με κριτήριο αξιολόγησης την ευστάθεια , την ταχύτητα επίλυσης του προβλήματος , την απαιτούμενη μνήμη του υπολογιστή και την ακρίβεια της λύσης .

2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

- Επιτρέπει την μελέτη θεωρητικών κατασκευών σε μη φυσιολογικές συνθήκες . Δηλαδή , μπορούμε να προσομοιώσουμε μια συσκευή σε λειτουργία που θα επιφέρει ατύχημα . Έτσι θα μπορέσουμε και να αποφύγουμε ατυχήματα σε μελλοντική λειτουργία αλλά και να μελετήσουμε την ασφάλεια της κατασκευής μας .
- Μας δίνει την δυνατότητα να μελετήσουμε σημεία της κατασκευής μας τα οποία είναι δύσκολο να μελετηθούν πάνω στην ίδια την συσκευή , είτε λόγω του ότι βρίσκονται σε μέρος το οποίο είναι δύσκολο να τα παρακολουθήσεις , είτε επειδή τα σημεία αυτά είναι πολύ μικρά για να τα παρακολουθήσεις .
- Μας βοηθά να βελτιώσουμε την κατασκευή μας όσο αφορά τον σχεδιασμό της λόγω γρηγορότερης ανάλυσης και χρόνου σχεδιασμού .
- Εξοικονομούμε χρόνο και χρήμα . Σε όλα αυτά που αναφέραμε πριν παρατηρούμε ότι δεν χρειάζεται να κάνουμε την παραμικρή αλλαγή πάνω στην κατασκευή μας (αν βέβαια υπάρχει) . Έτσι κάνουμε ταχύτατες δοκιμές και αλλαγές που συμβάλουν στην βελτίωση και όλα αυτά χωρίς κόστος .
- Μπορούμε να προσομοιώσουμε αληθινές συνθήκες λειτουργίας που δεν μπορούμε να κάνουμε στην πραγματικότητα όπως για παράδειγμα υπερηχητικές ροές.

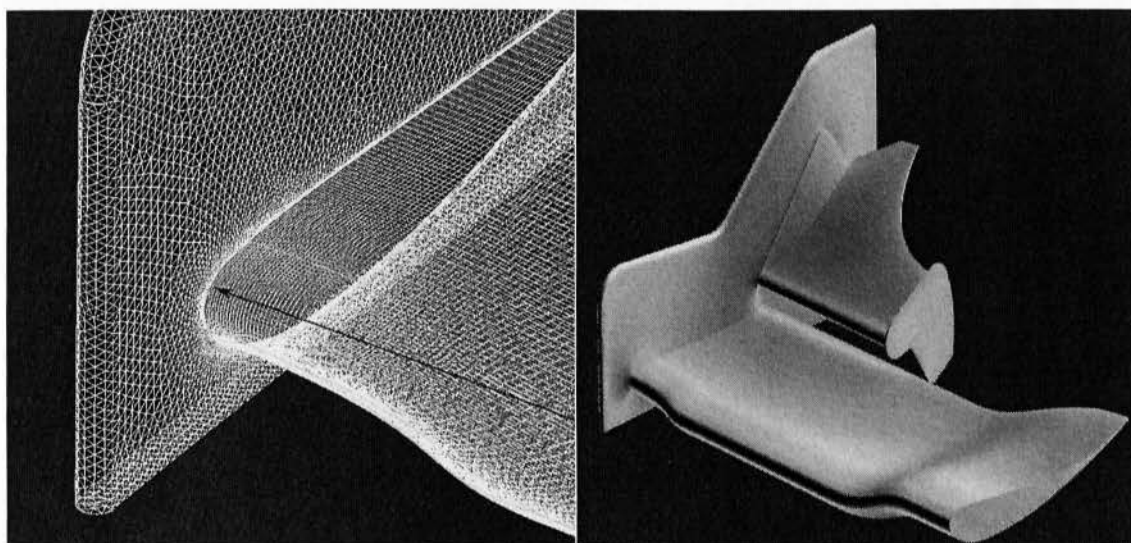
2.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Μία ανάλυση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής μπορεί να είναι ακριβής , ανάλογα με τον τρόπο και την ακρίβεια έχει σχεδιαστεί και μοντελοποιηθεί η περιοχή του εξαρτήματος ή της κατασκευής που θέλουμε να μελετήσουμε αλλά και από τις δυνατότητες των υπολογιστών που χρησιμοποιούμε (για παράδειγμα η στρογγυλοποίηση που ενδεχομένως να κάνει ο υπολογιστής σε αποτελέσματα) . Περιορισμούς έχουμε :

- Φυσικά μοντέλα : οι λύσεις που θα έχουμε από μια ανάλυση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής θα είναι τόσο ακριβής όσο και τα φυσικά μοντέλα που θα χρησιμοποιήσουμε . Όταν λέμε φυσικά μοντέλα εννοούμε σχέσεις ο οποίες μας βοηθούν να υπολογίσουμε φυσικά μεγέθη .
- Αριθμητικά λάθη : αυτά προέρχονται κυρίως από τις στρογγυλοποιήσεις που γίνονται σε πράξεις από τον υπολογιστή . Μπορεί αυτές οι στρογγυλοποιήσεις να φαίνονται πολύ μικρές , αλλά όταν
- Περιορισμοί στις συνθήκες που επικρατούν και παρέχονται στο αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιούμε : οι αρχικές-περιοριστικές συνθήκες που θέτουμε , έχουν να κάνουν με την ακρίβεια της λύσης που θα πάρουμε από την ανάλυση που θα κάνουμε .

2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

· Βιομηχανία αυτοκινήτου και μηχανοκίνητος αθλητισμός : χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής γίνεται σε μοντέλα αυτοκινήτων που πρόκειται να βγούν στην κυκλοφορία και θέλουμε να μελετηθεί η συμπεριφορά τους σε διάφορες συνθήκες οδήγησης , να δούμε αν ανταποκρίνονται στις αρχικές μας απαιτήσεις αλλά και να βρεθούν περιθώρια βελτίωσης τους . Στον μηχανοκίνητο αθλητισμό όπως σε αγώνες Formula 1 γίνεται χρήση για να επιτευχθεί βελτίωση της αεροδυναμικής των μονοθεσίων αλλά και μείωση των καταπονήσεων που δέχονται τα διάφορα μέρη του , σχήματα 2.5 και 2.6

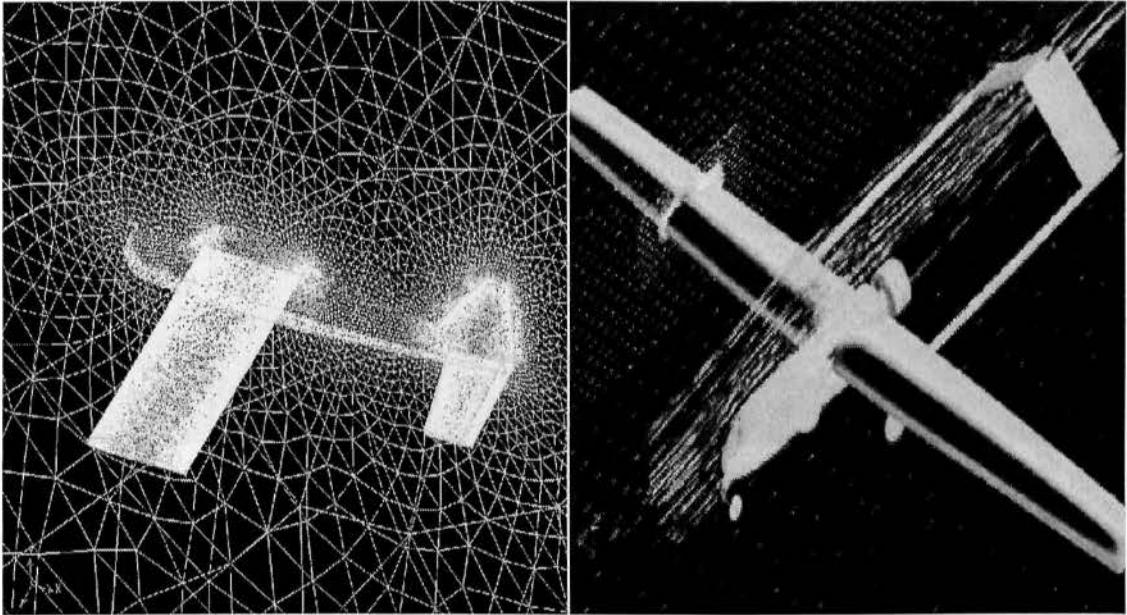


2.5 Υπό μελέτη μπροστινή αεροτομή μονοθεσίου formula 1 με cfd για την βελτιστοποίηση της .

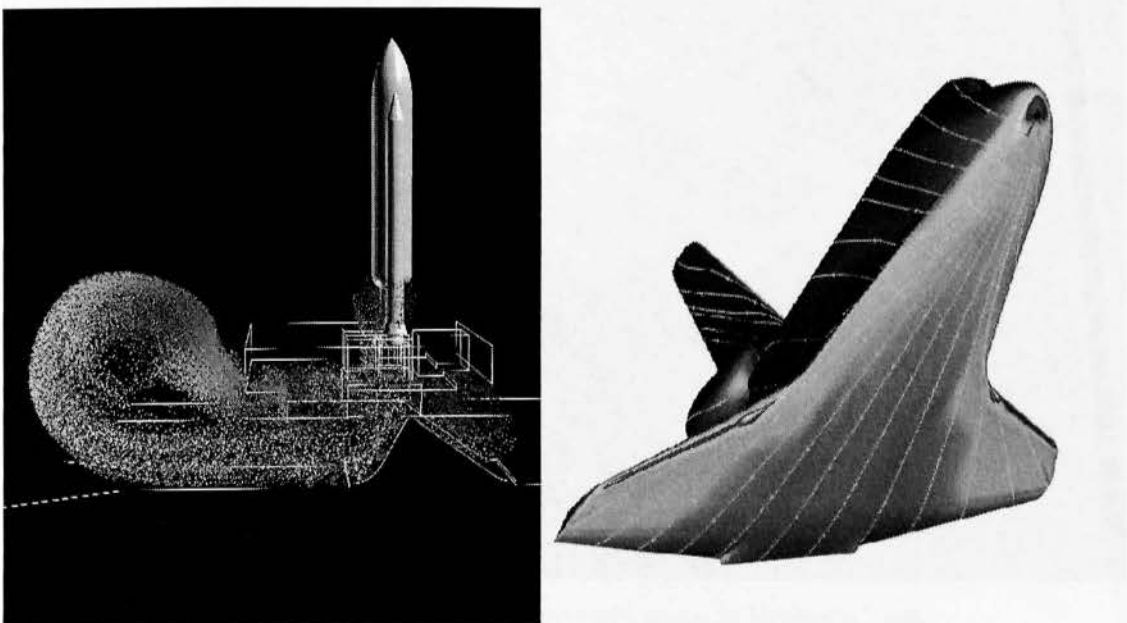


2.6 Μελέτη ροής αέρα γύρω από ένα μονοθέσιο.

· Βιομηχανία αεροσκαφών : τόσο στα επιβατικά όσο και στα διαστημόπλοια γίνεται χρήση της CFD για να μελετηθούν οι συμπεριφορές τους σε συνθήκες όπως για παράδειγμα η είσοδος ενός διαστημόπλοιου από το διάστημα στην ατμόσφαιρα , όπου αναπτύσσονται τεράστιες θερμοκρασίες επάνο στο διαστημόπλοιο . Ακόμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την υπολογιστική ρευστοδυναμική στην μοντελοποίηση πυραύλων σε ότι αφορά την αεροδυναμική τους , σχήματα 2.7 , 2.8

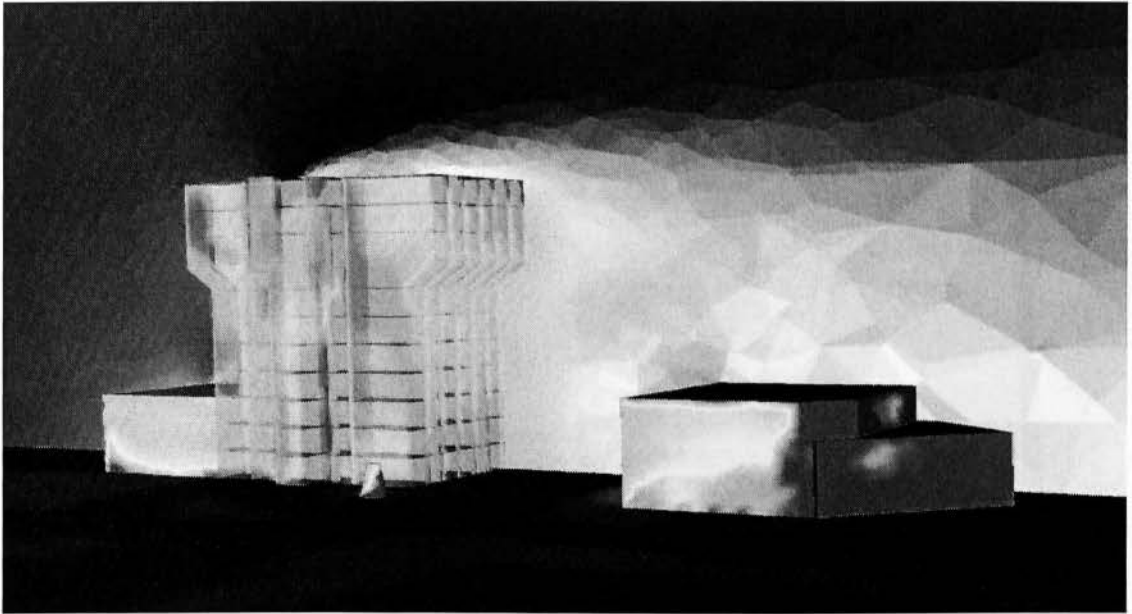


2.7 Διαδικασία σχεδιασμού πλέγματος και ανάλυση θερμοκρασιακής κατανομής σε φτερά επιβατικών αεροπλάνων .



2.8 Χρήση CFD σε πύραυλο (μελέτη καυσαερίων κατά την απογείωση) και σε αεροσκάφος του διαστήματος .

- Συστήματα θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού : μπορούμε να έχουμε προσομοίωση της λειτουργίας συσκευών και εγκαταστάσεων που προαναφέραμε για να μελετήσουμε την συμπεριφορά τους και να τα βελτιώσουμε εξοικονομώντας ενέργεια σχήματα 2.9 και 2.10

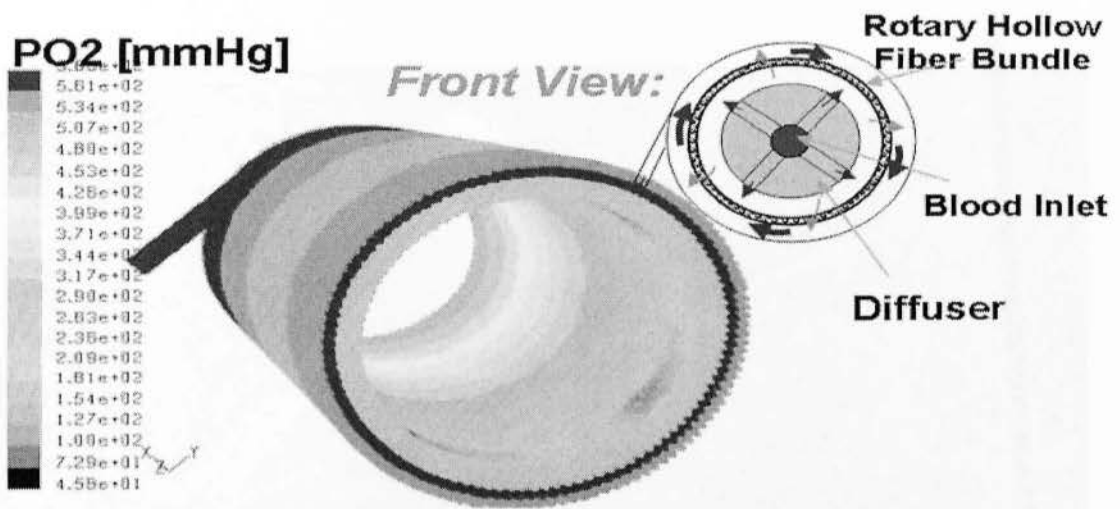


2.9 Θερμοκρασιακή κατανομή σε κτιριακούς χώρους .



2.10 Θερμοκρασιακή κατανομή εσωτερικού χώρου με λογισμικό fluent .

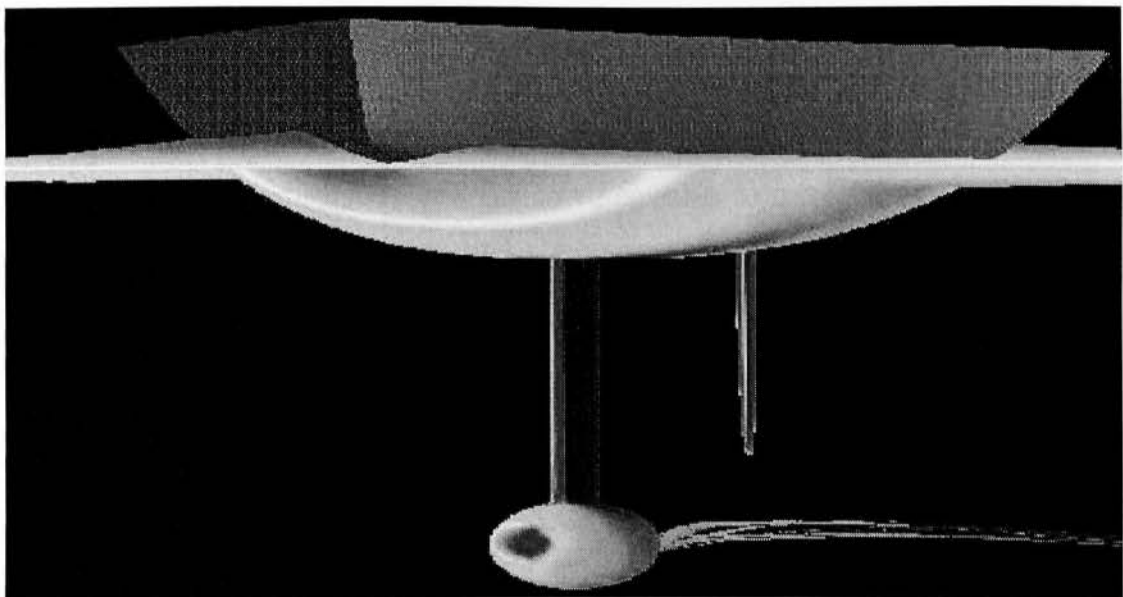
- Ιατρική : μπορούμε να μελετήσουμε συμπεριφορές συσκευών όπως τεχνητές καρδιακές βαλβίδες και αντλίες αίματος αλλά και να ανιχνεύσουμε διάφορες δυσλειτουργίες όπως στενώσεις σε φλέβες και αρτηρίες σχήμα 2.11



Predicted partial oxygen pressure in PRAL.

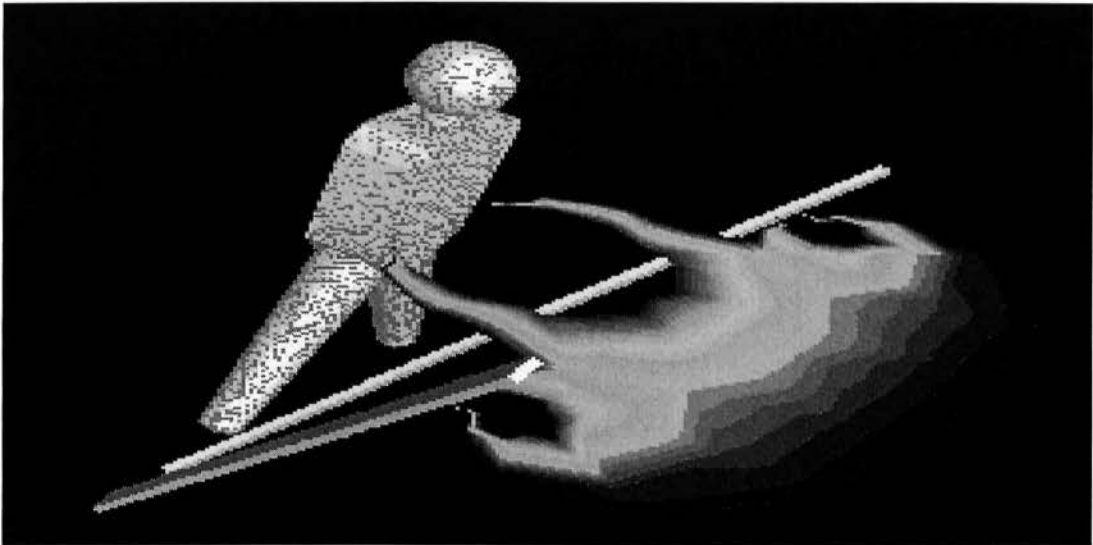
2.11 Χρήση cfd στην ιατρική

- Ναυτιλία : μπορούμε να σχεδιάσουμε και να μελετήσουμε συμπεριφορές σκαφών και των κινητήρων τους κατά την διάρκεια λειτουργίας τους .



2.12 Θερμοκρασιακή κατανομή στο κάτω μέρος πλοίου

- Σπορ : μπορούμε να μελετήσουμε κατανομές πίεσης γύρω από τους αθλητές έτσι ώστε να υπάρξουν νέες μέθοδοι και τρόποι εκτέλεσης με σκοπό την βελτιστοποίηση των επιδόσεων , αλλά και την αποφυγή ατυχημάτων , όπως και στον σχεδιασμό καινούριων προστατευτικών και βοηθημάτων .



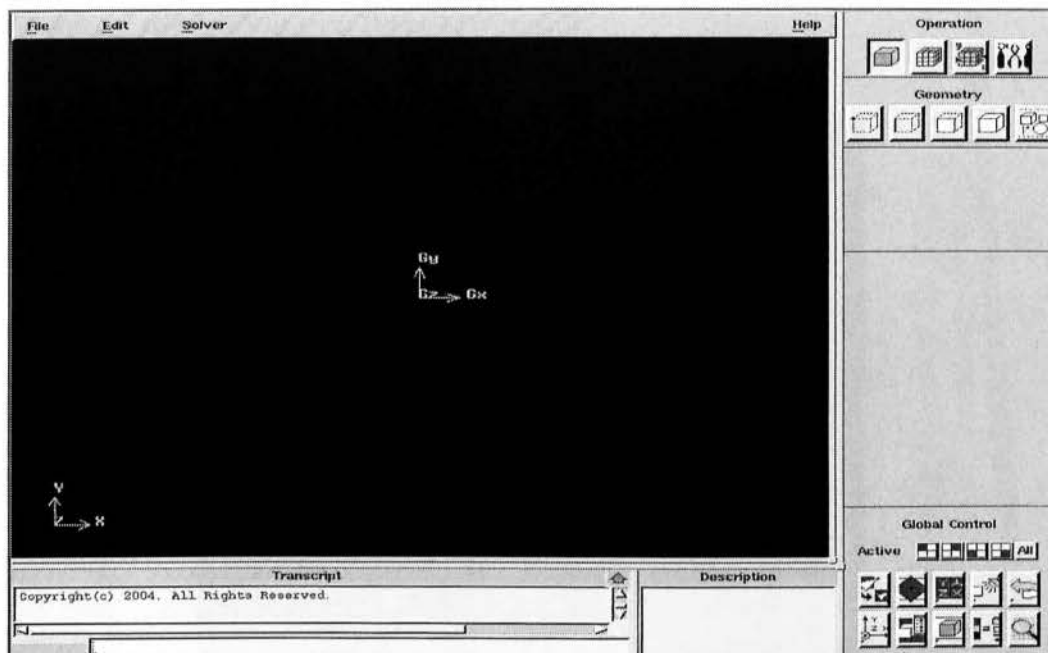
2.13 Χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής σε σκιέρ για την βελτιστοποίηση της τεχνικής του .

2.6 GAMBIT

Το Gambit είναι το πρόγραμμα που χρησιμοποιούμε για να σχεδιάσουμε την γεωμετρία την οποία θα εξετάσουμε μέσω της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής .

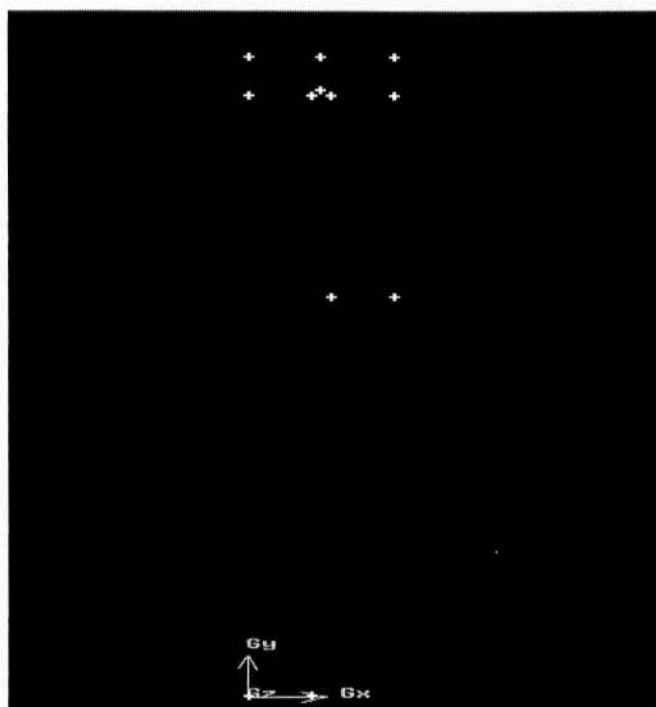
Μέσα στο Gambit υπάρχουν όλα εκείνα τα εργαλεία τα οποία χρειαζόμαστε για να σχεδιάσουμε από την πιο απλή έως την πιο συνθετη γεωμετρία που θέλουμε να μελετήσουμε . Παρέχει έτοιμες γεωμετρίες στις οποίες μπορούμε να κάνουμε παραλλαγές . Ακόμα μας δίνει την δυνατότητα να προσθέτουμε , να αφαιρούμε αλλά και να τροποποιούμε οτιδήποτε στοιχείο εισάγουμε . Εκτός της σχεδίασης της γεωμετρίας , στο Gambit σχεδιάζουμε και το πλέγμα που θα το χρησιμοποιήσουμε στο αλλό πρόγραμμα (Fluent) έτσι ώστε να εξετάσουμε την κατασκευή μας σε οποιοδήποτε σημείο του πλέγματος το οποίο έχουμε σχεδιάσει . Ακόμα μας δίνει την δυνατότητα να ορίσουμε οριακές

συνθήκες . Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον του σχεδιαστικού προγράμματος Gambit.



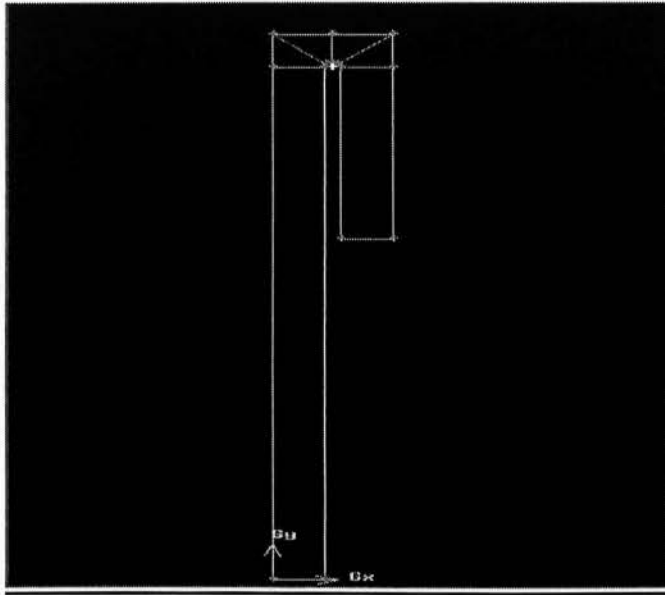
2.14 Γραφικό περιβάλλον Gambit .

Αρχικά ορίζουμε τα σημεία (vertex) που αποτελούν το σχέδιο της διόδου που μελετάμε στο επίπεδο με συντεταγμένες .



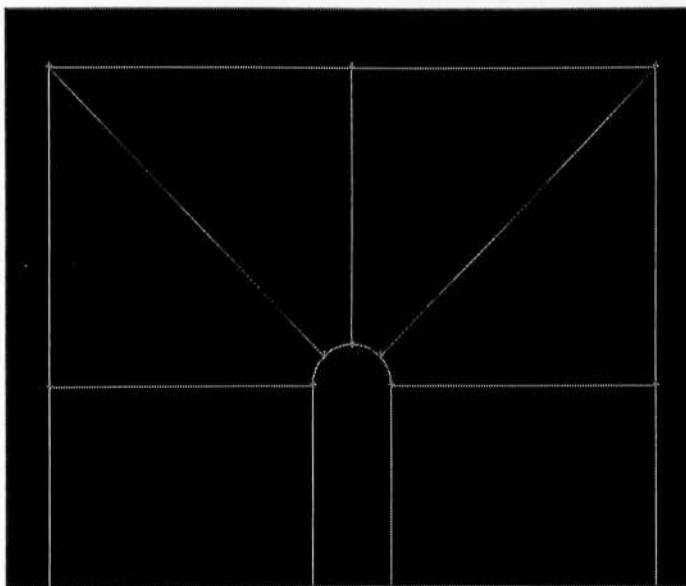
2.15 Ορισμός σημείων (vertex) .

Στη συνέχεια ενώνουμε τα σημεία που έχουμε ορίσει στο επίπεδο για να σχηματίσουμε τις γραμμές (edge) οι οποίες ορίζουν το περίγραμμα και τις επιφάνειες της διόδου που θα μελετήσουμε.



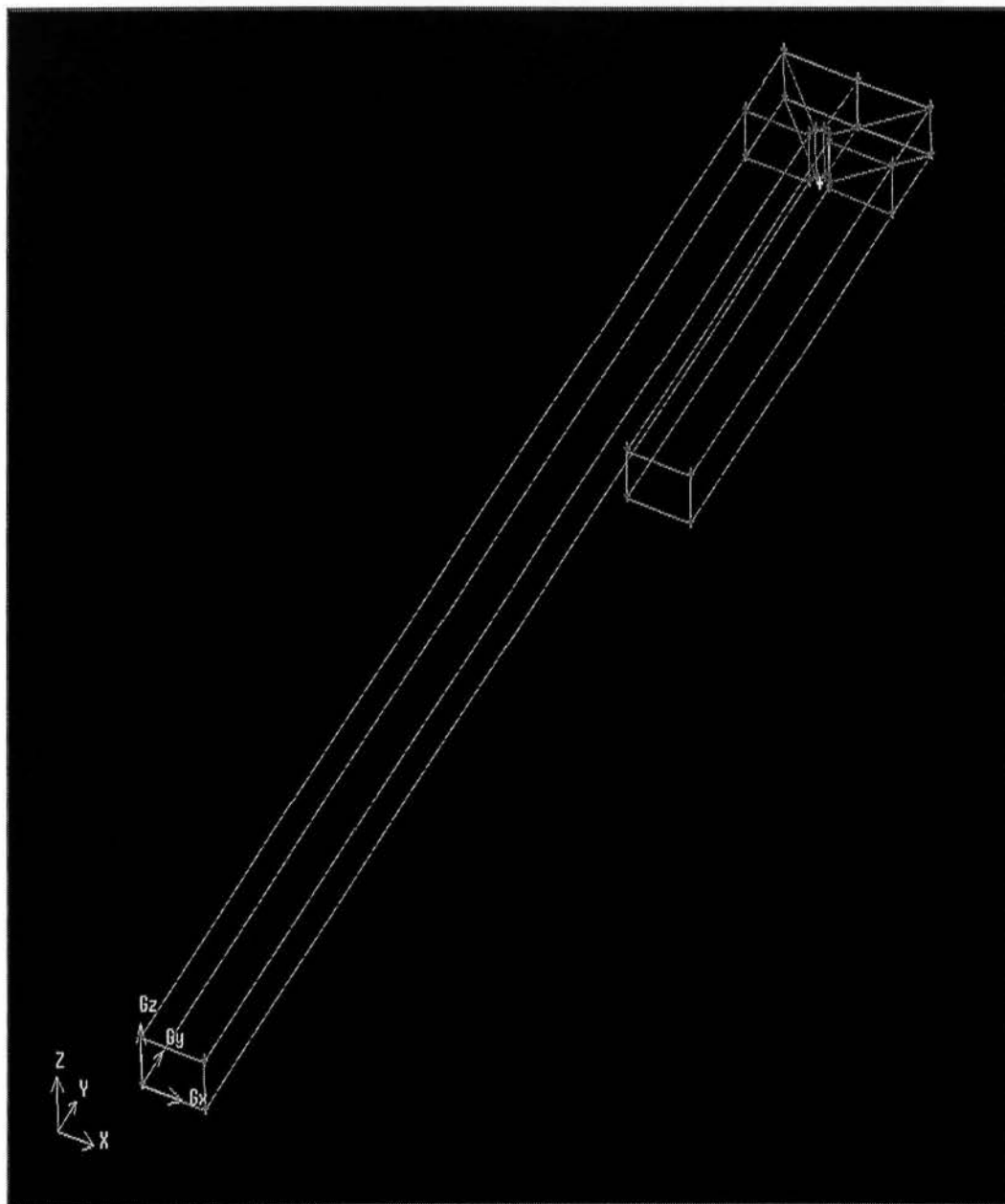
2.16 Σχεδιασμός γραμμών (edge) .

Οι γραμμές αυτές δεν είναι μόνο ευθείες, αλλά μπορεί να σχηματίσουν κύκλους, ελλείψεις και τόξα, ώστε να αποτυπώσουμε με ακρίβεια το σχήμα της διόδου, όπως φέεται στο παρακάτω σχήμα.



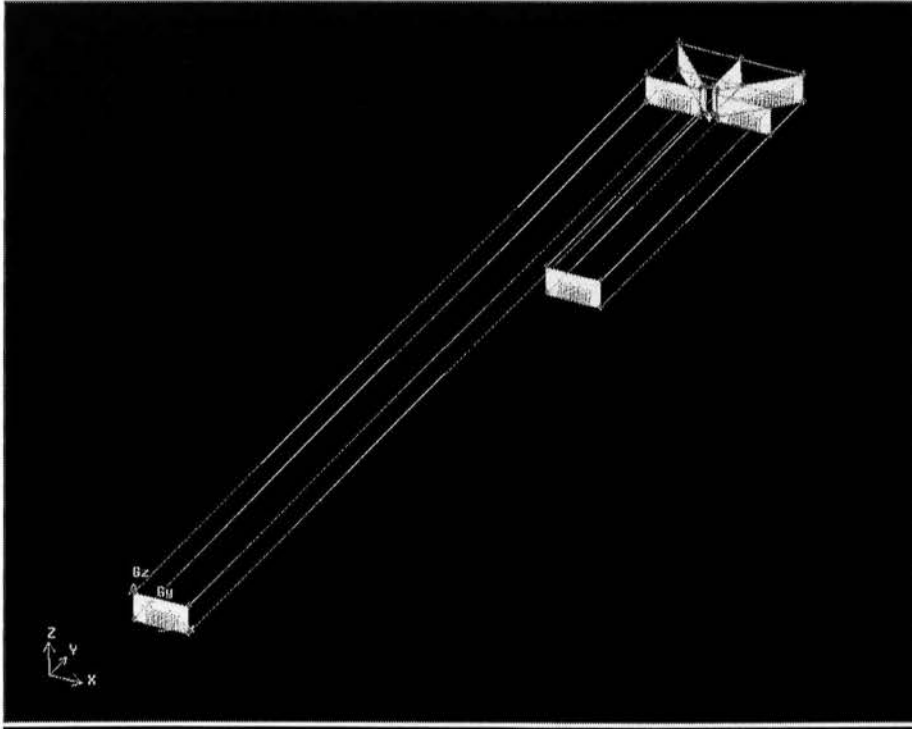
2.17 Σχεδιασμός διαφόρων γραμμών .

Αφού έχουμε το σχέδιο της διόδου σε δισδιάστατο επίπεδο και τα πρόσωπα (face) που ορίζουν το κάθε κομμάτι της συνολικής επιφάνειας της διόδου ορίζουμε σε κάθε ένα από αυτά το ύψος στον άξονα z, ώστε να δημιουργηθεί ο τελικός όγκος (volume) της διόδου, όπως φένεται στην παρακάτω εικόνα.

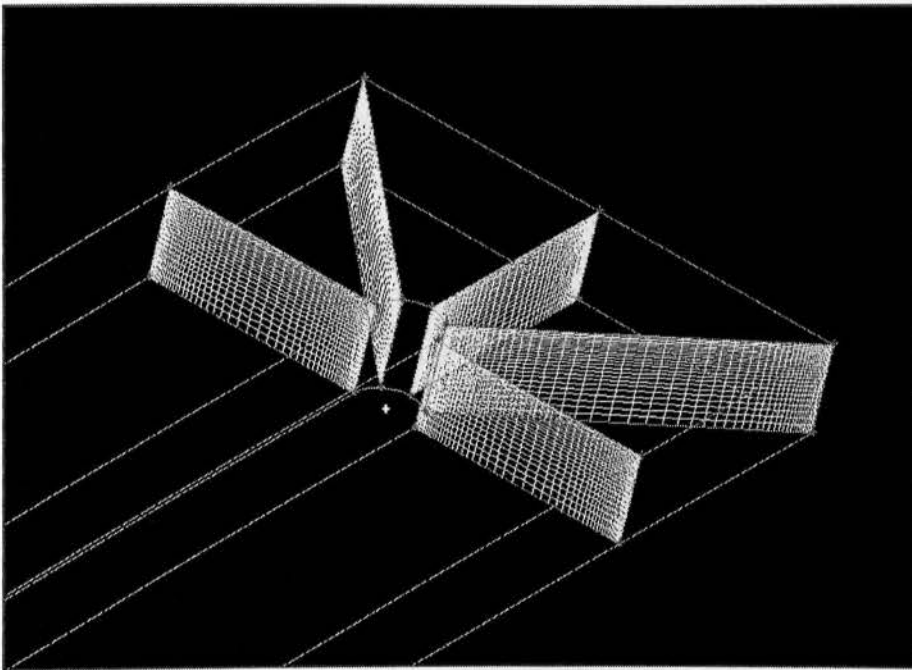


2.18 Δημιουργία όγκου (volume) στον χώρο .

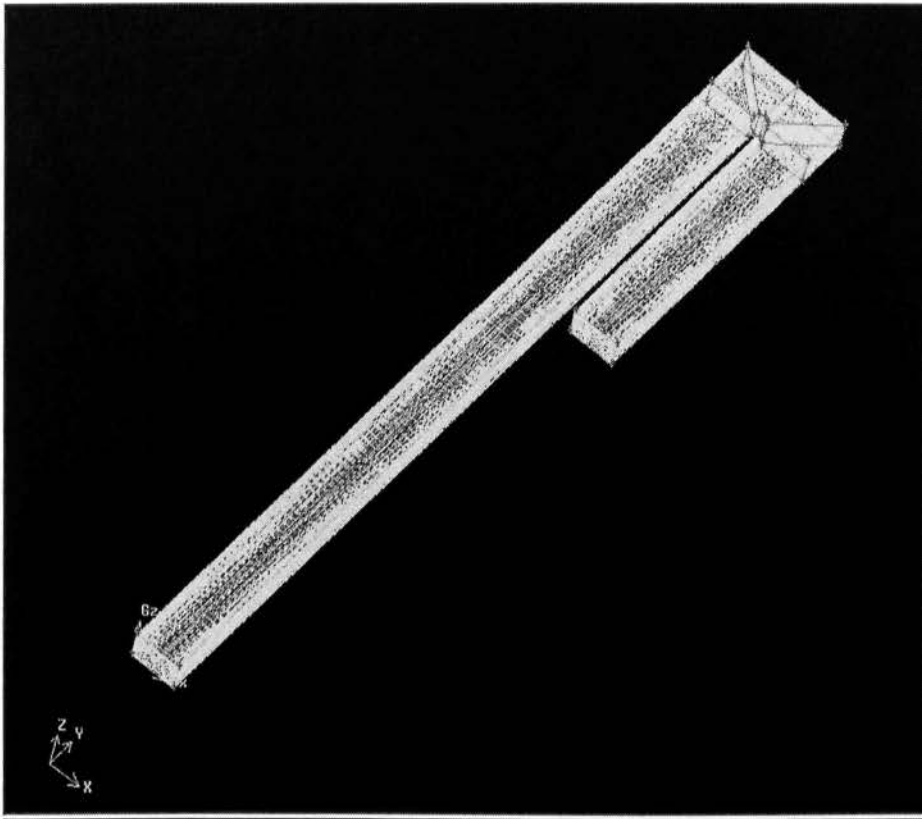
Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του εργαλείου Mesh του προγράμματος Gambit, ορίζουμε το πλέγμα που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα από το πρόγραμμα Fluent για την επίλυση των παραμετρικών εξισώσεων σε κάθε κελί για να έχουμε ως αποτέλεσμα την προσωμοίωση της ροής ρευστού μέσα στη δίοδο του πτερυγίου.



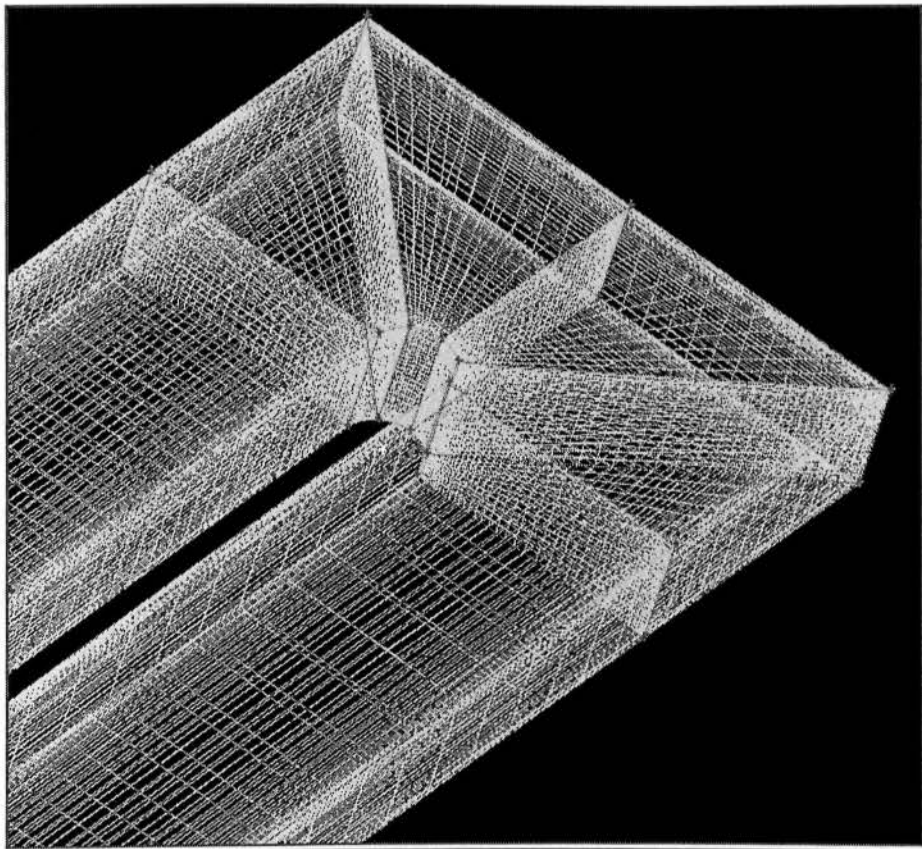
2.19α Δημιουργία πλέγματος .



2.19β Δημιουργία πλέγματος.



2.19γ Δημιουργία πλέγματος.

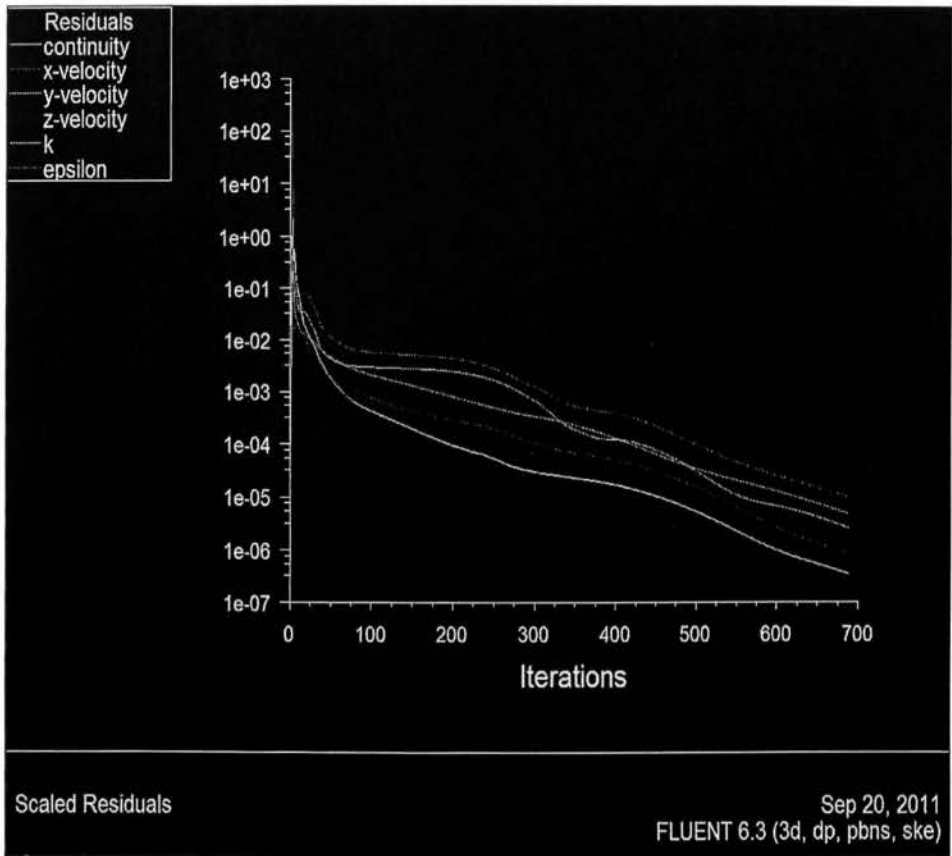


2.19δ Δημιουργία πλέγματος.

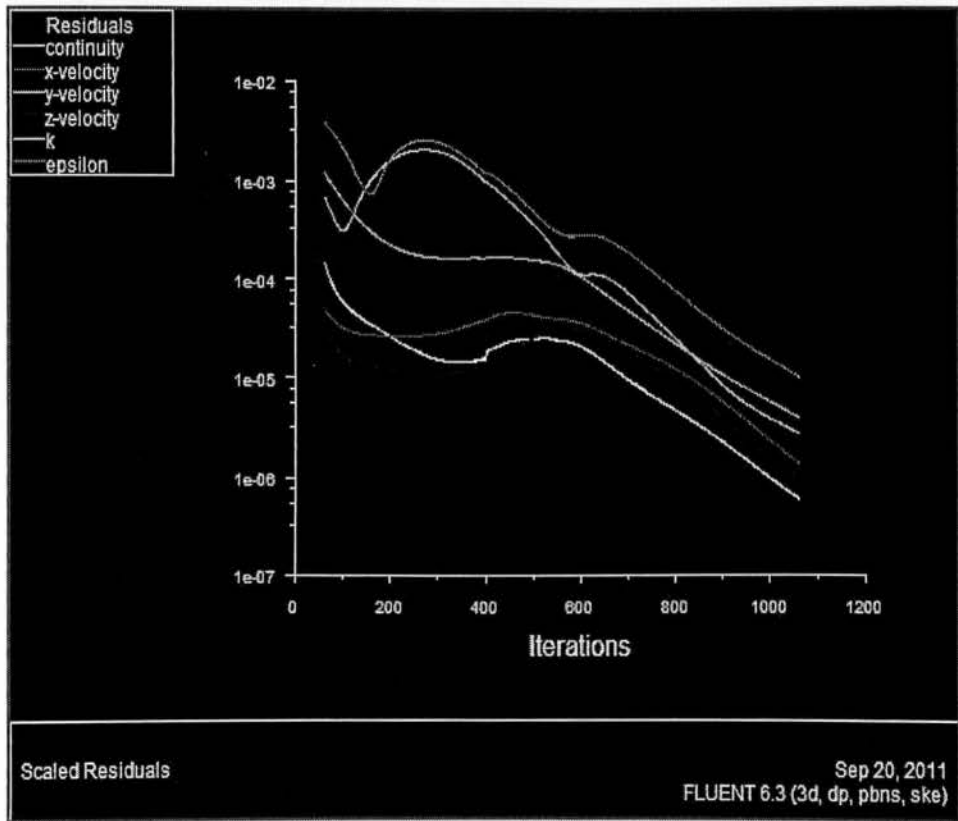
2.6 FLUENT

Το Fluent είναι το πρόγραμμα το οποίο θα επεξεργαστεί το υπολογιστικό κομμάτι . Δίνοντάς στοιχεία για της συνθήκες που επικρατούν μέσα στην γεωμετρία μας , όπως για παράδειγμα το τι ρευστό ρέει μέσα , την θερμοκρασία του , την πυκνότητα του ή και την αρχική του ταχύτητα , μας δίνει αποτελέσματα για τα φυσικά μεγέθη μέσα σε οποιοδήποτε σημείο του πλέγματος θέλουμε . Έτσι μπορούμε να εξετάσουμε τι συμβαίνει σε όλα τα σημεία εκείνα που μας ενδιαφέρουν είτε σε ταχύτητα , είτε σε θερμοκρασίες είτε σε πιέσεις . Με όλα αυτά τα στοιχεία που μπορεί να μας παρέχει μπορούμε να δούμε να η κατασκευή μας είναι αξιόπιστη (από πλευρά καταπονήσεων) , είτε αν είναι ενεργειακά και οικονομικά συμφέρουσα είτε αν πληρεί τις απαιτήσεις για την οποία προορίζεται να κατασκευαστεί.

Η αρχή λειτουργίας του προγράμματος Fluent στηρίζεται στην επίλυση παραμετρικών εξισώσεων μέσα στα κελιά του πλέγματος που έχουμε εξάγει από το Gambit. Η επίλυση ξεκινάει δίνοντας στο πρόγραμμα αρχικές τιμές στις παραμέτρους και πραγματοποιεί επαναλύσεις μέχρι οι λύσεις των εξισώσεων να συγκλίνουν με αυτές της προηγούμενης επανάληψης. Η επιτρεπτή απόκλιση των τιμών ορίζεται από τον χρήστη, ο οποίος επιλέγει πολύ μικρή απόκλιση για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά όχι τόσο μικρή, ώστε η χρονική διάρκεια του τρεξίματος του Fluent για μία δεδομένη εφαρμογή να γίνει ασύμφορη. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε απόκλιση τιμών των λύσεων 10^{-5} και ο αριθμός των επαναλήψεων κυμάνθηκε από 685 επαναλήψεις για το πλέγμα 57x25 και 1119 επαναλήψεις για το πλέγμα 86x38, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνα. Σε αυτό το σημείο παρατηρούμε πως όσο πυκνότερο είναι το πλέγμα που έχουμε επιλέξει, τόσο περισσότερες επαναλήψεις θα χρειαστεί το πρόγραμμα για να επιτεύξει την ίδια απόκλιση τιμών των λύσεων που έχουμε ορίσει, αφού οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν ίδιες.

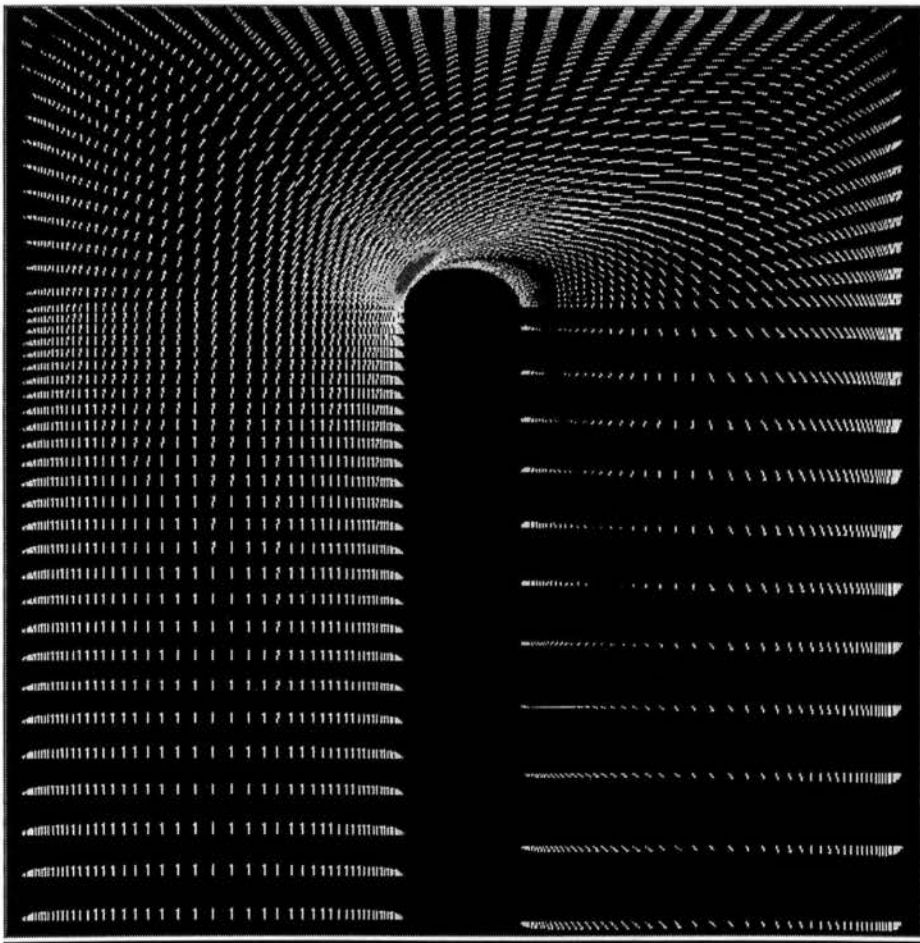


2.20 α Γραφικό περιβάλλον Gambit .

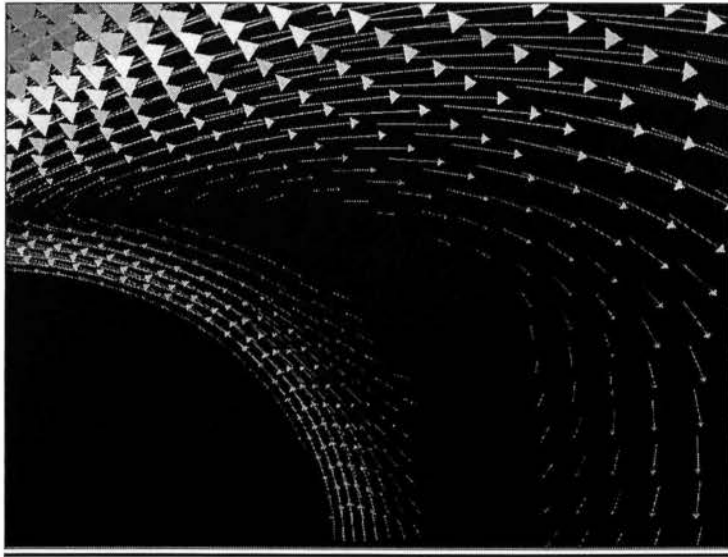


2.20 β Γραφικό περιβάλλον Gambit .

Με τη βοήθεια του προγράμματος Fluent, αφού επιλυθεί το δεδομένο πρόβλημα, μπορούμε να εμφανίσουμε τα αποτελέσματα της ροής σε διαγράμματα X- Ψ, σε διανυσματικές απεικονίσεις (vectors), αλλά και σε ποιοτικές απεικονίσεις στην συνολική επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου (contours). Οι δύο τελευταίοι τρόποι απεικονίσεις των δεδομένων μας βοηθούν να βγάλουμε άμεσα συμπεράσματα για την εξέλιξη της ροής, ανάλογα με την παράμετρο που μελετάμε, και να εντοπίσουμε τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα.

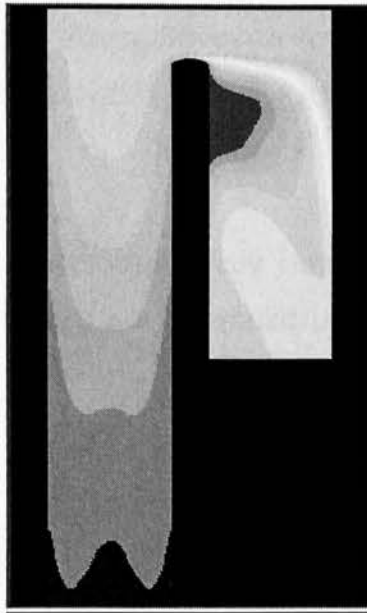


2.21α Διανυσματικές απεικονίσεις (vectors) σε περιβάλλον Gambit .



2.21β Διανυσματικές απεικονίσεις (vectors) σε περιβάλλον Gambit .

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την αναστροφή της ροής στη δίοδο σχήματος U, μέσα από αντίστοιχο vector plot της συνισταμένης ταχύτητας του αέρα μέσα σε αυτή.



2.2 Διάγραμμα θερμοκρασιακής κατανομής .

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα που διέρχεται μέσα από τη δίοδο, καθώς η θερμότητα απάγεται από το πτερύγιο σε αυτόν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

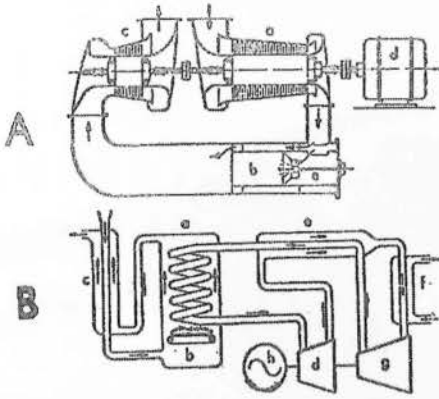
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΓΚΗ ΨΥΞΗΣ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Στο τρίτο κεφάλαιο έχουμε μία περιγραφή της αρχής λειτουργίας του αεριοστροβίλου . Ακόμα θα γίνει μια αναφορά για την καταπόνηση των πτερυγίων από τις υψηλές θερμοκρασίες και την ανάγκη ψύξης τους , τον τρόπο με τον οποίο γίνεται αυτό αλλά και τα οφέλη που έχουμε από αυτήν την διαδικασία .

3.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Οι περισσότεροι διαδεδομένοι αεριοστροβίλοι είναι ανοικτού κυκλώματος , καίνε δηλαδή το καύσιμο μέσα στο κύριο μέρος της μηχανής γι'αυτό θεωρούνται κυρίως μηχανές εσωτερικής καύσης . Ωστόσο υπάρχουν και κλειστού κυκλώματος και συμπεριλαμβάνονται στις μηχανές εξωτερικής καύσης αλλά δεν είναι τόσο διαδεδομένοι και δεν έχουν πολλές εφαρμογές .Οι διαφορές που παρουσιάζουν οι δύο αυτοί τύποι αεριοστροβίλων παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των αεριοστροβίλων είναι η απλότητα , η υψηλή ισχύς σε μικρό όγκο κινητήρα αλλά και ο σχετικά μικρός βαθμός απόδοσης που παρουσιάζουν .



- Α.
- α. Συμπιεστής
 - β. Θάλαμος καύσης
 - γ. Στρόβιλος
 - δ. Ηλεκτρογεννήτρια
 - ε. Καυστήρας

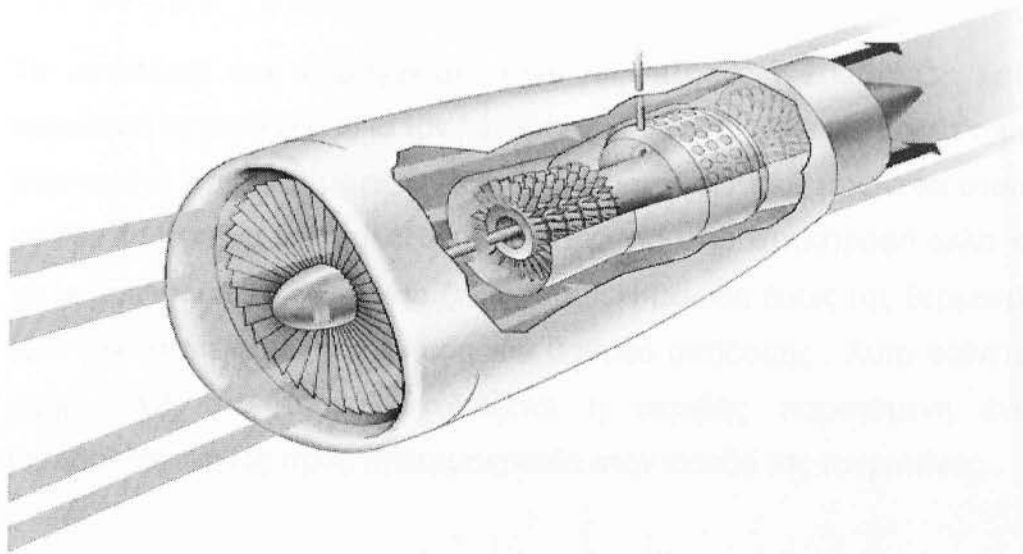
- Β.
- α. Θάλαμος θέρμανσης αέρα
 - β. Σχάρα καύσης
 - γ. Εναλλάκτης θερμότητας
 - δ. Στρόβιλος
 - ε. Εναλλάκτης θερμότητας
 - φ. Ψύκτης
 - ζ. Συμπιεστής
 - η. Ηλεκτρογεννήτρια

3.1 Α.αεριοστρόβιλος ανοικτού κυκλώματος Β.αεριοστρόβιλος κλειστού κυκλώματος

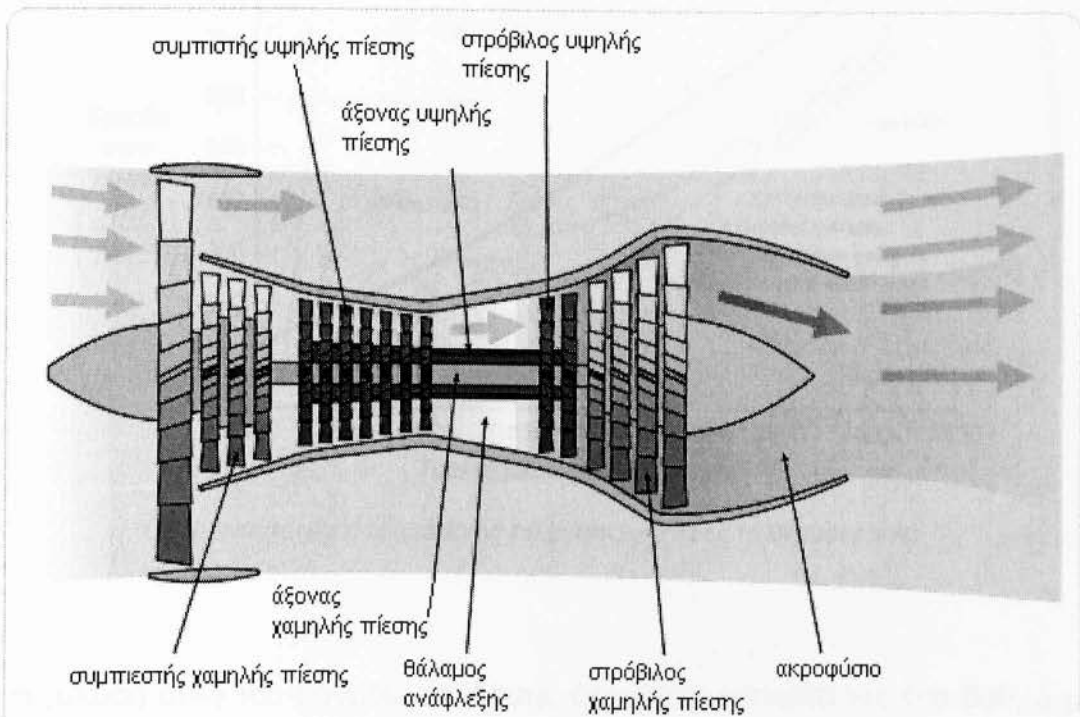
Οι αεριοστρόβιλοι ανοικτού κυκλώματος αποτελούνται από :

- Ένα συμπιεστή , ο οποίος μπορεί να είναι αξονικής ροής (μονοβάθμιος ή πολυβάθμιος) , όπου συμπιέζεται ο ατμοσφαιρικός αέρας και στην συνέχεια καταθλίβεται στον θάλαμο καύσης .
- Έναν θάλαμο καύσης , μέσα στον οποίο υπάρχει συνεχής ροή καυσίμου και πραγματοποιείται η καύση .
- Έναν στρόβιλο ο οποίος συνδέεται με τον συμπιεστή στον ίδιο άξονα και τον θέτει σε κίνηση .

Μέσα στον στρόβιλο (μονοβάθμιο ή πολυβάθμιο) γίνεται η μετατροπή της θερμικής ενέργεια των καυσαερίων σε μηχανική . Στις εγκαταστάσεις ανοικτού κυκλώματος αεριοστροβίλων χρησιμοποιούνται υγρά ή αέρια καύσιμα . Αυτά καίγονται μέσα στον θάλαμο καύσης σε συνθήκες μεγάλης περίσσειας αέρα στην μορφή συνεχούς καύσης . Η αρχική ανάφλεξη γίνεται με εξωτερική φλόγα . Παρακάτω στα σχήματα 3.2 και 3.3 βλέπουμε έναν αεριοστρόβιλο ανοικτού κυκλώματος με όλα του τα μέρη .



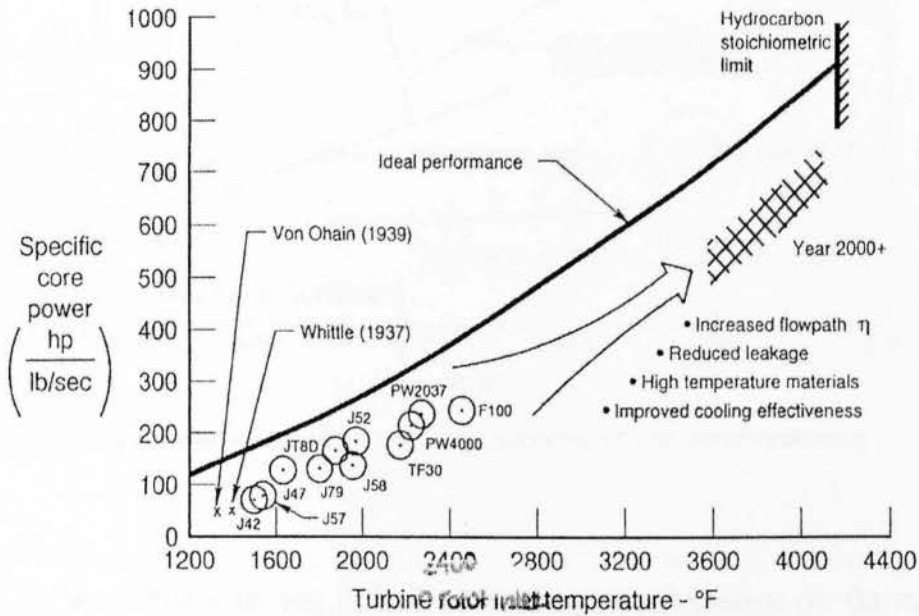
3.2 Αεριοστρόβιλος ανοικτού κυκλώματος



3.3 Τομή αεριοστροβίλου ανοικτού κυκλώματος

3.2 ΑΝΑΓΚΗ ΨΥΞΗΣ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

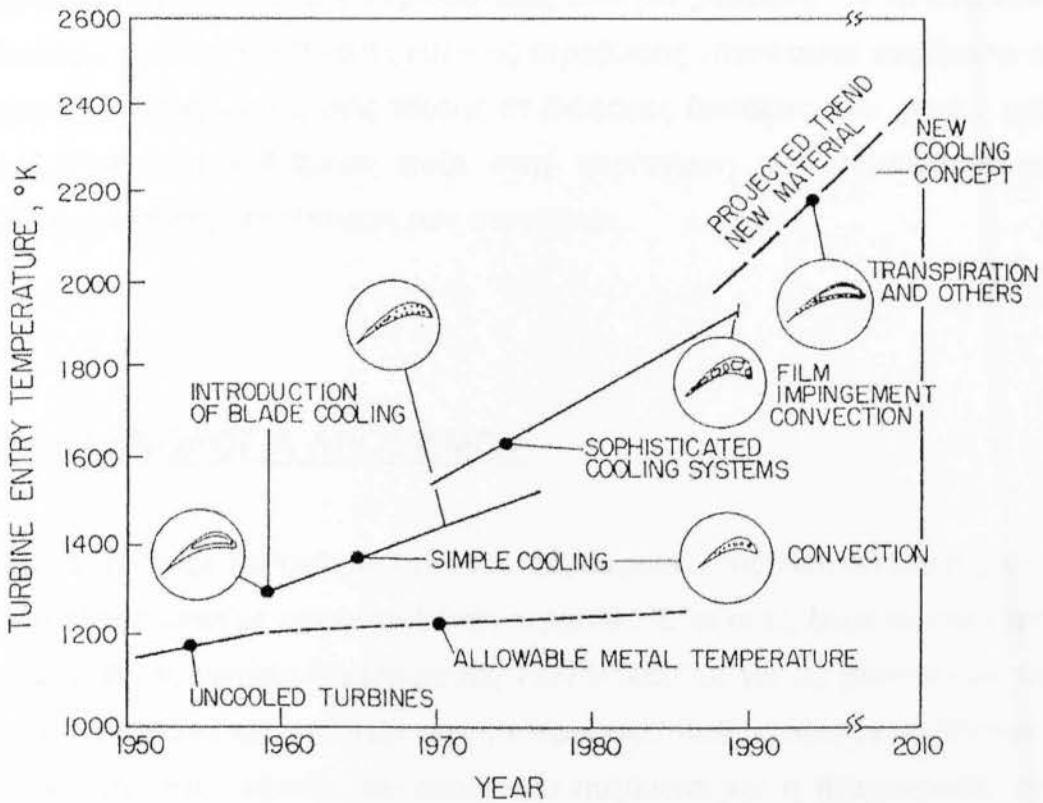
Τα καυσαέρια που παράγονται , είναι της τάξης των 2000 ° C , κάτι που καταπονεί τα πτερύγια . Για τον λόγο αυτό μειώνεται η θερμοκρασία τους πριν μπουν στον στρόβιλο με αέρα . Έτσι η θερμοκρασία τους μειώνεται στους 600 με 900 ° C για να προφυλάξουμε τα πτερύγια από καταστροφή αλλά και για να μεγαλώσουμε την διάρκεια ζωής τους . Η μείωση όμως της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα την πτώση του βαθμού απόδοσης . Αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.4 στο οποίο σχεδιάζεται η ακριβής παραγόμενη ενέργεια μεταβαλλόμενη ως προς τη θερμοκρασία στην είσοδο της τουρμπίνας .



3.4 Αντιστοιχία παραγόμενης ενέργειας ως προς τη θερμοκρασία .

Η μείωση αυτή του βαθμού απόδοσης έχει αντιμετωπισθεί ως ένα βαθμό με προθέρμανση του αέρα που αναροφάται από τον συμπιεστή . Η προθέρμανση αυτή γίνεται με από τα καυσαέρια και με αυτόν τον τρόπο εξοικονομούνται καύσιμα . Ξεκάθαρα φαίνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στην τουρμπίνα είναι μία από τις τεχνολογικές μεθόδους για την αύξηση της απόδοσης του αεροστροβίλου. Η θερμοκρασία εισόδου στο ρότορα της τουρμπίνας είναι πολύ υψηλότερη από το σημείο τήξης του υλικού

των πτερυγίων και σαν συνέπεια έχει ότι τα πτερύγια θα πρέπει να ψυχθούν . Αυτό μπορούμε να το παρατηρήσουμε και από το σχήμα 3.5 .



3.5 Διαχρονική εξέλιξη τρόπων αντιμετώπισης της υπερθέρμανσης .

Έτσι για να αυξήσουμε τον βαθμό απόδοσης παρατηρούμε ότι θα πρέπει να αυξήσουμε και την θερμοκρασία εισόδου σε οποιαδήποτε περίπτωση , αυξάνοντας και την θερμοκρασία σε όλα τα μέρη . Για να αντέξουν αυτήν την αύξηση της θερμοκρασίας τα πτερύγια , χρησιμοποιούνται υλικά θερμοκρασιακής αντοχής , τα οποία μπορούν να επικαλυφθούν με κεραμικά στρώματα τα οποία λειτουργούν σαν ασπίδα προς τα πτερύγια λόγω του ότι έχουν μεγαλύτερη αντοχή στην θερμοκρασία . Ακόμα η βελτίωση της ψυκτικής επίδρασης και η αύξηση της αποδοτικότητας των διαδρομών ροής με μείωση απωλειών μπορούν να προστατέψουν τα πτερύγια . Έτσι κατασκευάζονται εξ'αρχής τα πτερύγια που μέσα τους έχουν διόδους , στις οποίες διοχετεύεται αέρας από τον συμπιεστή με αποτέλεσμα να τα ψύχει . Έτσι τα πτερύγια

μπορούν να αντέξουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες καυσαερίων , άρα να έχουμε και μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης . Παράλληλα αυξάνεται η διάρκεια ζωής τους .

Ο βαθμός απόδοσης μπορεί ακόμα να βελτιωθεί με την κατασκευή αεριοστροβίλων που έχουν περισσότερες από μία βαθμίδες . Αυτό συμβαίνει ειδικότερα για τους συμπιεστές και τους στροβίλους , όταν αυτοί χωρίζονται σε χαμηλής , μέσης και υψηλής πίεσης σε διάφορες διατάξεις που μεταξύ τους πραγματοποιείται ενδιάμεση ψύξη στην περίπτωση των συμπιεστών και αναθέρμανση στην περίπτωση των στροβίλων .

3.2.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΡΟΣΙΣΜΟΥ

Όπως αναφέραμε και στην προηγούμε παράγραφο η αύξηση απόδοσης είναι άμεσα εξαρτώμενη με την υψηλή θερμοκρασία . Έτσι οι εξελιγμένοι κινητήρες λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες (1370-1450°C) για να βελτιώσουν την θερμική απόδοση και την παραγωγή ενέργειας . Καθώς λοιπόν αυξάνεται η θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου αυξάνεται και η θερμοκρασία στα πτερύγια , και για να κρατήσουμε τα πτερύγια ανέπαφα από φθορές πρέπει να κρατήσουμε την θερμοκρασία τους σε χαμηλά επίπεδα , ψύχοντάς τα .

Έτσι τα ψύχουμε με τη χρήση αποσπώμενου αέρα από το συμπιεστή της μηχανής δημιουργώντας όμως μια μείωση στην θερμική απόδοση της μηχανής μας . Έτσι θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί η τεχνική αυτή του δροσισμού έτσι ώστε να βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες λειτουργίας και ο θερμικός βαθμός . Τα πτερύγια ψύχονται με δύο τρόπους . Με την εσωτερική ψύξη και με την εξωτερική ψύξη .

·Εσωτερική ψύξη

επιτυγχάνεται με τη διέλευση του ψυκτικού μέσου μέσα από διάφορες ενισχυμένες ελικοειδής διόδους μέσα στο πτερύγιο απορροφώντας έτσι

θερμότητα από τα εξωτερικά του πτερυγίου. Και η αγωγιμότητα και η συναγωγιμότητα ως μέθοδοι ψύξης λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των πτερυγίων.

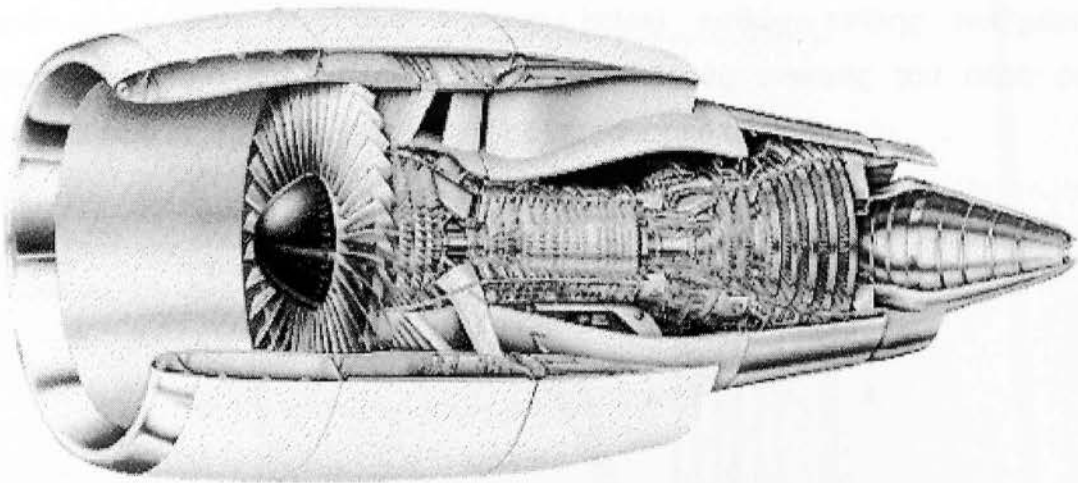
·Εξωτερική ψύξη

καλείται ψύξη με επιφανειακό στρώμα. Αυτό γιατί καθώς ο εσωτερικός αέρας ψύξης αποβάλλεται μέσα από ξεχωριστές τρύπες ή σχισμές, δημιουργεί ένα λεπτό στρώμα ψύξης της εξωτερικής επιφάνειας του πτερυγίου, έτσι ώστε να το προστατέψει από τα θερμά καυσαέρια.

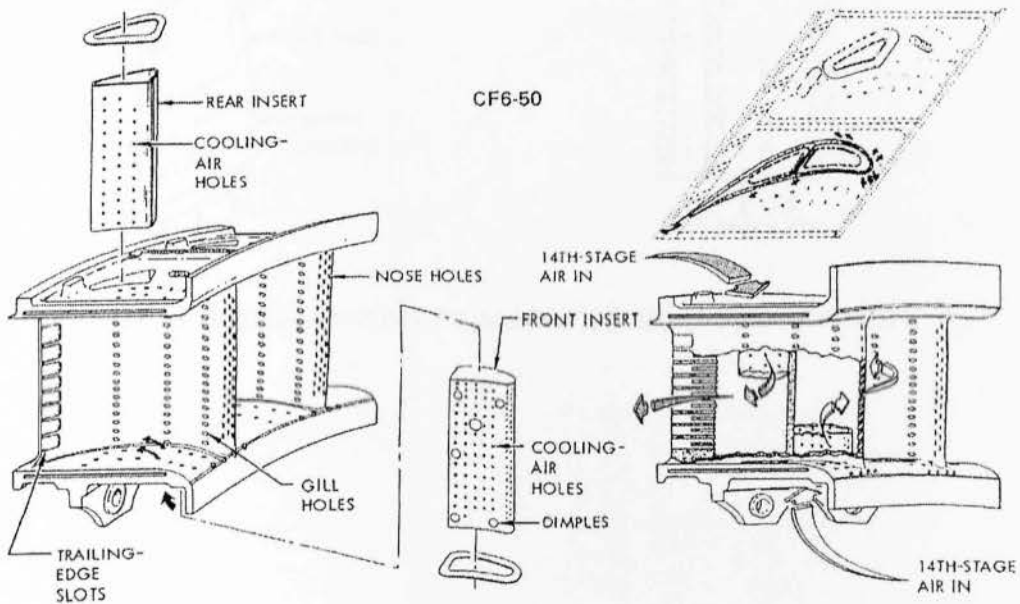
Επίσης το σύστημα ψύξης της μηχανής πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να εξασφαλίζει ότι οι υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες των πτερυγίων και οι διακυμάνσεις αυτών είναι συμβατές με τη μέγιστη θερμική επιτρεπόμενη τάση για το χρόνο ζωής που σχεδιάστηκαν. Για παράδειγμα , μια πολύ μικρή ροή ψυκτικού μέσου θα επιφέρει θερμότερες περιοχές στα πτερύγια και συναρτήσει αυτού μειώνεται και ο χρόνος ζωής τους. Αλλα και μια πολύ μεγάλη ροή μάζας ψυκτικού μέσου θα επιφέρει μειωμένη απόδοση της μηχανής. Για αυτό, το σύστημα ψύξης πρέπει να έχει σχεδιασθεί ελαχιστοποιώντας την ποσότητα του αποσπώμενου από το συμπιεστή αέρα και μεγιστοποιώντας τα οφέλη των καυσαερίων που εισέρχονται στην τουρμπίνα.

Στα παρακάτω σχήματα 3.6 και 3.7 βλέπουμε σε τομή προηγμένους κινητήρες που χρησιμοποιούν μεθόδους δροσισμού με επιφανειακό στρώμα , με αύξηση της αγωγιμότητας και της συναγωγιμότητας . Συγκεκριμένα , στο σχήμα 3.6 έχουμε σε τομή την όψη του G.E. CF6 κινητήρα turbofan και την πρώτη σταθερή βαθμίδα υψηλής πίεσης οδηγητικών . Ο αέρας ψύξης οδηγείται από το σύστημα αφάιμαξης της 14ης βαθμίδας του συμπιεστή και προσκρούει στα εσωτερικά τοιχώματα των οδηγητικών πτερυγίων . Μετά από

αυτή τη μέθοδο ψύξης, ο αέρας μέσω οπών στο χείλος προσβολής, στο χείλος εκφυγής αλλά και ενδιάμεσων οπών δημιουργεί ένα στρώμα ψύξης στην εξωτερική επιφάνεια.

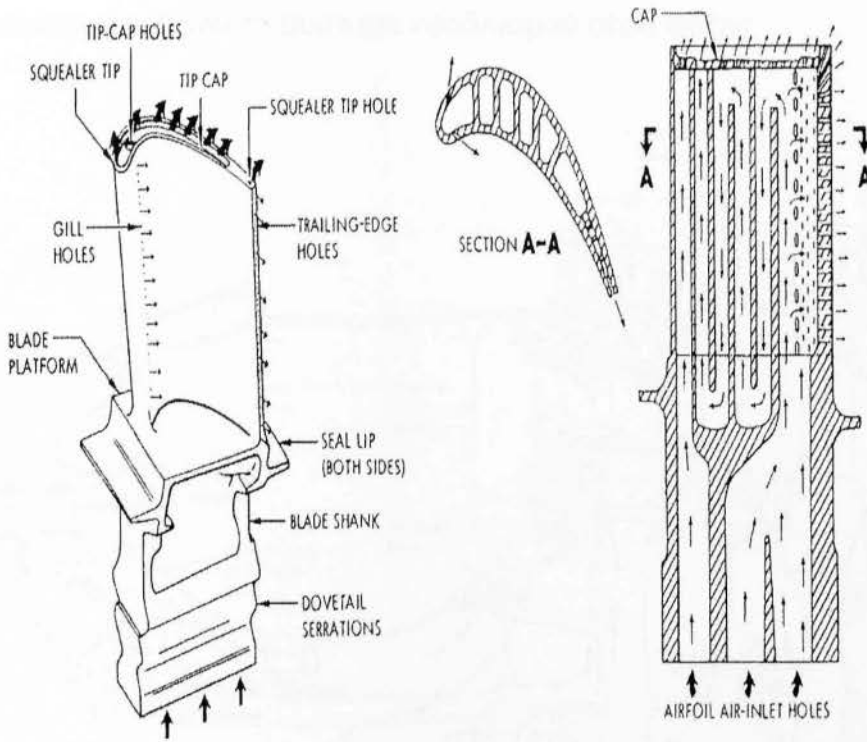


3.6 Ο CF6 turbofan κινητήρας της εταιρίας G.E. σε τομή



3.7 Η 1η βαθμίδα σταθερών ακροφυσίων του κινητήρα CF6.

Στο Σχήμα 3.8 βλέπουμε την εσωτερική ψύξη της 1ης κινητής πτερωτής. Το σύστημα είναι βασισμένο στην χρήση της ψύξης με συναγωγιμότητα στην περιοχή του χείλους προσβολής και επιφανειακή ψύξη μέσω των οπών, αυξημένη συναγωγιμότητα χρησιμοποιώντας νευρώσεις παραγωγής στροβιλισμών στην μεσοκαμπύλια περιοχή και ψύξη μέσω ροής από οπές στο άκρο του πτερυγίου (tip-cap holes) καθώς επίσης αυξημένη συναγωγιμότητα στο χείλος εκφυγής με διόδους εκφυγής του αέρα σε συνδυασμό με τη δημιουργία ψύξης με επιφανειακό στρώμα .

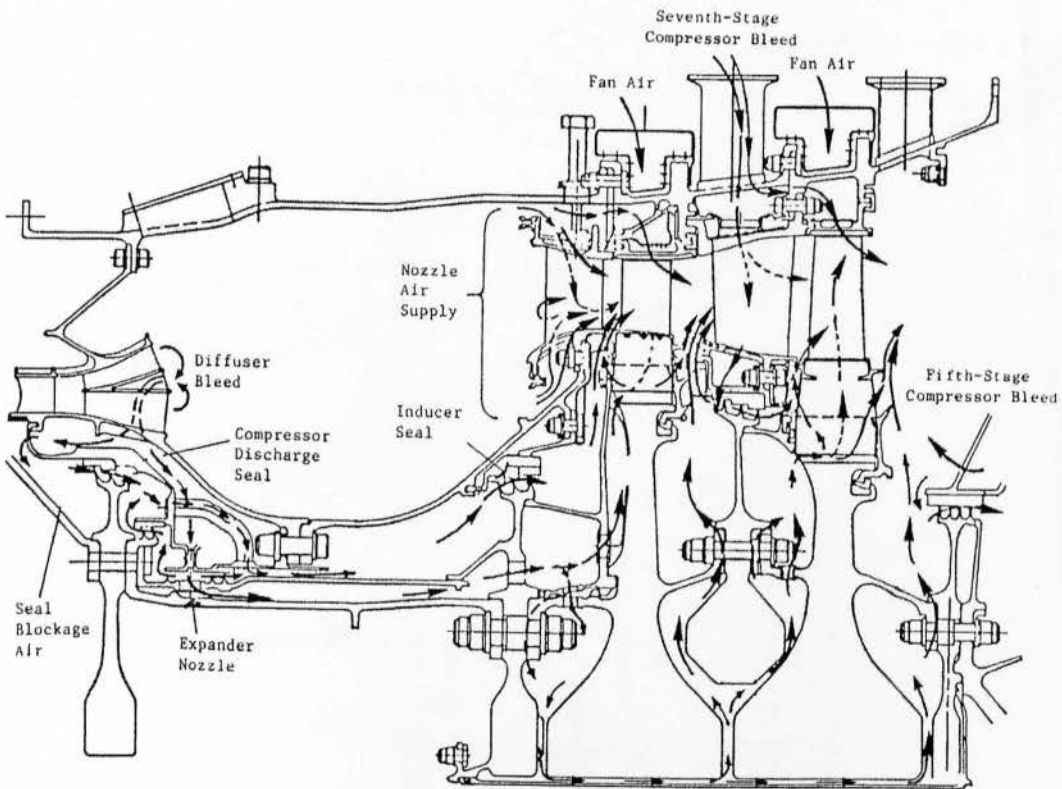


3.8 Η 1η βαθμίδα κινητών πτερυγίων της τουρμπίνας του κινητήρα CF6

Τυπικό σύστημα ψύξης του στροβίλου

Η τεχνολογία ψύξης των αεριοστροβίλων διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή μια και είναι πολυσύνθετη και συνεχώς εξελισσόμενη . Ακόμα και οι ίδιοι οι κατασκευαστές δεν χρησιμοποιούν το ίδιο σύστημα ψύξης για

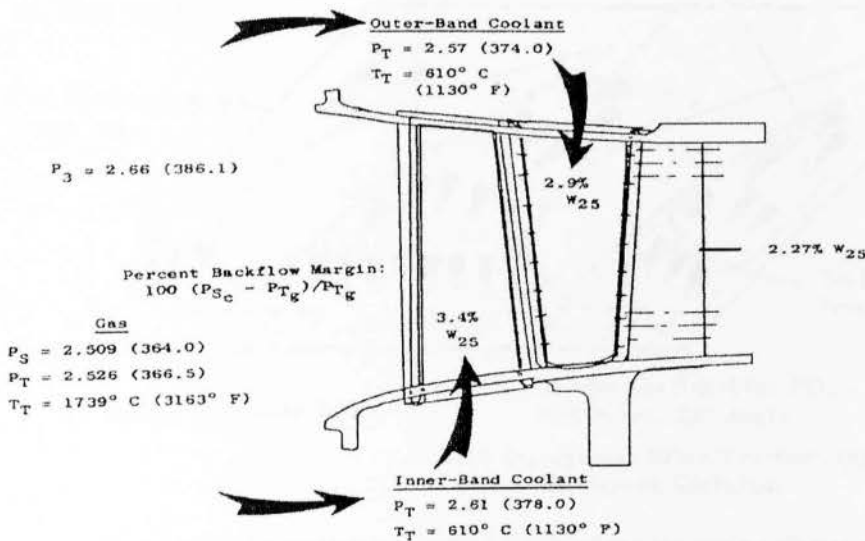
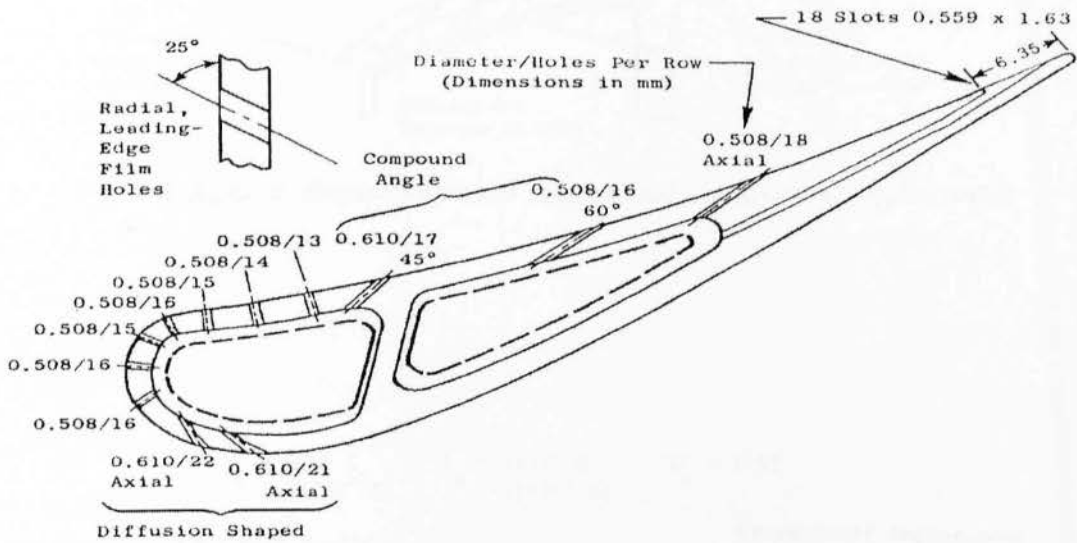
όλες τους τις μηχανές . Τα πιο πολλά συστήματα ψύξης είναι κατοχυρωμένα στη δημιουργία τους και δεν είναι διαθέσιμα στην ανοικτή βιβλιογραφία. Παρόλα αυτά οι πιο πολλοί σχεδιασμοί είναι πανομοιότυποι ασχέτως του κατασκευαστή και του μοντέλου. Στην επόμενη παράγραφο θα μελετήσουμε ένα σύστημα ψύξης το οποίο σαν φιλοσοφία χρησιμοποιείται πολύ συχνά και ο σχεδιασμός του είναι διαθέσιμος δημοσίως , αυτό του NASA E3 που παρήχθη από την G.E. Aircraft Engines. Βέβαια οι κινητήρες έχουν εξελιχθεί και συνεχίζουν να εξελίσσονται πέραν του E3 κινητήρα. Στο Σχήμα 3.9 υπάρχει μία συνολική άποψη του στροφείου, του κελύφους του στροβίλου και συμπεριλαμβάνει το σύστημα εφοδιασμού αέρα ψύξης.



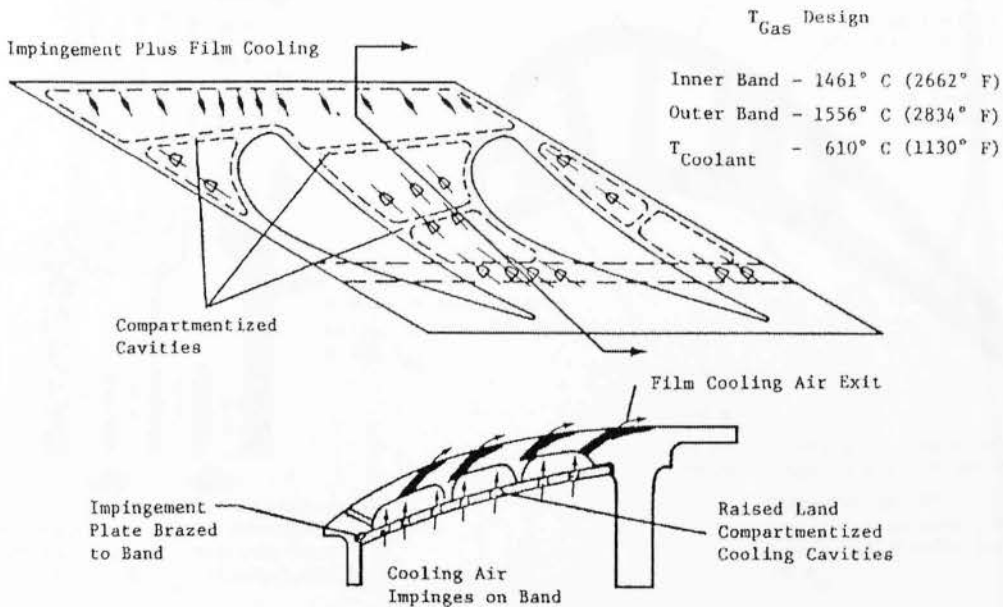
3.9 Συνολική άποψη του συστήματος ψύξης των ρότορα, στάτορα και κελύφους του κινητήρα E3

Στα παρακάτω σχήματα 3.10-3.12 φαίνεται η παροχή αέρα ψύξης για την περιοχή των σταθερών πτερυγίων και ο σχεδιασμός της εσωτερικής και εξωτερικής περιοχής. Αυτός ο σχεδιασμός περιλαμβάνει δύο ξεχωριστές εισόδους και οπές για την έξοδο του αέρα στο χείλος εκφυγής. Λόγω του

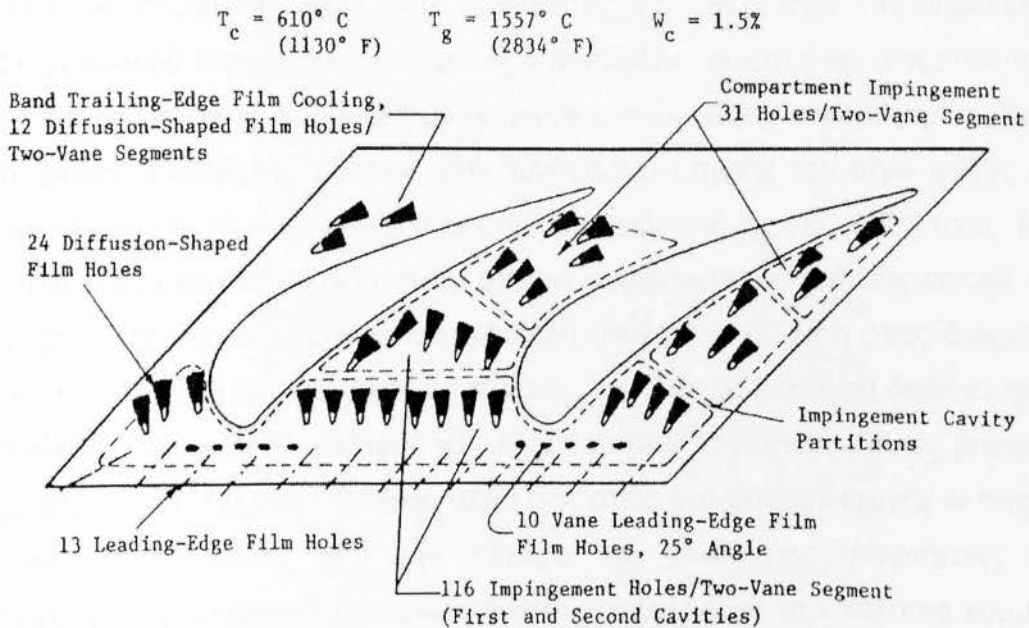
σχεδιασμού, επίσης, χρησιμοποιούνται και οι δύο μέθοδοι ψύξης, διείδυσης και δημιουργίας επιφανειακού στρώματος από τις οπές στο χείλος προσβολής και στα μέσα του πτερυγίου με δύο σειρές οπών στην πλευρά υπερπίεσης και δύο σειρές οπών στην πλευρά χαμηλότερης πίεσης. Η εσωτερική περιοχή του σταθερού πτερυγίου ψύχεται με την εισροή του ψυχρού αέρα και μετά η εξωτερική περιοχή ψύχεται με επιφανειακό στρώμα που δημιουργούν οι οπές διάχυσης. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ποσότητας ψυκτικού αέρα, η μεγιστοποίηση της επίδρασης της ψύξης και η παραγωγή μίας αποδεκτής θερμοκρασίας όσο αναφορά το μέτρο της αλλά και όσο αναφορά τη διανομή της στις επιφάνειες των πτερυγίων.



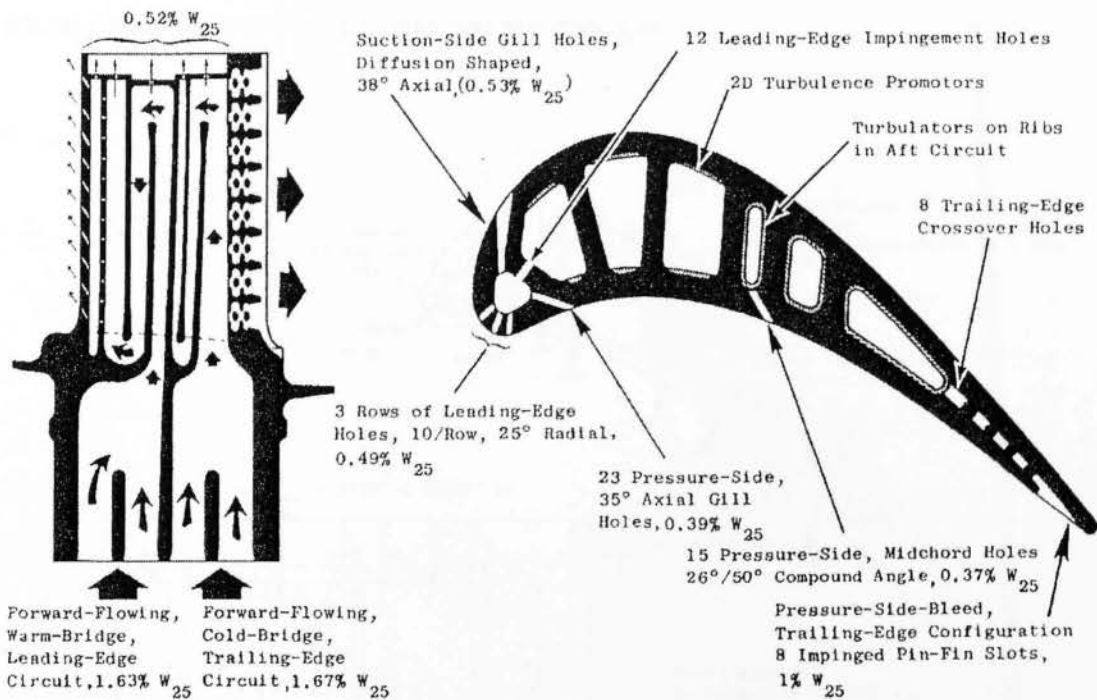
3.10 Γεωμετρία και εφοδιασμός αέρα ψύξεως της 1ης σταθερής βαθμίδας πτερυγίων του κινητήρα E3



3.11 1η βαθμίδα σταθερών πτερυγίων , σχεδιασμός ψύξης εσωτερικής περιοχής.



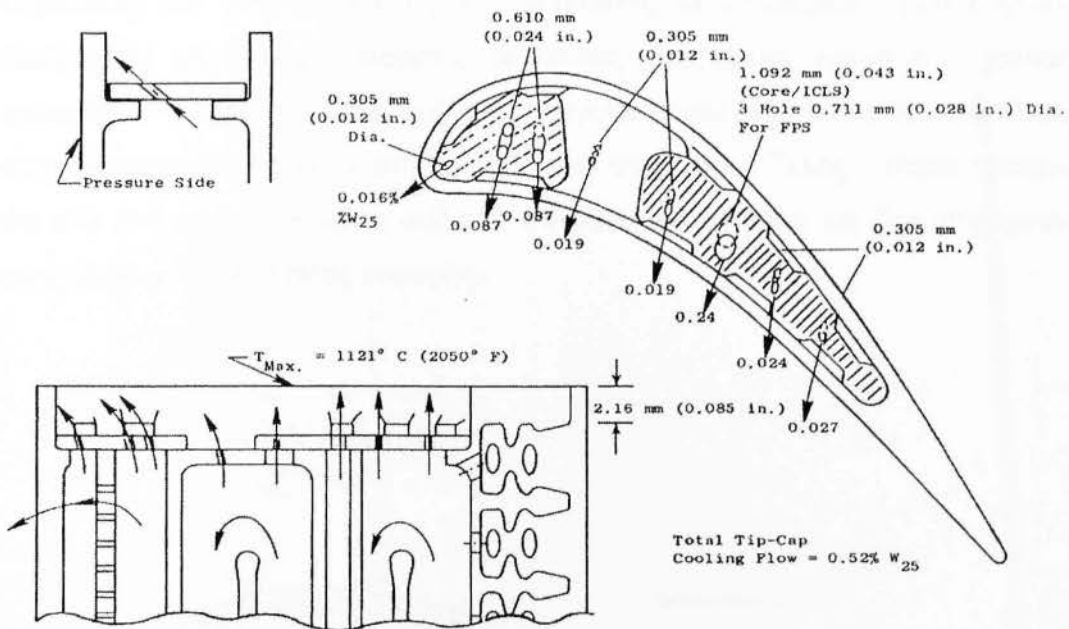
3.12 1η βαθμίδα σταθερών πτερυγίων , σχεδιασμός ψύξης εξωτερικής περιοχής.



3.13 1η βαθμίδα κινητών πτερυγίων , σχεδιασμός ψύξης εσωτερικής περιοχής.

Στο Σχήμα 3.13 παρατηρούμε την παροχή αέρα ψύξεως για τα πτερύγια της πρώτης κινητής βαθμίδας όπου χρησιμοποιούνται δύο κυκλώματα εσωτερικής ροής με αυξημένη συναλλαγή θερμότητας και σχεδιασμό για δημιουργία επιφανειακού στρώματος. Στο χείλος προσβολής, οι οπές εφοδιάζονται από τις τρεις ελικοειδής διαδρομές με νευρώσεις παραγωγής στροβιλισμών. Έτσι, το χείλος προσβολής ψύχεται από συνδυασμό εισροής του αέρα ψύξης και του επιφανειακού στρώματος που δημιουργείται από τις υπό κλίση οπές. Μία απλή λεπτή ροή υπό κλίση γύρω από την επιφάνεια υπερπίεσης εκτελεί την ψύξη αυτής της περιοχής καθώς μία ροή από τις υπό κλίση οπές διάχυσης εκτελεί την ψύξη της περιοχής υποπίεσης. Το δεύτερο κύκλωμα διαθέτει τρεις διαδρομές με τη ροή ενδιάμεσα να αλλάζει πορεία. Ο δεύτερος αυτός βρόγχος χρησιμεύει επίσης στην διάθεση αέρα στις οπές στο χείλος εκφυγής οι οποίες είναι τοποθετημένες από την πλευρά της επιφάνειας υπερπίεσης και δημιουργούν εξωτερικό επιφανειακό στρώμα ψύξης για το υπόλοιπο κομμάτι μικρής διατομής του χείλους εκφυγής. Η τρίτη διαδρομή αυτού του βρόγχου

καταλήγει μέσω μίας σειράς οπών στην εξωτερική επιφάνεια της υψηλής πίεσης ενισχύοντας έτσι το επιφανειακό στρώμα.



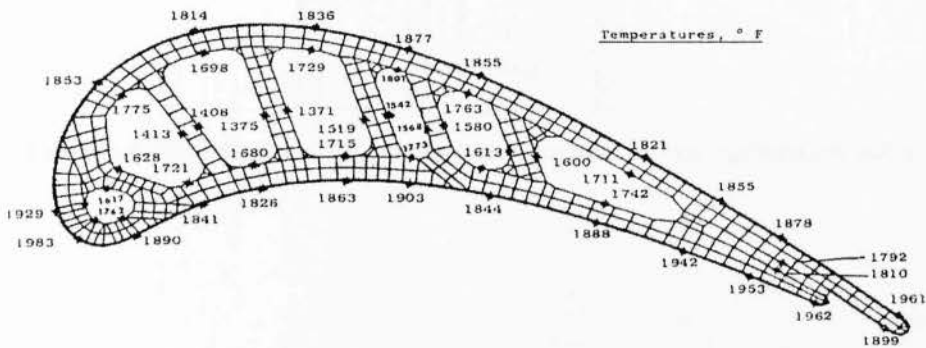
Σχήμα 3.14 1η βαθμίδα κινητών πτερυγίων , σχεδιασμός οπών.

Το Σχήμα 3.14 μας δείχνει τον τρόπο δροσισμού του επάνω άκρου του πτερυγίου. Εκεί κάποιο μέρος του αέρα σπαταλάτε διερχόμενο από τις οπές και ψύχει την περιοχή αυτή. Στόχος όπως είπαμε είναι η μείωση της καταναλισκόμενης ποσότητας ψυκτικού, μεγιστοποίηση της επίδρασης δροσισμού και η παραγωγή ενός αποδεκτού επιπέδου θερμοκρασίας στις επιφάνειες των πτερυγίων όπως φαίνεται και το Σχήμα 3.15.

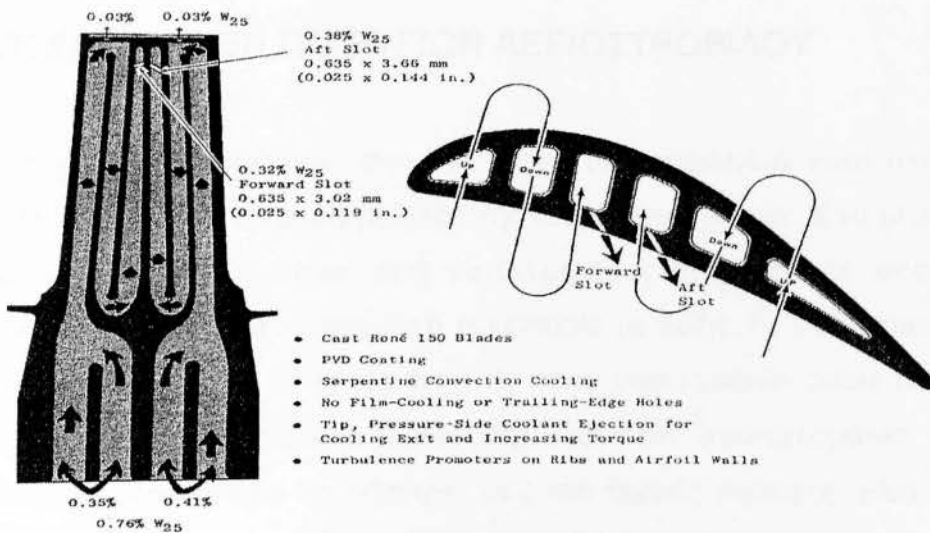
Το Σχήμα 3.16 δείχνει το σύστημα ψύξης της 2ης βαθμίδας σταθερών πτερυγίων. Ο σχεδιασμός χρησιμοποιεί μία και μόνο ροή στο εσωτερικό του πτερυγίου. Δεν χρησιμοποιεί επιφανειακό στρώμα αλλά διαθέτει οπές στο χείλος εκφυγής για την ψύξη εκείνης της περιοχής. Μετά την διάδοση του αέρα, μέρος αυτού προωθείται προς την εσωτερική διάμετρο των πτερυγίων για να προκαλέσει καθαρισμό της περιοχής εσωτερικής στεγανοποίησης αυτής της βαθμίδας. Στο επόμενο 3.17 φαίνεται η κινητή πτερωτή της δεύτερης βαθμίδας και ο τρόπος ψύξης αυτής. Παρατηρούμε ότι το σύστημα αποτελείται από δύο κυκλώματα ροής με σχεδιασμό για την αύξηση

εσωτερικά της συναγωγιμότητας. Στον εμπρόσθιο βρόγχο, αέρας ψύξης κινείται μέσω τριών διαδρομών με αλλαγές διεύθυνσης που προξενούν τύρβη. Παρομοίως στον οπίσθιο βρόγχο, αέρας ψύξης εισέρχεται από το σημείο εδράσεως του πτερυγίου και ρέει , ψύχοντας το εσωτερικό , μέσω τριών διαδρομών με αλλαγές πορείας οι οποίες βρίσκονται κοντά στο χείλος εκφυγής. Ο αέρας του κάθε βρόγχου εξαγεται μέσω μίας σχισμής υπό κλίση στην εξωτερική επιφάνεια υπερπίεσης του πτερυγίου. Τέλος , παρατηρούμε ότι εδώ δεν χρησιμοποιείται ψύξη με επιφανειακό στρώμα και δεν υπάρχουν οπές διαφυγής στο χείλος εκφυγής.

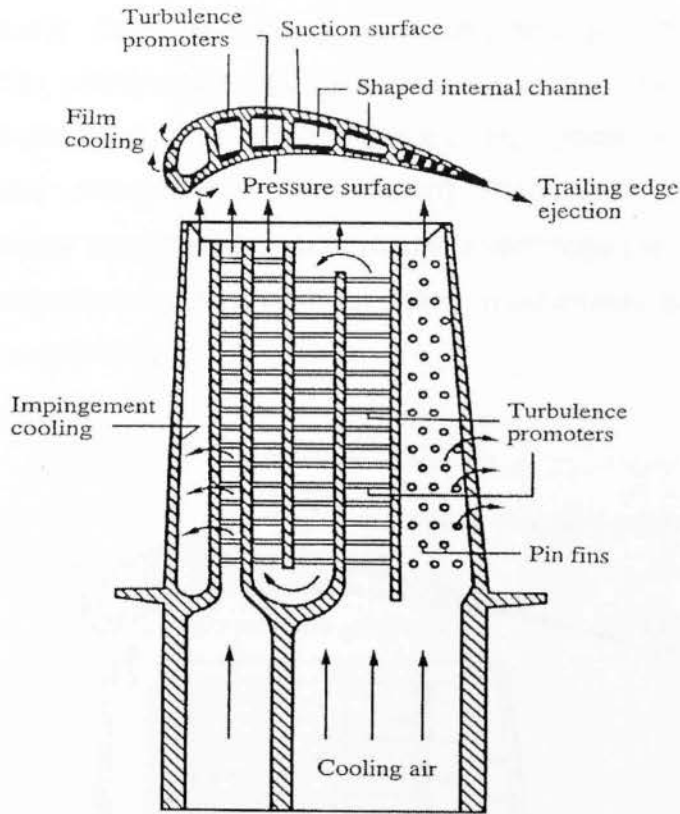
$T_{TB} = 1396^{\circ} C (2545^{\circ} F)$
 $T_{CDF} = 44^{\circ} C (111^{\circ} F)$
 $T_{CP} = 628^{\circ} C (1162^{\circ} F)$
 $W_{Coolant} = 3.3\% W_{25}$
 $T_{Bulk} = 953^{\circ} C (1748^{\circ} F)$



Σχήμα 3.15 1η βαθμίδα κινητών πτερυγίων , θερμοκρασιακή διανομή.



Σχήμα 3.16 2η βαθμίδα σταθερών πτερυγίων , ροές ψυκτικού μέσου.



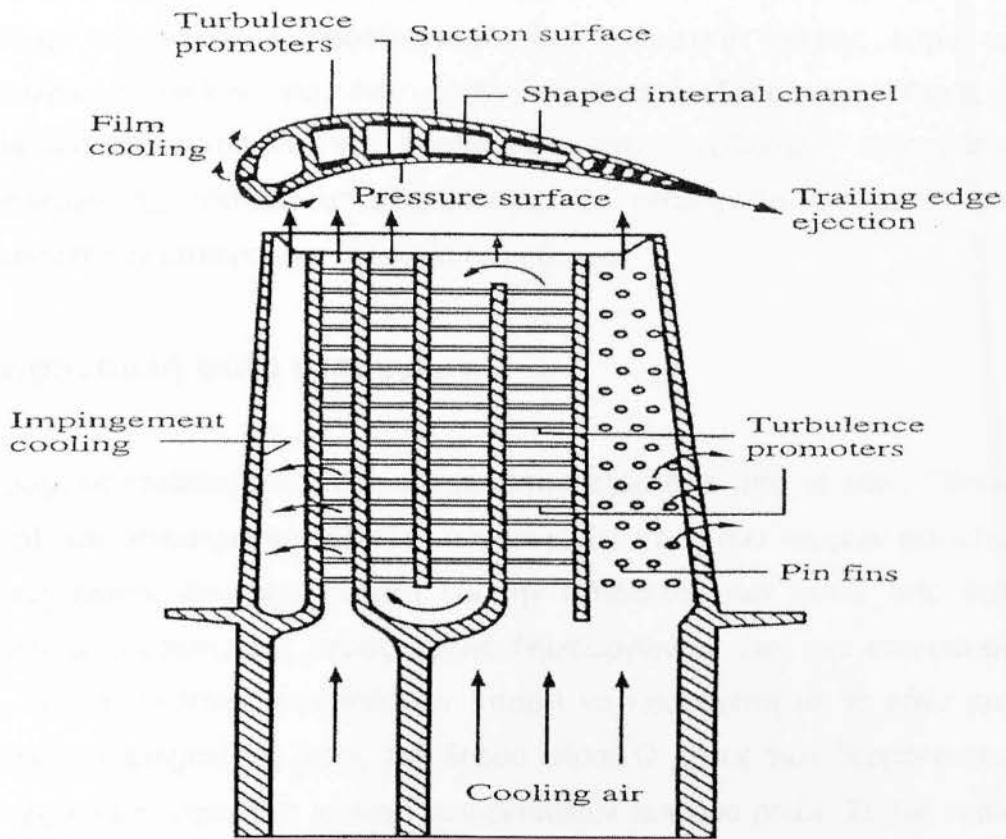
Σχήμα 3.17 2η βαθμίδα κινητών πτερυγίων ,χαρακτηριστικά σχεδιασμού ψύξης.

3.2.2 ΡΟΕΣ ΨΥΞΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΨΥΞΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Η ροή ρευστού (ψυκτικού) στις εσωτερικό των πτερυγίων είναι μία απλή τεχνική ψύξης για την πρώτη βαθμίδα της τουρμπίνας αερίων. Ένα μέρος του αέρα κινείται μέσω σειρών από κατανεμημένες επιφανειακές οπές στις αναγκαίες περιοχές για επιφανειακή προστασία με ψύξη. Το υπόλοιπο μέρος του αέρα κινείται προς το χείλος εκφυγής όπου μέσω μικρών οπών το ψύχει. Η παραπάνω μέθοδος ψύξης (διείσδυση) είναι πολύ αποτελεσματική καθώς το ψυκτικό μέσο μπορεί να οδηγηθεί στις πιο θερμές περιοχές. Είναι, πολύ σημαντικό όμως να προσδιορισθούν οι συνθήκες ροής στο εσωτερικό των πτερυγίων κάτω από τυπικές διατάξεις και διανομές των διόδων και των οπών

τους διότι όταν δημιουργούνται κάθετες ροές μειώνεται η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής. Οι συνθήκες ροής είναι αυτές που έχουν άμεση σχέση με τους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας. Η ψύξη με διείσδυση αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στην περιοχή του χείλους προσβολής, εξαιτίας των κατασκευαστικών περιορισμών στην κινητή πτερύγωση υπό συνθήκες υψηλών ταχυτήτων περιστροφής και μεγάλων περιστροφικών δυνάμεων. Στο σχήμα 3.18 παρατηρούμε το σύστημα ψύξης πολλαπλών διόδων κινητού πτερυγίου της τουρμπίνας.



3.18 Σχεδιασμός ψύξης ενός σύγχρονου πολλαπλών διόδων κινητού πτερυγίου του στροβίλου.

Προς το παρόν, στη μεσοκαμπύλια περιοχή του πτερυγίου χρησιμοποιούνται ελικοειδής διαδρομές ψύξης με αλλαγές πορείας στο εσωτερικό των τοιχωμάτων του πτερυγίου, ενώ η περιοχή του χείλους εκφυγής διαθέτει μικρές σχισμές, εξαιτίας των περιορισμών χώρου και κατασκευής. Η μετάδοση θερμότητας στις περιστρεφόμενες διόδους είναι πολύ διαφορετική από ότι όταν οι δίοδοι μένουν ακίνητες. Στην πρώτη περίπτωση δηλαδή, οι δυνάμεις

Coriolis και οι δυνάμεις άντωσης λόγω της περιστροφής μπορούν να τροποποιήσουν τις κατατομές της ροής και της θερμοκρασίας και φυσικά να επηρεάσουν τους επιφανειακούς συντελεστές διανομής της μετάδοσης της θερμότητας. Είναι πολύ σημαντικό να προσδιορισθούν οι τοπικοί συντελεστές μετάδοσης θερμότητας στο εσωτερικό των περασμάτων των πτερυγίων που διαθέτουν περιοχές απότομης αλλαγής κατεύθυνσης και περιοχές με μικρές οπές ή σχισμές για περαιτέρω ψύξη. Όλα αυτά κάτω από συνθήκες υψηλής διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ ψυκτικού και υλικού του πτερυγίου και υψηλής ταχύτητας περιστροφής γύρω από τον άξονα της μηχανής. Είναι, επίσης, σημαντικός ο προσδιορισμός των απωλειών πίεσης λόγω των εσωτερικών τριβών για ένα δοθέν σχεδιασμό δροσισμού. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να βοηθήσουν στο σχεδιασμό συστημάτων, αποφεύγοντας τοπικές υπερθερμάνσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν αστοχία στα πτερύγια του ρότορα.

Επιφανειακή ψύξη πτερυγίων

Η ψύξη με επιφανειακό στρώμα πρωτίστως εξαρτάται από το λόγο πιέσεων (p_c/p_t) και θερμοκρασιών (T_c/T_g) των ψυχρών προς των θερμών ρευμάτων καθώς επίσης από την διάταξη και την τοποθεσία των οπών από όπου εξέρχεται ο εσωτερικός αέρας ψύξης δημιουργώντας έτσι την επιφανειακή προστασία. Ο λόγος των πιέσεων μπορεί να έχει σχέση με το λόγο ροής μάζας του ψυχρού ως προς τον θερμό αέρα. Ο λόγος των θερμοκρασιών μπορεί να έχει σχέση με το λόγο των εντάσεων των δύο ροών. Σε ένα τυπικό αεριοστρόβιλο, ο λόγος p_c/p_t κυμαίνεται μεταξύ 1.02 με 1.1, ενώ η αντίστοιχη αναλογία της ροής μάζας μεταξύ 0.5 με 2. Από την άλλη, ο λόγος T_c/T_g ποικίλλει από 0.5 με 0.85 για μία αντίστοιχη αναλογία εντάσεων μεταξύ 2.0 με 1.5. Σημαντικότετοι παράγοντες αποτελούν και οι δύο λόγοι (πίεσης και θερμοκρασίας) στην αποτελεσματικότητα του επιφανειακού στρώματος. Γενικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος των πιέσεων, τόσο καλύτερη επιφανειακή προστασία έχουμε σε μία δεδομένη αναλογία θερμοκρασιών, ενώ όσο μικρότερος είναι ο λόγος των θερμοκρασιών, τόσο καλύτερη επιφανειακή προστασία έχουμε σε σταθερή αναλογία πιέσεων. Όμως, μία

πολύ υψηλή αναλογία πιέσεων μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα λόγω της αποκόλλησης από την επιφάνεια και της διείσδυσης στην κυρίως ροή των θερμών καυσαερίων. Επομένως, είναι σημαντικό να βελτιστοποιηθεί η ποσότητα του ψυκτικού μέσου για την εξωτερική ψύξη των πτερυγίων με επιφανειακό στρώμα κάτω από συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα (αριθμός Reynolds 106, αριθμός Mach 0.9 στην έξοδο).

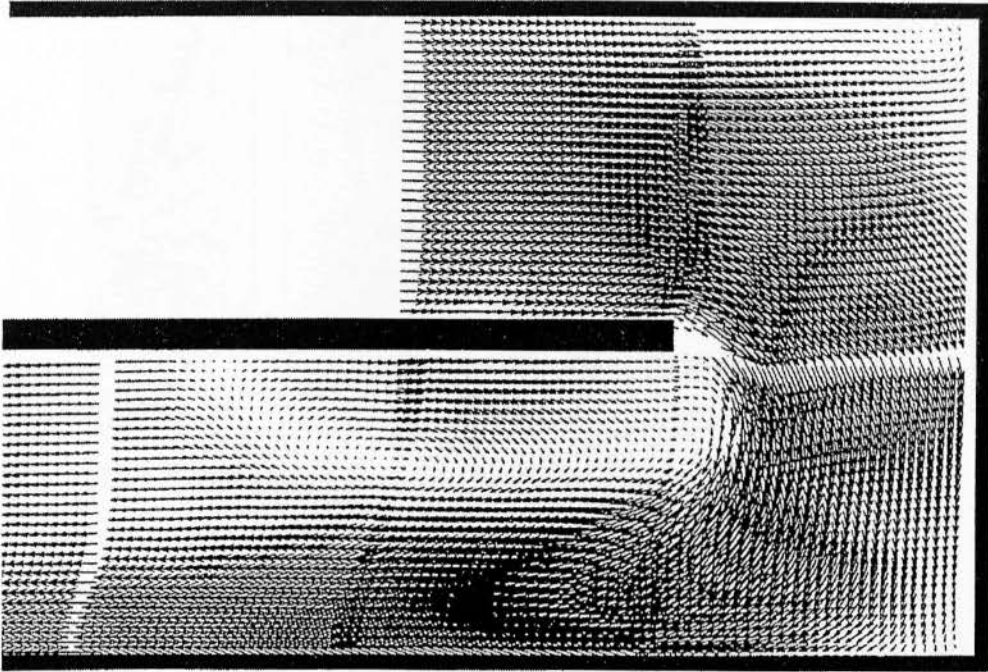
Είναι επίσης σημαντικό να διευκρινιστεί η επίδραση της τύρβης και των ασταθών ροών που εμφανίζονται στην απόδοση της ψύξης. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι σχεδιαστές των συστημάτων ψύξης χρειάζεται να ξέρουν σε ποια σημεία τα θερμά καυσαέρια θερμαίνουν τα πτερύγια για να σχεδιάσουν καλύτερα μοντέλα προστασίας της επιφάνειας. Αυτά τα μοντέλα που αποτελούνται από οπές και σχισμές στα πτερύγια επιδρούν καταλυτικά στην ψύξη των επιφανειών τους, άρα και στην αντοχή στη διάρκεια της ζωής τους.

3.3 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΨΥΞΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΕΡΙΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Σε αυτήν την παράγραφο θα δούμε την επίδραση που έχει η καμπύλη των 180° στο εσωτερικό των πτερυγίων . Στις εσωτερικές διόδους ψύξεως , που υπάρχουν μέσα στα πτερύγια , υπάρχουν πολλές απότομες καμπές 180° (U turns) . Πιο κάτω θα δούμε στοιχεία για την επίδραση που έχουν αυτές οι καμπύλες στην μετάδοση της θερμότητας .

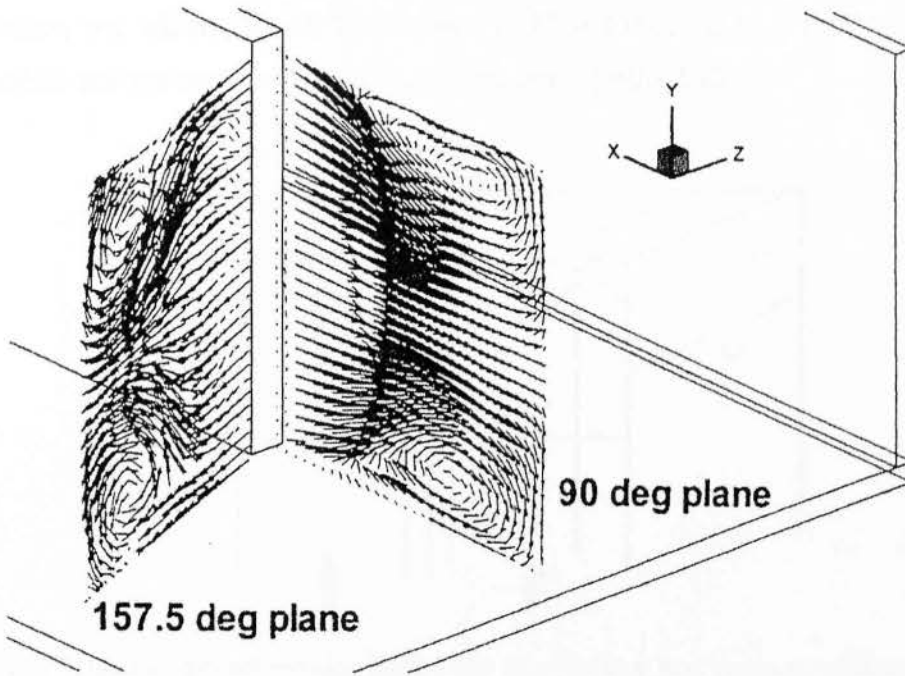
Το 1998 οι Schabacker et al., χρησιμοποίησαν ένα στερεοσκοπικό ταχύμετρο αναπαράστασης σωματιδίων για να προσδιορίσουν την χρονικά μέση ταχύτητα και τύρβη σε μία απότομη καμπύλη. Στο Σχήμα 3.19 φαίνεται το πεδίο της μέσης τιμής της ταχύτητας στην καμπή στο μέσο επίπεδο. Ο διαχωρισμός της ροής φαίνεται ξεκάθαρα στην περιοχή προς τα κάτω της καμπής. Επίσης παρουσιάζονται οι μικροί στροβιλισμοί που δημιουργούνται

στις γωνίες. Οι στροβιλισμοί στο μέσο επίπεδο διαφέρουν από αυτούς κοντά στα πλάγια τοιχώματα.



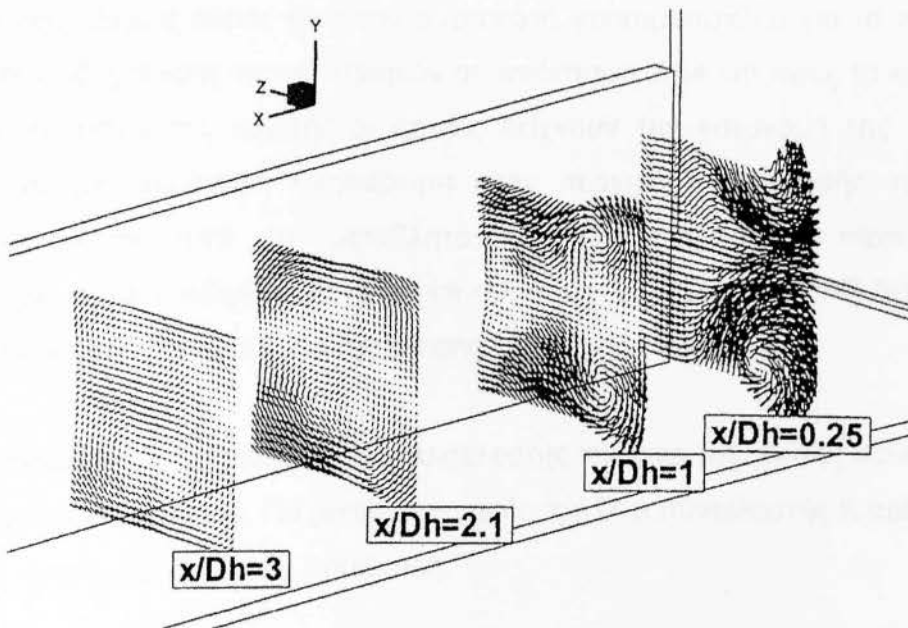
3.19 Διανομή της ροής στην περιοχή της καμπής.

Στο σχήμα 3.20 παρατηρούμε την δευτερεύουσα ροή που δημιουργήθηκε λόγω της καμπής . Η ροή αυτή έχει την μορφή 2 ης δίνης .



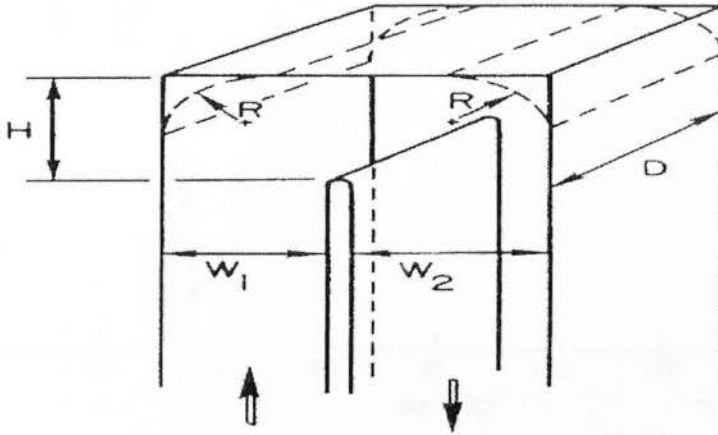
3.20 Δευτερεύουσα ροή στην περιοχή της καμπής (Schabacker et al., 1998).

Στο σχήμα 3.21 παρατηρούμε την μείωση της δευτερεύουσας ροής μετά την καμπή. Η ροή αυτή ενισχύει την ανάδευση του ρευστού, αυξάνοντας έτσι την μετάδοση της θερμότητας.



3.21 Δευτερεύουσα ροή κατάντη της καμπής (Schabacker et al., 1998).

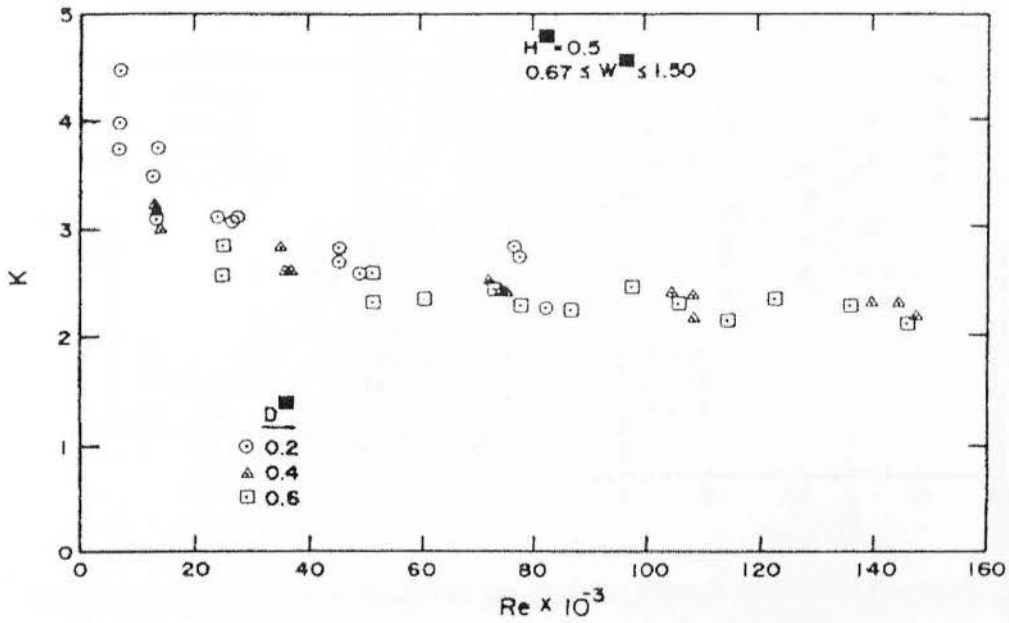
Σε μία άλλη ανάλυση δυναμικής ροής, οι Metzger et al. το 1984 μέτρησαν την πτώση της πίεσης σε απότομη καμπή. Μετέβαλαν τα πλάτη W_1 και W_2 της διόδου και την ακτίνα R , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.22.



3.22 Σχηματική απεικόνιση μίας διόδου δύο διευθύνσεων που χρησιμοποιήθηκε από τους Metzger et al., 1984.

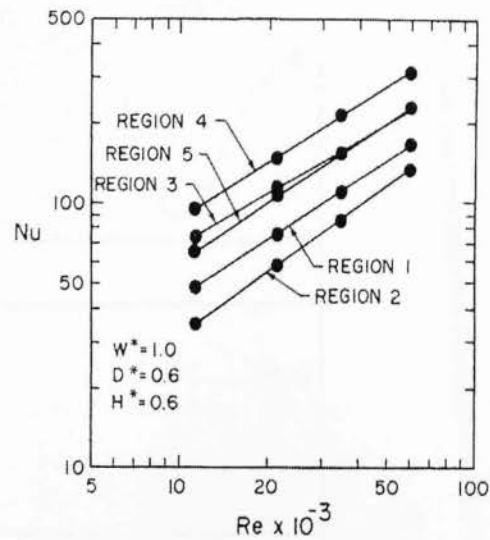
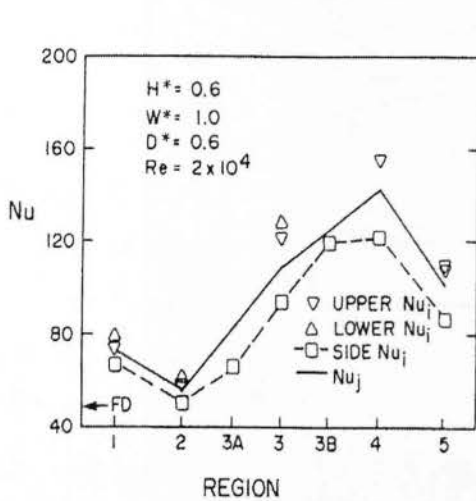
Έτσι, έλαβαν αποτελέσματα πτώσης της πίεσης από το συντελεστή απώλειας πίεσης $K=2\Delta P/\rho v^2$. Το πείραμα σχεδιάστηκε έτσι, ώστε με ευκολία να μεταβάλλονται οι παράμετροι αυτοί και να παρέχει ένα μεγάλο εύρος γεωμετρικών συνδυασμών. Το συνολικό πλάτος (άθροισμα των W_1 , W_2) είναι 7cm. Ξηρός αέρας από τον συμπιεστή χρησιμοποιείται για το πείραμα και βαλβίδες πίεσης τοποθετήθηκαν σε απόσταση 2.54 cm προς τα κάτω και προς τα πάνω της καμπής οι οποίες δείχνουν την κατανομή της πίεσης. Υπάρχει μία σημαντική κινητικότητα στην περιοχή της στροφής, η οποία χαρακτηρίζεται από τη μεταβλητότητα των μετρήσεων πίεσης. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν, ότι η επιρροή της $D' = D / W_1 + W_2$ δεν παίζει σημαντικό ρόλο στην πτώση της πίεσης.

Στο σχήμα 3.23 παρουσιάζεται ο συντελεστής πτώσης της πίεσης συναρτήσει του αριθμού Reynolds. Για μικρότερες τιμές του D' ο συντελεστής K αυξάνεται, αλλά η επίδραση δεν είναι σημαντική.



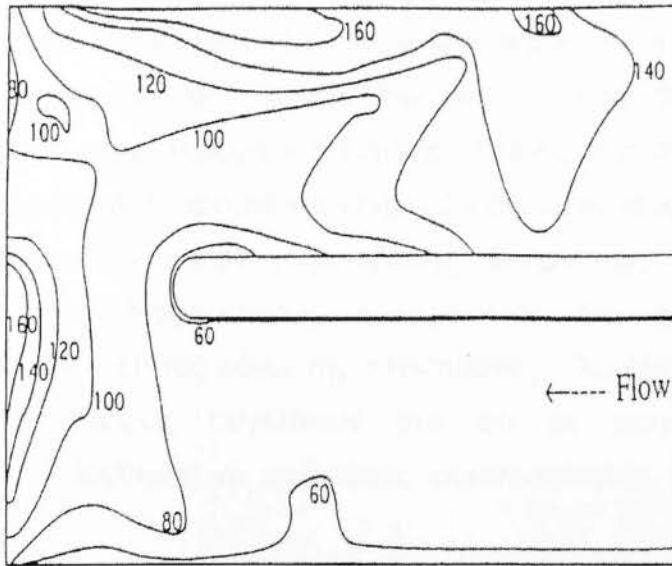
3.23 Κατανομή του συντελεστή K στην περιοχή της καμπής (Metzger et al. , 1984).

Οι Fan και Metzger το 1987 μελέτησαν την μετάδοση της θερμότητας σε μία καμπύλη περιοχή και στο σχήμα 3.24 φαίνονται τα αποτελέσματα του αριθμού Nusselt. Η περιοχή 3 είναι ακριβώς στο μέσο της στροφής, η περιοχή 1 είναι η είσοδος και 5 η έξοδος του καναλιού ροής. Τα στοιχεία δείχνουν ότι ο μέγιστος Nu παρουσιάζεται κατάντη της καμπύλης. Στο άλλο διάγραμμα σχεδιάστηκε η μεταβολή του αριθμού Nusselt σε αυτές τις περιοχές για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η κλίση των ευθειών δεν αλλάζει σημαντικά στο διπλό λογαριθμικό διάγραμμα. Παρόλα αυτά, για διαφορετικές περιοχές έχουμε διαφορετικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας με το μεγαλύτερο να είναι στην περιοχή 4, κατάντη δηλαδή, αλλά κοντά στο μέσο της καμπύλης.



3.24 Κατανομή του αριθμού Nusselt σε μία καμπύλη περιοχή συναρτήσει διαφορετικών αριθμών Reynolds (Fan και Metzger , 1987).

Οι Ekkan και Han το 1995 χρησιμοποίησαν μία προσωρινή τεχνική υγρών κρυστάλλων για να μετρήσουν λεπτομερώς τους συντελεστές μετάδοσης θερμότητας σε μία λεία και απότομη καμπή 180°. Στο Σχήμα 3.25 παρουσιάζεται η πλάγια όψη των ισοϋψών καμπυλών διανομής του αριθμού Nusselt για $Re=25000$. Ο αριθμός Nusselt αυξάνεται καθώς η ροή πλησιάζει την καμπή και γίνεται μέγιστος κοντά στο εξωτερικό τοίχωμα κατάντη, μετά τον εμφανή διαχωρισμό της ροής. Η μετάδοση θερμότητας παραμένει σε υψηλά επίπεδα και πιο μακριά κατάντη της στροφής λόγω της επανένωσης της ροής. Υπάρχει και μία περιοχή χαμηλού Nu στην επάνω αριστερή γωνία της καμπύλης, η οποία μπορεί να οφείλεται στην παγίδευση της ροής σε εκείνο το σημείο. Επίσης, διερευνήθηκε η περίπτωση ροής με μεγαλύτερο αριθμό Reynolds στην οποία παρατηρήθηκε, ότι λόγω της αυξημένης ροής υπήρξε υψηλότερο επίπεδο μετάδοσης θερμότητας και μεγαλύτερη επίδραση της καμπής στο φαινόμενο αυτό. Τέλος, στην περίπτωση αυτή, βρέθηκε ότι η δημιουργία πλήρους ανεπτυγμένης ροής έλαβε μέρος πολύ πιο μακριά κατάντη της στροφής.



Σχήμα 3.25 Λεπτομερής κατανομή του αριθμού Nusselt στην περιοχή της καμπής για $Re=25000$ (Ekkan και Han , 1995).

3.4 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΨΥΞΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΕΡΙΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ

3.4.1 Η επίδραση της περιστροφής στην ψύξη

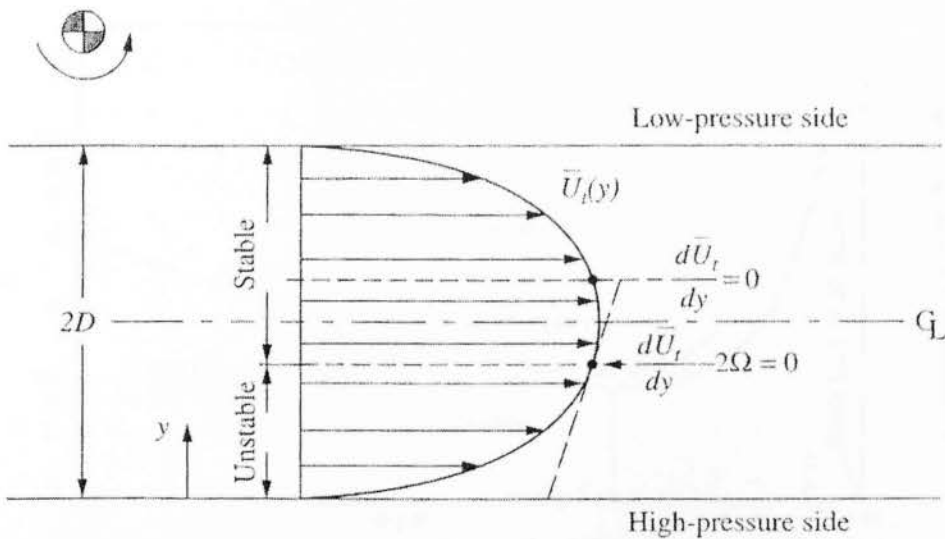
Στα πτερύγια της τουρμπίνας των αεροστροβίλων, ο αέρας ψύξεως λόγω των εσωτερικών διόδων αναδεύεται ώστε να δημιουργήσει δύνες και να απορροφήσει θερμότητα από το πτερύγιο . Η διαδικασία αυτή είναι αναγκαία για να μην υπερθερμαίνεται το πτερύγιο και να μην καταστραφεί αλλά και για να διατηρούνται οι μηχανικές του ιδιότητες κατά τη λειτουργία. Ο συνδυασμός των επιδράσεων της τύρβης, της μεταβολής των ιδιοτήτων, της επιφανειακής τραχύτητας και της γεωμετρίας των διόδων επηρεάζουν τη ροή και τη λειτουργία σε μία σταθερή οδηγική βαθμίδα. Εκτός όμως από αυτά που μόλις αναφέραμε , καθοριστικό ρόλο παίζει και ένας άλλος παράγοντας ο οποίος είναι η περιστροφή τους. Στην περίπτωση αυτή οι φυσικοί νόμοι οδηγούν στη δημιουργία δυνάμεων (δυνάμεις άντωσης και δυνάμεις Coriolis) λόγω περιστροφής και σαν συνέπεια έχουν την τροποποίηση του πεδίου ροής

κάτι το οποίο επηρεάζει την μετάδοση θερμότητας. Αυτή η τάση παράγει τη δευτερεύουσα ροή και διασκορπίζει ασύμμετρα τη ροή του πυρήνα μέσα στη δίοδο. Σε μία ελικοειδούς μορφής διέλευση, η ροή διαχωρίζεται και επανακυκλοφορεί στην περιοχή της καμπής. Επίσης, η ανάπτυξη της ροής κατάντη μεταβάλλεται σημαντικά και επηρεάζει όχι μόνο τους τοπικούς αλλά και τον συνολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Προγενέστερες δημοσιεύσεις από διαφορετικούς πειραματιστές δεν προέβλεπαν τις επιδράσεις συμπίεστικότητας λόγω της περιστροφής. Παρόλα αυτά, νεότερες αριθμητικές προβλέψεις συγκλίνουν στο ότι σε υψηλούς αριθμούς περιστροφής ($>10000\text{rpm}$) οι επιδράσεις συμπίεστικότητας γίνονται αρκετά σημαντικές.

3.4.2 Η επίδραση της περιστροφής στο πεδίο ροής

Η ροή σε μια περιστρεφόμενη δίοδο είναι σημαντικά διαφοροποιημένη από ότι σε μία ακίνητη δίοδο. Η δευτερεύουσα ροή κατά τη περιστροφή αναδιανέμει την ταχύτητα και αλλάζει τις τυχαίες αναταραχές της ταχύτητας σε τυρβώδη ροή.

Οι Lezius και Johnston το 1976 εξέτασαν την αστάθεια που προκάλεσε στη ροή η περιστροφή. Χρησιμοποίησαν ένα περιστρεφόμενο κανάλι ορθογωνικής διατομής και το εργαζόμενο μέσον ήταν το νερό. Στο σχήμα 3.26 επεξηγούνται οι παρατηρήσεις τους. Βλέπουμε ότι στην μία πλευρά η ροή δείχνει ασταθής (αύξηση της τύρβης) ενώ στην άλλη πλευρά δείχνει σταθερή (μείωση της τύρβης).



3.26 Σταθερές και ασταθείς περιοχές σε μία περιστρεφόμενη περιοχή.

Η ασταθής πλευρά παρουσιάζει ενίσχυση της τύρβης, ενώ η σταθερή πλευρά μείωση αυτής.
(Lezius και Johnston, 1976)

Στο παρακάτω σχήμα 3.27 φαίνονται αναλυτικά τα όρια μεταξύ ασταθούς και σταθερής ροής για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. “Ro” είναι ο αριθμός περιστροφής και ορίζεται από τη σχέση $Ro = \frac{\omega D}{\nu}$

όπου:

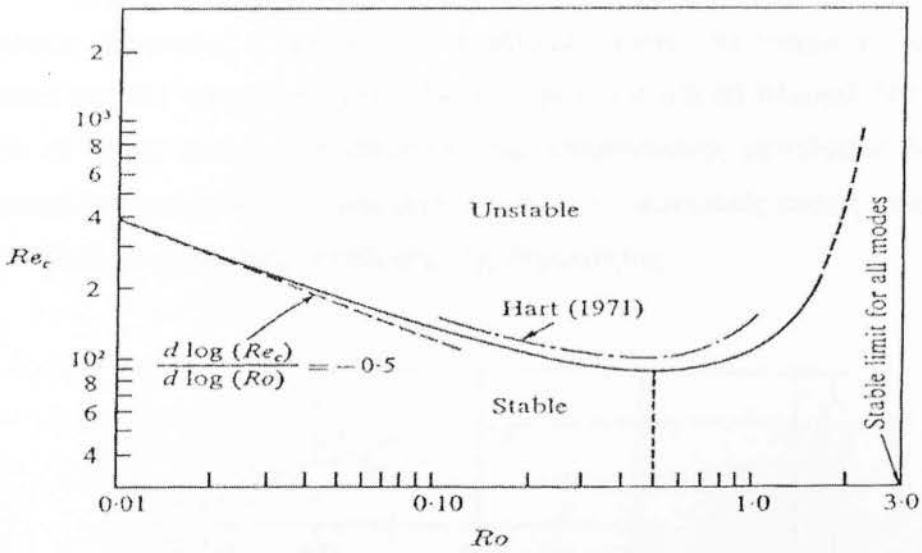
D: Πλάτος καναλιού

ω : Ταχύτητα περιστροφής

ν : Μέση αξονική ταχύτητα

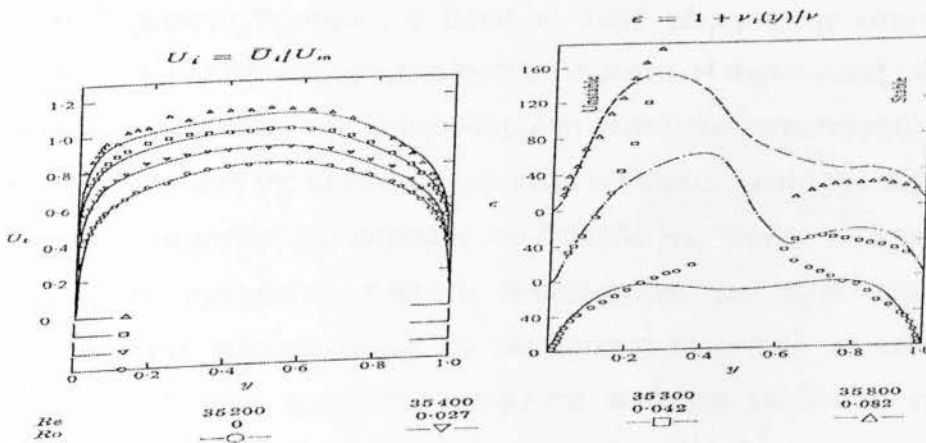
Ο κρίσιμος αριθμός Reynolds στον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος σημαίνει ότι η περιστροφή ενισχύει την αύξηση της τύρβης και ότι με $Ro = 0.5$, τυρβώδης ροή μπορεί να εμφανισθεί σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds ($Re \approx 88.5$), συγκρινόμενη με τον αριθμό περιστροφής $Ro = 0.01$ που έχει υψηλότερο κρίσιμο αριθμό Reynolds ($Re \approx 400$).

Να σημειωθεί ότι αυτή η πειραματική διαδικασία από τους Lezius και Johnston έγινε σε ένα μη θερμαινόμενο κανάλι, άρα τα αποτελέσματά τους συμπεριλαμβάνουν μόνο την επίδραση Coriolis και όχι τις επιδράσεις συμπίεστικότητας λόγω περιστροφής.



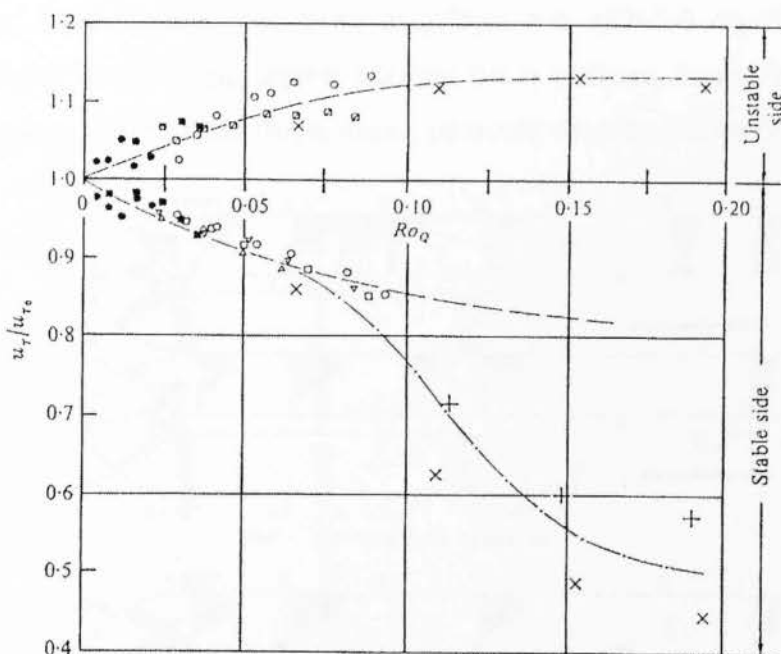
3.27 Κρίσιμος αριθμός Reynolds για τη μετάβαση σε ασταθή ροή με την παρουσία περιστροφής (Lezius και Johnston , 1976)

Το Σχήμα 3.28 δείχνει τις μετρούμενες τιμές ταχύτητας και το συντελεστή εσωτερικής τύρβης από τους Johnston και λοιποί το 1972. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι λόγω της περιστροφής η ταχύτητα και η τύρβη κοντά στην ασταθή περιοχή αυξάνονται ενώ μειώνονται οι αναταραχές κοντά στο λιγότερο ασταθές τοίχωμα. Αυτές οι παρατηρήσεις συχνότατα χρησιμοποιούνται ως βάσεις σε περαιτέρω πειράματα ή σε μαθηματικά μοντέλα επίλυσης της ροής



3.28 Κατανομές ταχυτήτων και στροβιλώδους εσωτερικής τύρβης σε ένα περιστρεφόμενο κανάλι (Lezius και Johnston , 1976)

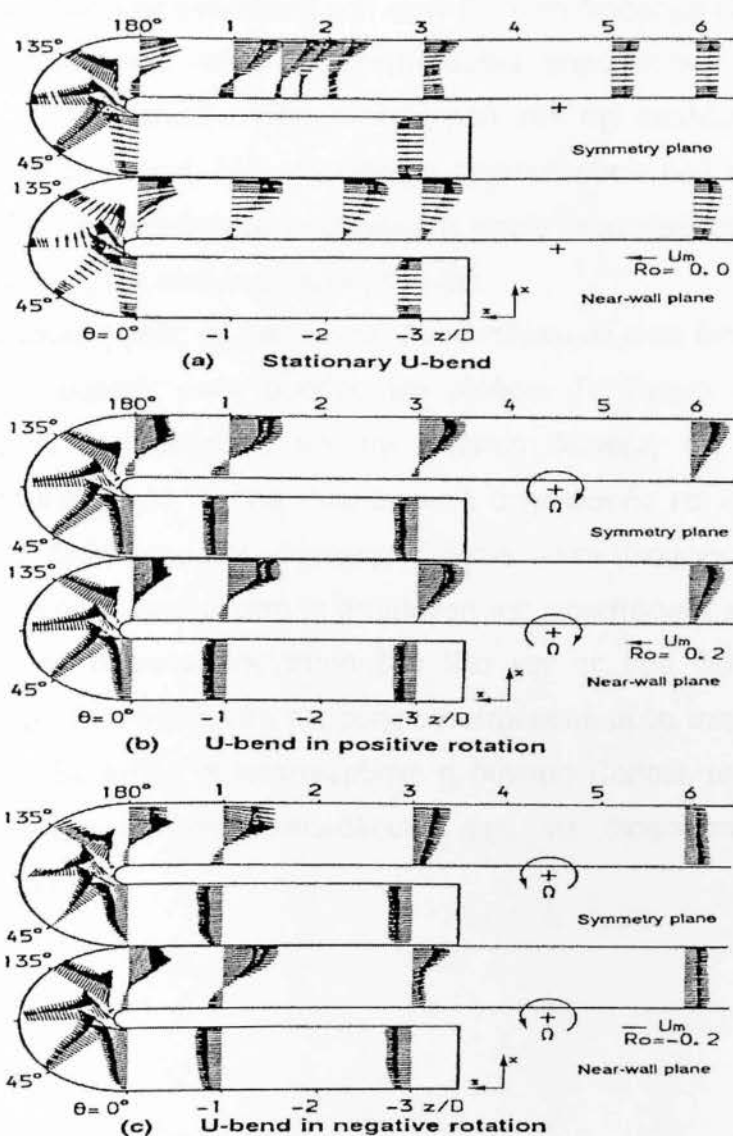
Στο σχήμα 3.29 φαίνεται η επίδραση της περιστροφής στις επιφανειακές τάσεις διάτμησης. Γενικώς, οι διατμητικές τάσεις στα τοιχώματα αυξάνονται στην ασταθή πλευρά και μειώνονται στην πιο σταθερή πλευρά. Να σημειωθεί ότι οι τάσεις αυτές είναι ανάλογες της επιφανειακής μετάδοσης θερμότητας καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι υψηλές επιφανειακές τάσεις επιφέρουν και υψηλούς συντελεστές μετάδοσης της θερμότητας.



3.29 Κατανομές ταχυτήτων κοντά στο τοίχωμα (Lezius και Johnston , 1976)

Σε ένα ξεχωριστό πείραμα , ο Elfert το 1993 μέτρησε την κατανομή της ταχύτητας σε ένα περιστρεφόμενο κυκλικό σωλήνα. Η περιστροφή μετατοπίζει την κυρίως ροή προς την ακολουθούμενη (κατά την περιστροφή) πλευρά. Επίσης η κατατομή της τύρβης δείχνει πολύ ενδιαφέρον κατά την περιστροφή. Σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, το επίπεδο της τύρβης είναι υψηλότερο κοντά στην εμπρόσθια πλευρά συγκρινόμενο με αυτό κοντά στην ακολουθούμενη πλευρά. Όμως, σε υψηλότερες ταχύτητες, το επίπεδο της τύρβης κοντά στην εμπρόσθια επιφάνεια απότομα μειώνεται, ενώ στον πυρήνα της ροής και κοντά στην οπίσθια επιφάνεια αυξάνεται.

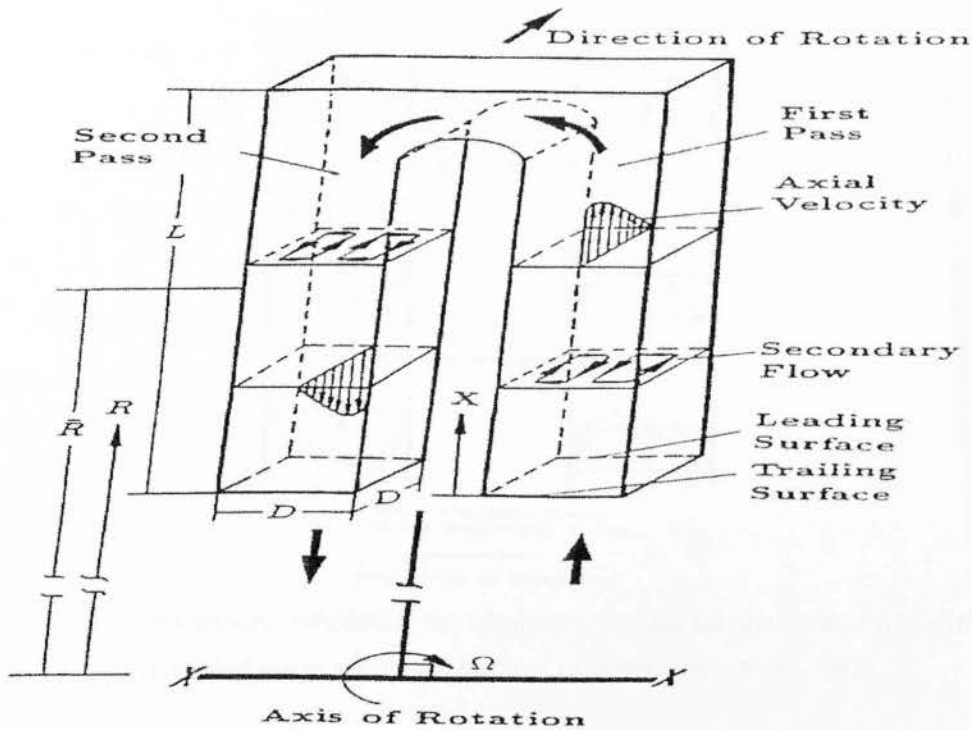
Το Σχήμα 3.30 δείχνει τις μετρήσεις της ταχύτητας των Cheah et al. (1996) σε ένα περιστρεφόμενο κανάλι με δύο διαδρομές. Στα διαγράμματα με τα διανύσματα των ταχυτήτων διακρίνονται διαχωρισμοί ροής κατάντη της καμπής των 180° . Μία θετική περιστροφή αυξάνει την απόσταση όπου η ροή επανασυνδέεται (b) ενώ η αρνητική περιστροφή την μειώνει (c). Από αυτό το πείραμα, επίσης, συμπεραίνεται ότι η ένταση της τύρβης πριν από την καμπή ($z/D=-3.0$) δεν επηρεάστηκε πολύ από την περιστροφή, ενώ η ένταση της τύρβης στον πυρήνα της ροής αυξήθηκε στο $z/D=5.9$ σημείο (κατάντη της καμπής). Τέλος, οι μετρήσεις έδειξαν ότι η κάθετες διακυμάνσεις της ροής κοντά στην καμπή ήταν συγκρίσιμες με αυτές στην οριζόντια διεύθυνση.



3.30 Κατανομή ταχύτητας σε μία δίοδο με καμπή 180 μοιρών (Cheah και λοιποί , 1996)

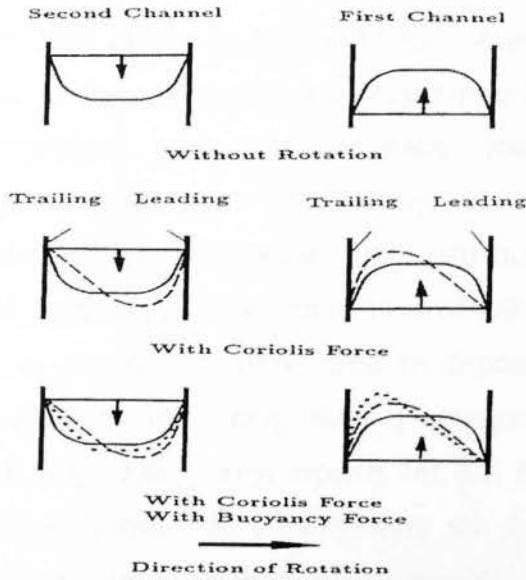
Οι Tse και McGrath το 1995 χρησιμοποίησαν ένα ταχύμετρο Laser –Doppler για τη μέτρηση ροής με $Re=25000$ και αριθμό περιστροφής $Ro=0.24$. Παρατήρησαν, ότι η ροή δεν ήταν πλήρως ανεπτυγμένη και σημειώθηκαν αυξημένες ταχύτητες κοντά στις χαμηλότερες και υψηλότερες επιφάνειες. Η εφαιπτόμενη συνιστώσα της δευτερεύουσας ροής επισήμανε ότι η Coriolis δύναμη καθοδηγούσε τη ροή αυτή από την χαμηλής πίεσης προς την υψηλής πίεσης πλευρά στο μεσαίο μέρος του καναλιού. Τα αποτελέσματα, επίσης, έδειξαν ότι η ροή κοντά στις χαμηλότερες και υψηλότερες επιφάνειες είχε διεύθυνση από την υψηλής προς την χαμηλής πίεσης πλευρά και ότι η διανομή της δευτερεύουσας ροής στην στροφή ήταν ασύμμετρη. Η ακτινοειδούς διάταξης εσωτερική ροή στην δεύτερη διαδρομή είχε μεγαλύτερη κατά μήκος ταχύτητα κοντά στην εμπρόσθια παρά στην ακολουθούμενη επιφάνεια και στον πυρήνα οδηγούσε τη ροή από την ακολουθούμενη προς την εμπρόσθια πλευρά. Μία ισχυρότερη δευτερεύουσα ροή υπάρχει κοντά στις ανώτερες και κατώτερες επιφάνειες η οποία μεταφέρει ρευστό από την εμπρόσθια προς την ακολουθούμενη πλευρά.

Οι δευτερεύουσες ροές σε ένα κανάλι δύο διαδρομών είναι διαφορετικές στις ακτινοειδούς μορφής ροές εισόδου και εξόδου. Το Σχήμα 3.31 αναφέρει σχηματικά τη δευτερεύουσα και την αξονική διανομή της ροής σε μία περιστρεφόμενη δίοδο. Η ροή είναι ακτινική στην είσοδο και στην έξοδο της καμπής. Η διεύθυνση της δύναμης Coriolis είναι διαφορετική στις δύο διαδρομές αφού εξαρτάται από τη διεύθυνση της περιστροφής και της ροής. Η διεύθυνση της περιστροφής παραμένει ίδια για τις δύο διαδρομές, όμως παρατηρούμε ότι η διεύθυνση της ροής αντιστρέφεται μέσα στην καμπή. Αυτό συμβαίνει, διότι καθώς προαναφέρθηκε η δύναμη Coriolis μετά την καμπή γίνεται αντίθετη και σαν επακόλουθο έχει να διαφοροποιείται και η δευτερεύουσα ροή.



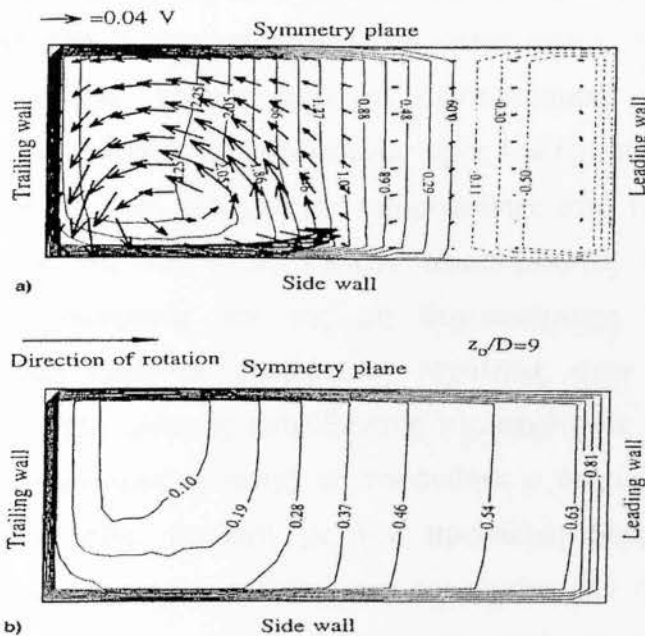
3.31 Ποιοτική άποψη της διανομής της ροής ψυκτικού μέσου σε μία δύο διευθύνσεων περιστρεφόμενη δίοδο (Han et al. , 1993).

Στο Σχήμα 3.32 φαίνονται οι επιδράσεις στη διανομή της ροής λόγω της δύναμης Coriolis και λόγω της συμπιεστότητας κατά την περιστροφή. Για την ακτινική ροή στην έξοδο της πρώτης διαδρομής, η δύναμη Coriolis μετακινεί την ροή του πυρήνα προς την ακολουθούμενη πλευρά. Εάν και οι δύο πλευρές (εμπρόσθια και ακολουθούμενη) θερμανθούν συμμετρικά, τότε το ψυκτικό μέσο κοντά στο ακολουθούμενο τοίχωμα έχει μεγαλύτερη ταχύτητα και χαμηλότερη θερμοκρασία από ότι κοντά στο εμπρόσθιο τοίχωμα όπου η ταχύτητα ελαττώνεται και αυξάνεται η θερμοκρασία. Η συμπιεστότητα προκαλείται από τη φυγοκεντρική δύναμη που ωθεί το ψυχρότερο, άρα και βαρύτερο ρευστό από το κέντρο της περιστροφής. Στην πρώτη διαδρομή, η συμπιεστότητα επηρεάζει τη ροή με έναν τρόπο παρόμοιο με αυτόν της δύναμης Coriolis και προκαλεί μία περαιτέρω αύξηση της ροής κοντά στην ακολουθούμενη πλευρά, ενώ η δύναμη Coriolis ενισχύει τη ροή στην εμπρόσθια πλευρά της δεύτερης διαδρομής. Η συμπιεστότητα στη δεύτερη διαδρομή προσπαθεί να δημιουργήσει μία πιο ομοιόμορφη διανομή της ροής στον αγωγό.



3.32 Ποιοτική άποψη των επιδράσεων της αδράνειας, Coriolis και συμπίεστικότητας κατά την περιστροφή κοντά και μακριά από την επιφάνεια (Han et al., 1993).

Το Σχήμα 3.33, δείχνει την προβλεπόμενη διανομή των ταχυτήτων και θερμοκρασιών σε έναν τετραγωνικής διατομής αγωγό με ακτινοειδούς διάταξης ροή εξόδου. Αυτές οι προβλέψεις από τον Dutta et al. (1995) περιλαμβάνουν όλες τις επιδράσεις (Coriolis και συμπίεστικότητας) στην ορμή και στη τύρβη.



3.33 Προβλεπόμενη δευτερεύουσα ροή, αξονική ροή και θερμοκρασιακή διανομή σε μία τετραγωνικής μορφή καμπή μέσα σε ένα περιστρεφόμενο κανάλι (Dutta et al., 1995)

Οι Liou και Chen το 1999 μέτρησαν την ανάπτυξη της ροής σε ένα κανάλι με LDV. Εκεί, έθεσαν αριθμό Reynolds και περιστροφής 14000 και 0,082 αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε, ότι η περιστροφή μειώνει την φουσαλίδα αποκόλλησης στην περιοχή μετά την καμπή κατά 25%. Στην πρώτη διαδρομή, η περιστροφή παραμορφώνει την κατατομή της κατά μήκος ταχύτητας και η ροή ήταν αυξημένη κοντά στην ακολουθούμενη πλευρά. Στην δεύτερη διαδρομή, η ροή διαταράχθηκε από τη στροφή και εμφανίζει δύο μέγιστα στην κατανομή της ταχύτητας. Αυτή η μέτρηση, επίσης, έδειξε την κατά μήκος ένταση της τύρβης στην πρώτη και στη δεύτερη διαδρομή. Η ένταση αυτή αυξήθηκε λόγω της περιστροφής και αυτή η αύξηση είναι λιγότερη στον πυρήνα της ροής και μεγαλώνει πλησιάζοντας στα τοιχώματα.

Οι Bons και Kerrebrock το 1998 μέτρησαν την εσωτερική ροή σε ένα εξομοιωμένο πτερύγιο με λείες επιφάνειες χρησιμοποιώντας οπτικό ταχύμετρο σωματιδίων για θερμαινόμενη και μη θερμαινόμενη περίπτωση. Τα διανύσματα ταχύτητας στην γραμμή συμμετρίας έδειξαν ότι η κατά μήκος ταχύτητα ήταν έντονη και όχι ιδιαίτερα επηρεασμένη από τη δευτερεύουσα ροή. Παρόλα αυτά, η μέση τιμή της ροϊκής ταχύτητας σε αυτήν την περιοχή επηρεάστηκε από την περιστροφή, κάτι το οποίο δεν είναι εμφανές σε σχέδιο αλλά αναλύθηκε από αυτούς σε κάποιο ξεχωριστό σχήμα. Η ροή κοντά στο τοίχωμα επηρεάστηκε αρκετά από τη δευτερεύουσα ροή και, όπως αναμενόταν, τα διανύσματά της παρέκκλιναν προς την εμπρόσθια πλευρά. Η διανομή της κατά μήκος ταχύτητας επηρεάστηκε από τη συμπίεστικότητα και οι κατατομές της ταχύτητας έδειξαν αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις μεταξύ της θερμαινόμενης και της μη θερμαινόμενης περίπτωσης. Η θερμαινόμενη ροή εμφάνισε υψηλότερες ταχύτητες στην ακολουθούμενη πλευρά. Αυτή η τάση αλλαγής κατεύθυνσης της ταχύτητας συμφωνεί με τις υπολογιστικές προβλέψεις. Επίσης, επισημάνθηκε ο διαχωρισμός της ροής κοντά στην εμπρόσθια περιοχή με την προσθήκη θερμικής ενέργειας. Δυστυχώς, λεπτομερή στοιχεία κοντά στα τοιχώματα δεν ήταν δυνατόν να μετρηθούν, αλλά απομονωμένα διανύσματα από μερικές επιλεγμένες περιοχές αποδεικνύουν την παρουσία αντιστραμμένης ροής. Τα μεγέθη της δευτερεύουσας ροής είναι μεγαλύτερα στις δύο περιοχές της διόδου, και η

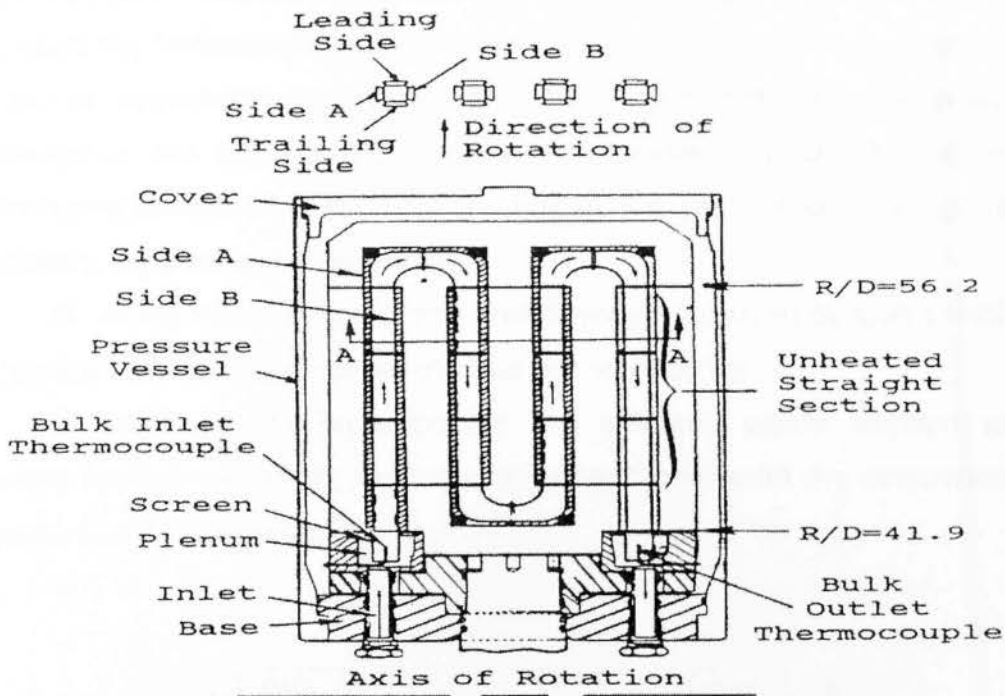
ταχύτητα της δευτερεύουσας ροής στον πυρήνα είναι μικρότερη από αυτές. Τα διανύσματα της ταχύτητας αποκαλύπτουν μία περιοχή στασιμότητας της ροής δίπλα στο τοίχωμα στην εμπρόσθια πλευρά της διόδου.

Επίδραση της περιστροφής στη μετάδοση θερμότητας

Στο Σχήμα 3.34 φαίνεται ένα κανάλι τεσσάρων διαδρομών που χρησιμοποιήθηκε από τους Wagner et al. το 1991. Αυτή η εγκατάσταση έχει τη δυνατότητα εξομοίωσης των συνθηκών σε μία τέτοια σπειροειδούς μορφής εσωτερική δίοδο δροσισμού του περυγίου.

Η πρώτη, δεύτερη και τρίτη διαδρομή κατασκευάστηκαν με στόχο την εξέταση της μετάδοσης της θερμότητας. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν αναφέρονταν κυρίως για τις δύο πρώτες διαδρομές και στην αδιάστατη μορφή του λόγου αριθμού Nusselt (Nu/Nu^∞), όπου Nu^∞ είναι ο αριθμός Nusselt για πλήρως ανεπτυγμένη ροή.

Οι Wagner et al. περίεστρεψαν το δοκίμιο στις 1100rpm ή λιγότερες και με αυξημένη πίεση λειτουργίας περίπου 10atm (147psi). Η σταθερή θερμοκρασία εισόδου ήταν 27°C και τα χάλκινα στοιχεία, τα οποία αποτελούσαν τα συστήματα θέρμανσης, σταθεροποιήθηκαν σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες όπως 49°C, 71°C, 93°C και 116°C. Οι διαφορετικές θερμοκρασίες επέφεραν διαφορετικές επιδράσεις συμπίεστικότητας κατά τη μετάδοση της θερμότητας. Οι θερμοκρασίες των χάλκινων στοιχείων μετρήθηκαν με δύο θερμοζεύγη τοποθετημένα εσωτερικά σε κάθε ένα στοιχείο. Η πρωτοποριακή αυτή δουλειά συνεκτίμησε τις επιδράσεις της περιστροφής στη μετάδοση της θερμότητας. Έδειξαν πως η μετάδοση της θερμότητας πρωτίστως εξαρτάται από τον αριθμό περιστροφής και από το λόγο των εντάσεων. Ο αριθμός περιστροφής είναι η κύρια μεταβλητή της δύναμης Coriolis σχετιζόμενη με την αδράνεια μάζας και ο λόγος των εντάσεων είναι η κύρια μεταβλητή της δύναμης συμπίεστικότητας λόγω περιστροφής επίσης σχετιζόμενη με την αδράνεια μάζας. Εκτός από τις επιδράσεις της περιστροφής, οι επιδράσεις της καμπύλης μπορούν σημαντικά να επηρεάσουν την μετάδοση της θερμότητας. Επομένως, για να ερμηνευτούν αξιόπιστα αποτελέσματα πρέπει να συμπεριληφθούν και οι δύο αυτοί παράγοντες.



3.34 Μοντέλο διόδου ελικοειδούς μορφής που χρησιμοποιήθηκε από τους Wagner et al. (1991).

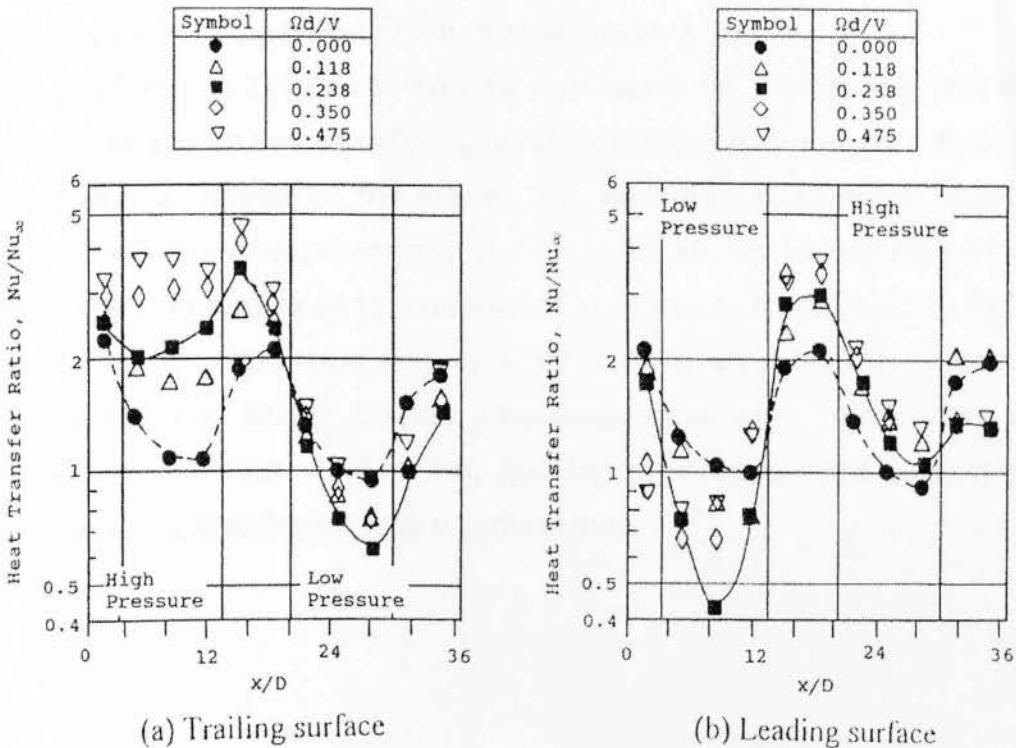
Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής

Το Σχήμα 3.35 αναφέρεται στις επιδράσεις του αριθμού περιστροφής στο λόγο μετάδοσης της θερμότητας στην εμπρόσθια κατά την περιστροφή αλλά και στην ακολουθούμενη επιφάνεια.

Ο αριθμός περιστροφής είναι ένα σχετιζόμενο μέγεθος με τη δύναμη Coriolis, άρα και με τη δύναμη αδράνειας της ροής μάζας. Ένας υψηλός αριθμός περιστροφής σημαίνει περισσότερες επιδράσεις στη ροή και στη μετάδοση θερμότητας. Στο Σχήμα φαίνεται ότι αυξανόμενης της ταχύτητας περιστροφής αυξάνεται αξιόλογα και η μετάδοση θερμότητας στην ακολουθούμενη πλευρά της πρώτης διαδρομής ($x/D \approx 12$) συγκριτικά με την αύξηση στη δεύτερη διαδρομή ($x/D > 20$) της εμπρόσθιας πλευράς που παρατηρήθηκε. Η μετάδοση θερμότητας στην πρώτη διαδρομή αυξάνεται περισσότερο από μία τιμή των 3.5 στο μεγαλύτερο αριθμό περιστροφής σε σύγκριση με την μη

περιστρεφόμενη περίπτωση, ενώ η αύξηση κοντά στην εμπρόσθια πλευρά της δεύτερης διαδρομής κυμάνθηκε στις 12.5 φορές της ανάλογης μέτρησης σε ένα μη περιστρεφόμενο κανάλι. Η διαφορά αυτή μεταξύ των διαδρομών αιτιολογείται στη δύναμη της άντωσης των ακτινικών ροών. Υψηλότεροι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας στην ακολουθούμενη πλευρά της πρώτης διαδρομής οφείλονται σε δύο λόγους:

- 1) Η εισροή του ψυκτικού μέσου καθοδηγούμενη από τη δύναμη Coriolis σχηματίζει ένα λεπτότερο οριακό στρώμα στο τοίχωμα και
- 2) Η κατατομή της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου παράγει μία ευνοϊκή, λόγω περιστροφής και άντωσης, τεχνητή ροή κοντά στο επιφανειακό στρώμα που προαναφέρθηκε.



3.35 Επίδραση του αριθμού περιστροφής στον λόγο του αριθμού Nusselt για $Re=25000$ και λόγο εντάσεως $=0.13$ (Wagner και λοιποί, 1991)

Η μείωση της μετάδοσης της θερμότητας κοντά στην είσοδο του ίδιου καναλιού (πρώτη διαδρομή , εμπρόσθια επιφάνεια) οφείλεται στο σχηματισμό ενός σταθεροποιημένου και πυκνού οριακού στρώματος. Η επακόλουθη αύξηση του συντελεστή στο ίδιο σχήμα ερμηνεύεται ως το αποτέλεσμα της ισχυρής φυγοκεντρικής, τεχνητής άντωσης, και του υψηλής τύρβης επιφανειακού στρώματος σε εκείνο το σημείο. Λόγω της καμπής αυξάνεται, επίσης, η μετάδοση θερμότητας στην τελευταία περιοχή της πρώτης διαδρομής ($x/D > 28$). Καθώς το ψυκτικό μέσο εισέρχεται ακτινικά στη δεύτερη διαδρομή , η δύναμη Coriolis δρα με την αντίθετη διεύθυνση, κάτι το οποίο μετακινεί τη ροή έναντι της εμπρόσθιας επιφάνειας. Αυτό αναγκάζει το ψυχρότερο ρευστό να κινηθεί ταχύτερα προς την εμπρόσθια επιφάνεια και το θερμότερο ρευστό να κινηθεί βραδύτερα προς την ακολουθούμενη επιφάνεια. Επομένως, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι σημαντικά αυξημένος στην εμπρόσθια επιφάνεια από ότι στην ακολουθούμενη.

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 3.35 φαίνεται η επίδραση της περιστροφής στις δύο αυτές περιοχές. Οι συντελεστές της μετάδοσης της θερμότητας από αυτές τις επιφάνειες μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Αυτή η μείωση οφείλεται στην μείωση της αξονικής ροής και την σταθεροποίηση της ροής κοντά στα τοιχώματα της εμπρόσθιας επιφάνειας (Johnston et al., 1972). Επιπλέον, η δευτερεύουσα ροή κατά την περιστροφή μεταφέρει το ρευστό κατά μήκος των άλλων θερμών επιφανειών πριν αυτό προσεγγίσει την εμπρόσθια επιφάνεια. Αυτό επίσης έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της μετάδοσης της θερμότητας στην επιφάνεια αυτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

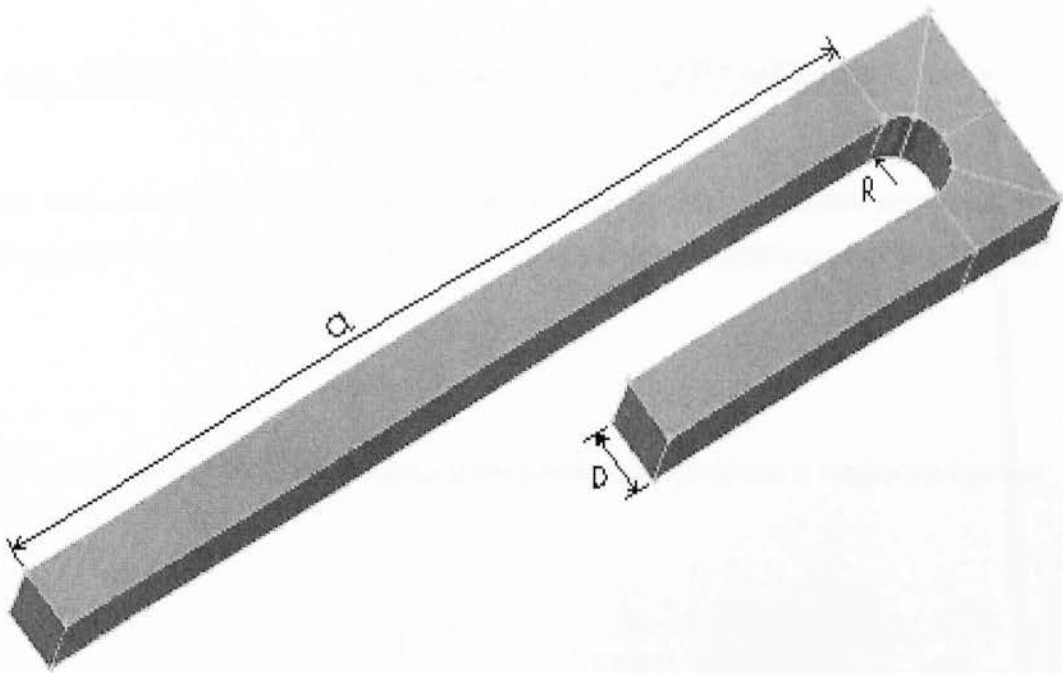
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στην γεωμετρία της δίοδου που χρησιμοποιούμε για το πείραμά μας καθώς και οι συνθήκες-παράμετροι που επικρατούν σε αυτή . Θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα και θα γίνει μια σύγκριση τους με τα διαθέσιμα αποτελέσματα από το πανεπιστήμιο του UMIST

4.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΙΟΔΟΥ

Οι δίοδοι δροσισμού που βρίσκονται στο εσωτερικό των πτερυγίων είναι τετραγωνικές καμπές σχήματος U με έντονη καμπυλότητα και ραβδώσεις . Το σχήμα αυτό έχει ως σκοπό να δημιουργηθούν στροβιλισμοί και ανακυκλοφορία στην ροή του αέρα ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας από την επιφάνια του πτερυγίου προς τον αέρα που κυκλοφορεί μέσα στην δίοδο άρα και καλύτερη ψύξη του .

Για το πείραμά μας θα χρησιμοποιήσουμε την γεωμετρία μιας τετραγωνικής δίοδου σχήματος U με ορθογωνικές λείες εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες . Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά σχήμα 4.1 είναι ίδια με εκείνα των πειραματικών μοντέλων του UMIST



4.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά καμπύλης U-bend

όπου

$D = 50.8 \text{ mm}$ (οι τετραγωνικές πλευρές του αγωγού)

$R_c = 7.62 \text{ mm}$ (η ακτίνα της καμπής)

$\alpha = 18D$

Να αναφερθεί ότι το R_c είναι κατά 10 φορές μεγαλύτερη από αυτήν μίας τυπικής διόδου δροσισμού ενός πραγματικού πτερυγίου . Ακόμα η απόσταση α είναι ίση με $18D$ διότι μετά από ελέγχους που έγιναν είδαμε ότι για $Re=100000$ η ροή ήταν πλήρως ανεπτυγμένη μετά από το μήκος των $16D$

4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Οι πειραματικές συνθήκες και οι παράμετροι που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα εργασία είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν και στο UMIST .

· Για τον αριθμό Reynolds πάνω στον οποίο βασίζεται και η ταχύτητα έχουμε

$$Re_1 = 100000$$

$$Re_2 = 36000$$

· Το κινηματικό ιξώδες είναι

$$\nu = 1,0040112 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$$

Έτσι μέσω της εξίσωσης $Re=U_{bl} \cdot D/\nu$ μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του ρευστού στην είσοδο της διόδου

$$U_{bl1} = 1,764 \text{ m/sec} \quad \text{και}$$

$$U_{bl2} = 0,7115 \text{ m/sec}$$

4.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Όπως αναφέραμε και στην αρχή του κεφαλαίου , θα χρησιμοποιήσουμε κάποια θεωρητικά μοντέλα για να προβλέψουμε τα πεδία ροής . Αυτά είναι τα εξής :

Πρότυπο μοντέλο κ-ε

Πρότυπο μοντέλο κ-ε με ενισχυμένες εξισώσεις τοιχώματος

Αντικειμενικό μοντέλο κ-ε

Και στα 3 αυτά χρησιμοποιούμενα μοντέλα αν επιλύσουμε ως προς k και ε τότε θα δούμε ότι έχουν παρόμοιες μορφές . Αυτά στα οποία διαφέρουν είναι ο αριθμός Prandtl και η μέθοδος υπολογισμού της τυρβώδους ροής .

Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις μεταφοράς και οι μέθοδοι υπολογισμού της έντασης της τύρβης σε μια ροή καθώς και οι σταθερές του κάθε μοντέλου .

4.3.1 ΠΡΟΤΥΠΟ ΜΟΝΤΕΛΟ κ-ε

Το πρότυπο κ-ε μοντέλο είναι ένα ημ εμπειρικό μοντέλο βασισμένο σε μοντέλα επιλύσεως εξισώσεων μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια (k) και το ρυθμό απωλειών της (ε). Κατά την παραγωγή του κ-ε μοντέλου, θεωρήθηκε :

- α. ότι η ροή που επιλύει θα είναι πλήρως τυρβώδης και
- β. οι επιδράσεις του μοριακού ιξώδους αμελητέες.

Επομένως, το πρότυπο κ-ε μοντέλο είναι πλήρως αξιόπιστο για περιπτώσεις τυρβώδους ροής.

Εξισώσεις

Ο όρος της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) και ο αντίστοιχος ρυθμός απωλειών του (ε) υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.2)$$

και

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} + S_\varepsilon \quad (4.3)$$

όπου

G_k είναι η παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω της διακύμανσης της τιμής της πρωτεύουσας ταχύτητας και ο υπολογισμός του αναφέρεται παρακάτω

G_b είναι η παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω της άντωσης και ο υπολογισμός του αναφέρεται παρακάτω

Y_m συμβολίζει τη συμβολή της αυξομειούμενης διαστολής στον συνολικό ρυθμό απωλειών και ο υπολογισμός του αναφέρεται παρακάτω

C_{1E} , C_{2E} , και C_{3E} είναι σταθερές

σ_k και σ_ε είναι οι αριθμοί Prandtl για το k και το ε αντίστοιχα

S_k και S_E είναι οι όροι που προσδιορίζονται από το χρήστη

Υπολογισμός Κινηματικού Ιξώδους

Το κινηματικό ιξώδες, μ_t , υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.4)$$

Όπου, το C_μ είναι μια σταθερά.

Σταθερές μοντέλου

$$C_{1E}=1.44$$

$$C_{2E}=1.92$$

$$C_\mu=0.09$$

$$\sigma_k=1.0$$

$$\sigma_\varepsilon=1.3$$

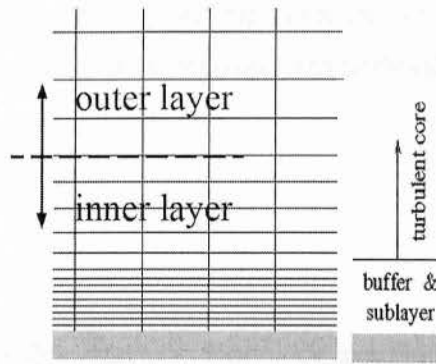
Αυτές οι τιμές έχουν προσδιορισθεί πειραματικά χρησιμοποιώντας αέρα και νερό σε θεμελιώδης τυρβώδης ροές συμπεριλαμβανομένων ομογενοποιημένες διατμητικές τάσεις και τύρβη. Ορίσθηκαν έτσι, ώστε να αποδίδουν αξιόπιστους υπολογισμούς για μεγάλο εύρος περιπτώσεων ροών περιορισμένων από τοιχώματα ή ελεύθερα. Παρόλο που οι προκαθορισμένες τιμές των σταθερών του μοντέλου αυτού είναι οι πιο κοινά αποδεκτές μπορούν και αυτές να αλλαχθούν στις ρυθμίσεις του μοντέλου.

4.3.2 ΠΡΟΤΥΠΟ ΜΟΝΤΕΛΟ κ-ε με ενισχυμένες εξισώσεις τοιχώματος

Η ενισχυμένη επιφανειακή επεξεργασία είναι μία μέθοδος μοντελοποίησης κοντά στα τοιχώματα η οποία συνδυάζει μοντέλο δύο στρωμάτων με βελτιωμένες επιφανειακές συναρτήσεις. Εάν το πλέγμα κοντά στα τοιχώματα είναι αρκετό, ώστε να μπορεί να επιλύσει το ιξώδες υπόστρωμα, τότε με ενισχυμένη επεξεργασία θα είναι ιδανικό να επιλύσει με τη μέθοδο διαστρωματικής ζώνης (λεπτομέρειες παρακάτω). Στην περίπτωση αυτή, βέβαια, οι υπολογιστικές απαιτήσεις αυξάνονται λόγω του πυκνού πλέγματος κοντά στα τοιχώματα. Σε ιδανική περίπτωση θα έπρεπε να υπάρχει μία διατύπωση, η οποία θα παρείχε το ίδιο αξιόπιστα αποτελέσματα τόσο σε πυκνά όσο και σε αραιά πλέγματα. Για το λόγο αυτό, το FLUENT διαθέτει το μοντέλο αυτό το οποίο περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

Μέθοδος δύο στρωμάτων για τη βελτίωση της επεξεργασίας κοντά στο τοίχωμα

Στο μοντέλο αυτό, η περιοχή κοντά στο τοίχωμα που επηρεάζεται από το ιξώδες επιλύεται πλήρως. Η προσέγγιση δύο στρωμάτων είναι σύμφυτη με τη βελτίωση της ακρίβειας και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των k και ϵ στα κελιά κοντά στο τοίχωμα. Για το λόγο αυτό, ολόκληρη η περιοχή υποδιαιρείται σε δύο μικρότερες περιοχές. Η μία κοντά στο τοίχωμα η οποία επηρεάζεται από τις διατμητικές τάσεις και μία μακριά από το τοίχωμα της πλήρως τυρβώδους ροής σχήμα 4.5. Ο καθορισμός των ορίων μεταξύ των στρωμάτων υπολογισμού γίνεται αυτόματα από το FLUENT.



4.5 Υποδιαίρεση σε 2 περιοχές, μια διατμητικών τάσεων και μια πλήρους τυρβώδους ροής

Στην περιοχή μακριά από το τοίχωμα ($Re_y > Re_y^*$, $Re_y^* = 200$) υιοθετούνται οι υπολογισμοί του εκάστοτε μοντέλου (για την παρούσα πτυχιακή του πρότυπου κ-ε μοντέλου). Στην περιοχή κοντά στο τοίχωμα ($Re_y < Re_y^*$) υιοθετείται μοντέλο μίας εξίσωσης .

Εξισώσεις

Οι εξισώσεις για το κ και το ε σε αυτό το μοντέλο είναι οι ίδιες με το προηγούμενο πρότυπο κ-ε μοντέλο

Υπολογισμός Κινηματικού Ιξώδους

$$\mu_{1,2layer} = \rho C_\mu l_\mu \sqrt{k} \quad (4.6)$$

όπου
$$l_\mu = y c_l \left(1 - e^{-Re_y/A_\mu} \right) \quad (4.7)$$

Το κινηματικό αυτό ιξώδες χρησιμοποιείται ως μέρος της μεθόδου, αφού συνυπολογίζεται με το μ_t του πρότυπου μοντέλου σύμφωνα με τη σχέση :

$$\mu_{,enh} = \lambda_\epsilon \mu_t + (1 - \lambda_\epsilon) \mu_{1,2layer} \quad (4.8)$$

ενώ ο όρος συνυπολογισμού, λ_ε , καθορίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι ίσος με τη μονάδα μακριά από το τοίχωμα και μηδενίζεται πλησιάζοντας προς αυτό:

$$\lambda_\varepsilon = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{\text{Re}_y - \text{Re}_y^*}{A} \right) \right] \quad (4.9)$$

όπου Re_y είναι ο τυρβώδης αριθμός Reynolds και $\text{Re}_y^* = 200$.

Η σταθερά A καθορίζει το μέγεθος του λ_ε . Ο κύριος σκοπός του λ_ε είναι για να διευκολύνει την σύγκλιση της λύσης ειδικά στην περίπτωση, όπου δεν συμφωνούν τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο περιοχών. Ο ρυθμός απωλειών ε ορίζεται ως :

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_\varepsilon} \quad (4.10)$$

Όπου
$$l_\varepsilon = \gamma c_l \left(1 - e^{-\text{Re}_y / A_\varepsilon} \right) \quad (4.11)$$

Οι τιμές των σταθερών αυτών όρων, είναι αντίστοιχα: $c_l = k C_\mu^{-3/4}$, $A_\mu = 70$,
 $A_\varepsilon = 2c_l$

4.3.3 ANTIKEIMENΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ κ-ε (realizable)

Παράλληλα με το πρότυπο κ-ε Μοντέλο που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο το FLUENT διαθέτει και το αντικειμενικό (realizable) κ-ε μοντέλο. Με τον όρο αντικειμενικό εννοούμε ότι το μοντέλο ικανοποιεί ορισμένους μαθηματικούς περιορισμούς υπό φυσιολογικές τάσεις, οι οποίοι είναι σύμφωνοι με τη φυσική της τυρβώδους ροής. Το αντικειμενικό κ-ε μοντέλο υιοθετεί τα εξής:

Ένα νέο συντελεστή εσωτερικών τριβών που εμπεριέχει ένα μεταβλητό συντελεστή C_μ αρχικά υπολογισμένο και εξαρτώμενο από τον αριθμό Reynolds.

Μία νέα εξίσωση του μοντέλου για το ε βασισμένη στην εξίσωση της αυξομειούμενης δίνης.

Εξισώσεις

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.12)$$

και

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} + C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4.13)$$

$$\text{με } C_1 = \max \left[0.43, \frac{n}{n+5} \right], \quad n = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις παρατηρούμε ότι η εξίσωση του k είναι η ίδια ακριβώς με αυτήν στο πρότυπο k - ε μοντέλο εκτός από τις σταθερές, ενώ η μορφή της εξίσωσης του ε είναι αρκετά διαφορετική. Μία από τις αξιοσημείωτες διαφορές είναι ότι ο δεύτερος όρος στα δεξιά της εξίσωσης δεν εμπεριέχει το k , όπως επίσης δεν περιλαμβάνει τον ίδιο όρο G_k , όπως στο πρότυπο μοντέλο. Θεωρείται ότι η συγκεκριμένη μορφή αναπαριστά καλύτερα τη φασματική μεταφορά θερμότητας. Ένα άλλο επιθυμητό χαρακτηριστικό της εξίσωσης αυτής είναι ότι ο όρος κατάρρευσης (ο προτελευταίος από τα δεξιά όρος) δεν έχει καμία ιδιομορφία, δηλαδή ο παρονομαστής του δεν μηδενίζεται ακόμα και αν το k μηδενιστεί ή γίνει αρνητικό. Αυτό το χαρακτηριστικό αντιπαραβάλλεται με το πρότυπο k - ε μοντέλο, το οποίο έχει μία ιδιαιτερότητα εξαιτίας του ότι μόνο το k είναι στον παρονομαστή.

Αυτό το μοντέλο έχει εκτεταμένα ελεγχθεί και εγκριθεί για μία μεγάλη ποικιλία τύπων ροών. Ειδικότερα, για πολλές περιπτώσεις ροών έχει βρεθεί ότι ο βαθμός αξιοπιστίας του είναι καλύτερος από αυτόν του πρότυπου Μοντέλου.

Υπολογισμός κινηματικού ιξώδους

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

και η διαφορά από τα προηγούμενα μοντέλα είναι ότι το C_μ δεν είναι πλέον μία σταθερά τιμή αλλά υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (4.14)$$

και είναι μία συνάρτηση του μέσου λόγου παραμόρφωσης και των συντελεστών της περιστροφής, της γωνιακής ταχύτητας και των πεδίων της τύρβης (k και ε). Ο C_μ στην παραπάνω εξίσωση μπορεί να βρεθεί να ξεπερνά την προκαθορισμένη τιμή του 0.09 σε αδρανειακές περιοχές στο εσωτερικό ισορροπημένων οριακών στρωμάτων, ενώ τα A_0 και A_s λαμβάνουν σταθερές τιμές.

Σταθερές μοντέλου

$$C_{1\varepsilon} = 1.44$$

$$C_2 = 1.9$$

$$\sigma_k = 1.0$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.2$$

Οι σταθερές σε αυτό το μοντέλο έχουν ορισθεί ώστε να εξασφαλίζουν, ότι το μοντέλο λειτουργεί αξιόπιστα σε κανονικές ροές και λαμβάνουν τις τιμές .-

4.3.4 Μοντελοποίηση της παραγόμενης τύρβης

Ο όρος G_k , αναπαριστά την παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και διαμορφώθηκε ιδανικά για τα k - ε μοντέλα. Για να εκτιμηθεί το G_k που συμφωνεί με την υπόθεση Boussinesq* ισχύει:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (4.15)$$

Όπου S είναι το μέγεθος της τάσης της παραμόρφωσης που ορίζεται ως:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4.16)$$

Προσέγγιση Boussinesq: Στη ρευστοδυναμική, η προσέγγιση Boussinesq χρησιμοποιείται στο οδηγημένο από την άντωση πεδίο ροής. Δηλώνει, ότι οι διαφορές πυκνότητας είναι αρκετά μικρές ώστε να παραμεληθούν, εκτός από τις περιπτώσεις, όπου εμφανίζονται στους όρους που πολλαπλασιάζονται με το g (επιτάχυνση βαρύτητας). Η ουσία της προσέγγισης Boussinesq είναι ότι η διαφοροποίηση της τιμής της άντωσης είναι αμελητέα, αλλά η δύναμη της βαρύτητας είναι ιδιαίτερα ισχυρή. Τα ηχητικά κύματα είναι επίσης αμελητέα, όταν χρησιμοποιείται η υπόθεση Boussinesq, διότι αυτά κινούνται μέσω των διακυμάνσεων της πυκνότητας.

4.3.5 Επιδράσεις της άντωσης στην τυρβώδη ροή

Όταν στη ροή μας παρουσιάζονται ταυτόχρονα θερμοκρασιακές μεταβολές και ένα μη μηδενικό πεδίο βαρύτητας, τα k-ε μοντέλα στο FLUENT προσμετρούν την παραγωγή του k λόγω της άντωσης (G_b) και τις αντίστοιχες επιδράσεις στον υπολογισμό του ϵ . Το G_b υπολογίζεται ως εξής:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4.17)$$

όπου, Pr_t είναι ο τυρβώδης αριθμός Prandtl και g_i είναι το στοιχείο του βαρυτικού διανύσματος στην διεύθυνση του i . Η καθορισμένη τιμή του αριθμού Prandtl είναι 0.85

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής β καθορίζεται ως:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (4.18)$$

Από τις εξισώσεις μεταφοράς του k παρατηρούμε ότι η κινητική ενέργεια της τυρβώδους ροής αυξάνεται ($G_b > 0$) σε ασταθή διαστρωμάτωση.

Σε σταθερή διαστρωμάτωση, η άντωση τείνει να μειώσει τη τύρβη ($G_b < 0$). Στο FLUENT, οι επιδράσεις της άντωσης συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό του k σε περιπτώσεις μη μηδενικού βαρυτικού πεδίου και θερμοκρασιακής κλίσης.

Καθώς η άντωση επιδρά καθοριστικά στον υπολογισμό του k , στον υπολογισμό του ϵ το FLUENT προκαθορισμένα θέτει $G_b=0$ στις εξισώσεις μεταφοράς (Εξ. 4.2 και 4.11). Παρόλα αυτά, μπορούν να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις της άντωσης στον υπολογισμό του ϵ στον πίνακα του μοντέλου (VISCOUS MODEL). Ο βαθμός στον οποίο επηρεάζεται το ϵ από την άντωση, καθορίζεται από τη σταθερά $C_{3\epsilon}$. Στο FLUENT η σταθερά αυτή δεν είναι προκαθορισμένη, αλλά υπολογίζεται αρχικά από τη σχέση :

$$C_{3\epsilon} = \tanh\left|\frac{\nu}{u}\right| \quad (4.19)$$

όπου ν είναι το στοιχείο της ταχύτητας της ροής που είναι παράλληλο στο βαρυτικό διάνυσμα και u είναι το στοιχείο της ροϊκής ταχύτητας που είναι κάθετο στο βαρυτικό διάνυσμα. Με αυτό τον τρόπο ο όρος $C_{3\epsilon}$ θα γίνει ίσος με τη μονάδα σε περιπτώσεις, όπου η διεύθυνση της ροής είναι ευθυγραμμισμένη με τη διεύθυνση της βαρύτητας. Στην περίπτωση που είναι κάθετες το $C_{3\epsilon}$ θα γίνει 0.

4.3.6 Επιδράσεις της συμπιεστότητας στην τυρβώδη ροή

Για ροές με υψηλό αριθμό Mach η συμπιεστότητα επηρεάζει την τύρβη μέσω της ονομαζόμενης διαστολής απωλειών, δηλαδή την διαστολή που προκαλείται από την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ρευστού σε θερμική η οποία είναι αμελητέα σε ασυμπίεστες ροές. Ο μηδενισμός αυτός όμως των απωλειών οδηγεί στην αναξιόπιστη πρόβλεψη κατά την αύξηση του αριθμού Mach και την επίδραση της συμπιεστότητας. Για τον υπολογισμό αυτών των επιδράσεων στα k - ϵ μοντέλα του FLUENT, ο όρος της διαστολής απωλειών Y_m συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση του k . Για τον υπολογισμό του , ισχύει:

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2 \quad (4.20)$$

Όπου M_t είναι ο τυρβώδης αριθμός Mach:

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{\alpha^2}} \quad (4.21)$$

και $\alpha \equiv \sqrt{\gamma RT}$ (Ταχύτητα ήχου)

Η τροποποίηση πάντα ενεργοποιείται όταν χρησιμοποιείται η συμπιεστή μορφή του νόμου των τελείων αερίων.

4.4 ΡΟΗ ΣΕ ΜΗ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗ ΔΙΟΔΟ ΣΧΗΜΑΤΟΣ U

(Re=100000 , Ro=0.0)

4.4.1 Συνολική ανάπτυξη της ροής

Όπως είναι γνωστό, οι καμπυλωτοί αγωγοί χαρακτηρίζονται από την παρουσία δευτερεύουσας κίνησης και τις επιδράσεις αυτής στο πεδίο της κατά μήκος ροής. Επιπλέον, καθώς το πεδίο της κάθετης ροής επίσης αλλάζει λόγω της καμπής, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή κατά μήκος κλιμακωτής πίεσης. Στην περίπτωση ροής μέσα σε απότομη U καμπή, ένα δεύτερο και εξίσου σημαντικό στοιχείο επηρεάζει την ανάπτυξη της ροής, δηλαδή η ισχυρή κλίση της κατά μήκος πίεσης στην είσοδο της καμπής και στην έξοδο της οι οποίες προκαλούν τις λεγόμενες επιδράσεις 'εισόδου' και 'εξόδου'. Προτού προχωρήσουμε σε μία σύγκριση με τις διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις, θα ήταν χρήσιμο να εξετάσουμε την ανάπτυξη της πρωτεύουσας ροής μέσω των διαγραμμάτων ταχύτητας απεικονισμένη με βέλη σε τρία διαφορετικά καθ' ύψος επίπεδα ($y/D=0.5$, 0.75 , 0.95). Τα αποτελέσματα αυτά προβλέφθηκαν με το πρότυπο k-ε μοντέλο και φαίνονται στο Σχήμα 4.22.

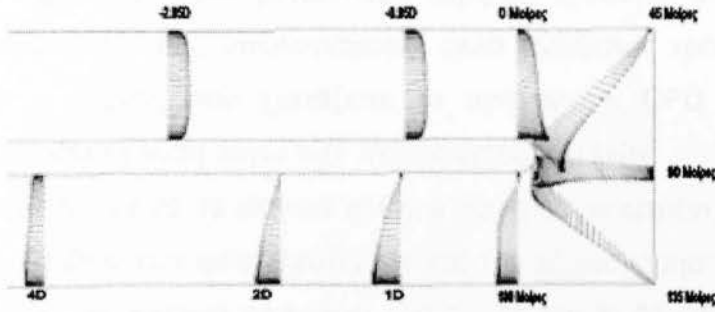
Στην είσοδο της καμπής, η ροή φαίνεται να κινείται προς το εσωτερικό τοίχωμα λόγω της μεγάλης διαφοράς πίεσης, η οποία δημιουργείται από την ισχυρή και απότομη καμπυλότητα. Σαν αποτέλεσμα, παρατηρούμε ισχυρή

επιτάχυνση κατά μήκος του εσωτερικού τοιχώματος και αντίστοιχα μεγάλη επιβράδυνση κατά μήκος του εξωτερικού τοιχώματος. Επίσης, η αντίστροφη κλίση της πίεσης κατά μήκος του εξωτερικού τοιχώματος δρα, έτσι ώστε η ροή να παρουσιάζει μικρές ανακυκλοφορίες κοντά στις εξωτερικές γωνίες και τοιχώματα. Αυτό παρατηρείται έντονα στις 45° , όπου η ανακυκλοφορία εκεί, κοντά στην εξωτερική γωνία είναι αρκετά μεγάλη. Η δευτερεύουσα ροή κινείται από την εξωτερική πλευρά προς την εσωτερική σχεδόν σε όλο το κάθετο επίπεδο και αντίστροφα στο συμμετρικό επίπεδο.

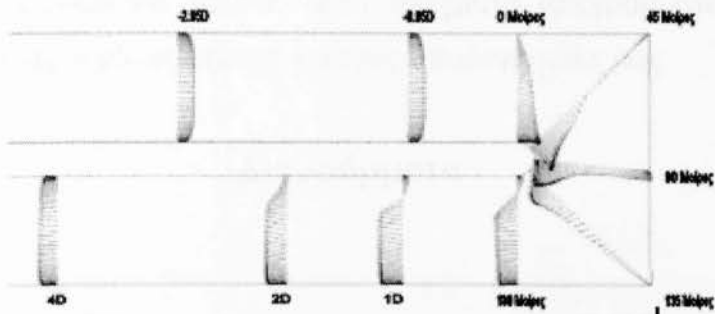
Η περιοχή ανακυκλοφορίας φαίνεται να εξαφανίζεται στη θέση των 90° κυρίως λόγω της μείωσης της ροϊκής επιφάνειας, ενώ στο εσωτερικό τοίχωμα η συμπεριφορά φαίνεται παρόμοια, όπως στην είσοδο, δηλαδή το ρευστό κοντά εκεί να έχει αρκετά μεγάλη ορμή. Ο δευτερεύων στροβιλισμός έχει τώρα εγκατασταθεί, αφού φαίνεται η κίνηση προς τα έξω στο επίπεδο συμμετρίας και, αντίστροφα, η κίνηση προς τα μέσα στο επίπεδο κοντά στο άνω τοίχωμα ($y/D=0.95$). Στο επίπεδο των 135° , η παρουσία της γωνίας στο εξωτερικό τοίχωμα παράγει εκεί ένα μικρό κομμάτι ανακυκλοφορίας. Επιπλέον, η κλίση της πίεσης είναι αντίθετη, εξαιτίας της προσέγγισης της ροής προς την έξοδο της καμπής, δημιουργώντας μία σημαντική περιοχή ανακυκλοφορίας κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα. Τέλος, φαίνεται, ότι η ισχυρή προς τα έξω κίνηση ωθεί το ρευστό με υψηλή ορμή προς το μέσον του αγωγού.

Περαιτέρω κατάντη, η περιοχή ανακυκλοφορίας κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα, φαίνεται σταδιακά να επεκτείνεται σε πλάτος. Ως αποτέλεσμα αυτού, το ρευστό με ορμή ωθείται μακριά από το εσωτερικό τοίχωμα κάτι το οποίο είναι η αιτία της επιτάχυνσης που παρατηρείται κοντά στο εξωτερικό τοίχωμα. Η δευτερεύουσα ροή είναι επίσης ισχυρή εδώ αλλά όχι στο εσωτερικό του πεδίου της ανακυκλοφορίας σχεδόν μηδενίζεται. Αυτό το φαινόμενο 'εξόδου', προκαλείται από την έλλειψη καμπυλότητας αλλά η μορφή της περιοχής της ανάδευσης συνεχώς προωθείται κατάντη της καμπής και κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα. Κοντά στην έξοδο της καμπής, καθώς το συνολικό επίπεδο της δευτερεύουσας ροής συνεχώς μειώνεται, η περιοχή της ανακυκλοφορίας ακόμα αυξάνεται. Σε απόσταση μίας διαμέτρου από την έξοδο ($1D$), η ανακυκλοφορία παραμένει ισχυρή, αλλά λόγω της εξισορρόπησης της πίεσης, η δευτερεύουσα ροή εξασθενεί. Στις δύο διαμέτρους κατάντη ($2D$), η ροή έχει πλήρως επαναπροσκολληθεί και λόγω αυτού, η δευτερεύουσα ροή

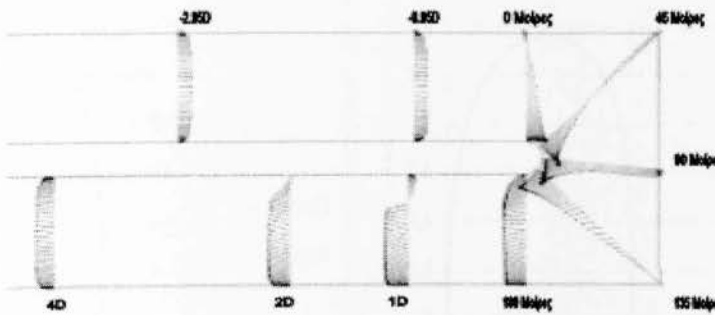
επανεμφανίζεται εδώ κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα. Αυτή η δευτερεύουσα ροή οδηγεί με ορμή ρευστό, όπως φαίνεται στο ανώτερο επίπεδο ($y/D=0.95$) από το εξωτερικό προς το εσωτερικό τοίχωμα. Έτσι, μία περιοχή κίνησης ρευστού με χαμηλή ορμή περαιτέρω παρατηρείται να λαμβάνει χώρα στις 4 διαμέτρους (4D) κατάντη της καμπής.



α



β



γ

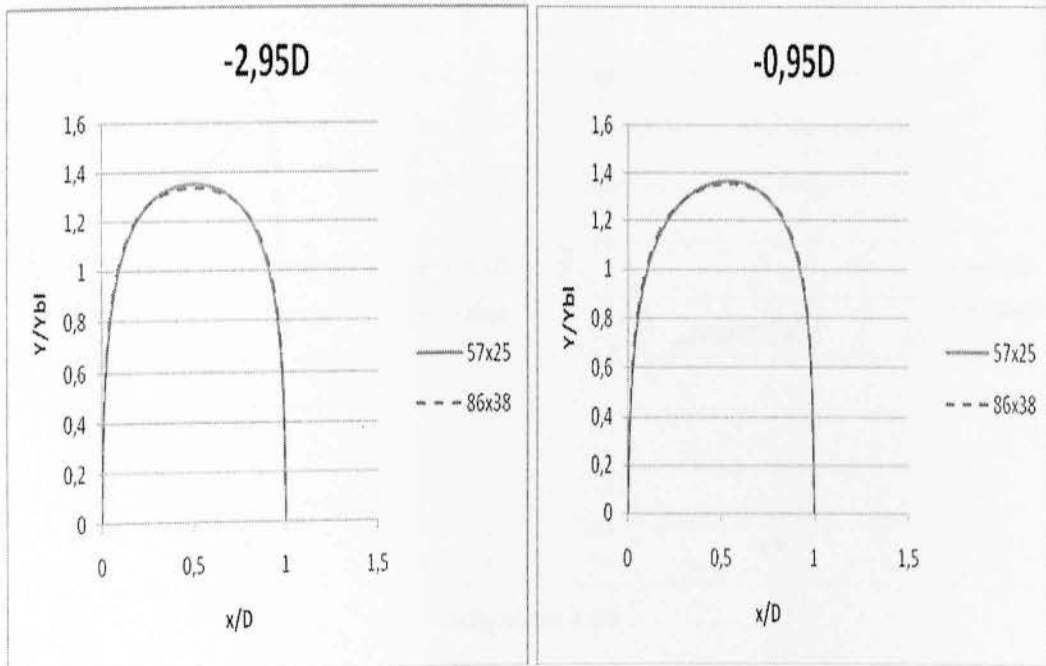
4.22 Διαγράμματα διανυσμάτων κύριας ροής κατά μήκος των επιπέδων α) $y/D=0.0$, β) $y/D=0.75$, γ) $y/D=0.95$ μη περιστρεφόμενης U καμπής ($Re=100000$, $Ro=0.0$)

4.5 Ανεξαρτησία πλέγματος

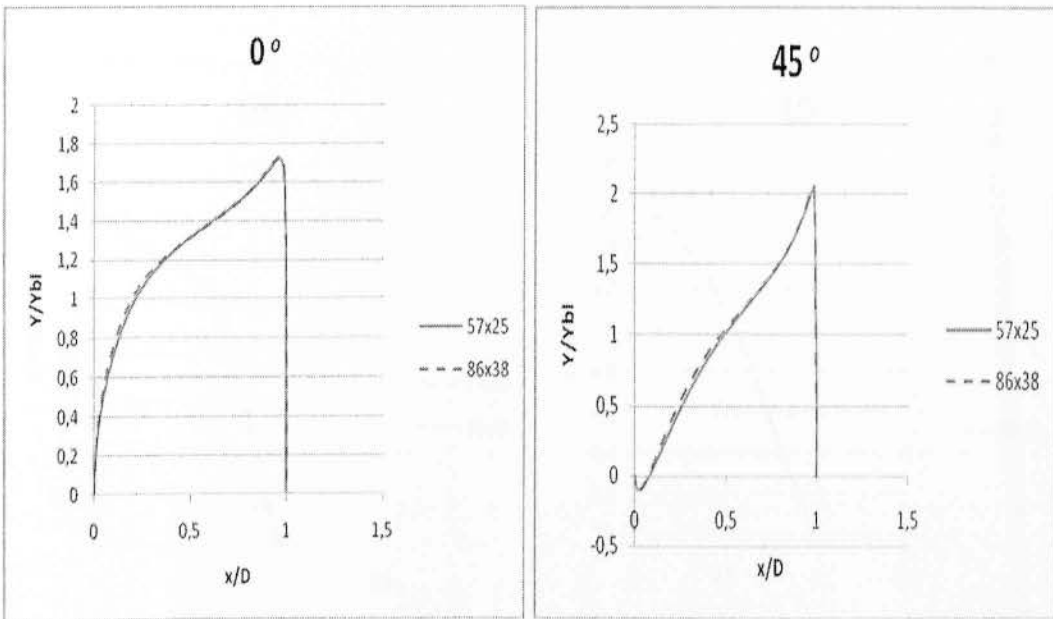
Η ακρίβεια των υπολογισμών στην υπολογιστική ρευστομηχανική εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητα του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο μας. Όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα που εισάγουμε στην δίοδο πτερυγίου που μελετάμε τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια έχουν τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από τους υπολογισμούς, αλλά αντιθέτως τόσο πιο πολύ αυξάνεται και ο χρόνος που χρειάζεται το πρόγραμμα CFD (Fluent) να καταλήξει σε αποδεκτή λύση λόγω των περισσότερων κελιών.

Για να ελέγξουμε ποιό είναι το ιδανικό πλέγμα για τη συγκεκριμένη περίπτωση ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και την εξοικονόμηση χρόνου θα μελετήσουμε δύο διαφορετικά πλέγματα : α) 57x25 και β) 86x38. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα ολικής ταχύτητας ρευστού κατά μήκος της διατομής της δίοδου για τα δύο αυτά πλέγματα (διαγράμματα 4.23-4.27) χρησιμοποιώντας νερό ως ρευστό για τους υπολογισμούς μας.

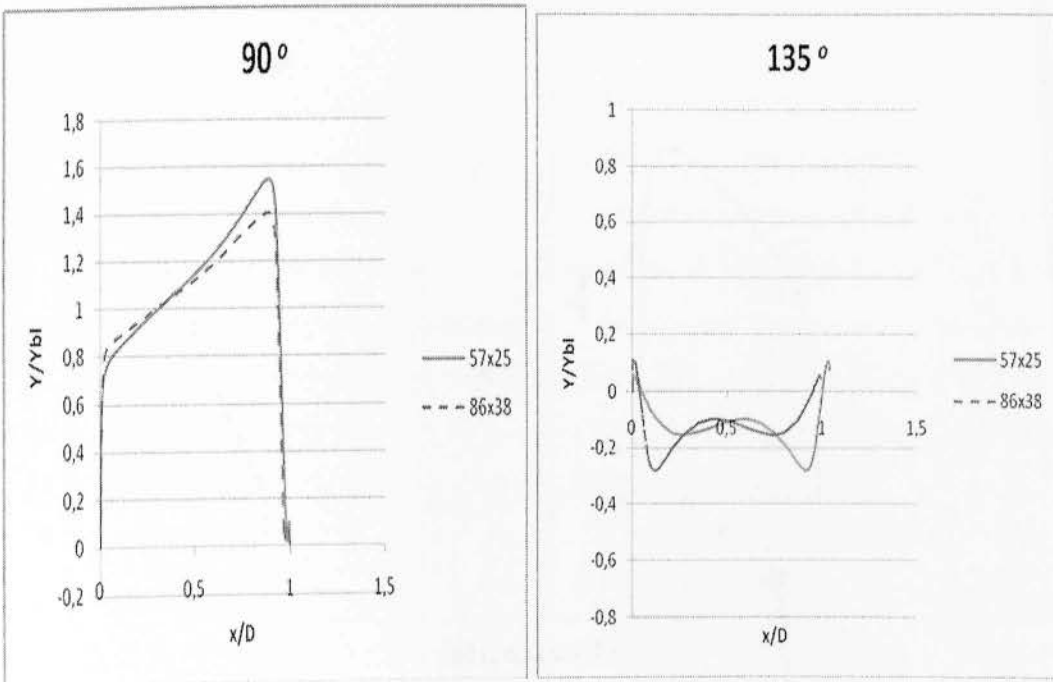
Διαγράμματα



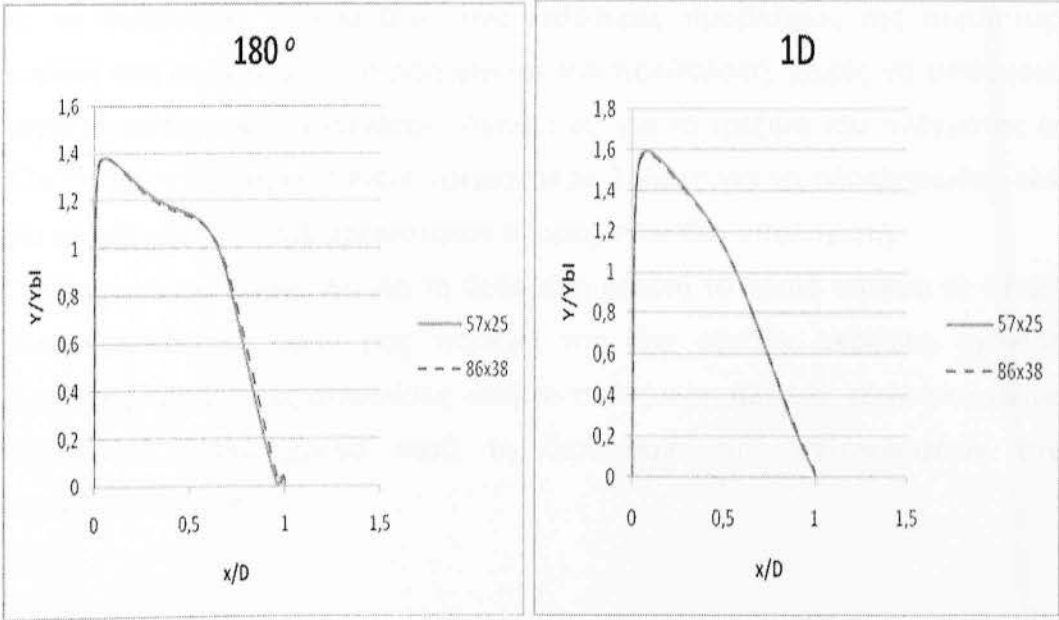
διάγραμμα 4.23



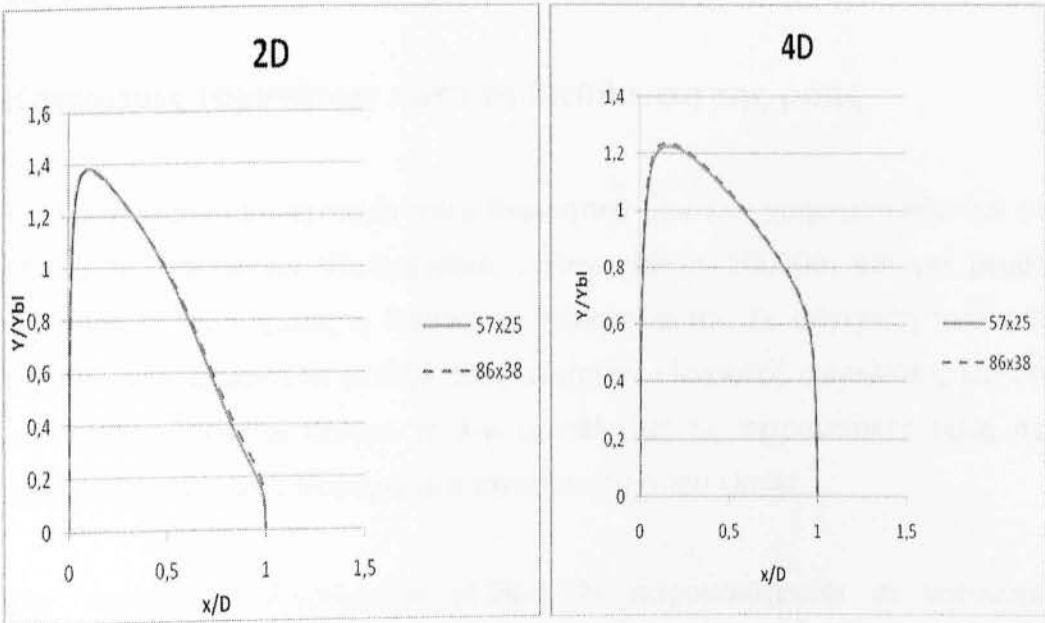
διάγραμμα 4.24



διάγραμμα 4.25



διάγραμμα 4.26



διάγραμμα 4.27

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται αρχικά πως και με το αραιό πλέγμα α) 57x25 και με το πιο πυκνό πλέγμα β) 86x38 η ταχύτητα του ρευστού στη δίοδο παρουσιάζει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά ως προς την μορφή τους, με το πυκνότερο πλέγμα δίνει λίγο καλύτερες προβλέψεις της ταχύτητας, κυρίως στα σημεία όπου η ροή γίνεται πιο πολύπλοκη, χωρίς να υπάρχουν μεγάλες αριθμητικές αποκλίσεις. Αντιθέτως, για το τρέξιμο του πλέγματος α) 57x25 στο πρόγραμμα Fluent χρειάστηκαν 3 ώρες για να ολοκληρωθεί, ενώ για το πλέγμα β) 86x38 χρειάστηκαν 8 ώρες στον ίδιο υπολογιστή.

Συμπεραίνουμε οπότε, ότι για τη δεδομένη μελέτη το αραιό πλέγμα α) 57x25 είναι ιδανικότερο, αφού μας παρέχει την ίδια σχεδόν ακρίβεια, έχοντας ελάχιστες αριθμητικές αποκλίσεις από το πυκνότερο πλέγμα, εξοικονομώντας παράλληλα πολύ χρόνο κατά τη διαδικασία των επαναλήψεων στο πρόγραμμα Fluent.

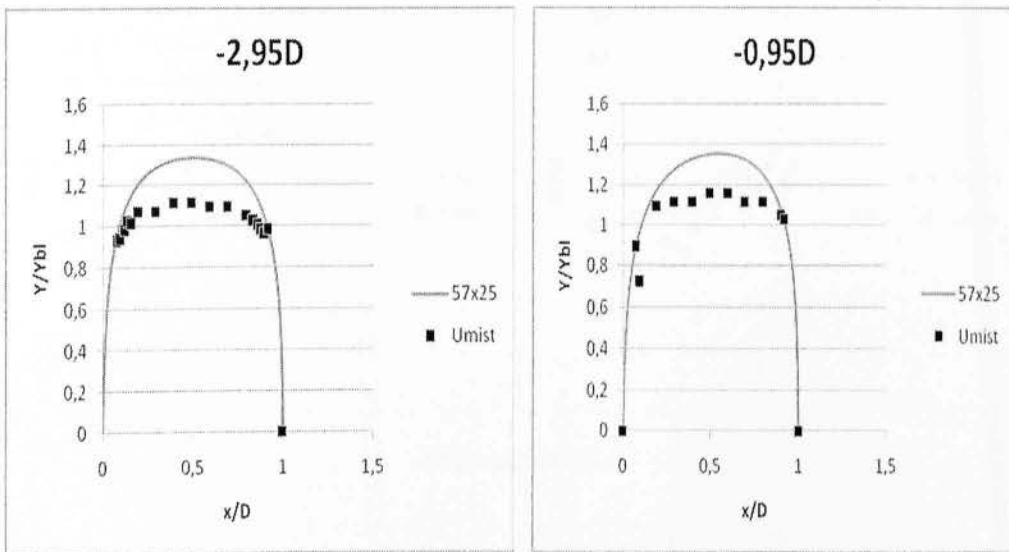
4.6 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

Κατανομές ταχυτήτων κατά τη διεύθυνση της ροής

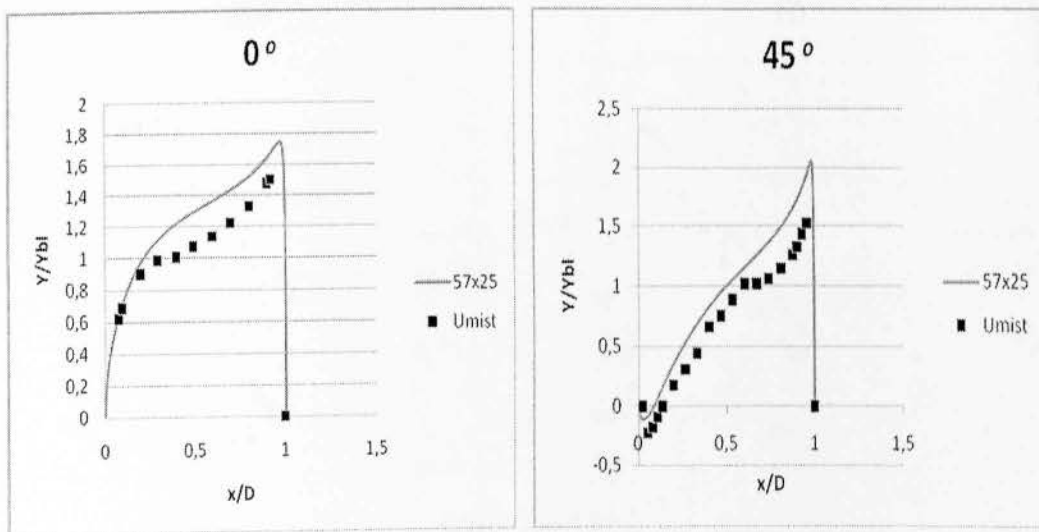
Για να συγκρίνουμε τα παραπάνω θεωρητικά μοντέλα χρησιμοποιήσαμε στο Fluent τις παρακάτω παραμέτρους : Reynolds = 100000, και για ρευστό θεωρήσαμε νερό, χωρίς η δίοδος να περιστρέφεται. Σε σύγκριση που έγινε στα θεωρητικά μοντέλα μεταξύ τους υπήρχαν ελάχιστες αποκλίσεις και έτσι καταλήξαμε να συγκρίνουμε το k-ε μοντέλο με τις πειραματικές τιμές που έχουν προκύψει από πείραμα στο πανεπιστήμιο του Umist.

Στα παρακάτω διαγράμματα (4.28-4.32) παρουσιάζονται οι κατανομές ταχυτήτων της κύριας ροής U_{vel} του μοντέλου k-ε και των πειραματικών τιμών του Umist κατά το πλάτος του αγωγού.

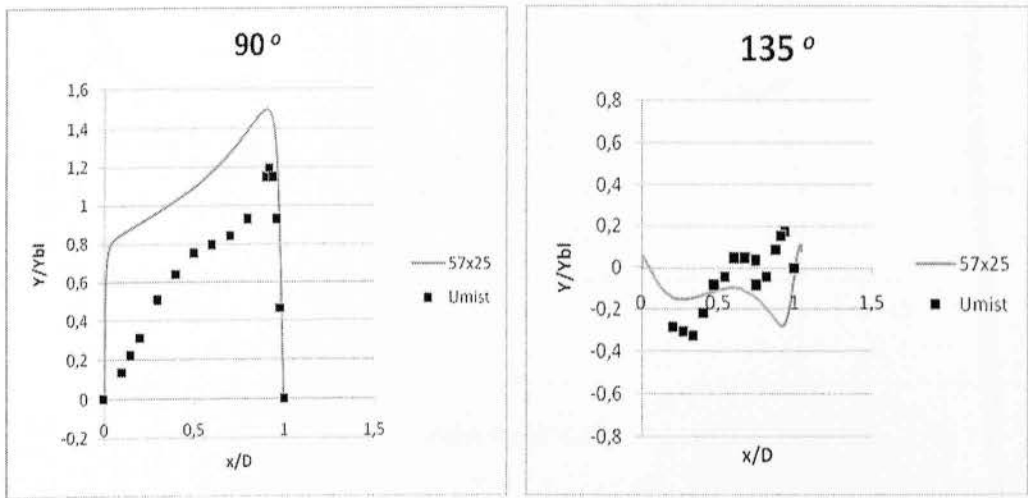
Διαγράμματα



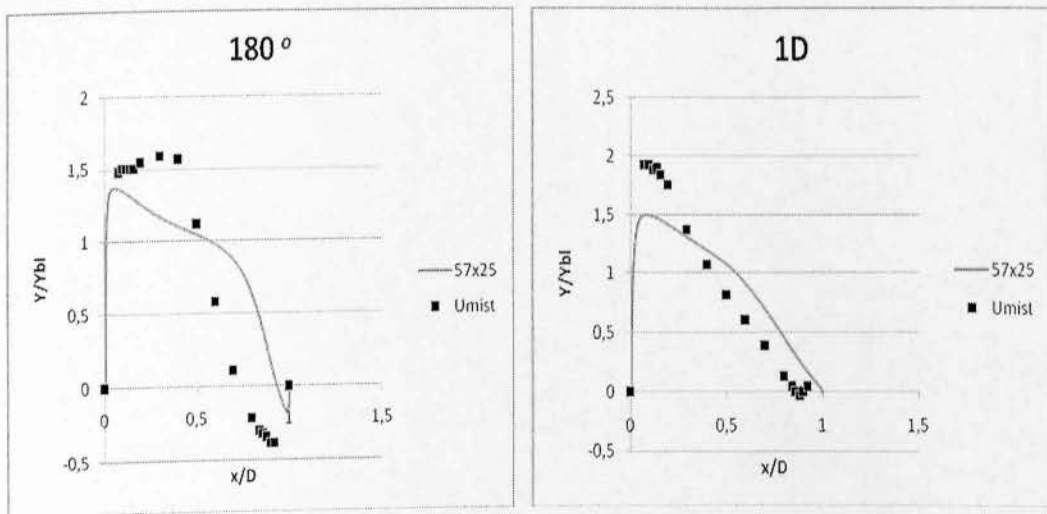
διάγραμμα 4.28



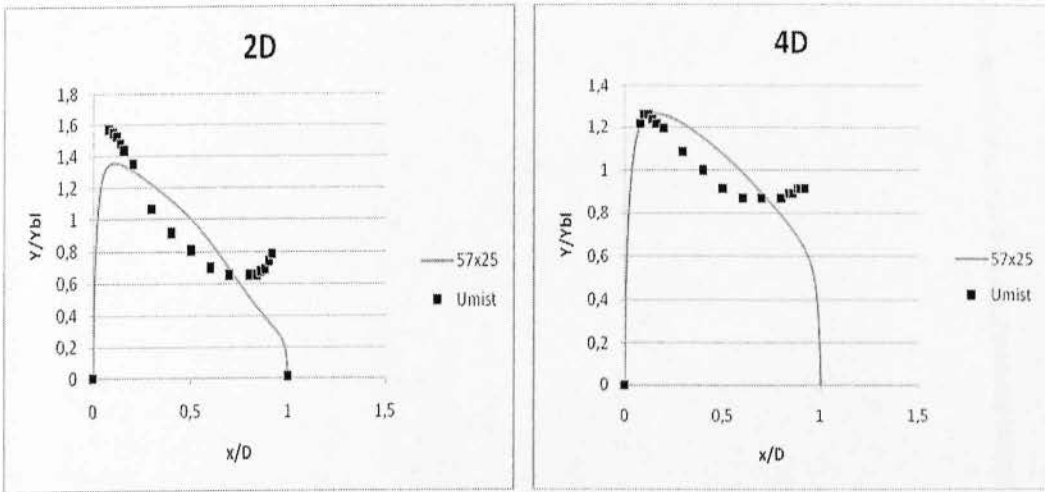
διάγραμμα 4.29



διάγραμμα 4.30



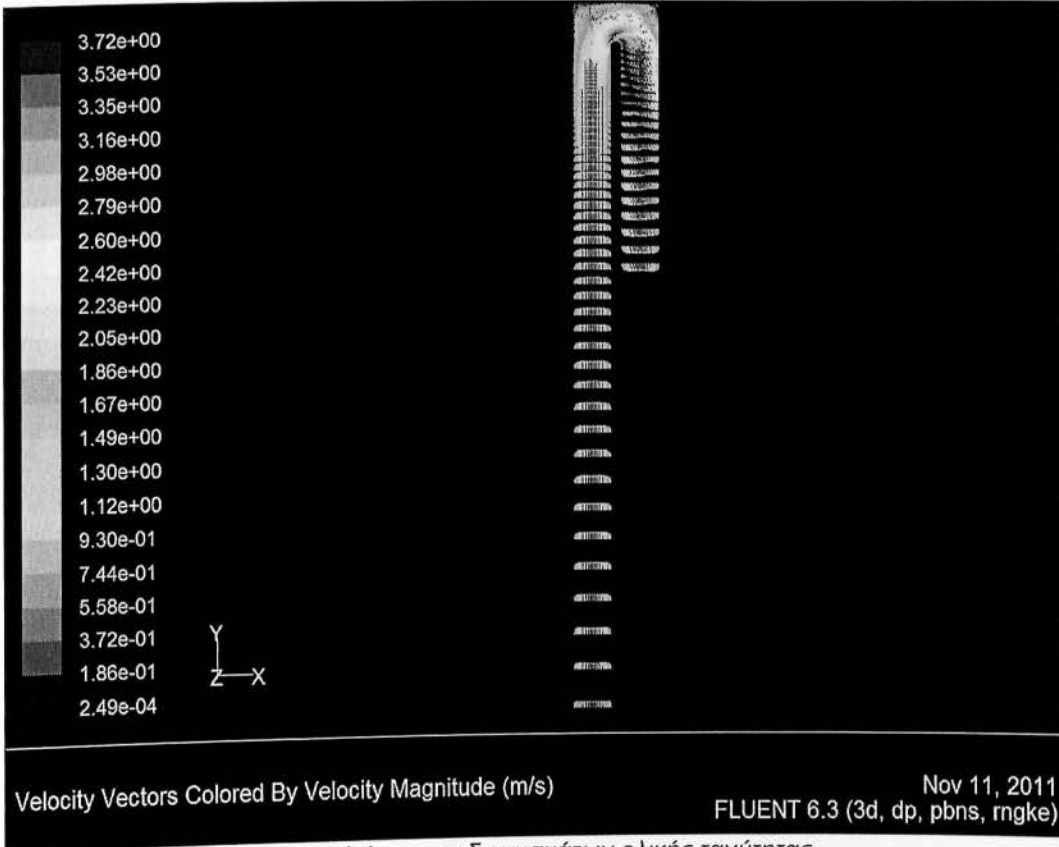
διάγραμμα 4.31



διάγραμμα 4.32

Παρακάτω (σχήμα 4.33 α,β,γ) παρουσιάζεται το διάγραμμα των διανυσμάτων της ολικής ταχύτητας σε όλο το μήκος της διόδου στο επίπεδο συμμετρίας με ρευστό αέρα θερμοκρασίας 800° Kelvin.

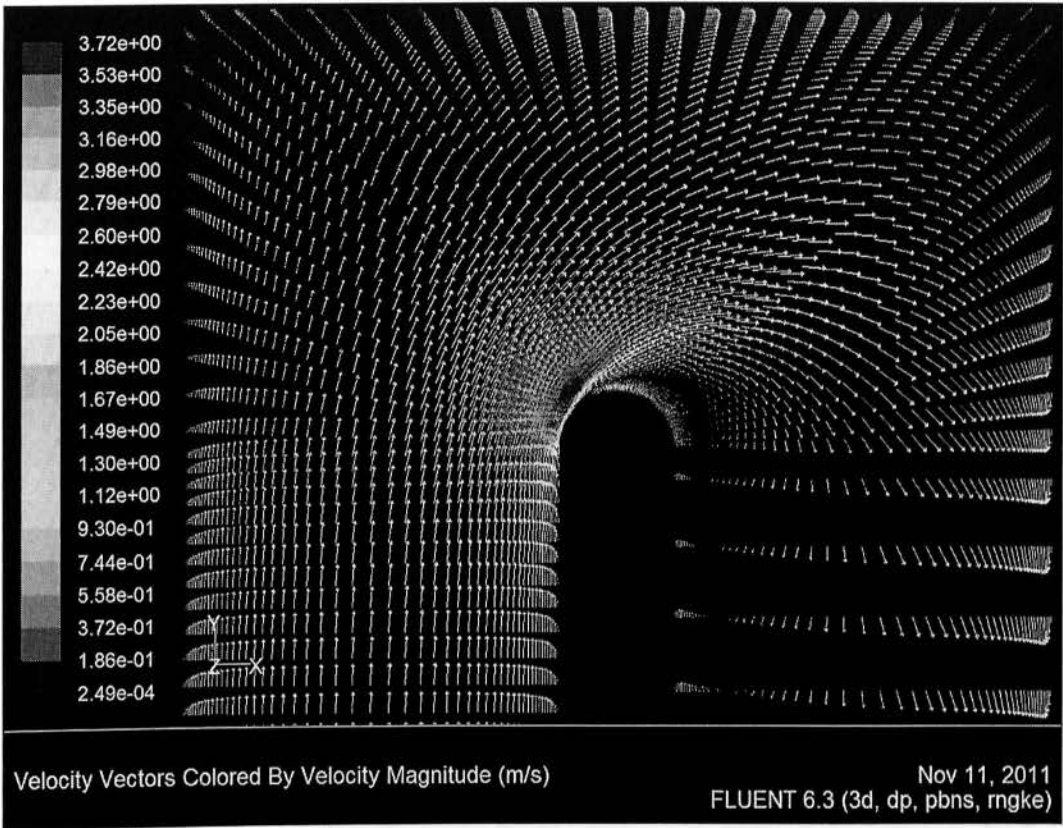
Vectors



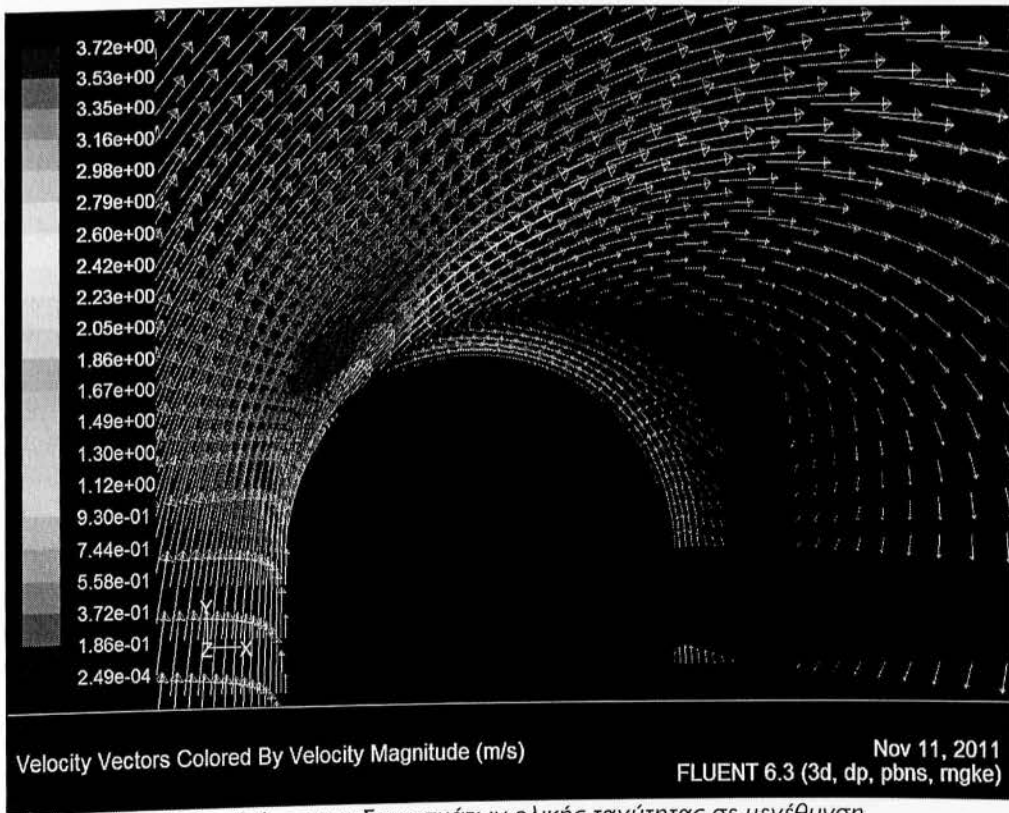
Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Nov 11, 2011
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rngke)

4.33 α Διάγραμμα διανυσμάτων ολικής ταχύτητας



4.33 β Διάγραμμα διανυσμάτων ολικής ταχύτητας σε μεγέθυνση

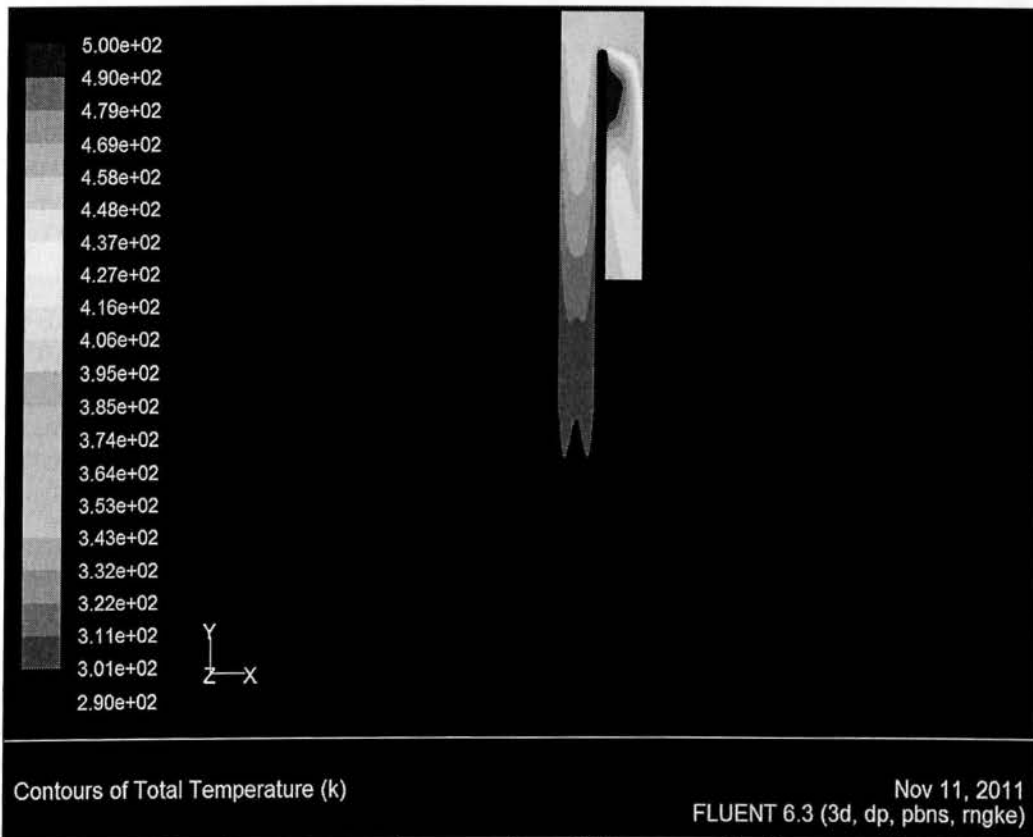


4.33 γ Διάγραμμα διανυσμάτων ολικής ταχύτητας σε μεγέθυνση

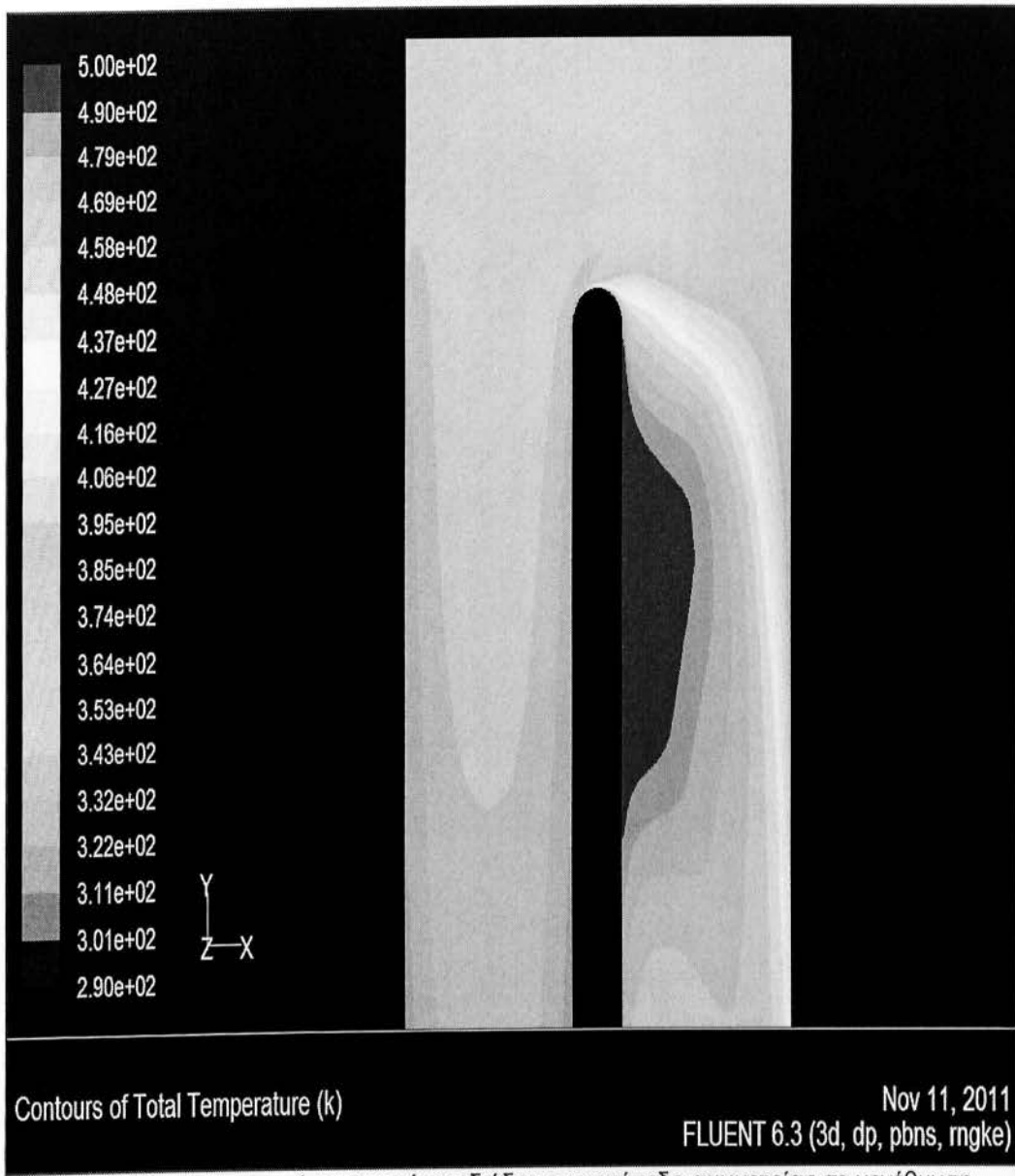
Στα παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε την αντηρροή που σχηματίζεται στο τέλος της καμπύλης U-bent λόγω της μορφολογίας της διόδου.

Παρακάτω (σχήμα 4.34 α,β,γ) φαίνεται η θερμοκρασιακή κατανομή της διόδου στο επίπεδο συμμετρίας.

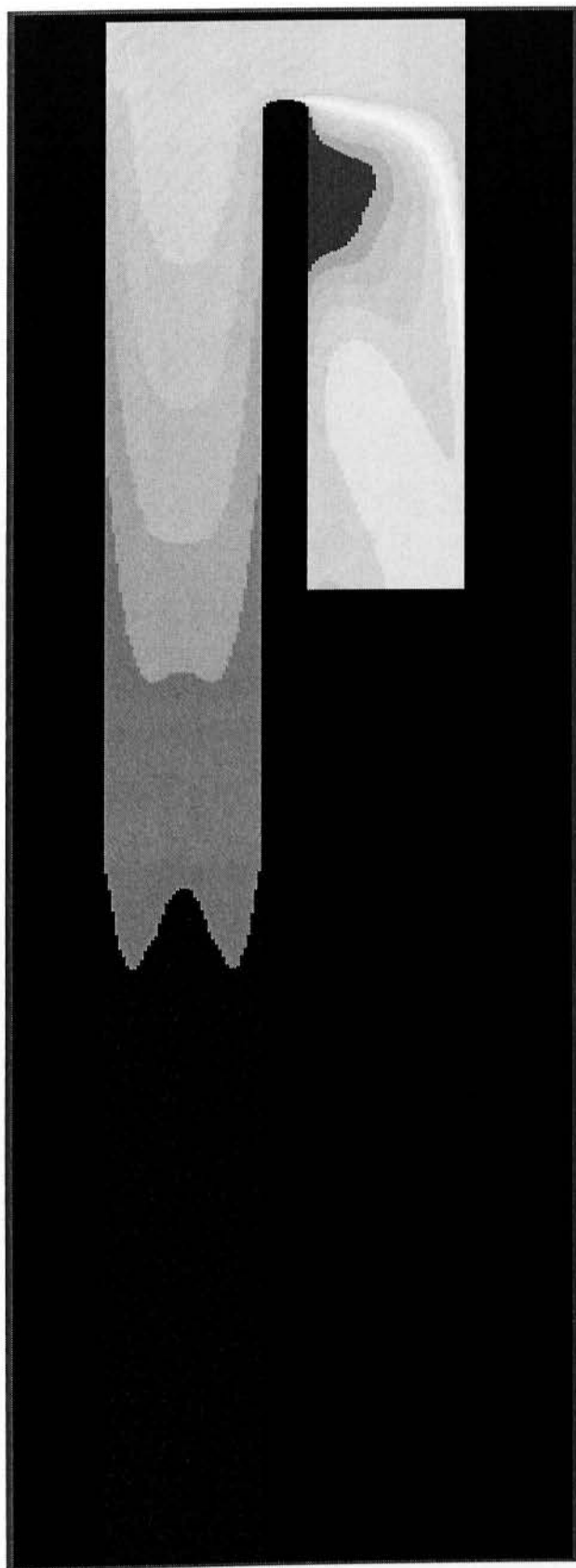
Contours



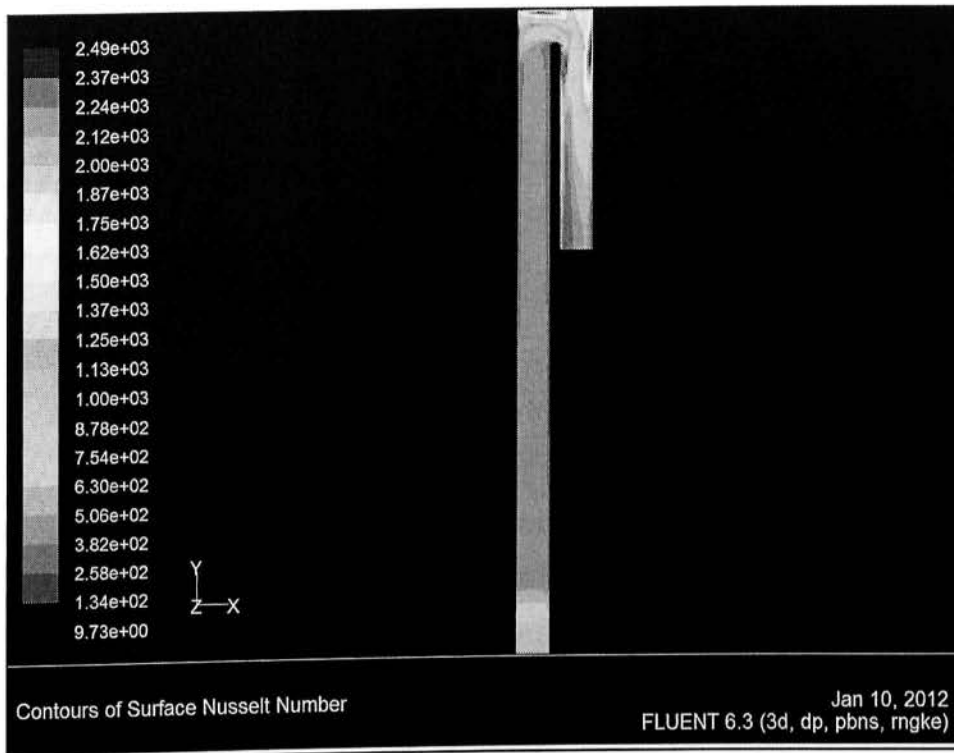
4.34 α Θερμοκρασιακή κατανομή της διόδου στο επίπεδο συμμετρίας



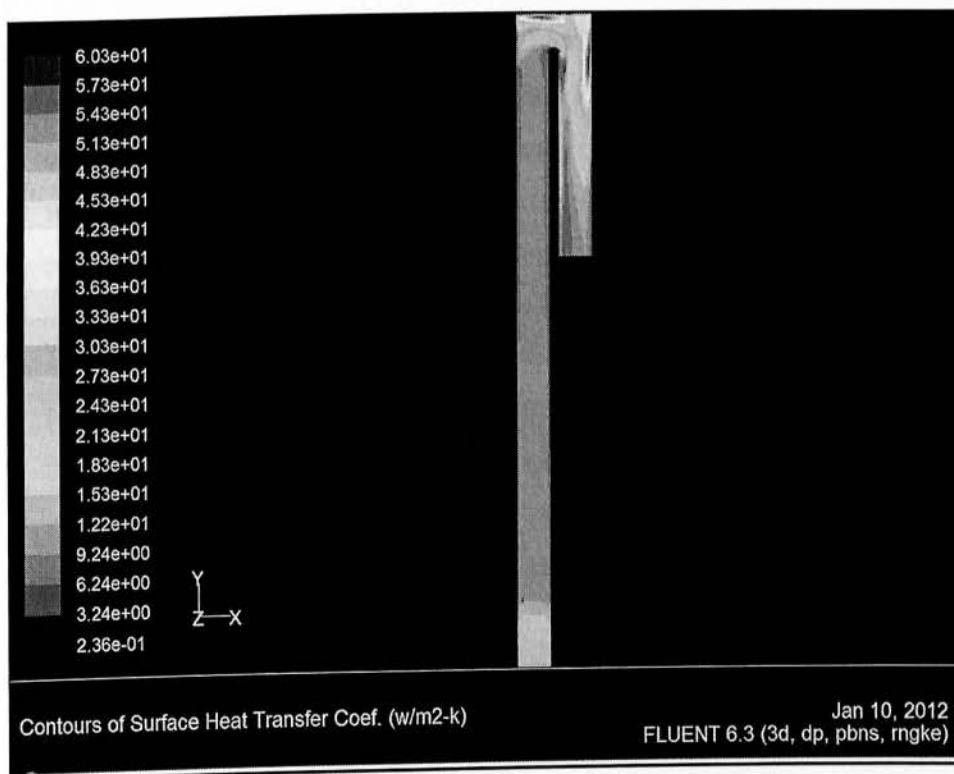
4.34 β Θερμοκρασιακή κατανομή της διόδου στο επίπεδο συμμετρίας σε μεγέθυνση



4.34 γ Θερμοκρασιακή κατανομή της διόδου στο επίπεδο συμμετρίας



4.34 δ Αριθμός Nusselt στο θερμαινόμενο τοίχωμα



4.34ε Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στο θερμαινόμενο τοίχωμα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΤΥΧΙΑΚΗ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Στα δύο πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν α) 57x25 και β) 86x38 παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις είναι ελάχιστες για τη συγκεκριμένη εφαρμογή που μελετήσαμε, οπότε και ισχύει η ανεξαρτησία του πλέγματος. Παρότι μας παρέχουν τα ίδια περίπου αποτελέσματα, το πυκνότερο πλέγμα παρουσιάζει λίγο καλύτερη ακρίβεια στα σημεία όπου η ροή γίνεται πιο πολύπλοκη με το μειωνέκτημα όμως ότι το τρέξιμο για το πυκνότερο πλέγμα στο Fluent είναι πολύ πιο χρονοβόρο.
- Μετά τη χρήση διαφορετικών μοντέλων προσομοίωσης καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για τη συγκεκριμένη μελέτη της συγκεκριμένης ψυκτικής διόδου, όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσίασαν παραπλήσια αποτελέσματα, οπότε και χρησιμοποιήσαμε για τους τελικούς υπολογισμούς το αρχικό μοντέλο k-ε.
- Στα διαγράμματα $Y/Y_{bl} - x/D$ όπου παραθέτονται οι θεωρητικές τιμές της ταχύτητας από την προσομοίωση στο Fluent και οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές της ταχύτητας που έχουν προκύψει από πείραμα στο πανεπιστήμιο Umist ως προς το πλάτος της διόδου σε διάφορες κατατομές παρατηρούμε πως σε όλα τα διαγράμματα οι θεωρητικές καμπύλες με τα πειραματικά σημεία συγκλίνουν και ως προς τη μορφή αλλά και ως προς τις τιμές. Έτσι, διαφαίνεται η χρησιμότητα της υπολογιστικής ρευστομηχανικής, αφού η προσομοίωση της ροής στη δίοδο που μελετάμε προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα.

- Στο διάγραμμα $Y/Y_{bl} - x/D$ για τις 135° παρατηρούμε πως υπάρχουν κυρίως αρνητικές τιμές ταχύτητας. Αυτό συμβαίνει γιατί στη συγκεκριμένη περιοχή της διόδου παρουσιάζεται αντιρροή (backflow) λόγω της μορφολογίας της διόδου και δημιουργείται ανακυκλοφορία του ρευστού. Το φαινόμενο αυτό διαφαίνεται ακόμα καλύτερα και στο διάγραμμα διανυσμάτων (Vectors) της ολικής ταχύτητας του ρευστού.
- Στο διάγραμμα της θερμοκρασιακής κατανομής παρατηρούμε πως καθώς κινείται το ρευστό μέσα στη δίοδο διαρκώς αυξάνεται η θερμοκρασία του, αφού απάγει τη θερμοκρασία από το πτερυγίο του αεριοστροβίλου. Στο σημείο που υπάρχει το φαινόμενο της αντιρροής η θερμοκρασία του ρευστού παρουσιάζει μέγιστες τιμές, γιατί το ρευστό παραμένει στην ίδια περιοχή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, λόγω της ανακυκλοφορίας του.

5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΤΥΧΙΑΚΗ

Στην παρούσα πτυχιακή μελέτησαμε μία δίοδο ψύξης πτερυγίου αεριοστροβίλου συγκρίνοντας διάφορα μοντέλα προσομοίωσης, πλέγματα και συνθήκες. Επίσης, εκτός από τη μελέτη της ροής του αέρα μέσα στη δίοδο είδαμε πώς η θερμοκρασία επηρεάζει το σύστημα αυτό τοποθετώντας το υπό μία σταθερή πηγή θερμότητας.

Σε μία επόμενη πτυχιακή εργασία θα μπορούσε να μελετηθεί η συμπεριφορά της συγκεκριμένης ψυκτικής διόδου υπό περιστροφή, έτσι ώστε να προσομοιωθούν οι πραγματικές συνθήκες ψύξης του πτερυγίου ακόμα πιο πιστά. Η σύγκριση των μελλοντικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της παρούσας πτυχιακής θα προσδιορίσουν το πως η περιστροφή του πτερυγίου σε υψηλές στροφές, όπως συμβαίνει στον αεριοστροβίλο, επηρεάζει την ψυκτική ικανότητα της διόδου και ως συνέπεια και την απόδοση του αεριοστροβίλου.

Επίσης, θα μπορούσε να μελετηθεί μία διαφορετική γεωμετρία διόδου με σκοπό να επιτευχθεί καλύτερη ψύξη του πτερυγίου του αεριστροβίλου. Η νέα γεωμετρία μπορεί να περιλαμβάνει διαφορετική διατομή διόδου, διαφορετικό μοτίβο αναδίπλωσης ή ακόμα και ειδικά εμπόδια κατά τη ροή του αέρα με σκοπό την αύξηση της τύρβης, αφού όπως διαπιστώσαμε και στην παρούσα πτυχιακή, κατά το φαινόμενο της αντιροής, η αύξηση της τύρβης συνεπάγεται μεγαλύτερη απαγωγή θερμότητας.

Τέλος, θα μπορούσαν να συγκριθούν κατασκευαστικά και οικονομοτεχνικά και ενεργειακά διαφορετικές δίοδοι ψύξης, έτσι ώστε να προσδιοριστεί το ποιος από αυτές είναι εφικτές να κατασκευαστούν, έχουν μικρότερο κόστος κατασκευής, κατά πόσο αυξάνουν το βαθμό απόδοσης του αεριστροβίλου και κατά πόσο μειώνουν τη διάρκεια ζωής των πτερυγίων λόγω της αφαίρεσης υλικού από αυτά.

BIBLIOΓΡΑΦΙΑ

Akella K,V and Han J,C . (1998) . Impingement Cooling in Rotating Two-Pass Rectangular Channels. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 12, No. 4 .

Bons J,P . and Kerrebrock J,L . (1998) . Complementary Velocity and Heat Transfer Measurements in a Rotating Cooling Passage with Smooth Walls. Stockholm : ASME Paper 98-GT-464 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition.

Cohen H . Rodgers G,F,C . Saravanamuttoo H,I,H (1987) . Gas turbine Theory

Han J,C . Dutta S and Ekkad S. (2001) . Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology

Han J,C and Dutta S. (1995). Internal Convection Heat Transfer and Cooling: An Experimental Approach. Belgium: Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series 1995-05 on Heat Transfer and Cooling in Gas Turbines .

Iacovides H . (1998) . "Computation of Flow and Heat Transfer Through Rotating and Stationary Passages", Int. J. Heat and Fluid Flow.

Iacovides H. (1999) . The Computation of Turbulent Flow Through Stationary and Rotating U-Bends of With Rib Roughened Surfaces, Int. J. Numer. Mech. Fluids. Vol.2

Lakshminarayana B . (2007) . Fluid dynamics and heat transfer of turbomachinery

Metzger D,E. (1985) . Cooling Techniques for Gas Turbine Airfoils .

Παπαθεοδωσίου Θ,Κ . Κροντήρη Η,Α . (1997) . Κινητήριες μηχανές εκδοση Β