



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
ΣΤΗ ΡΟΗ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΓΧΥΣΗΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ
PELTON**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΤΤΑΣ ΒΑΣΙΛΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ι. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2012

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και έχει ως στόχο την προσομοίωση και μελέτη της ροής στο τελικό τμήμα συστήματος διανομής υδροστροβίλου δράσης (Pelton-Turgo). Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση στη ροή του βάκτρου (που φέρει την ρυθμιστική βελόνη) και των πτερυγίων στήριξης αυτού, στο εσωτερικό του τελευταίου ευθύγραμμου τμήματος του αγωγού διανομής μετά από γωνία 90 μοιρών. Η διάταξη αυτή υπάρχει στους περισσότερους υδροστροβίλους δράσης μικρής ισχύος και η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή του ακροφυσίου του πειραματικού μοντέλου υδροστροβίλου Pelton που υπάρχει στο εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών της Σχολής.

Η μοντελοποίηση και αριθμητική επίλυση της ροής σε αυτή την διάταξη έγινε με την χρήση των εμπορικού λογισμικού υπολογιστικής ρευστομηχανικής, της εταιρείας Ansys, Fluent. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε με χρήση των λογισμικών Tecplot 360, Excel καθώς και υπολογιστικού προγράμματος σε Fortran. Οι υπολογισμοί έγιναν για την ονομαστική παροχή του υδροστροβίλου. Αρχικά, μελετήθηκε η ροή σε αγωγό με γωνία χωρίς εσωτερικές διαμορφώσεις ενώ κατόπιν εξετάστηκε η επίδραση του βάκτρου και των πτερυγίων σε αυτή.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η επίδραση των πτερυγίων σε σχέση με το μήκος τους, την σχετική τους γωνία και το πλήθος τους. Μεταβάλλοντας αυτές τις παραμέτρους δημιουργήθηκαν διάφορες γεωμετρίες οι οποίες μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν με κριτήριο την μείωση των υδραυλικών απωλειών στον αγωγό, την ελαχιστοποίηση των δευτερευουσών στροβιλισμών που αναπτύσσονται κατά την εγκάρσια διατομή αλλά και την κατά το δυνατόν εξομάλυνση της ροής κατά μήκος της διάταξης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παρουσία των πτερυγίων παίζει σημαντικό ρόλο στον περιορισμό των δευτερευουσών ροών. Στα καλύτερα από αυτά, που επετεύχθησαν σε μία από τις γεωμετρίες με τα 4 πτερύγια, οι εφαπτομενικές ταχύτητες μειώθηκαν στο μισό σε σχέση με την περίπτωση χωρίς πτερύγια.

Abstract

The present diploma thesis was developed at the School of Mechanical Engineering of National Technical University of Athens and has as object of study the numerical simulation and flow analysis in the final section a Pelton turbine distributor. More precisely, the influence in the flow structure of the ribs, which support the needle of the nozzle and the driving rod, at the final straight section of the distributor after a 90° bend was examined. This kind of geometrical configuration is common in small scale impulse turbines with two nozzles. The geometry of the model is based on the experimental Pelton turbine model which is installed at the Laboratory of Hydrodynamic Machines of NTUA.

The curvatures of the distributor result to an increase of tangential velocities and therefore adverse secondary flows which in turn, according to recent studies, affect the jet quality and lead to hydraulic efficiency losses. Several different rib configurations were examined by changing their count (2,3 and 4), length and angular position. It was found that the presence of ribs does play an important role in restricting secondary flows. The best results were achieved in one of the 4-rib cases where the tangential velocities were reduced by half compared to the no-ribs case.

Numerical simulations were performed for the flow field using the commercial computational fluid dynamics Fluent software with water as the working fluid for the nominal operating point of the turbine. The post-processing of the results was done using Tecplot 360, Excel and a Fortran code.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Αναγνωστόπουλο Ιωάννη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το αντικείμενο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Κουκουβίνη Φοίβο για τη συνεργασία, τη συνεχή επίβλεψη και την καθοδήγηση σε όλα τα στάδια της εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ τον φίλο και υποψήφιο διδάκτορα Πολίτη Κωνσταντίνο για την βοήθεια και την υποστήριξη που μου προσέφερε.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Πρόλογος	9
Σκοπός της εργασίας	9
Διάρθρωση της εργασίας.....	11
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	13
1.1 Υδροηλεκτρική ενέργεια και υδροστρόβιλοι.....	13
1.1.1 Κατάταξη των υδροστροβίλων	13
1.1.2 Περιγραφή του υδροστροβίλου Pelton	17
1.1.3 Απώλειες ενέργειας στον υδροστρόβιλο	21
1.2 Η ροή στη δέσμη	24
1.2.1 Δημιουργία της δέσμης.....	24
1.2.2 Διασπορά της δέσμης και η σημασία της.....	27
1.2.3 Αλληλεπίδραση της δέσμης με τα σκαφίδια	29
1.3 Πειραματικά και αριθμητικά ερευνητικά αποτελέσματα	32
Κεφάλαιο 2: Υπολογιστική ρευστομηχανική	49
2.1 Γενικά χαρακτηριστικά.....	49
2.1.1 Οι εξισώσεις που διέπουν τη ροή του ρευστού.....	50
2.1.2 Μοντελοποίηση της τύρβης	51
2.1.3 Συναρτήσεις τοιχώματος	54
2.1.4 Κατηγοριοποίηση μεθόδων προσομοίωσης.....	55
2.1.5 Πως δουλεύει ένας κώδικας CFD	56
2.2 Το υπολογιστικό πακέτο Fluent	59
2.2.1 Gambit	59
2.2.2 Fluent	62
2.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	64
Κεφάλαιο 3: Πρώτη προσέγγιση του προβλήματος-Ροή σε αγωγό με κλίση 90°	65
3.1 Ροή σε αγωγό με κλίση 90°	65
3.2 Επικύρωση (validation) του κώδικα.....	69
3.2.1 Παρουσίαση του πειράματος.....	70

3.2.2 Παρουσίαση του αριθμητικού μοντέλου	72
3.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	76
Κεφάλαιο 4: Δημιουργία του τελικού υπολογιστικού μοντέλου	81
4.1 Παρουσίαση και μοντελοποίηση του φυσικού προβλήματος	81
4.2 Δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος	84
4.2.1 Εναλλακτικά πλέγματα	85
4.2.2 Τελικό πλέγμα	93
4.3 Εξακρίβωση (verification) μέσω ελέγχου ανεξαρτησίας πλέγματος	96
4.4 Τελικές επιλογές αριθμητικών μοντέλων	100
4.5 Παρουσίαση των εξεταζόμενων διατάξεων	102
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης ανά περίπτωση	107
5.1 Εισαγωγή	107
5.2 Αγωγός με βάκτρο χωρίς πτερύγια	110
5.2 Κοντά πτερύγια	117
5.2.1 Διατάξη με δύο πτερύγια	117
5.2.2 Διατάξεις με τρία πτερύγια	120
5.2.3 Διατάξεις με τέσσερα πτερύγια	136
5.3 Μακριά πτερύγια	145
5.3.1 Διατάξεις με τρία πτερύγια	145
5.3.2 Διατάξεις με τέσσερα πτερύγια	158
Κεφάλαιο 6: Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα	167
6.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων	167
6.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων	170
6.3 Συμπεράσματα	180
6.4 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	182
Βιβλιογραφία	185
Παράρτημα	187

Πρόλογος

Σκοπός της εργασίας

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των πτερυγίων και του βάκτρου στη ροή μέσα στο σύστημα έγχυσης υδροστροβίλου Pelton. Η μελέτη βασίζεται στον πειραματικό υδροστρόβιλο Pelton του Εργαστηρίου Υδροδυναμικών Μηχανών του ΕΜΠ, αλλά τα συμπεράσματα, μπορούν να γενικευθούν μιας και αυτή η διάταξη είναι συνηθισμένη και συναντάται στους περισσότερους υδροστροβίλους δράσης (Pelton-Turgo) μικρής ισχύος με δύο ακροφύσια.

Από την προσομοίωση και επίλυση συγκεκριμένων εναλλακτικών διατάξεων με τις μεθόδους της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD), επιδιώκεται η εξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο που επηρεάζουν τα πτερύγια την ροή μέσα στον αγωγό του συστήματος έγχυσης με παραμέτρους το πλήθος τους, το μήκος τους και την σχετική γωνία μεταξύ τους. Αυτό μπορεί να βοηθήσει, ανάλογα με τα κριτήρια που τίθενται κάθε φορά, στην επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας ώστε να υπάρχουν λιγότερες απώλειες όχι μόνο στο σύστημα διανομής αλλά και στον ίδιο τον υδροστρόβιλο, με βελτίωση της ποιότητας στη ροή στο σύστημα έγχυσης (σωλήνας-ακροφύσιο) και κατ' επέκταση καλύτερη ποιότητα δέσμης ύδατος (jet) που τελικά οδηγεί σε μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας από τον υδροστρόβιλο. Μετά την μελέτη της κάθε περίπτωσης ξεχωριστά, γίνεται συγκριτική παρουσίαση όλων των περιπτώσεων προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα. Επειδή εξετάζεται μεμονωμένα το τμήμα αυτό της εξόδου, χωρίς να εξετάζεται το παρακάτω τμήμα, μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα συγκριτικά για τις περιπτώσεις αλλά όχι ακριβή αποτελέσματα.

Τα βασικά βήματα στα οποία βασίστηκε αυτή η μελέτη ήταν η μοντελοποίηση του προβλήματος, η επίλυση της κάθε περίπτωσης και η εξαγωγή-αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Αυτά τα βήματα αναλύονται εκτενέστερα στη συνέχεια.

Διάρθρωση της εργασίας

Το πρώτο κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο (ενότητες 1.1 και 1.2), γίνεται ανάλυση του υδροστροβίλου τύπου Pelton δίνοντας βαρύτητα στα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη μεταφορά ενέργειας από το νερό στο δρομέα της μηχανής. Στο δεύτερο τμήμα παρουσιάζονται σύγχρονα ερευνητικά αποτελέσματα (πειραματικά και αριθμητικά) για την ανάλυση της ροής στη δέσμη και το δρομέα του υδροστροβίλου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται πληροφορίες σχετικά με την επιστήμη της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής και τις μεθόδους της που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετάται η απλούστερη περίπτωση της ροής σε αγωγό με κλίση 90° . Επίσης, γίνεται η επικύρωση (validation) του κώδικα με σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για την περίπτωση αυτή.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το υπολογιστικό πλέγμα (και οι εναλλακτικές του που απορρίφθηκαν) και τα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στις τελικές αριθμητικές προσομοιώσεις για τις διαφορετικές γεωμετρίες. Ακόμα παρουσιάζεται η διαδικασία της εξακρίβωσης (verification) του υπολογιστικού μοντέλου μέσω του ελέγχου ανεξαρτησίας του πλέγματος καθώς και οι διαφορετικές γεωμετρίες που εξετάστηκαν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης ανά περίπτωση για όλες τις διατάξεις των πτερυγίων.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Αυτό γίνεται με σύγκριση διάφορων μεγεθών όπως η τυπική απόκλιση των αξονικών ταχυτήτων και η μέση εφαπτομενική ταχύτητα σε συγκεκριμένες διατομές του αγωγού. Επίσης, στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα της αριθμητικής διερεύνησης καθώς και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Σε αυτό το τμήμα της εργασίας θα παρουσιαστούν εισαγωγικά και βιβλιογραφικά οι κατηγορίες, τα βασικά τμήματα και η λειτουργία των υδροστροβίλων με μεγαλύτερη έμφαση στους Pelton. Επίσης, θα παρουσιαστούν συνοπτικά και ορισμένα επιστημονικά άρθρα και ερευνητικές εργασίες σχετικές με το αντικείμενο.

1.1 Υδροηλεκτρική ενέργεια και υδροστρόβιλοι

Για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη η μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας αρχικά σε μηχανική. Οι υδροστρόβιλοι είναι οι μηχανές που συνηθέστερα χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της ενέργειας του υγρού σε μηχανική. Για να είναι δυνατή η αποτελεσματική μετατροπή, απαιτείται συνεχής ροή του διερχόμενου υγρού ενώ γίνεται ρύθμιση ώστε η παροχή στον υδροστρόβιλο να είναι σταθερή. Το τμήμα του υδροστροβίλου στο οποίο συμβαίνει η μετατροπή ονομάζεται δρομέας. Ο δρομέας είναι το στρεφόμενο τμήμα της μηχανής και καθώς αναπτύσσεται κινητήρια ροπή σε αυτό μετατρέπεται η ενέργεια του υγρού σε μηχανική.

Έπειτα, λαμβάνει χώρα η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας που παράχθηκε σε ηλεκτρική. Για να συμβεί αυτό, η άτρακτος του δρομέα βρίσκεται σε σύζευξη με άτρακτο ηλεκτρικής γεννήτριας. Δια μέσου της κοινής ατράκτου η γεννήτρια παραλαμβάνει το μηχανικό φορτίο του υδροστροβίλου και το μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. (Παπαντώνης, 2002)

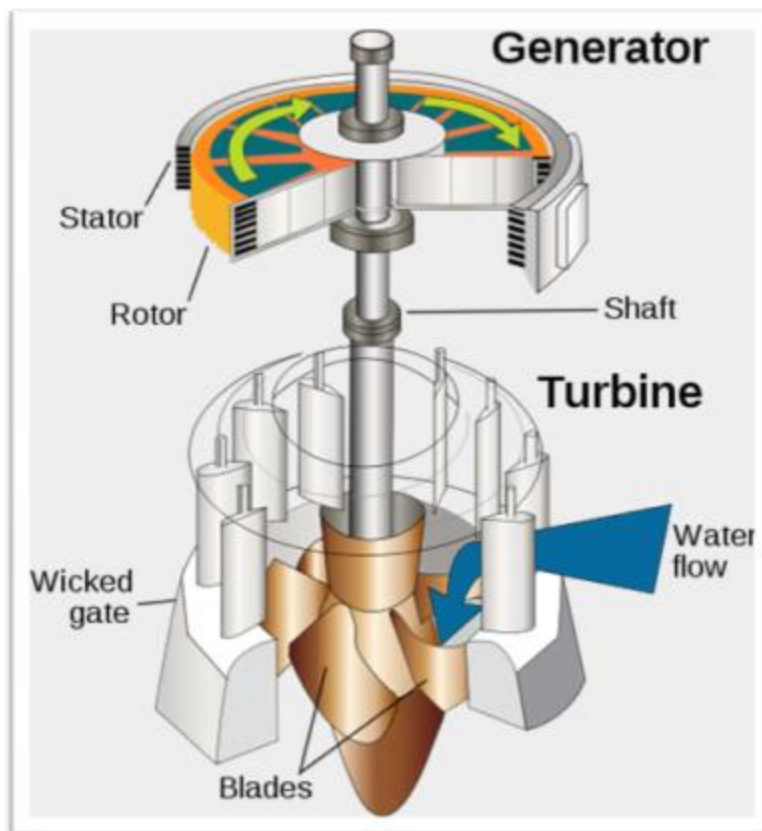
1.1.1 Κατάταξη των υδροστροβίλων

Οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται με κύριο κριτήριο τον βαθμό αντιδράσεως: οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως είναι ολικής προσβολής, δηλαδή όλος ο δρομέας λειτουργεί αξονοσυμμετρικά, ενώ οι υδροστρόβιλοι δράσεως (βαθμός αντίδρασης $r_e = 0$) είναι μερικής προσβολής και σε κάθε χρονική στιγμή τμήμα μόνο του δρομέα συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή.

Ως βαθμός αντίδρασης σε μια βαθμίδα ορίζεται ο λόγος της μεταβολής της δυναμικής ενέργειας του ρευστού διαμέσου της πτερωτής προς την μεταβολή της δυναμικής ενέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου από την βαθμίδα. Στην περίπτωση ασυμπίεστου ρευστού (όπως στην περίπτωση μας) η δυναμική ενέργεια ή ενέργεια εντατικής καταστάσεως εκφράζεται από την στατική πίεση p του ρευστού. Συνεπώς στους υδροστροβίλους δράσεως η ισχύς παράγεται αποκλειστικά από την ορμή του νερού.

Οι συνηθέστεροι τύποι υδροστροβίλων ολικής προσβολής είναι οι ακόλουθοι:

- Francis (ακτινικής και μικτής ροής)
- Deriaz (διαγώνιας ροής)
- Kaplan (αξονικής ροής) (σχήμα 1.1)
- Βολβοειδής ή Bulb (αξονικής ροής)
- Σωληνωτός ή Tube (αξονικής ροής)
- Δακτυλίου ή Straflo (αξονικής ροής)

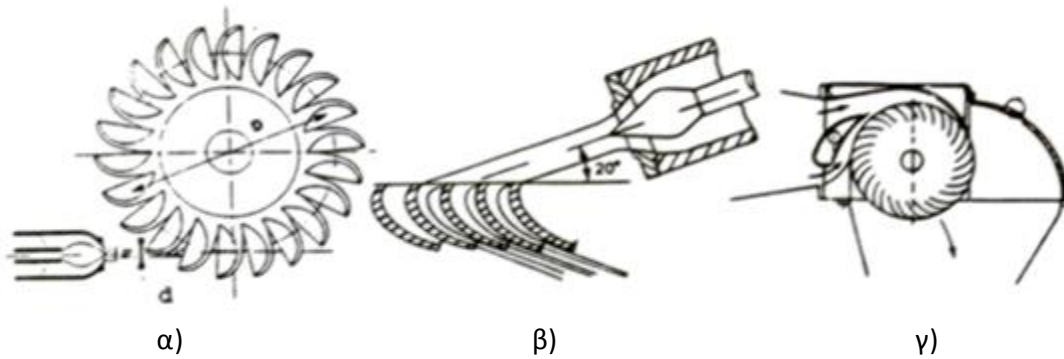


Σχήμα 1.1 Υδροστρόβιλος Kaplan

Ο Pelton με τον οποίο ασχολούμαστε στην εργασία αυτή ανήκει στην κατηγορία των υδροστροβίλων μερικής προσβολής (σχήμα 1.2) που περιλαμβάνει τους:

- Pelton
- Turgo
- Cross-Flow

Ο υδροστρόβιλος Pelton είναι ο τύπος που έχει επικρατήσει ενώ ο Turgo, που είναι ουσιαστικά μια παραλλαγή του, συναντάται σπανίως.



Σχήμα 1.2 σχηματική διάταξη υδροστροβίλων α)Pelton β)Turgo γ)Cross Flow

Στους υδροστροβίλους μερικής προσβολής η ροή δεν είναι αξονοσυμμετρική και κάθε χρονική στιγμή γίνεται τροφοδοσία όχι σε ολόκληρο το δρομέα αλλά σε τμήμα αυτού. Συνεπώς, κάθε χρονική στιγμή μόνο το τμήμα που τροφοδοτείται συμβάλλει ουσιαστικά στην μετατροπή ενέργειας για την οποία είναι υπεύθυνος ο δρομέας. Λόγω του ότι ολόκληρος ο δρομέας λειτουργεί σε χώρο όπου επικρατεί ομοιομορφία στις συνθήκες στατικής πίεσης, ο βαθμός αντιδράσεως τους είναι μηδενικός. Για το λόγο αυτό ονομάζονται και στρόβιλοι δράσης.

Οι υδροστρόβιλοι μερικής προσβολής χρησιμοποιούνται για μεγάλες τιμές υδραυλικής πτώσης και συγκεκριμένα για τιμές της τάξεως των 500 έως 1000 mΣΥ. Σε τέτοιες τιμές υδραυλικής πτώσης προτιμούνται από τους υδροστροβίλους αντιδράσεως για τους ακόλουθους λόγους.

Αρχικά, σε τόσο υψηλές τιμές ενέργειας παρατηρούνται μεγάλες ταχύτητες στη ροή. Οι υψηλές ταχύτητες σε συνδυασμό με τις μικρές τιμές παροχής άρα και τις μικρές τιμές των διατομών προκαλούν τη δραματική αύξηση των υδραυλικών απωλειών λόγω τριβής στο εσωτερικό της μηχανής. Αυτή η αύξηση των απωλειών έχει ως αποτέλεσμα την ανεπιθύμητη μείωση του βαθμού απόδοσης.

Επιπρόσθετα, οι τιμές της στατικής πίεσης που παρατηρούνται σε τέτοια μεγέθη υδραυλικής πτώσης είναι πολύ υψηλές. Συνεπώς, το απαραίτητο σπειροειδές κέλυφος των τυπικών υδροστροβίλων ολικής προσβολής θα υπόκειτο σε μεγάλες καταπονήσεις που θα απειλούσαν τη μηχανική του αντοχή. Δεδομένου ότι το κέλυφος είναι ούτως ή άλλως το μεγαλύτερο τμήμα της μηχανής, το κόστος κατασκευής του θα εκτοξευόταν σε περίπτωση που θα ήταν απαραίτητο να είναι ανθεκτικό σε τόσο μεγάλες τιμές στατικής πίεσης. Αντίθετα, στους υδροστροβίλους μερικής προσβολής το μόνο τμήμα που υφίσταται σημαντική στατική πίεση είναι το ακροφύσιο τροφοδοσίας το οποίο όμως είναι μικρό σε μέγεθος.

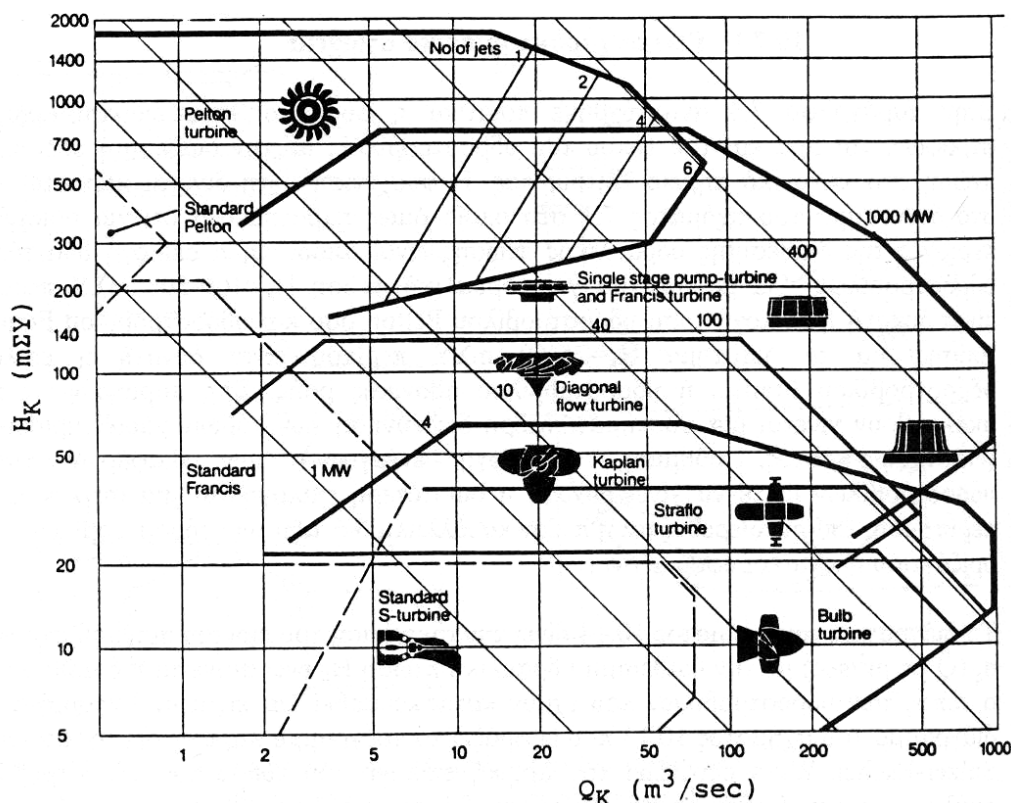
Τέλος, σε περίπτωση που γινόταν χρήση υδροστροβίλων αντιδράσεως, η μεγάλη διαφορά που παρατηρείται στο μέγεθος της στατικής πίεσης ανάντι και κατόντι του δρομέα, θα προκαλούσε την ανάπτυξη σημαντικού μεγέθους αξονικών δυνάμεων στο

δρομέα. Επίσης, η διαφορά αυτή θα προκαλούσε και την δραματική αύξηση των ογκομετρικών απωλειών στο εσωτερικό της μηχανής με αποτέλεσμα να απαιτούνται δαπανηρές κατασκευές σύνθετων λαβυρίνθων ώστε να διατηρούνται οι απώλειες αυτές στα αποδεκτά επίπεδα.

Άλλα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν οι υδροστροβίλοι δράσης σε σχέση με τους αντιδράσεως είναι η καλύτερη αντοχή σε άμμο, χώμα και γενικά σωματίδια τα οποία μπορεί να μεταφέρονται από το νερό. Επίσης, έχουν γενικότερα μικρότερο κόστος κατασκευής αλλά και συντήρησης καθώς είναι ευκολότερη η πρόσβαση στα περισσότερα τμήματα της μηχανής.

Ωστόσο, το κυριότερο μειονέκτημα των υδροστροβίλων μερικής προσβολής είναι η ακαταλληλότητα τους για χρήση σε μικρές διαθέσιμες υδραυλικές πτώσεις. Οι χαμηλές ειδικές ταχύτητες που θα παρουσίαζαν σε τέτοιες περιπτώσεις θα απαιτούσαν ειδικό σύστημα που θα αύξανε σε μεγάλο βαθμό τις στροφές ώστε να είναι δυνατή η σύζευξη της ατράκτου του δρομέα με γεννήτρια.

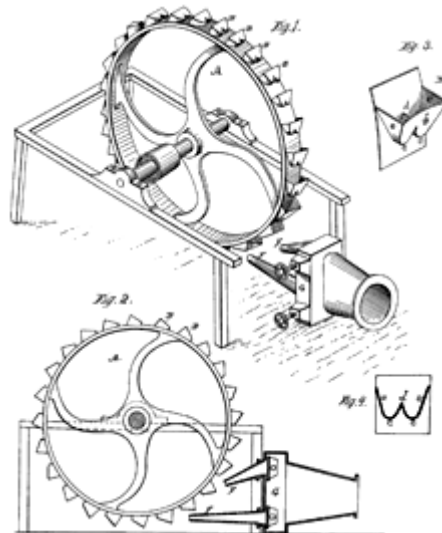
Υδροστροβίλοι τύπου Pelton κατασκευάζονται για μεγάλο εύρος τιμών ισχύος από μερικά KW έως εκατοντάδες MW. Οι υδροστροβίλοι τύπου Cross-Flow εμφανίζουν σχεδόν μηδενικό βαθμό αντίδρασης στο κανονικό σημείο λειτουργίας και προτιμούνται σε περιπτώσεις τιμής ισχύος μικρότερης των 2 MW και τιμές υδραυλικής πτώσης μικρότερης των 100m (Παπαντώνης, 2002). Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ένα διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλου για δεδομένη παροχή και υδραυλικό ύψος.



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλου για δεδομένη παροχή και υδραυλικό ύψος

Στη συνέχεια θα γίνει παρουσίαση των κύριων τμημάτων (και της εξέλιξης τους) του υδροστροβίλου Pelton που είναι και το αντικείμενο αυτής της εργασίας.

1.1.2 Περιγραφή του υδροστροβίλου Pelton



Σχήμα 1.3 Το σχέδιο του Lester Pelton με το οποίο κατοχύρωσε την εφεύρεση του το 1880

Ο υδροστρόβιλος Pelton (όπως όλοι οι υδροστρόβιλοι) αποτελείται από τρία βασικά τμήματα: το τμήμα εισόδου που κατευθύνει το νερό στον δρομέα, τον δρομέα και το τμήμα εξόδου. Εμείς σε αυτήν την εργασία ασχολούμαστε με το τελικό τμήμα της εισόδου.

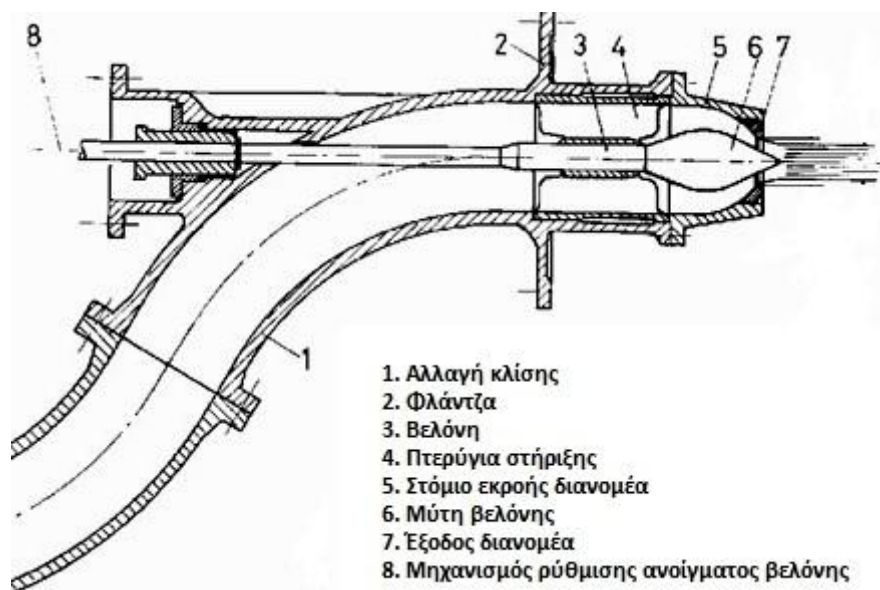
Τμήμα εισόδου

Το τμήμα εισόδου αποτελείται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια τροφοδοσίας σκοπός των οποίων είναι η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας (στατική πίεση) σε κινητική ενέργεια, μέσω του σχηματισμού μιας δέσμης κυκλικής διατομής. Κάθε δέσμη προσπίπτει στον δρομέα, δίνοντας του ώθηση κατά την περιφερειακή διεύθυνση που δημιουργεί την κινητήρια ροπή για την γεννήτρια.

Ως αφετηρία του τμήματος εισόδου λαμβάνεται η σφαιρική βάνα που εδράζεται στο άκρο του αγωγού προσαγωγής. Το τμήμα εισόδου εκτείνεται ως τα ακροφύσια τροφοδοσίας. Για χωροταξικούς, κυρίως, λόγους συνήθως ο αγωγός του συστήματος τροφοδοσίας στο τέλος του λίγο πριν το ακροφύσιο κάνει κάποια γωνία η οποία επηρεάζει την ροή δημιουργώντας εγκάρσιους στροβιλισμούς και ανομοιομορφία στο προφίλ της ταχύτητας.

Το κάθε ακροφύσιο περικλείει μία βελόνη η οποία δύναται να μετακινείται κατά μήκος του άξονα του ακροφυσίου. Σε μικρούς υδροστροβίλους σαν αυτόν του εργαστηρίου

μας η μετατόπιση της βελόνης γίνεται μηχανικά με τη βοήθεια βάκτρου. Σε μεγαλύτερους υδροστροβίλους με πολλά ακροφύσια γίνεται με τη βοήθεια υδραυλικού συστήματος. Η βελόνη είναι υπεύθυνη για την ρύθμιση της παροχής που διέρχεται από το ακροφύσιο και καταλήγει στο δρομέα. Καθώς μετακινείται η βελόνη, προκαλείται μεταβολή τόσο στη διατομή διέλευσης της παροχής όσο και στην διάμετρο της δέσμης με συνέπεια την μεταβολή της παροχής. Ωστόσο, η ταχύτητα της δέσμης δεν μεταβάλλεται σημαντικά καθώς παραμένει κοντά στην τιμή $c = \sqrt{2gh}$ (όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας και h η διαθέσιμη υδραυλική πτώση) όπως αυτή προκύπτει από εφαρμογή του θεμελιώδους θεωρήματος Βερνούλι. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα κύρια τμήματα του ακροφυσίου.



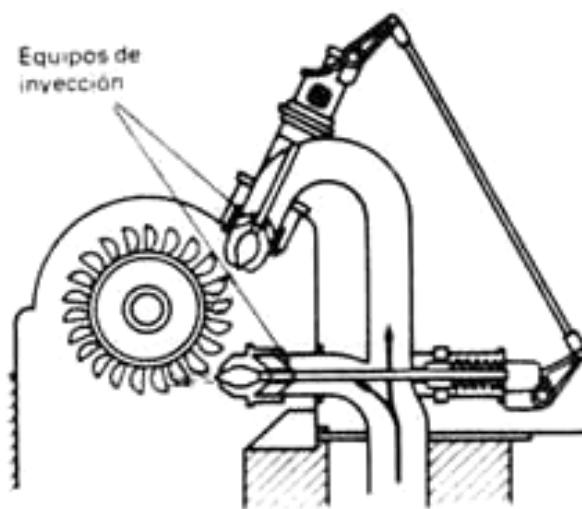
Σχήμα 1.4 Ακροφύσιο τροφοδοσίας Pelton

Σε μικρότερους υδροστροβίλους όπως αυτός του εργαστηρίου μας η ρύθμιση της θέσης της βελόνης δεν γίνεται με υδραυλικό αλλά με μηχανικό τρόπο. Η ρυθμιστική βελόνη μετακινείται με τη βοήθεια ενός βάκτρου το οποίο την φέρει στην άκρη του. Το βάκτρο στηρίζεται με τη βοήθεια εδράνων σε πτερύγια, 3 ή 4 συνήθως, τα οποία πέρα από το ρόλο τους αυτό επηρεάζουν και την ροή του ρευστού στο τελικό τμήμα του ακροφυσίου λίγο πριν την βελόνη και το τελικό συγκλίνον ακροφύσιο. Αντικείμενο της μελέτης μας εδώ είναι το πως επηρεάζεται η ροή από το σύστημα βάκτρο- πτερύγια στο τελικό τμήμα της εισόδου. Στην παρούσα μελέτη δεν περιλαμβάνεται η βελόνη και το τελικό συγκλίνον ακροφύσιο.

Ένας υδροστροβίλος Pelton μπορεί να έχει ένα ή περισσότερα ακροφύσια με μέγιστο αριθμό τα 6 ακροφύσια ανά δρομέα. Τα ακροφύσια τοποθετούνται στο ίδιο επίπεδο με τον δρομέα. Συγκεκριμένα, τοποθετούνται στο κάθετο προς το έδαφος επίπεδο όταν είναι ένα ή δύο σε αριθμό ενώ προτιμάται οριζόντια τοποθέτηση τους σε περίπτωση που τα ακροφύσια είναι τρία και άνω. Γενικά όσο μεγαλύτερης ισχύος είναι ο

υδροστρόβιλος τόσο περισσότερα ακροφύσια διαθέτει. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με σκοπό την ελαχιστοποίηση της επίδρασης που έχει η δέσμη του κάθε ακροφυσίου στις δέσμες των υπολοίπων.

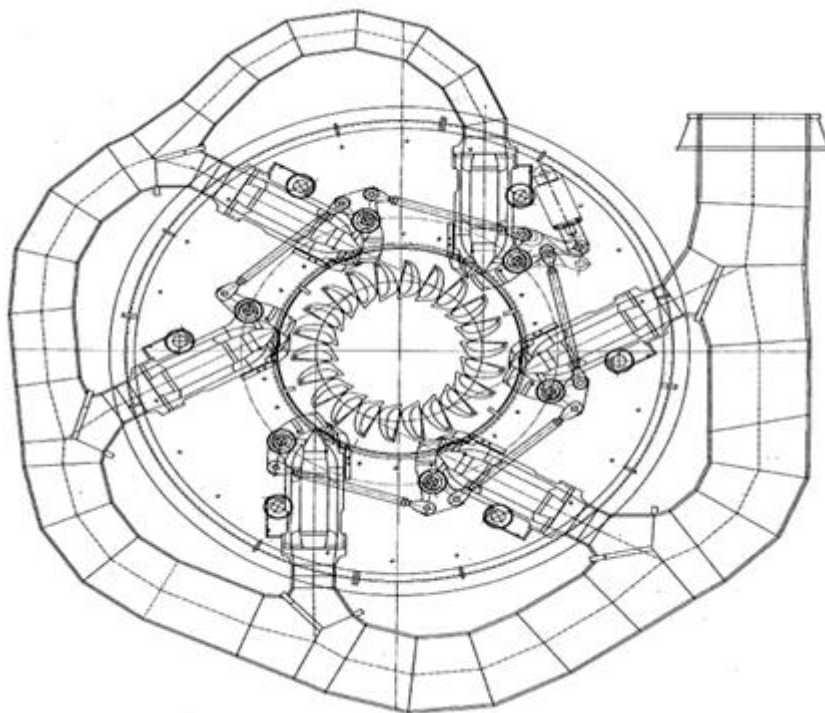
Το ακροφύσιο υπόκειται σε μεγάλες καταπονήσεις λόγω των υψηλών τιμών τόσο της στατικής πίεσης όσο και των μεγάλων ταχυτήτων που αναπτύσσονται στην περιοχή. Για το λόγο αυτό απαιτείται στιβαρή κατασκευή του. Συνήθως, για την κατασκευή του σώματος του ακροφυσίου χρησιμοποιείται χυτοχάλυβας. Το άκρο της βελόνης κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα και αντικαθίσταται από καινούριο ανά κάποιες ώρες λειτουργίας καθώς υφίσταται διάβρωση λόγω της υψηλής ταχύτητας της ροής και τον σωματιδίων που αυτή μεταφέρει.



Σχήμα 1.5 Ακροφύσιο τροφοδοσίας Pelton



Σχήμα 1.6 Βελόνη και πτερύγια σε ακροφύσιο (Canyon Hydro)



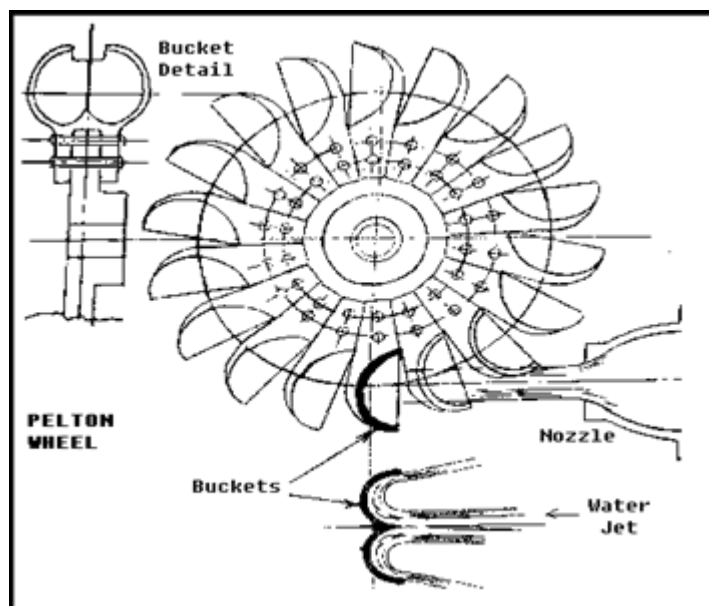
Σχήμα 1.7 Διάταξη υδροστροβίλου Pelton με 6 ακροφύσια

Δρομέας

Ο δρομέας έχει σχήμα κυκλικού δίσκου στην περιφέρεια του οποίου εδράζονται ειδικά σχεδιασμένα σκαφίδια. Το 1879, ο Lester Pelton δημιούργησε έναν δρομέα δράσεως με διπλά σκαφίδια στον οποίο το νερό εξερχόταν από το πλάι, μειώνοντας τις αντίστοιχες απώλειες κινητικής ενέργειας. Αργότερα το 1895, ο William Doble βελτίωσε την ιδέα του Pelton και δημιούργησε ένα ελλειπτικό σκαφίδιο με μια τομή επιτρέποντας στην δέσμη ύδατος να εισέλθει ομαλά στο σκαφίδιο. Η σημερινή πρακτική στη σχεδίαση σκαφιδίων βασίζεται στην προηγούμενη εμπειρία ενώ τα τελευταία χρόνια γίνεται έρευνα ώστε να κατανοηθούν καλύτερα οι λεπτομέρειες της αρκετά περίπλοκης τυρβώδους ροής στον δρομέα με την βοήθεια της υπολογιστικής ρευστομηχανικής και πειραμάτων.

Το κάθε σκαφίδιο μοιάζει σαν να είναι χωρισμένο στη μέση και να αποτελείται από δύο υπό-σκαφίδια τα οποία είναι συμμετρικά ως προς το κάθετο στο μέσο του σκαφιδίου επίπεδο. Η διαμόρφωση αυτή είναι απαραίτητη ώστε το μέσο του σκαφιδίου – στο οποίο προσκρούει και η δέσμη του υγρού – να μην αποτελεί νεκρό σημείο.

Κατασκευαστικά ο δρομέας είναι είτε ολόσωμος είτε τα σκαφίδια προσαρμόζονται μέσω κοχλίωσης στον δρομέα. Λόγω των πολύ ισχυρών δυνάμεων που δέχονται τα σκαφίδια και της διάβρωσης που υφίστανται από το νερό κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα. Η διάμετρος του δρομέα είναι συνήθως 12 με 18 φορές μεγαλύτερη της δέσμης στο κανονικό σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου.



Σχήμα 1.8 Δρομέας υδροστροβίλου Pelton

Τμήμα εξόδου

Στους υδροστροβίλους Pelton το τμήμα εξόδου είναι σχετικά απλό. Εκμεταλλευόμενο την βαρυτική έλξη συλλέγει το νερό που πέφτει από τον υδροστρόβιλο. Έπειτα το οδηγεί στην φυσική κοίτη του ποταμού ή στον κάτω ταμιευτήρα ανάλογα το έργο. Για την συλλογή του ύδατος που εκτοξεύεται προς διάφορες κατευθύνσεις λόγω της ιδιαίτερης διαρρύθμισης των σκαφιδίων ο δρομέας και ένα τμήμα του συστήματος διανομής – συνήθως πλησίον στα ακροφύσια – καλύπτεται από ειδικό περίβλημα το οποίο είναι και αυτό συνδεδεμένο με το τμήμα εξόδου. Η σχεδίαση του περιβλήματος αποκτά ιδιαίτερη σημασία στους υδροστροβίλους με πολλά ακροφύσια τροφοδοσίας.

Σήμερα, τα περισσότερα τμήματα των υδροστροβίλων μεγάλης ισχύος αναλύονται υπολογιστικά μέσω CFD και η έρευνα στοχεύει στην συνολική σχεδιαστική βελτιστοποίηση των σκαφιδίων και των συστημάτων διανομής. Ακόμη πεδίο έρευνας μέσω CFD είναι η κατανόηση της ροής στο τμήμα του ακροφυσίου αλλά και στη δέσμη ύδατος και τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης αυτής με τον αέρα και τα σκαφίδια. Η ροή σε αυτά τα τμήματα είναι αρκετά σύνθετη και μόνο τα τελευταία χρόνια έχει καταστεί εφικτή η προσέγγιση της με αριθμητικά μοντέλα.

1.1.3 Απώλειες ενέργειας στον υδροστρόβιλο

Ο στόχος της ερευνάς στα διάφορα υποσυστήματα του υδροστροβίλου είναι τελικά η βελτιστοποίηση του και κυρίως η βελτίωση του βαθμού απόδοσης του και άρα η μείωση των απωλειών. Συνεπώς κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία σύντομη αναφορά στα είδη των

απωλειών αυτών. Θα ασχοληθούμε με τις απώλειες των υδροστροβίλων Pelton που είναι και το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

Απώλειες υδροστροβίλου Pelton

- Μηχανικές απώλειες
- Υδραυλικές απώλειες κρούσεως
- Υδραυλικές απώλειες τριβής
- Απώλειες λόγω της δέσμης και της αλληλεπίδρασης της με τα σκαφίδια

Μηχανικές απώλειες

Ως μηχανικές απώλειες χαρακτηρίζονται οι απώλειες μηχανικής ισχύος που αποδίδεται στην άτρακτο του δρομέα. Στον υδροστρόβιλο Pelton αυτές οφείλονται στα έδρανα. Ακόμη στις μηχανικές απώλειες περιλαμβάνονται και οι απώλειες ανεμισμού. Οι απώλειες αυτές οφείλονται στην κίνηση του περιβάλλοντα αέρα η οποία προκαλείται λόγω της περιστροφής του δρομέα.

Υδραυλικές απώλειες κρούσεως

Ως υδραυλικές απώλειες κρούσεως χαρακτηρίζονται οι απώλειες που οφείλονται στη διαφορά της γωνίας πρόσπτωσης της ροής στα πτερύγια του δρομέα σε σχέση με την αντίστοιχη γωνία των πτερυγίων. Οι υδραυλικές απώλειες κρούσης συμβολίζονται με δh_a και μηδενίζονται για τις παροχές στις οποίες η γωνία πρόσπτωσης της ροής στα πτερύγια είναι μηδενική.

Υδραυλικές απώλειες τριβής

Ως υδραυλικές απώλειες τριβής χαρακτηρίζονται οι απώλειες που οφείλονται στην συνεκτικότητα του ρευστού. Δηλαδή οφείλονται κατά βάση στην αλληλεπίδραση του ρευστού με τα τοιχώματα. Οι απώλειες τριβής λαμβάνουν χώρα καθ' όλο το μήκος των γραμμών ροής από τη διατομή εισόδου μέχρι την διατομή εξόδου. Συμβολίζονται με δh_t και υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\delta h_t = \zeta_t \cdot Q^2$$

Ο συντελεστής ζ_t έχει σταθερή τιμή στην περιοχή της πλήρως τυρβώδους ροής. Στις περιοχές της μεταβατικής και της στρωτής ροής είναι αντιστρόφως ανάλογος του αριθμού Reynolds. Κατ' αυτόν τον τρόπο, όσο μεγαλύτερο το μέγεθος του υδροηλεκτρικού έργου, δηλαδή για μεγάλες υδραυλικές διαμέτρους και πλήρως τυρβώδη ροή, οι υδραυλικές απώλειες μειώνονται. Οι υδραυλικές απώλειες διακρίνονται σε γραμμικές και εντοπισμένες.

Απώλειες λόγω της δέσμης και της αλληλεπίδρασης της με τα σκαφίδια

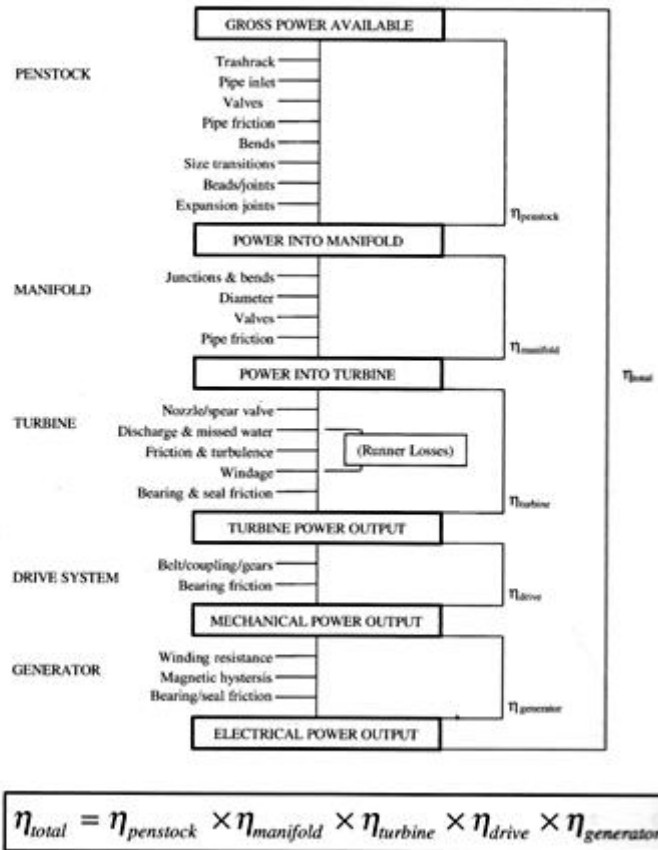
Αυτές οι απώλειες οφείλονται στην κακή ποιότητα της δέσμης λόγω της επίδρασης με τον αέρα (ελεύθερη επιφάνεια δέσμης) αλλά και των δευτερευουσών ροών λόγω των διαμορφώσεων στο σύστημα έγχυσης του υδροστροβίλου. Ο μηχανισμός δεν έχει διερευνηθεί πλήρως και είναι ένα από τα αντικείμενα της έρευνας σήμερα τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά μέσω του CFD. Τα φαινόμενα της τυρβώδους ροής στην δέσμη και στην ροή πάνω στα σκαφίδια είναι αρκετά σύνθετα και μόλις τα τελευταία χρόνια έχει καταστεί τεχνολογικά εφικτή η αριθμητική προσομοίωση και πειραματική μελέτη τους. Η δέσμη όταν βγαίνει από το ακροφύσιο στον αέρα αλληλεπιδρά με αυτόν και σε συνδυασμό με τις όποιες εφαπτομενικές ταχύτητες έχουν αποκτήσει από πριν τα στοιχεία της, αλλοιώνεται το σχήμα της και η θέση της με αποτέλεσμα τα σκαφίδια τελικά να μην μπορούν να απορροφήσουν την ενέργεια που θα απορροφούσαν αν η δέσμη ήταν ιδανική. Αυτή είναι μια απλουστευμένη θεώρηση. Στην συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα γίνει μια πιο λεπτομερής θεώρηση της ροής στη δέσμη και στα σκαφίδια καθώς και αναφορά σε επιστημονικά άρθρα και δημοσιεύσεις που ασχολούνται με το αντικείμενο είτε πειραματικά είτε αριθμητικά. Αυτό έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία αφού εξηγεί γιατί μας ενδιαφέρει η εξομάλυνση της ροής στο τμήμα πριν το τελικό συγκλίνον ακροφύσιο.

Στις σύγχρονες κατασκευαστικές μελέτες υδροστροβίλων μεγάλης ισχύος ο υπολογισμός των απωλειών δεν γίνεται με χρήση εμπειρικών τύπων αλλά με προσομοίωση της λειτουργίας (ολόκληρου ή τμηματικά) του υδροστροβίλου. Αυτό βοηθάει στην πρόβλεψη με ακρίβεια των μεγεθών του υδροστροβίλου (απώλειες, βαθμός απόδοσης, χαρακτηριστική κλπ) ενώ παράλληλα δίνει πολλές δυνατότητες βελτιστοποίησης στα επιμέρους τμήματα χωρίς την ανάγκη κατασκευής μοντέλων και διεξαγωγή πειραμάτων.

Στο επόμενο σχήμα δίνεται ένα συνοπτικό διάγραμμα με τα είδη των απωλειών στα διάφορα τμήματα του υδροστροβίλου.

POWER LOSSES

EFFICIENCIES



Σχήμα 1.9 Οι απώλειες των διαφόρων υποσυστημάτων του υδροστροβίλου (Thake, 2000)

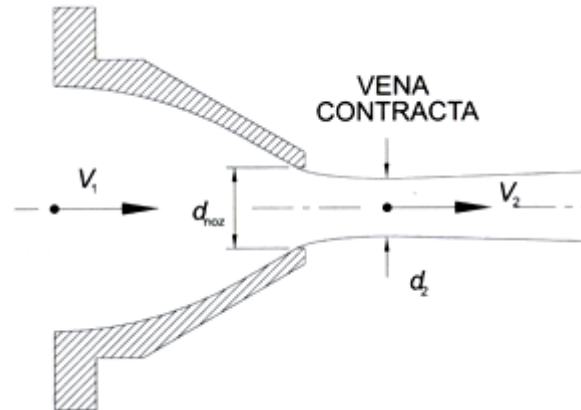
1.2 Η ροή στη δέσμη

Σε αυτό το τμήμα της εργασίας θα παρουσιαστεί η δημιουργία της δέσμης, τα βασικά χαρακτηριστικά της και ο τρόπος αλληλεπίδρασης της με τα σκαφίδια. Επίσης, θα γίνουν αναφορές σε δημοσιευμένες εργασίες σχετικές με αυτό το θέμα.

1.2.1 Δημιουργία της δέσμης

Στους υδροστροβίλους Pelton το νερό που αλληλεπιδρά με τα σκαφίδια βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση. Στο ακροφύσιο η στατική πίεση (δυνητική ενέργεια του ρευστού) μετατρέπεται εξολοκλήρου σε κινητική ενέργεια αφού έχουμε στρόβιλο δράσεως που εκμεταλλεύεται μόνο την ορμή του ρευστού. Το νερό μπαίνοντας στο ακροφύσιο συγκλίνει και συνεχίζει βγαίνοντας από αυτό, ως κυκλική δέσμη πλέον, να συγκλίνει μέχρι που φτάνει μία ελάχιστη διάμετρο που λέγεται Vena Contracta. Σε αυτό το σημείο οι γραμμές ροής μέσα στη δέσμη είναι παράλληλες. Η πίεση της δέσμης φτάνει την ατμοσφαιρική ενώ

η ροή συνεχίζει να επιταχύνεται μέχρι το σημείο της Vena Contracta. Η απόσταση του σημείου αυτού από το ακροφύσιο έχει παρατηρηθεί περίπου ίση με μια διάμετρο του ακροφυσίου. Μετά από αυτό το σημείο η δέσμη αρχίζει να ανοίγει με τη διάμετρο της να αυξάνεται (διασπορά δέσμης) λόγω της τριβής του ρευστού με τον αέρα.



Σχήμα 1.10 Η δέσμη στην έξοδο του ακροφυσίου

Η μέση ταχύτητα της πραγματικής δέσμης όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.1.2 είναι:

$$v_{jet} = C_v \cdot \sqrt{2gH_n}$$

Όπου

v_{jet} : η ταχύτητα της δέσμης σε m/s

H_n : η υδραυλική ενέργεια στη θέση του ακροφυσίου σε mΣΥ

g : επιτάχυνση της βαρύτητας σε $\frac{m}{s^2}$

C_v : Συντελεστής απωλειών ακροφυσίου

Η διαφορά με τον προηγούμενο τύπο είναι στον συντελεστή απωλειών ακροφυσίου. Αυτός ο συντελεστής εισάγεται διότι το ακροφύσιο δεν είναι ιδανικό και οι απώλειες εξαιτίας του πρέπει να ληφθούν υπόψη. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι ο συντελεστής C_v συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.95-0.99. Ο παραπάνω τύπος ισχύει για το σημείο vena contracta αλλά μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι αυτή είναι η ταχύτητα σε κάθε σημείο της δέσμης.

Η διατομή της δέσμης στο σημείο vena contracta είναι:

$$A_2 = C_c \cdot A_{noz}$$

όπου

A_2 : η ελάχιστη διατομή της δέσμης

A_{noz} : η διατομή του στομίου του ακροφυσίου

C_c : συντελεστής που εξαρτάται από τη γεωμετρία του ακροφυσίου

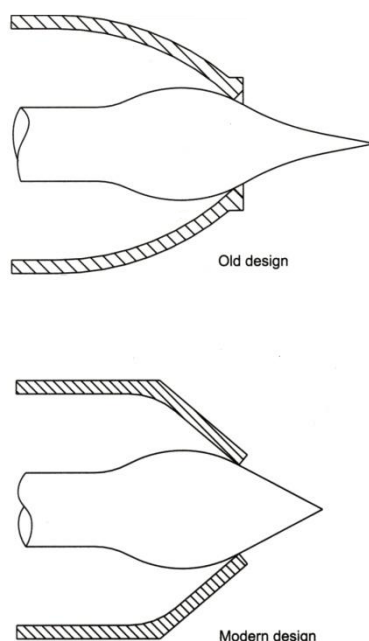
Η παροχή τελικά στο ακροφύσιο θα είναι:

$$Q = C_D \cdot A_{noz} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

όπου

$$C_D = C_c \cdot C_v$$

Τα προηγούμενα ισχύουν για συγκλίνον ακροφύσιο που δεν έχει βελόνη μέσα του για ρύθμιση της παροχής. Η βελόνη σχεδιάζεται για να δίνει τις ελάχιστες απώλειες και το σχήμα της έχει βελτιωθεί προς αυτήν την κατεύθυνση. Παλιότερα οι βελόνες ήταν σχεδιασμένες μακριές με πολύ μικρές γωνίες και καμπυλότητα στην άκρη τους. Αυτό δημιουργούσε μια περιοχή χαμηλής πίεσης στο κέντρο της δέσμης και έντονα φαινόμενα σπηλαίωσης στην ίδια τη βελόνη. Οι σύγχρονες βελόνες είναι κωνικές και έχουν μεγαλύτερες γωνίες στην άκρη τους. Η παροχή ρυθμίζεται με την κίνηση της βελόνας αξονικά σε σχέση με το ακροφύσιο, μεταβάλλοντας την ελεύθερη διατομή εξόδου. Όταν η βελόνα ακουμπά στα χείλη του ακροφυσίου έχουμε θεωρητικά μηδενική παροχή.



Σχήμα 1.11 Παλαιότερη και σύγχρονη σχεδίαση βελόνης

Η διάμετρος της δέσμης σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Thake, 2000) με την βελόνη θα είναι:

$$d_{jet} = \sqrt{2 \cdot \sin \frac{a}{2} \cdot (2 \cdot s \cdot D_0 - s^2 \cdot \sin a)}$$

όπου:

α : γωνία βελόνης

s : Μετατόπιση της βελόνης

D_0 : η διάμετρος εξόδου του ακροφυσίου

Ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού της δέσμης υπάρχουν και άλλες σχέσεις της διαμέτρου της δέσμης όπως αυτή (Nechleba, 1957):

$$d_{jet} = \sqrt{\frac{Q \cdot \sin a}{2.66 \cdot \mu \cdot c_{jet} \cdot \sqrt{H_n}}}$$

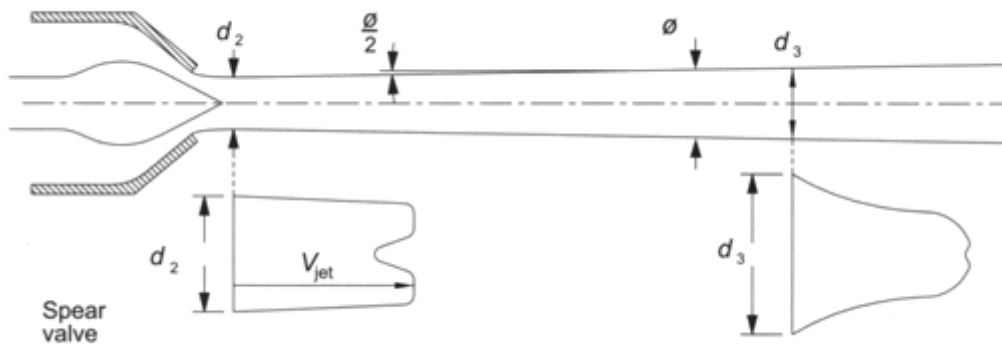
όπου

μ : συντελεστής ροής με τυπικές τιμές 0.80-0.88

1.2.2 Διασπορά της δέσμης και η σημασία της

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το σημείο της ελάχιστης διαμέτρου της δέσμης απέχει από το ακροφύσιο απόσταση μίας διαμέτρου. Η διασπορά αρχίζει να συμβαίνει λίγο μετά από αυτό. Η διάμετρος της δέσμης είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ακριβώς λόγω των πολλών και γρήγορα εξελισσόμενων φαινομένων που συμβαίνουν. Η επιφάνεια της δέσμης συνεχώς σπάει και μετασχηματίζεται. Ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς της δέσμης είναι αντικείμενο έρευνας τόσο πειραματικά όσο και με υπολογιστικές προσομοιώσεις.

Η δέσμη ανοίγει λόγω της έντονης στροβιλότητας μέσα της και της τριβής της επιφάνειας της με τον αέρα. Στο επόμενο σχήμα δίνεται μια γενική απεικόνιση της κατανομής της ταχύτητας σε διάφορες θέσεις της αποκλίνουσας δέσμης. Παρατηρούμε ότι στο σημείο vena contracta η κατανομή της ταχύτητας είναι ομοιόμορφη. Υπάρχει μια μικρή επιβράδυνση της ροής στην εξωτερική επιφάνεια λόγω της τριβής με τα τοιχώματα του ακροφυσίου. Επίσης υπάρχει στο κέντρο της δέσμης μια περιοχή με χαμηλές ταχύτητες λόγω της τριβής με την βελόνη. Στο σημείο d_3 που βρίσκεται μία διάμετρο μετά το vena contracta η τριβή με τον αέρα έχει επιβραδύνει την εξωτερική περιοχή της δέσμης.



Σχήμα 1.12 Κατανομή ταχυτήτων της δέσμης

Η διασπορά της δέσμης εξαρτάται κυρίως από τους εξής παράγοντες:

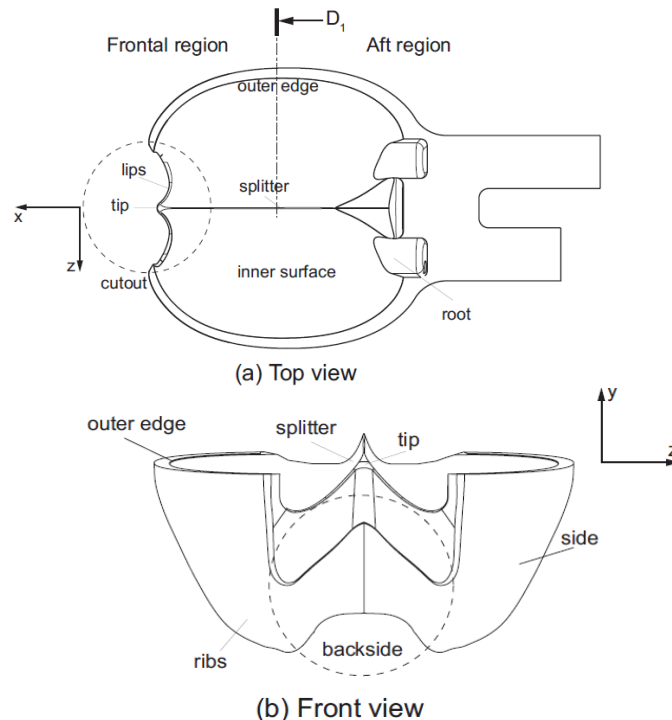
1. Από την ταχύτητα της δέσμης η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την διαθέσιμη υδραυλική πτώση στο ακροφύσιο. Όσο μεγαλώνει το h_{noz} τόσο μεγαλώνει και η διασπορά.
2. Από την γεωμετρία του ακροφυσίου και της βελόνης.
3. Από την θέση της βελόνης. Σε μικρότερα ανοίγματα της βελόνης η διασπορά της δέσμης είναι μεγαλύτερη από ότι στο άνοιγμα της κανονικής παροχής.
4. Την επιφανειακή τραχύτητα της βελόνης και του ακροφυσίου.
5. Την ροή ανάντι της δέσμης. Αν αυτή είναι ομαλή και χωρίς έντονες δευτερεύουσες ροές η δέσμη ανοίγει λίγο ενώ αν είναι έντονα τυρβώδης με ισχυρές δίνες η δέσμη εμφανίζει έντονη διασπορά και σε ακραίες περιπτώσεις διαλύεται και μετατρέπεται σε spray.
6. Αλληλεπίδραση με γειτονικές δέσμες. Ακόμα και μικρά σταγονίδια που μπορεί να προσκρούσουν στην δέσμη από τις γειτονικές της μπορεί να την εκτρέψει και να της δημιουργήσει έντονες τοπικές διαταραχές.

Από τα προηγούμενα φαίνεται ακόμα η σημασία του να είναι κοντά το ακροφύσιο στον δρομέα. Τα σκαφίδια έχουν μία μέγιστη διάμετρο δέσμης που μπορούν να διαχειριστούν. Έτσι υπάρχει ο κίνδυνος αν δεν είναι αρκετά κοντά στο ακροφύσιο η διάμετρος της δέσμης, η οποία μεγαλώνει όσο προχωράει, να ξεπεράσει τα όρια των σκαφιδίων. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τμήμα της δέσμης του νερού να μην αλληλεπιδρά καθόλου με τα σκαφίδια ή να μην προσπίπτει στα σωστά σημεία. Επίσης η ενέργεια της δέσμης μειώνεται λόγω της τριβής με τον αέρα και της απωλειών λόγω τύρβης συνεπώς όσο μειώνεται η απόσταση του ακροφυσίου από τον δρομέα τόσο μειώνονται και οι ενεργειακές απώλειες.

Η ανάλυση στην ροή της δέσμης δείχνει τη σημασία της ομαλής ροής, χωρίς σημαντικές δευτερεύουσες ροές και μεγάλη στροβιλότητα ανάντι του ακροφυσίου. Σκοπός

της εργασίας είναι να εξεταστεί ο τρόπος και ο βαθμός στον οποίο επηρεάζουν τη ροή ανάντι το βάκτρο και τα πτερύγια στήριξης του.

1.2.3 Αλληλεπίδραση της δέσμης με τα σκαφίδια



Σχήμα 1.13 Σχεδίαση σύγχρονου σκαφιδίου

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε τη σχεδίαση σύγχρονου σκαφιδίου δρομέα Pelton. Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στον τρόπο με τον οποίο τα σκαφίδια μετατρέπουν την ενέργεια της δέσμης σε ροπή αλλά και της ροής στα σκαφίδια. Για πιο λεπτομερή ανάλυση παραπέμπεται ο αναγνώστης στην βιβλιογραφία (Thake, 2000),(Nechleba, 1957).

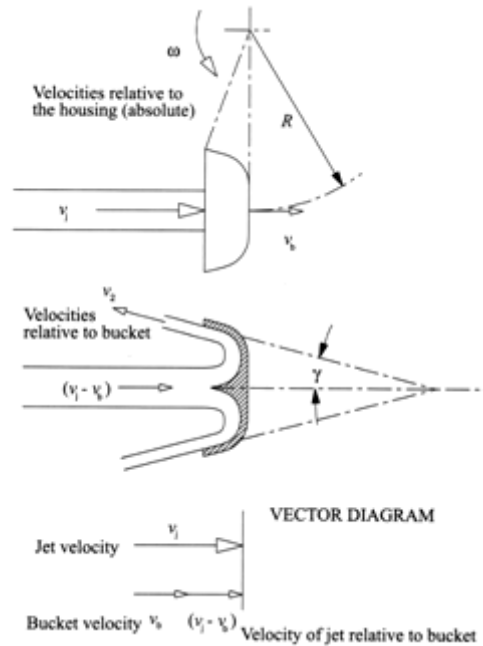
Κατά την περιστροφή του δρομέα η δέσμη κατευθύνεται στην ονομαστική διάμετρο του δρομέα. Η ονομαστική διάμετρος του δρομέα (Pitch Circle Diameter or PCD) είναι η διάμετρος του κύκλου που ορίζεται με κέντρο το κέντρο του δρομέα και ακτίνα την απόσταση του κέντρου της δέσμης από το κέντρο του δρομέα. Η δέσμη έχει ταχύτητα (v_j) σχεδόν διπλάσια των σκαφιδίων (v_b). Τα σκαφίδια απομακρύνονται από τη δέσμη λόγω της περιστροφής του δρομέα στην κατεύθυνση της δέσμης. Συνεπώς η σχετική ταχύτητα της δέσμης όταν πέφτει στα σκαφίδια είναι $v_j - v_b$. Η δέσμη χωρίζεται από το splitter σε δύο τμήματα και περνάει στις δύο κοιλότητες του σκαφιδίου τις οποίες διατρέχει και εξέρχεται από τις πλευρές. Οι κοιλότητες είναι λείες και ομοιόμορφες ώστε το νερό να μην χάνει ταχύτητα ενώ τις διατρέχει. Αν δεν υπήρχαν καθόλου απώλειες το νερό θα έβγαινε από τα σκαφίδια με ταχύτητα ίση με της εισόδου του.

Αν υποθέσουμε, θεωρητικά, ότι η ταχύτητα της δέσμης στην είσοδο του σκαφιδίου είναι ακριβώς διπλάσια της ταχύτητας του σκαφιδίου τότε (θεωρώντας μηδενικές απώλειες) τότε η σχετική ταχύτητα εξόδου του νερού θα είναι $v_j - v_b = 2v_b - v_b = v_b$. Συνεπώς το σκαφίδιο θα κινείται με ταχύτητα v_b ενώ το νερό θα εξέρχεται με σχετική ταχύτητα v_b στην αντίθετη κατεύθυνση. Τότε η πραγματική ταχύτητα του ρευστού θα είναι ουσιαστικά μηδενική. Αυτό θα σημαίνει ότι το ρευστό έχασε όλη την ενέργεια του (αφού όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ιδανικά στο ακροφύσιο έχει μετατραπεί όλη η ενέργεια του ρευστού σε κινητική) την οποία παρέλαβαν τα σκαφίδια. Στην ιδανική περίπτωση που περιγράφεται, το νερό θα είχε μηδενική ταχύτητα στην έξοδο του από το σκαφίδιο, θα έμενε ακίνητο και έτσι υπό την επίδραση της βαρύτητας θα έπεφτε στον αγωγό εξόδου.

Στην πράξη κάτι τέτοιο είναι αδύνατο καθώς η τριβή με τα τοιχώματα του σκαφιδίου επηρεάζει σημαντικά τη ροή του ρευστού ενώ και η δέσμη (όπως αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα) αποκλίνει του ιδανικού πριν την είσοδο της στο σκαφίδιο. Επίσης το νερό όταν βγαίνει από το σκαφίδιο είναι επιθυμητό να έχει μια μικρή ταχύτητα (που ουσιαστικά είναι απώλεια ενέργειας) προκειμένου να απομακρύνεται και να μην αλληλεπιδρά με το επόμενο σκαφίδιο που ακολουθεί. Η γωνία γ (που φαίνεται στο επόμενο σχήμα) των πλευρών του σκαφιδίου κάνει το νερό να εκτρέπεται με μια μικρή κλίση από το σκαφίδιο προκειμένου να αποφευχθεί η αλληλεπίδραση με το επόμενο. Η ταχύτητα στην έξοδο του νερού είναι απώλεια και σχεδιαστικός στόχος είναι να είναι η μικρότερη δυνατή.

Ακόμα οι τριβές του ρευστού με τον αέρα και τα τοιχώματα επηρεάζουν την ταχύτητα εξόδου του. Συνεπώς αυτή θα είναι μικρότερη της θεωρητικής: $v_{out} = \zeta \cdot (v_j - v_b)$ όπου ζ είναι ο βαθμός απόδοσης του σκαφιδίου. Η τιμή του ζ υπολογίζεται πειραματικά και υπολογιστικά ενώ η αύξηση του είναι αντικείμενο έρευνας. Για καλά σχεδιασμένα σκαφίδια στην ονομαστική παροχή μπορεί να φτάσει το 0.98. Σε μικρούς υδροτροβίλους και σε διαφορετικές παροχές η τυπική τιμή του είναι 0.85 ενώ σε σκαφίδια κακής σχεδίασης ή διαβρωμένα από σπηλαιώση μπορεί να φτάσει το 0.65.

Η παραπάνω είναι μια απλουστευμένη δισδιάστατη ανάλυση που δεν λαμβάνει υπόψη την περιστροφή του δρομέα και το γεγονός ότι περισσότερα από ένα σκαφίδια κόβουν την δέσμη ταυτόχρονα ενώ περιστρέφονται.



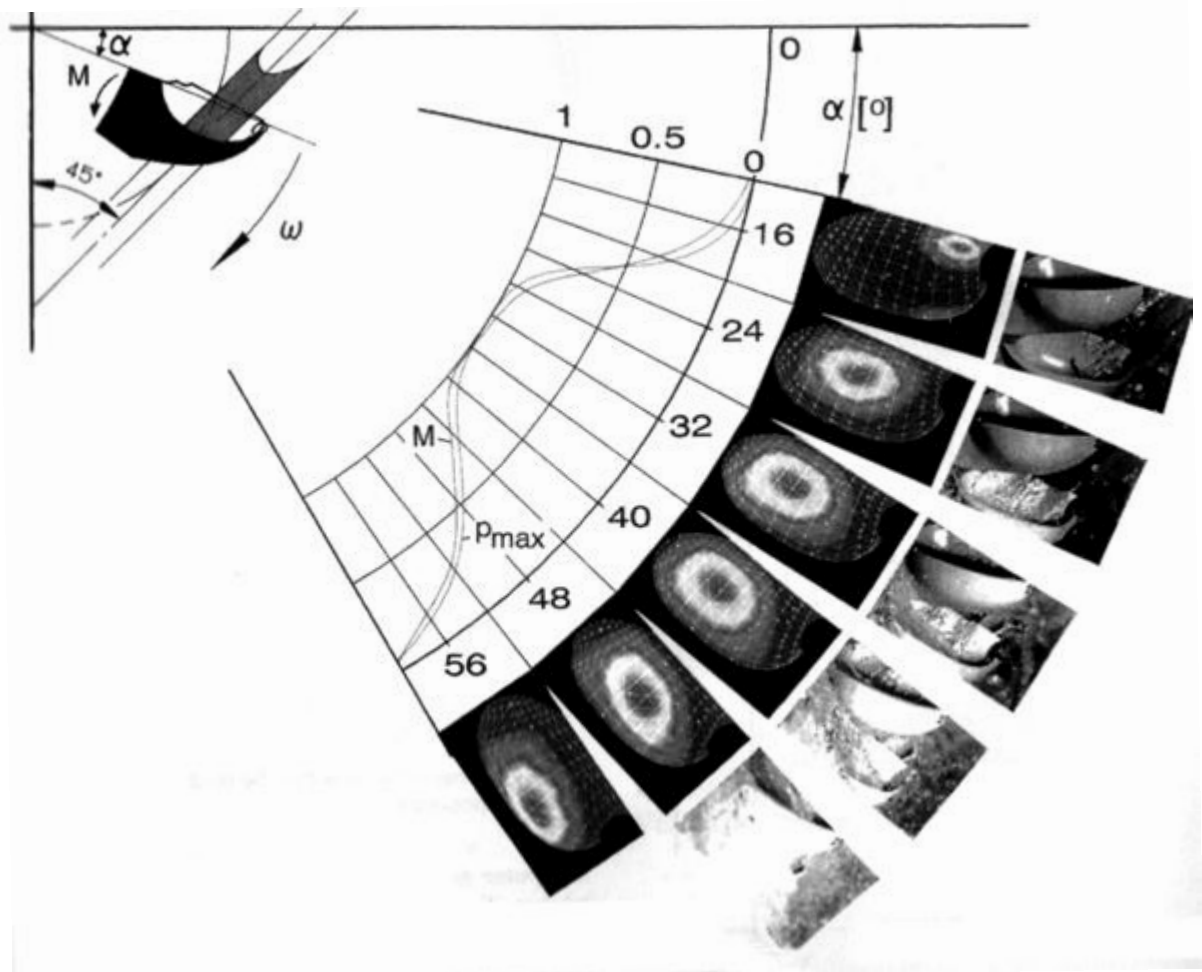
Σχήμα 1.14 Απλοποιημένο διάγραμμα της ροής στα σκαφίδια

Η ακριβής ανάλυση του μηχανισμού αλληλεπίδρασης είναι ιδιαίτερα περίπλοκη. Η ροή στο σκαφίδιο μετασχηματίζεται συνεχώς, είναι ένα δυναμικό φαινόμενο. Συνεπώς η ροή είναι συνέχεια σε μεταβατική κατάσταση και δεν γίνεται ποτέ μόνιμη.

Τα σύγχρονα σκαφίδια σχεδιάζονται αξιοποιώντας την προηγούμενη εμπειρία σε συνδυασμό με αριθμητικές και πειραματικές προσομοιώσεις. Παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει θεωρία που να αναλύει πλήρως τα φαινόμενα με την βοήθεια του CFD η γεωμετρία των σκαφιδίων έχει βελτιστοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό. Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης του δρομέα μειώνεται σε ένα ποσοστό της τάξης του 4-5% από τις απώλειες στα σκαφίδια. Σε συνδυασμό με τον μηχανικό βαθμό απόδοσης του που τυπικά είναι της τάξης του 0.98 ο συνολικός βαθμός απόδοσης του δρομέα είναι της τάξης του 91%.

Με δεδομένο ότι τα άλλα τμήματα του υδροστροβίλου (μηχανικό, ηλεκτρικό, σωληνώσεις) έχουν σήμερα βελτιωθεί στο μέγιστο βαθμό υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στην μελέτη της ροής στη δέσμη και το δρομέα που είναι και το κύριο πεδίο εξέλιξης των υδροστροβίλων Pelton.

Στο επόμενο σχήμα δίνεται μια εικόνα της πραγματικής ροής στα σκαφίδια. Στις εξωτερικές εικόνες βλέπουμε φωτογραφίες υψηλής ταχύτητας με χρήση στροβοσκοπίου. Στις εσωτερικές εικόνες βλέπουμε την κατανομή των δυνάμεων στα σκαφίδια όπως αυτή προβλέφθηκε μέσω CFD στις διαφορετικές θέσεις του σκαφιδίου. Το διάγραμμα δείχνει την κατανομή της δύναμης P_{max} και της καμπτικής ροπής στη ρίζα (root) του σκαφιδίου. Όπως ήταν αναμενόμενο η μέγιστη κινητήρια δύναμη εμφανίζεται όταν το σκαφίδιο είναι κάθετο με την δέσμη.



Σχήμα 1.15 Κατανομή δύναμης και καμπτικής ροπής στο σκαφίδιο στρεφόμενου δρομέα (Sulzer Hydro Ltd.)

1.3 Πειραματικά και αριθμητικά ερευνητικά αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει αναφορά σε κάποιες πρόσφατες ερευνητικές δημοσιεύσεις που αφορούν στα θέματα που αναπτύχθηκαν στην ενότητα 1.2. Σκοπός της ενότητας είναι να δοθεί μία γενική εικόνα των σύγχρονων διεθνών προσπαθειών που γίνονται για την επιτυχημένη προσομοίωση της ροής στη δέσμη και τα σκαφίδια και αναλύονται τα βασικά προβλήματα που προκύπτουν. Η έρευνα χωρίζεται σε δύο βασικούς τομείς:

Τον πειραματικό που περιλαμβάνει πειράματα οπτικοποίησης της δέσμης και της συμπεριφοράς της με χρήση ειδικών διατάξεων που περιλαμβάνουν ειδικές κάμερες υψηλής ταχύτητας, αισθητήρες, laser και λογισμικό επεξεργασίας. Υπάρχει μεγάλη εξέλιξη στις πειραματικές μεθόδους τα τελευταία χρόνια όπως η PIV (Particle Image Velocimetry) και η LDA. Η ανάλυση αυτών των μεθόδων ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της εργασίας και ο αναγνώστης παραπέμπεται στη σχετική βιβλιογραφία.

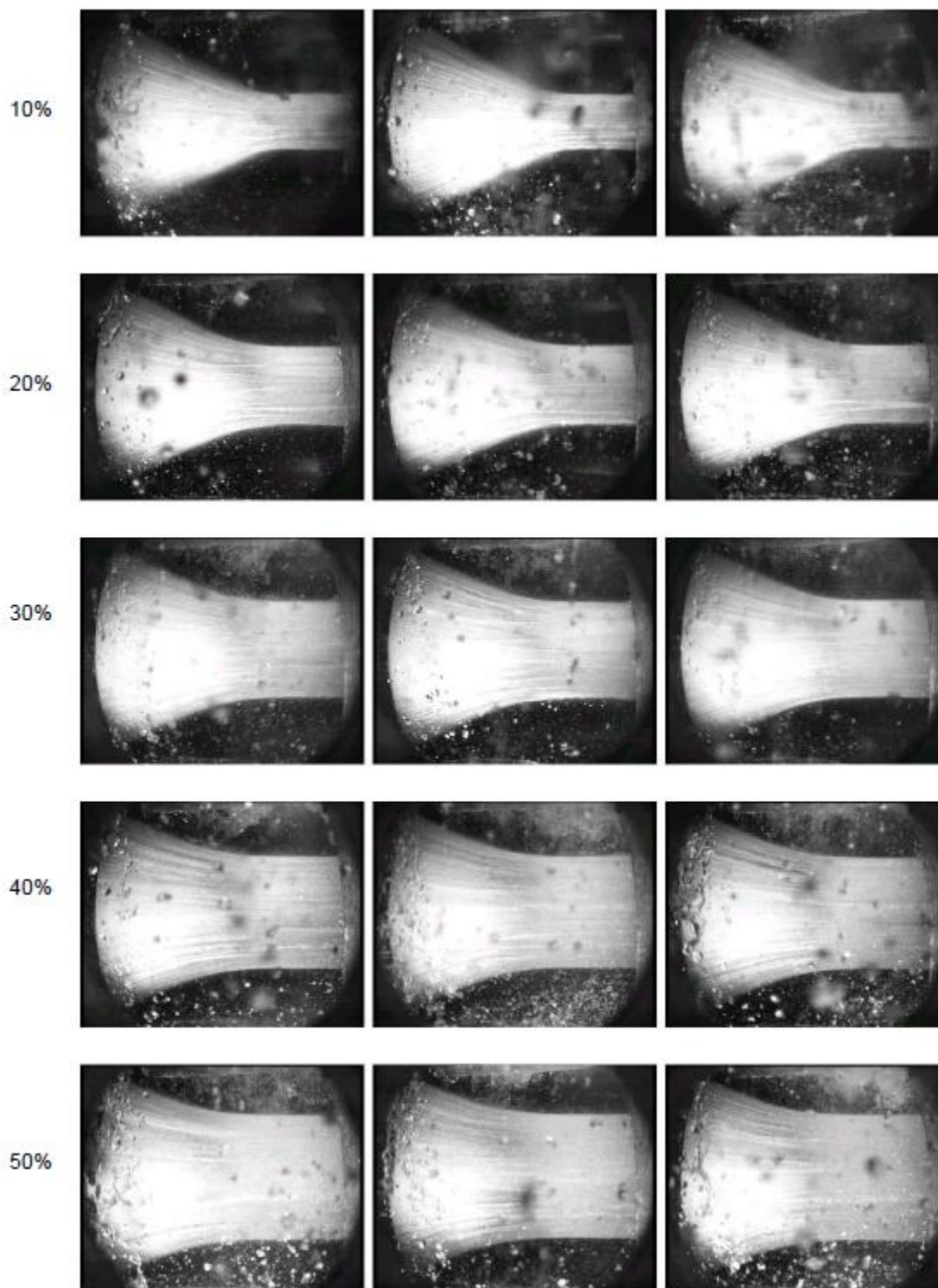
Ο άλλος τομέας είναι η αριθμητική πρόβλεψη της ροής μέσω CFD. Αντικείμενο της έρευνας είναι ο υπολογισμός της ροής με χρήση είτε εμπορικών προγραμμάτων είτε εξειδικευμένου κώδικα που έχουν αναπτυχθεί από ερευνητικές ομάδες σε πανεπιστήμια και ερευνητικές ομάδες. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με πειραματικά όπου αυτά υπάρχουν με στόχο τον έλεγχο και την βελτίωση του κώδικα επίλυσης ή χρησιμοποιούνται για εξαγωγή συμπερασμάτων σε τμήματα που είναι δύσκολο (τεχνικά, οικονομικά ή χρονικά) να μετρηθούν πειραματικά. Περεταίρω ανάλυση των μεθόδων CFD θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

Επίσης, γίνεται έρευνα με στόχο τη θεμελίωση θεωρητικών μοντέλων που να περιγράφουν αναλυτικά τα σύνθετα φαινόμενα της ροής στη δέσμη και τα σκαφίδια και να ποσοτικοποιούν την επίδραση της ποιότητας της δέσμης και της αλληλεπίδρασης της με τα σκαφίδια στον υδραυλικό βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου (Zhang Z. , 2009).

Το 2004 οι Staubli και Hauser (Staubli & Hauser, Flow visualization- A diagnosis tool for Pelton turbines, 2004) οπτικοποίησαν πειραματικά την ροή στη δέσμη πραγματικού υδροστροβίλου ισχύος 57,5 MW. Με χρήση ειδικής διάταξης κατέγραψαν video σε τρεις γωνίες $-11^{\circ}, 0^{\circ}, 11^{\circ}$ σε σχέση με την δέσμη. Στη συνέχεια ανέλυσαν ποιοτικά τα πειραματικά αποτελέσματα και τα συνέκριναν με τα θεωρητικά για την διάμετρο της δέσμης. Τέλος, έκαναν κάποιες αλλαγές στη γεωμετρία και την κατεργασία του ακροφυσίου με σκοπό την βελτίωση της δέσμης. Οι μετρήσεις έγιναν για διάφορα ανοίγματα της βελόνης από 5% ως 100%.

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ύπαρξη διασποράς στη δέσμη πριν τα πτερύγια καθώς και ασταθείς δομές στην επιφάνεια της οι οποίες δημιουργούνται αμέσως μετά την έξοδο του ακροφυσίου. Η πραγματική διάμετρος της δέσμης σημειώθηκε σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη της θεωρητικής. Οι αλλαγές στο ακροφύσιο απέφεραν τελικά βελτίωση 1.2% στον συνολικό βαθμό απόδοσης, που δείχνει την σημασία της ποιότητας της δέσμης στην απόδοση του υδροστροβίλου.

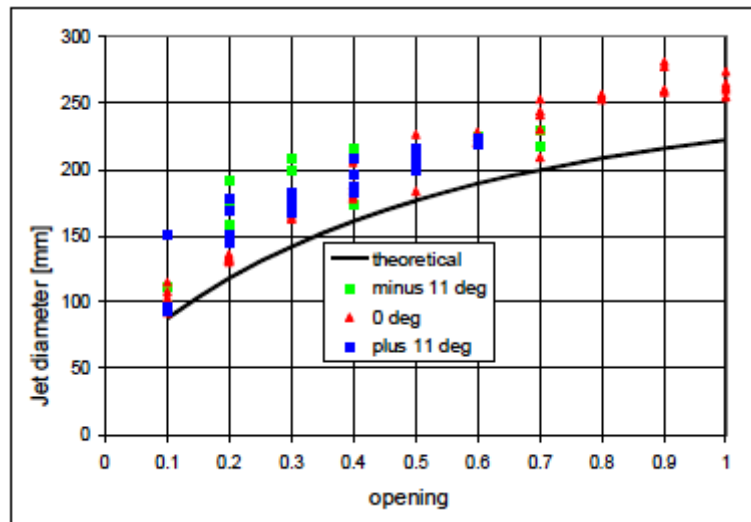
Στο σχήμα 1.16 φαίνεται η δέσμη από τις διαφορετικές θέσεις της κάμερας για άνοιγμα βελόνης 10% ως 50% (με ίδια διαθέσιμη πτώση). Παρατηρήθηκε ότι οι διαταραχές στην επιφάνεια αυξάνονται σε μέγεθος και γίνονται όλο και πιο ασταθείς ενώ μεταβάλλονται έντονα και με το χρόνο (Staubli & Hauser, Flow visualization- A diagnosis tool for Pelton turbines, 2004).



Σχήμα 1.16 Δέσμη μετά το ακροφύσιο για άνοιγμα βελόνης 10-50% (Staubli & Hauser, Flow visualization- A diagnosis tool for Pelton turbines, 2004)

Στο επόμενο σχήμα γίνεται σύγκριση της θεωρητικής διαμέτρου με την πραγματική σε θέση που απέχει απόσταση 3.5 διαμέτρους του ακροφυσίου από την έξοδο αυτού. Επειδή οι εικόνες δεν είναι ξεκάθαρες ως προς τη διάμετρο της δέσμης λόγω των

διαταραχών στην επιφάνεια της έγινε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων πολλαπλών εικόνων. Σε κάθε περίπτωση η πειραματική ήταν μικρότερη της πραγματικής.



Σχήμα 1.17 Σύγκριση της θεωρητικής διαμέτρου της δέσμης με την πραγματική (Staubli & Hauser, Flow visualization- A diagnosis tool for Pelton turbines, 2004)

Το 2007 οι Zhang και Casey (Zhang & Casey, 2007) έκαναν πείραμα με σκοπό την διερεύνηση της δέσμης σε ακροφύσιο πειραματικού υδροστροβίλου. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος LDA για την οπτικοποίηση της ροής. Στόχος ήταν η μελέτη της επίδρασης στην ποιότητα της δέσμης της γεωμετρίας του ακροφυσίου (γωνία 90° στη σωλήνωση, βελόνη, πτερύγια), των δευτερευουσών ροών που αναπτύσσονται στη ροή πριν την δέσμη (αντικείμενο αυτής της εργασίας) και της τριβής της ελεύθερης επιφάνειας της δέσμης με τον αέρα.

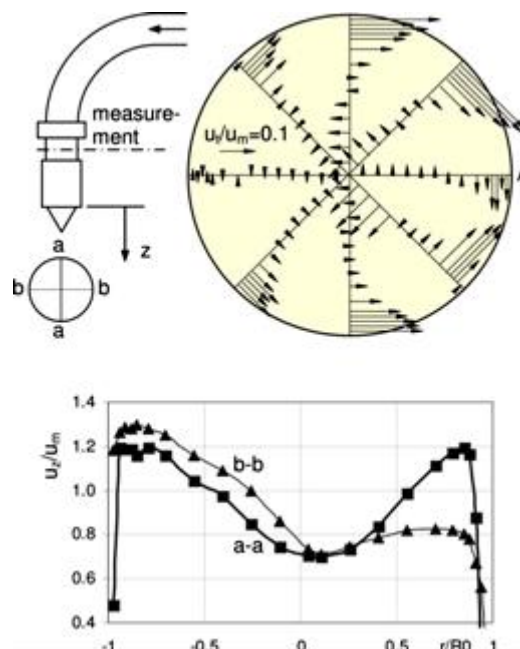
Πιο συγκεκριμένα, εκτέλεσαν τρία διαφορετικά πειράματα. Αρχικά σύνδεσαν το ακροφύσιο με έναν ίσιο αγωγό μήκους 4 m προκειμένου η ροή στην είσοδο να είναι στρωτή και πλήρως διαμορφωμένη. Αυτή η περίπτωση χρησιμοποιήθηκε σαν μέτρο σύγκρισης για τις επόμενες. Στη συνέχεια συνδέθηκε με αγωγό εισόδου με γωνία 90° ώστε να εξεταστούν οι επιδράσεις των δευτερευουσών ροών που εμφανίζονται λόγω της γεωμετρίας στη δέσμη. Τέλος, συνδέθηκε σε πραγματικό διανομέα με 6 ακροφύσια.

Από τη μελέτη αυτών των περιπτώσεων συμπεραίνεται ότι οι μικρές δευτερεύουσες ροές που δημιουργούνται από τις αλλαγές κλίσεων και την εσωτερική διαμόρφωση του αγωγού εισόδου συνεχίζουν να υπάρχουν και μέσα στη δέσμη. Αυτές προκαλούν διαταραχές στο σχήμα, την κατεύθυνση και την τοπολογία της δέσμης ενώ παράλληλα παρατηρείται μετατόπιση του πυρήνα της δέσμης.

Οι δευτερεύουσες ροές που δημιουργούνται πριν το ακροφύσιο είναι μικρές της τάξης του 10% της κύριας ταχύτητας (παρατήρηση που επαληθεύτηκε και στη δική μας περίπτωση) αλλά η ροή ανάντι στη δέσμη επηρεάζεται σημαντικά όσο απομακρυνόμαστε από το ακροφύσιο. Επειδή στην δέσμη υπάρχει η ελεύθερη επιφάνεια, δεν περιορίζεται

από τα τοιχώματα του ακροφυσίου και οι δευτερεύουσες ροές την παραμορφώνουν. Το αποτέλεσμα είναι η εκτροπή του άξονα της δέσμης από αυτόν του ακροφυσίου και οι διαταραχές στο σχήμα και τη διάμετρο της δέσμης κατάντι.

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η κατανομή των εφαπτομενικών καθώς και των αξονικών ταχυτήτων στη διατομή ακριβώς πριν το ακροφύσιο για την περίπτωση με την γωνία 90° . Παρατηρούνται δύο κύριες σχεδόν συμμετρικές δίνες οι οποίες οφείλονται στην αλλαγή κλίσης του αγωγού. Οι δίνες συναντούνται στο σημείο A το οποίο όμως δεν ήταν σταθερό κάθε φορά, πράγμα που οφείλεται στα έντονα δυναμικά φαινόμενα της τυρβώδους ροής σε αυτή την περιοχή. Αντίστοιχα συμπεράσματα για τη ροή προέκυψαν και στη δική μας όπως θα διαπιστωθεί στα επόμενα κεφάλαια. Επίσης στο κέντρο της διατομής φαίνεται μία μείωση της αξονικής ταχύτητας που οφείλεται στην ύπαρξη της βελόνης.

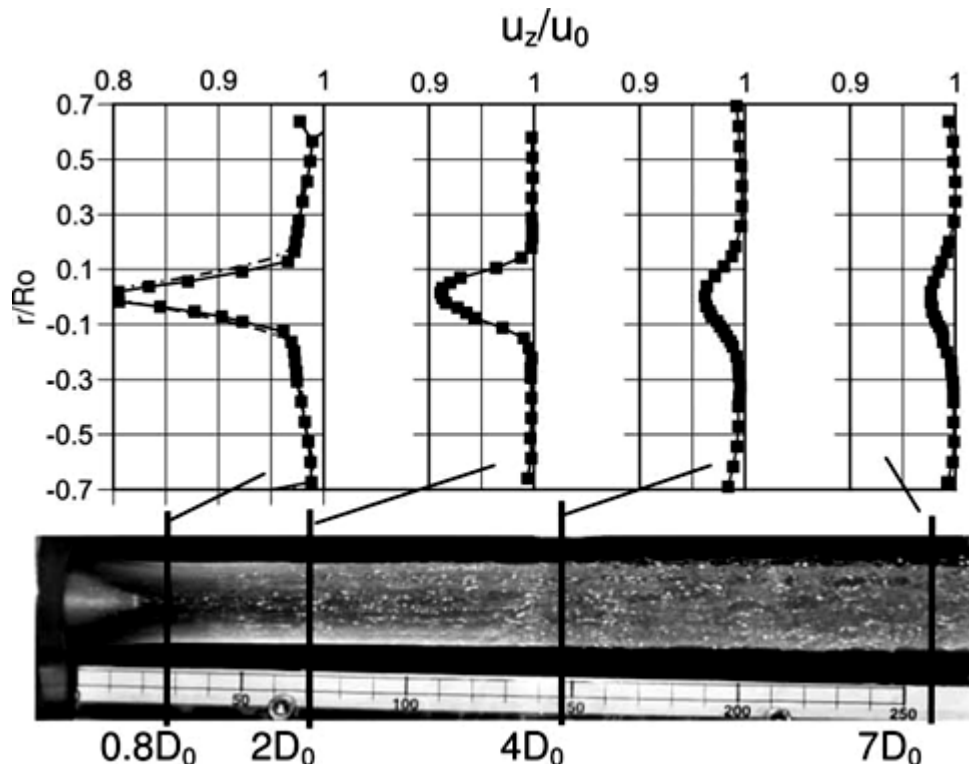


Σχήμα 1.18 Κατανομή εφαπτομενικών και αξονικών ταχυτήτων μετά την γωνία (Zhang & Casey, 2007)

Η κλίση του ακροφυσίου (στο συγκλίνον τμήμα του γύρω από τη βελόνη) επηρεάζει τη ροή στη δέσμη με τον τρόπο που αναμενόταν. Αμέσως μετά το ακροφύσιο μικραίνει η διάμετρος της μέχρι να φτάσει στην ελάχιστη σε απόσταση περίπου δύο διαμέτρων του ακροφυσίου.

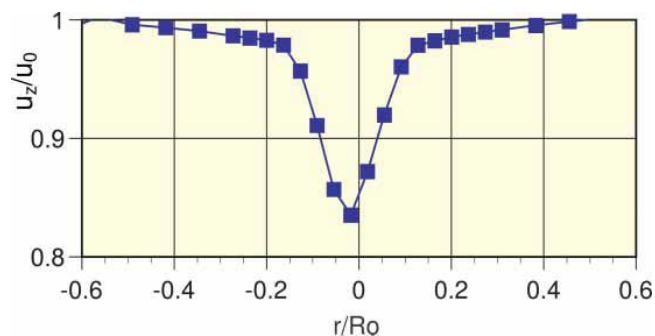
Στη συνέχεια δίνεται ένα σχήμα με την κατανομή των αξονικών ταχυτήτων της ροής στη δέσμη σε διάφορες θέσεις για την περίπτωση με τον ευθύ αγωγό. Παρατηρείται έλλειμμα ταχύτητας στον πυρήνα της δέσμης το οποίο οφείλεται στην τριβή του ρευστού με την βελόνη. Από τις μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι αυτό το τμήμα μικραίνει όσο μεγαλώνει η διαθέσιμη υδραυλική πτώση. Επίσης, στην διατομή $0.8 D_0$ η κατανομή ταχυτήτων δεν είναι ομοιόμορφη εκτός του πυρήνα. Αυτό οφείλεται στην τριβή του ρευστού με τα τοιχώματα του ακροφυσίου. Λόγω της κλίσης των τοιχωμάτων του

ακροφυσίου η στατική πίεση αυξάνεται κατά μήκος τους και με δεδομένο ότι η ολική πίεση πρέπει να παραμένει σταθερή η ταχύτητα μειώνεται.



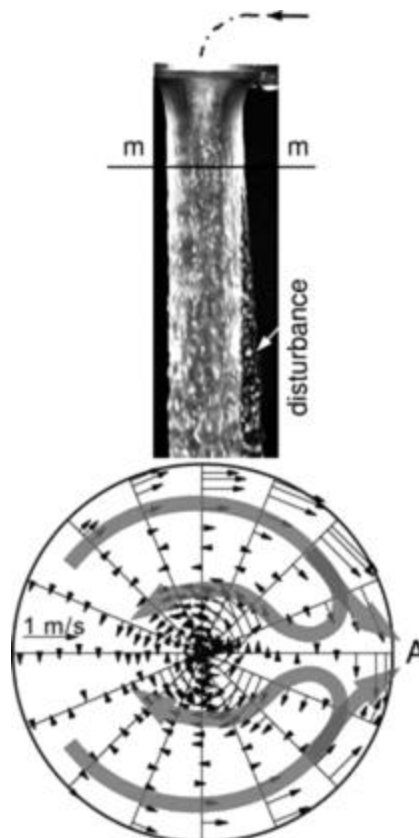
Σχήμα 1.19 Προφίλ αξονικών ταχυτήτων στη δέσμη (Zhang & Casey, 2007)

Η επίδραση της γωνίας 90° ως προς την μετατόπιση του άξονα της δέσμης φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Το προφίλ των αξονικών ταχυτήτων είναι στη θέση $0.8D_0$. Βλέπουμε ότι έχει μετατοπιστεί το κέντρο της δέσμης. Αυτή η μικρή μετατόπιση του πυρήνα στη συνέχεια της ροής μεγαλώνει επηρεάζοντας τη θέση και την τοπολογία της δέσμης. Μια ακόμα ενδιαφέρουσα παρατήρηση που έγινε από το πείραμα (δεν φαίνεται στο σχήμα) είναι ότι στην περίπτωση των πολλαπλών ακροφυσίων η δέσμη κάθε ακροφυσίου διαφέρει από τις άλλες. Αυτό οφείλεται στην διαφορετική ροή ανάντι κάθε ακροφυσίου λόγω διαφορετικών διαμορφώσεων-γεωμετριών καθώς και στις διαφορές (γεωμετρικές, φθορές κλπ) των ίδιων των ακροφυσίων.



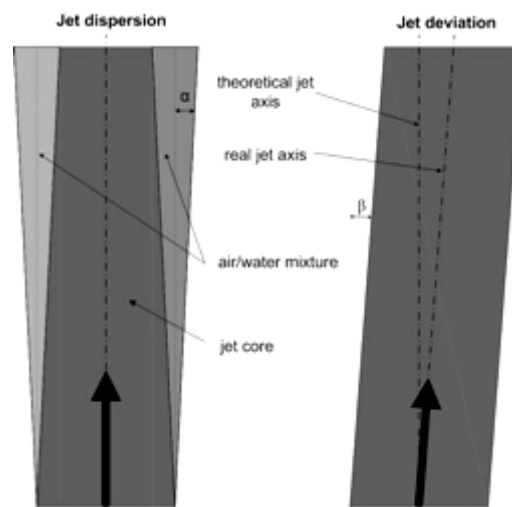
Σχήμα 1.20 Κατανομή αξονικών ταχυτήτων στη διατομή $0.8D_0$ για αγωγό κλίσης 90° (Zhang & Casey, 2007)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι δευτερεύουσες ροές πριν το ακροφύσιο μεταφέρονται και στην δέσμη με αποτέλεσμα να χαλάνε την ποιότητα της. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε την μορφή της δέσμης και την κατανομή των εφαπτομενικών ταχυτήτων για την περίπτωση με την γωνία πριν το ακροφύσιο. Αρχικά παρατηρούμε ότι υπάρχουν σημαντικές διαταραχές στην επιφάνεια της δέσμης που οφείλονται στις εφαπτομενικές ταχύτητες σε συνδυασμό με την τριβή της επιφάνειας με την δέσμη. Σύμφωνα με τους Zhang και Casey αυτό οφείλεται μόνο σε αυτές τις δύο αιτίες. Τα πτερύγια στήριξης θεωρείται ότι δεν μειώνουν τις δευτερεύουσες ροές και κατά συνέπεια την δέσμη. Στο πειραματικό ακροφύσιο είχαν δύο πτερύγια στις 180° μεταξύ τους (δεν αναφέρεται η θέση τους ως προς τον άξονα συμμετρίας της ροής) και μεγαλώνοντας το πάχος τους δεν άλλαξε κάτι στις διαταραχές της δέσμης. Αυτό αποδίδεται στην μεγάλη απόσταση μεταξύ τους και στην επίδραση του συγκλίνοντος τμήματος του ακροφυσίου. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αριθμητική διερεύνηση αυτής της επίδρασης των πτερυγίων σε σχέση με το πλήθος τους, το μήκος τους και τις σχετικές γωνίες μεταξύ τους στην ανάντι ροή του ακροφυσίου. Τέλος, στο ίδιο σχήμα παρατηρούμε ότι οι δευτερεύουσες ροές παραμένουν στην δέσμη. Οι δύο σχεδόν συμμετρικές δίνες συνεχίζουν να υπάρχουν. Στη περιοχή του σημείου A συναντώνται δημιουργώντας μια περιοχή υψηλής αστάθειας. Τότε η επιφάνεια της δέσμης παραμορφώνεται (αφού δεν υπάρχει περιορισμός από στερεό όριο) επιμηκυνόμενη προς αυτή την περιοχή και χάνοντας το κυκλικό σχήμα της. Αυτές οι στρεβλώσεις συνεχίζουν ανάντι και σε συνδυασμό με την επίδραση του αέρα αυξάνονται επηρεάζοντας την ποιότητα της δέσμης.



Σχήμα 1.21 Εφαπτομενικές ταχύτητες θέση ($0.8 D_0$) και διαταραχές στην δέσμη (Zhang & Casey, 2007)

Από την προηγούμενη ανάλυση γίνεται αντιληπτό ότι η ροή στη δέσμη παύει να είναι αξονοσυμμετρική από κάποιο σημείο και έπειτα. Παράλληλα μπορεί να αποκλίνει από τον άξονα του ακροφυσίου ενώ και εσωτερικά η δέσμη αποκτά μία συστροφή σε σχέση με το σημείο εξόδου από το ακροφύσιο. Η ανταλλαγή ορμής με τον αέρα οδηγεί στην διασπορά της επιφάνειας της δέσμης η οποία σταματά να είναι μία συμπαγής δέσμη ύδατος και αποκτά ένα ολοένα αυξανόμενο στρώμα διαφασικού μείγματος αέρα-νερού (σταγονίδια- spray). Τα παραπάνω οδηγούν σε υδραυλικές απώλειες στο δρομέα αφού αλλοιώνεται η γωνία πρόσπτωσης στα σκαφίδια με αποτέλεσμα ένα μικρό τμήμα της ροής δεν αλληλεπιδρά καθόλου με τα πτερύγια και το ρευστό έχει χάσει ένα τμήμα της ορμής του.



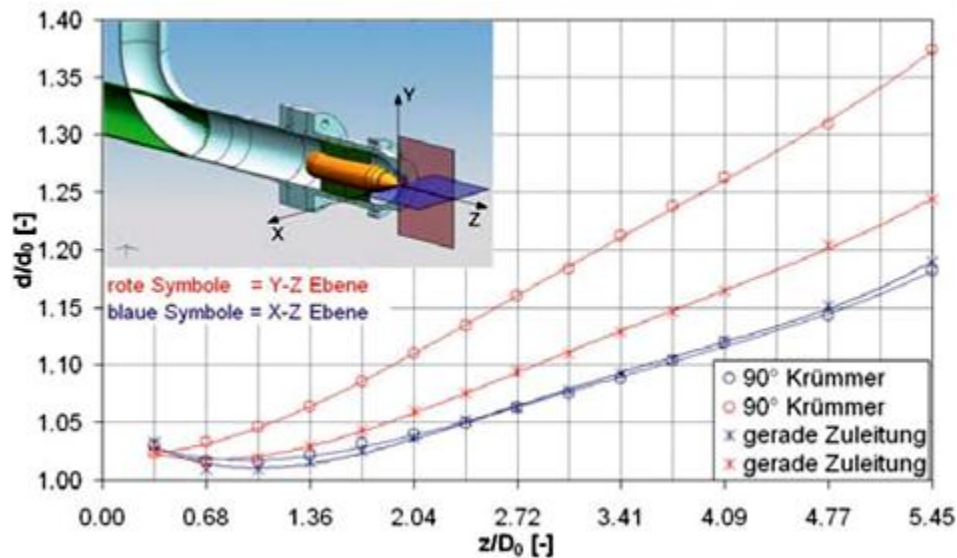
Σχήμα 1.22 Σχηματική απεικόνιση διασποράς και απόκλισης δέσμης

Σήμερα ένας καλά σχεδιασμένος υδροστροβίλος Pelton έχει βαθμό απόδοσης της τάξης του 90-92%. Οι απώλειες που οφείλονται στην ποιότητα της δέσμης εκτιμάται ότι είναι της τάξης του 0.5-1% , ποσοστό σημαντικό ιδίως για υδροστροβίλους μεγάλης ισχύος.

Στην μελέτη τους για την Andritz Hydro οι Staubli *et al.* (Staubli, Bissel, Leduc, & Parkinson, 2009) συνδύασαν πειραματικές μετρήσεις με μεθόδους CFD προκειμένου να μελετήσουν την επίδραση της ποιότητας της δέσμης στην απόδοση πραγματικού υδροστροβίλου και βάσει αυτών να τον βελτιώσουν. Σημειώνεται ότι η ποιότητα της δέσμης, πέραν των προαναφερθέντων, επηρεάζεται από σταγονίδια που προέρχονται από τις γειτονικές δέσμες, από το νερό που προσκρούει στο περίβλημα του στροβίλου και από τα ίδια τα σκαφίδια λόγω της φυγόκεντρου. Προφανώς αυτή η επίδραση είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί και να υπολογιστεί, εντούτοις παρατηρείται πειραματικά.

Αρχικά, μετρήθηκε η διάμετρος της δέσμης του ακροφυσίου όταν αυτό είναι συνδεδεμένο σε ευθύ σωλήνα εισόδου και όταν συνδέεται με αγωγό με κλίσης 90°. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η μέση ως προς το χρόνο (time averaged), αδιαστατοποιημένη (με τη διάμετρο του ακροφυσίου) διάμετρος της δέσμης για τις δύο περιπτώσεις. Με μπλε σημειώνεται η διάμετρος στο ΧΖ επίπεδο και με κόκκινο στο ΥΖ επίπεδο. Στην περίπτωση

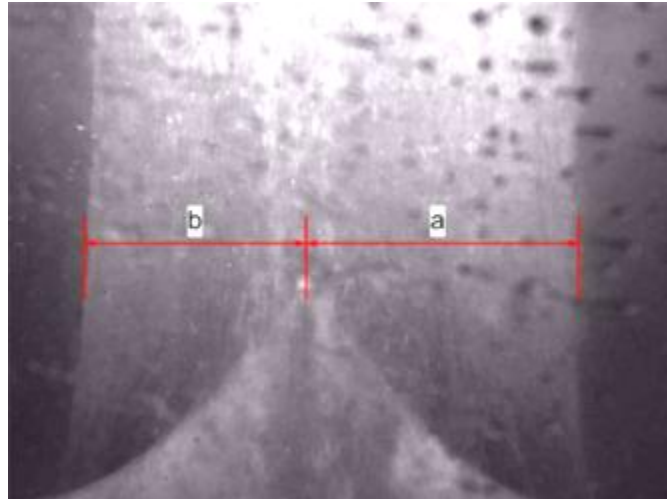
του ΧΖ επιπέδου που είναι κάθετο στον άξονα συμμετρίας των δύο δινών που, όπως είδαμε και προηγουμένως, εμφανίζονται λόγω της γωνίας πριν το ακροφύσιο προκύπτουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα. Αντίθετα στο ΥΖ επίπεδο που κείται και ο άξονας συμμετρίας των δινών αποκλίνουν σημαντικά. Αυτό οφείλεται στην αστάθεια που δημιουργείται στο σημείο όπου συναντούνται οι δίνες.



Σχήμα 1.23 Σύγκριση αδιαστατοποιημένης διάμετρου της δέσμης για αγωγό εισόδου με γωνία 90° (ο) και ευθύ (x) (Staubli, Bissel, Leduc, & Parkinson, 2009)

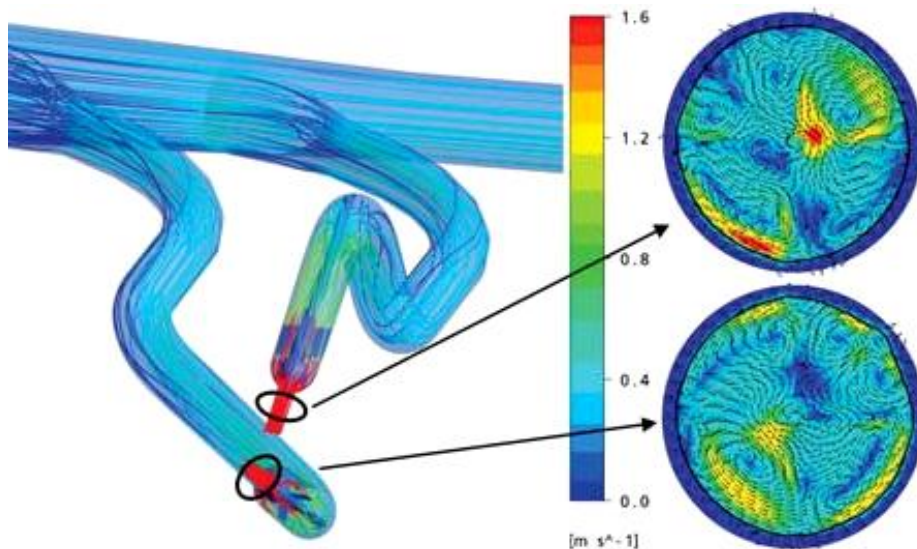
Η μελέτη έγινε σε τρεις υδροστροβίλους, ένας εκ των οποίων ήταν οριζοντίου άξονα με δύο ακροφύσια με παραπλήσια διάταξη με αυτόν του εργαστηρίου υδροδυναμικών μηχανών. Οι αγωγοί εισόδου είχαν ο πάνω μία καμπυλότητα 90° και ο κάτω είχε δύο αλλαγές κλίσης σε δύο επίπεδα ενώ η γωνία μεταξύ των ακροφυσίων ήταν 45°. Διαπιστώθηκε ότι σε λειτουργία με ένα ακροφύσιο ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου ήταν 1.5% μεγαλύτερος στην λειτουργία μόνο με το κάτω ακροφύσιο. Η δέσμη του πάνω ακροφυσίου μετρήθηκε σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του κάτω γεγονός που δείχνει το συσχετισμό βαθμού απόδοσης και διασποράς δέσμης. Ακόμη για το κάτω ακροφύσιο παρατηρήθηκε σημαντική απόκλιση της δέσμης η οποία αποδίδεται στις έντονες αλλαγές κλίσης του συστήματος διανομής του. Στο επόμενο σχήμα (σχήμα 1.24) φαίνεται η δέσμη του ακροφυσίου την στιγμή που έρχεται σε επαφή με το splitter του σκαφιδίου. Η αναλογία των αποστάσεων a/b είναι 1.18.

Η ροή στον διανομέα και τις δέσμες αναλύθηκε μέσω CFD με χρήση του εμπορικού πακέτου CFX της Ansys με τη χρήση του μοντέλου επιφανειακής τάσης SST και ομογενές μοντέλο διφασικής ροής για επίλυση των εξισώσεων Reynolds (για την δέσμη). Έγινε έτσι πρόβλεψη των δευτερευουσών ροών στην έξοδο των δύο ακροφυσίων. Στο σχήμα 1.25 βλέπουμε τις ισοϋψείς καμπύλες (contours) και τα επαφτομενικά (στο επίπεδο της τομής) διανύσματα των επαφτομενικών ταχυτήτων στις εξόδους των δύο ακροφυσίων. Παρατηρήθηκε ότι το μέγιστο μέτρο αυτών των ταχυτήτων έφτασε στο 3% της αξονικής



Σχήμα 1.24 Απόκλιση δέσμης κάτω ακροφυσίου σε σχέση με το splitter του σκαφιδίου (Staubli, Bissel, Leduc, & Parkinson, 2009)

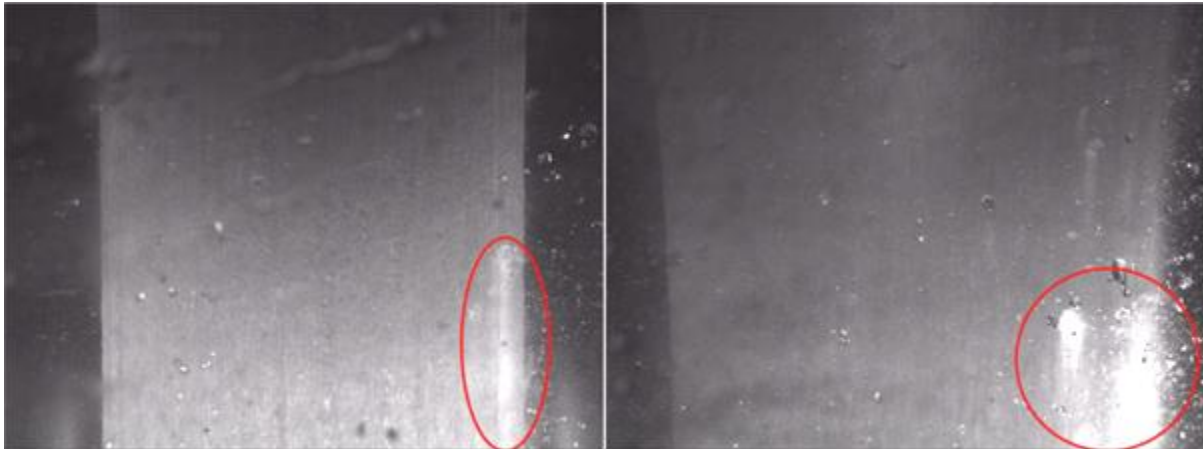
ταχύτητας πράγμα ασυνήθιστο που αποδίδεται στην σύνθετη γεωμετρία του διανομέα και την υποεκτίμηση των μεγεθών στην αριθμητική προσομοίωση (στο σχήμα δεν δίνονται αδιαστατοποιημένες οι ταχύτητες). Επίσης παρατηρείται η παραμόρφωση του σχήματος της δέσμης η οποία δεν είναι κυκλική.



Σχήμα 1.25 Προσομοίωση μέσω CFD των δευτερευουσών ροών στη δέσμη (Staubli, Bissel, Leduc, & Parkinson, 2009)

Στους τρεις πραγματικούς υδροστροβίλους που εξετάστηκαν παρατηρήθηκε ότι η επιφάνεια της δέσμης εμφάνιζε ξαφνικές τοπικές διαταραχές η αιτία των οποίων δεν μπορεί να εξηγηθεί πλήρως. Μπορεί να είναι σταγονίδια που προσκρούουν στην δέσμη ή φυσαλίδες αέρα εγκλωβισμένου στη δέσμη. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε αυτά τα

φαινόμενα στην επιφάνεια της δέσμης σε δύο διαφορετικούς πραγματικούς υδροστροβίλους.



Σχήμα 1.26 Τοπικές διαταραχές στη δέσμη (Staubli, Bissel, Leduc, & Parkinson, 2009)

Οι Peron *et al.* (Peron, Parkinson, Geppert, & Staublit, 2008) το 2008 δημοσίευσαν μία έκθεση για την σημασία της ποιότητας της δέσμης στην απόδοση αλλά και στην σπηλαίωση υδροστροβίλων Pelton βασιζόμενοι σε δύο έργα βελτίωσης της δέσμης σε μεγάλους υδροηλεκτρικού σταθμούς.

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως η δέσμη έχει μεγάλες διακυμάνσεις στο σχήμα της αλλά και στον χρόνο. Μέσα σε λίγα εκατοστά από την έξοδο του ακροφυσίου μέχρι μία διάμετρο μετά από αυτό οι φυσικές ιδιότητες του ρευστού αλλάζουν ραγδαία. Για παράδειγμα για μία διαθέσιμη πτώση 800m ΣΥ στο ακροφύσιο η ταχύτητα του ρευστού αλλάζει από 10 σε 125m/s και η πίεση πέφτει από τα 78 στο 1 bar (πίεση περιβάλλοντος). Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να αναλυθούν με προσομοιώσεις διφασικής ροής μέσω CFD που περιλαμβάνουν τον διανομέα και τη δέσμη.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι η μεταφορά των αποτελεσμάτων από τα μοντέλα στις μηχανές πρωτότυπου μεγέθους είναι συχνά αναξιόπιστη. Πράγματι, η ροή σε έναν υδροστροβίλο Pelton συνδυάζει 4 διαφορετικές βαθμίδες:

- (I) Ροή στον ανάντι σωλήνα και στον διανομέα
- (II) ελεύθερες δέσμες μετά την έξοδο των ακροφυσίων
- (III) ροή στην ελεύθερη επιφάνεια των σκαφιδίων
- (IV) διασκορπισμένες ροές στο περίβλημα

Κάθε βαθμίδα χαρακτηρίζεται από ένα διαφορετικό χαρακτηριστικό μήκος, μια διαφορετική κλίμακα ταχύτητας, και επομένως καθορίζεται από διαφορετικές δυνάμεις, όπως συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. Κατά συνέπεια, οι νόμοι ομοιότητας για διαφορετικού μεγέθους στροβίλους δεν μπορούν να εφαρμοστούν ταυτόχρονα στις 4 παραπάνω βαθμίδες(Perrig, 2007).

	Length scale	Velocity scale	Reynolds number	Froude number	Weber number
Flow regime	D [mm]	C [m/s]	$Re = \frac{C \cdot D}{\nu}$ [-]	$Fr = \frac{C}{\sqrt{gD}}$ [-]	$We = \frac{\rho C^2 D}{\sigma}$ [-]
Confined flow	200	4.5	$5 \cdot 10^5$	3	-
Water jet	30	40	$6 \cdot 10^5$	80	15
Bucket flow	300	20	$3.2 \cdot 10^6$	12	40
Isolated water droplet	1	5	$3 \cdot 10^3$	100	0.03

Σχήμα 1.27 Χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής σε έναν υδροστροβίλο Pelton (Perrig, 2007)

Η προηγούμενη παρατήρηση δείχνει την σημασία του να γίνονται οι μετρήσεις σε πραγματικών διαστάσεων υδροστροβίλους. Αυτό, βέβαια, είναι πρακτικά αδύνατο ιδιαίτερα στην φάση σχεδίασης γεγονός που δείχνει την σημασία της αριθμητικής ανάλυσης της ροής παρά τις όποιες αποκλίσεις (από την πραγματικότητα) στα αποτελέσματα. Ακόμα λόγω του επηρεασμού της ποιότητας δέσμης από την ταχύτητα της (συνεπώς από τη διαθέσιμη πτώση) οι διαφορές μεταξύ μοντέλου και πρωτοτύπου γίνονται σημαντικότερες αφού το μοντέλο διαχειρίζεται μικρότερη πτώση. Στο παρακάτω σχήμα επιβεβαιώνονται τα παραπάνω με την αντιπαραβολή της δέσμης του μοντέλου και του πλήρους μεγέθους στροβίλου για ίδιο άνοιγμα βελόνης. Υπάρχει έντονη ερευνητική δραστηριότητα στην κατεύθυνση της ανάπτυξης ειδικών μεθόδων και αλγορίθμων για την προσομοίωση των σύνθετων φαινομένων της ροής στις διάφορες βαθμίδες της.



Model Head: 153 m
Nozzle opening: 80%
Jet diameter: 34mm

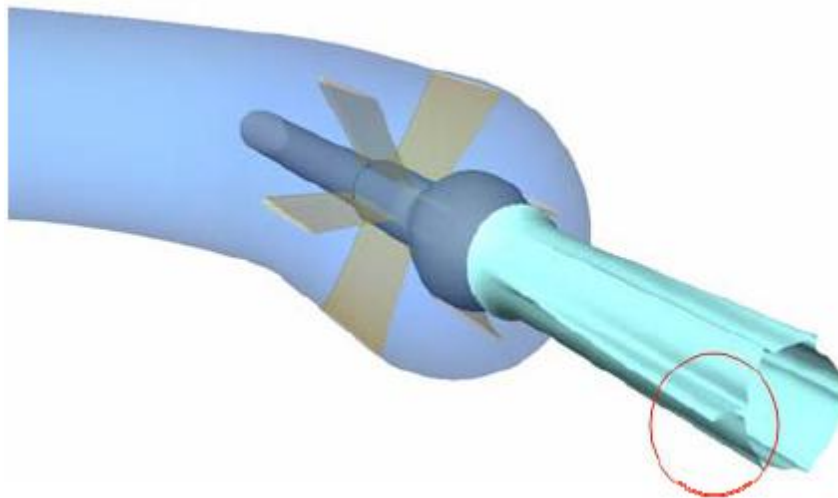


Prototype Head: 588.4 m
Nozzle opening: 80%
Jet diameter: 182 mm

Σχήμα 1.28 Διασπορά της δέσμης σε απόσταση 1.5 διάμετρο από το ακροφύσιο για το μοντέλο και τον πρωτότυπο μεγέθους υδροστροβίλο (Peron, Parkinson, Geppert, & Staublit, 2008)

Η πρώτη περίπτωση υδροστροβίλου που εξετάστηκε ήταν στο υδροηλεκτρικό έργο BORDOGNA στο Bergamo. Μέσα σε μόλις τρεις μήνες λειτουργίας της εγκατάστασης ασύμμετρες φθορές λόγω σπηλαιώσης παρατηρήθηκαν στο εξωτερικό τμήμα των σκαφιδίων. Το σημάδια της σπηλαιώσης παρατηρήθηκαν λίγο έξω από την θεωρητική διάμετρο της δέσμης στα σκαφίδια και θεωρήθηκε ότι αυτό συνέβαινε λόγω της διασποράς της δέσμης. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί αυτό έγινε προσομοίωση μέσω CFD στο σύστημα διανομής και τη δέσμη όπου τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι φθορές εντοπίζονται ακριβώς στο σημείο που υπάρχει μεγάλη παραμόρφωση της δέσμης λόγω των

δευτερευουσών ροών ανάντι της δέσμης. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε τη μορφή της δέσμης όπως αυτή υπολογίστηκε αριθμητικά.

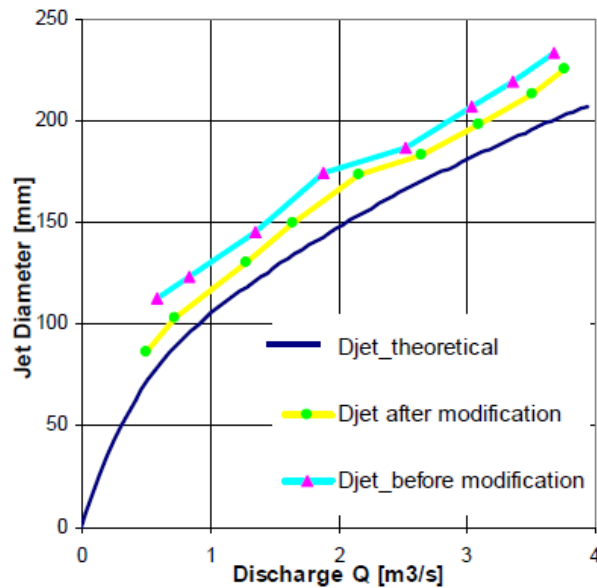


Σχήμα 1.29 Έντονες παραμορφώσεις της δέσμης που οδήγησαν σε σπηλαιωση (Peron, Parkinson, Geppert, & Staublit, 2008)

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αποφασίστηκε να αλλάξει η εσωτερική διαμόρφωση του τελικού συστήματος έγχυσης προκειμένου να εξαλειφθούν κατά το δυνατό οι δίνες λόγω των δευτερευουσών ροών. Έτσι άλλαξε η διάταξη των πτερυγίων στήριξης και του βάκτρου κατόπιν μελέτης βελτιστοποίησης μέσω CFD (η τελική γεωμετρία δεν παρουσιάζεται). Ύστερα από έξι μήνες λειτουργίας με την νέα διάταξη επαναλήφθηκε ο έλεγχος για φθορές. Ο έλεγχος έδειξε ότι δεν υπήρχαν φθορές λόγω σπηλαιώσης στον δρομέα. Η εξαφάνιση της σπηλαιώσης επιβεβαίωσε ότι η κύρια αιτία της ήταν η παραμόρφωση και διασπορά της δέσμης. Τα παραπάνω δείχνουν ότι η ποιότητα της δέσμης είναι σημαντικός παράγοντας όχι μόνο ως προς την απόδοση του υδροστροβίλου αλλά και ως προς την μείωση των φθορών από σπηλαιώση.

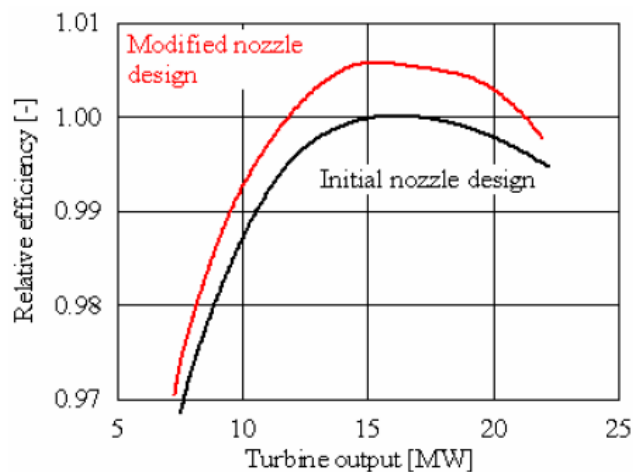
Ο δεύτερος υδροστροβίλος που εξετάστηκε ήταν στον υδροηλεκτρικό σταθμό Fionnag της Ελβετίας. Στόχος του έργου ήταν η βελτίωση της απόδοσης του μέσω της βελτίωσης της δέσμης. Στα έργα αποκατάστασης που έγιναν άλλαξε η γεωμετρία του ακροφυσίου με σκοπό την μείωση της διασποράς. Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί αυτή έγινε ανάλυση μέσω CFD. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε ότι η ροή στα σκαφίδια εξαρτάται από την ένταση της διασποράς της δέσμης. Σε περίπτωση μεγάλης διασποράς, το πεδίο πίεσης στο σκαφίδιο κατανέμεται σε μεγαλύτερη περιοχή αποκλίνοντας από το υδραυλικό βέλτιστο με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης του δρομέα.

Στο επόμενο σχήμα (σχ. 1.30) βλέπουμε την σύγκριση της διαμέτρου της δέσμης, όπως αυτή μετρήθηκε πριν και μετά από τα έργα βελτίωσης, με την θεωρητική για διάφορες παροχές. Παρατηρούμε ότι με τη βελτίωση της γεωμετρίας η αύξηση της διαμέτρου της πραγματικής δέσμης από αυτήν της θεωρητικής μικρυνε.



Σχήμα 1.30 Μέτρηση της διαμέτρου της δέσμης πριν και μετά τις αλλαγές και σύγκριση με την θεωρητική (Peron, Parkinson, Geppert, & Staublit, 2008)

Μετά από αυτές τις αλλαγές μετρήθηκε ξανά η απόδοση του υδροστροβίλου σε όλο το εύρος λειτουργίας του. Το αποτέλεσμα ήταν ότι με την μείωση της διασποράς της δέσμης η απόδοση του υδροστροβίλου αυξήθηκε σε όλο το εύρος λειτουργίας του. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε την σύγκριση της απόδοσης του υδροστροβίλου πριν και μετά τις αλλαγές. Η βελτίωση στο βαθμό απόδοσης είναι από 0.1-0.5% σε όλο το εύρος.



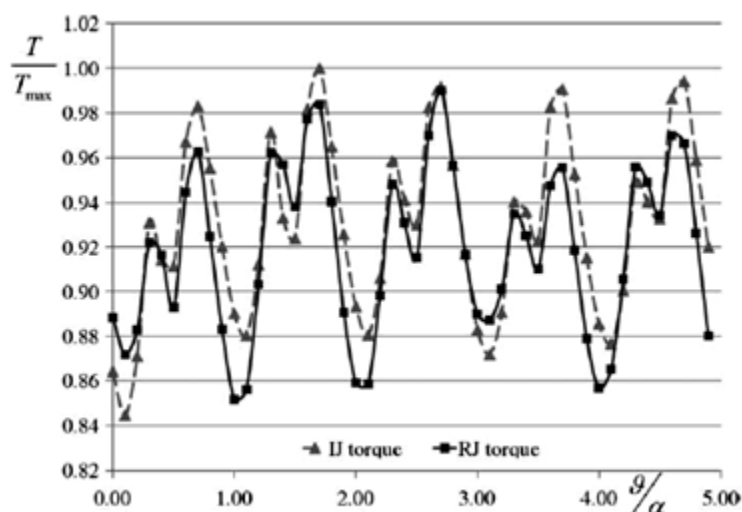
Σχήμα 1.31 Σύγκριση απόδοσης υδροστροβίλου πριν και μετά τις αλλαγές στη γεωμετρία του ακροφυσίου (Peron, Parkinson, Geppert, & Staublit, 2008)

Από την ανάλυση που προηγήθηκε σε αυτήν την ενότητα γίνεται φανερό η σημασία της ποιότητας της δέσμης στην απόδοση και λειτουργία του υδροστροβίλου Pelton. Στην παρούσα εργασία θα διερευνηθεί αριθμητικά η ροή στο ανάντι τμήμα του ακροφυσίου του υδροστροβίλου του εργαστηρίου των υδροδυναμικών μηχανών για διάφορες εναλλακτικές

διατάξεις των πτερυγίων στήριξης με στόχο την μείωση των δευτερευουσών ροών στο ακροφύσιο.

Κρίνεται σκόπιμο σε αυτό το σημείο να γίνει αναφορά στη ροή στα σκαφίδια προκειμένου να υπάρχει μια εποπτική εικόνα της ροής στον υδροστρόβιλο. Για περισσότερες πληροφορίες σε αυτό το θέμα ο αναγνώστης παραπέμπεται στην βιβλιογραφία (Perrig, 2007),(Perrig, Parkinson, & Avellan, 2006), (Santolin, Gavazzini, & Ardizzon, 2009)(Mariongiu, Leboeuf, & Caro, 2010).

Οι Santolin et al. το 2009(Santolin, Gavazzini, & Ardizzon, 2009) συνδύασαν πειραματικά αποτελέσματα και προσομοιώσεις CFD προκειμένου αφενός να τα συγκρίνουν μεταξύ τους και αφετέρου να εξετάσουν την επίδραση της ποιότητας της δέσμης στη ροή στα σκαφίδια και κατ' επέκταση στην απόδοση του υδροστρόβιλου. Συγκρίθηκε η αλληλεπίδραση που έχει με τα σκαφίδια α) δέσμη που προκύπτει από απλό ακροφύσιο χωρίς βελόνη και εσωτερική διαμόρφωση (ιδανική δέσμη) και β) πραγματική δέσμη. Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκε η ασκούμενη ροπή και προέκυψε το διάγραμμα του παρακάτω σχήματος. Παρατηρούμε, όπως αναμενόταν, ότι η ροπή που παράγεται από την ιδανική δέσμη είναι σχεδόν σε όλες τις γωνίες μικρότερη. Αυτό σημαίνει μικρότερη μεταφορά ενέργειας από το ρευστό στα σκαφίδια και συνεπώς μικρότερη απόδοση του υδροστρόβιλου.



Σχήμα 1.32 Ροπή που ασκείται από πραγματική δέσμη (RJ) και ιδανική δέσμη (IJ) στην πτερωτή σε συνάρτηση με την γωνία της πτερωτής (Santolin, Gavazzini, & Ardizzon, 2009)

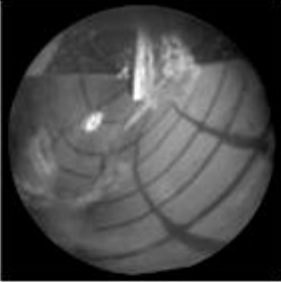


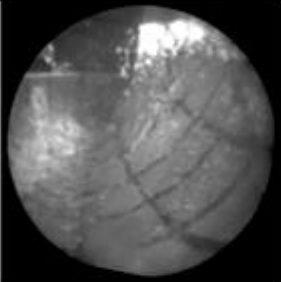


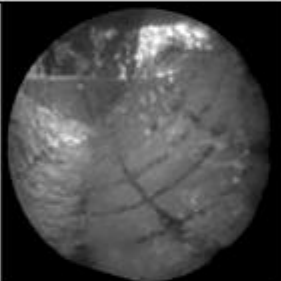


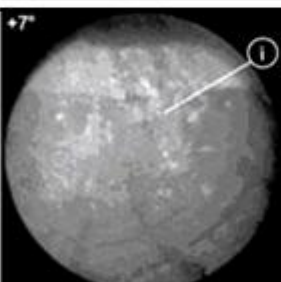


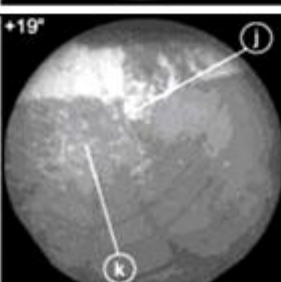
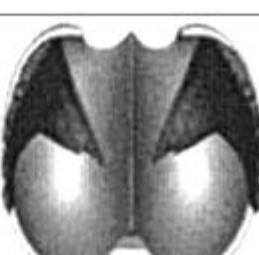

Ο Perrig στην διδακτορική διατριβή του (Perrig, 2007) μελέτησε τη φαινόμενα της ροής στα σκαφίδια πειραματικά και στη συνέχεια τα συνέκρινε με αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης. Από τις συγκρίσεις αυτές εξήχθησαν συμπεράσματα για το μέγεθος του σφάλματος των CFD πλεγματικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν. Η ροή στα σκαφίδια είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, συνεχώς εξελίσσονται και προτείνονται νέα αριθμητικά μοντέλα για την ακριβέστερη περιγραφή της. Πιο συγκεκριμένα έκανε τρεις μετρήσεις: Πρώτον,

μέτρησε την πίεση που ασκείται από το νερό στα τοιχώματα των σκαφιδίων χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες τοποθετημένους πάνω στην επιφάνεια των σκαφιδίων. Δεύτερον, οπτικοποίησε τη ροή χρησιμοποιώντας ενδοσκόπια τοποθετημένα πάνω στο δρομέα ώστε να φαίνεται η σχετική κίνηση της ροής αλλά και εξωτερικά στο περίβλημα. Τρίτον, μέτρησε το πάχος του υγρού στρώματος πάνω στην εσωτερική επιφάνεια των σκαφιδίων χρησιμοποιώντας ακτίνες Laser. Το κενό μεταξύ του δρομέα Pelton και του περιβλήματος δημιουργεί πολλά προβλήματα, κάνοντας τις απεικονίσεις της ροής πολύ δύσκολα πραγματοποιήσιμες. Ενώ η αρχική αλληλεπίδραση της ελεύθερης δέσμης με τα σκαφίδια δεν έχει παρατηρηθεί ποτέ.



Σχήμα 1.33 Οπτικοποίηση της ροής στα σκαφίδια (Perrig, 2007)

Παρατηρήθηκαν λεπτομέρειες της ροής στην εσωτερική επιφάνεια του σκαφιδίου που υποδεικνύουν ότι η βίαιη κρούση του νερού με το σκαφίδιο, σε συνδυασμό με τον αέρα του περιβάλλοντος προκαλούν στιγμιαίες υψηλές πιέσεις. Επίσης, παρατηρήθηκε με μεγάλη ακρίβεια η προσκόλληση της ροής στο πίσω μέρος του σκαφιδίου (Coanda effect). Κατά την είσοδο του σκαφιδίου στη ροή κάποια ποσότητα νερού προσκολλάται στο πίσω μέρος του σκαφιδίου προκαλώντας αρχικά μία ροπή αντίθετη στην κίνηση του σκαφιδίου. Πολύ γρήγορα όμως αυτή αλλάζει κατεύθυνση και προκαλείται μία θετική ροπή αρκετά σημαντική ως ποσοστό της συνολικής που τραβάει το σκαφίδιο αποδίδοντας του ενέργεια. Ενδεικτικά στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα της οπτικοποίησης σε συνδυασμό με σχηματική απεικόνιση της ροής όπως προέκυψε από την αριθμητική προσομοίωση.

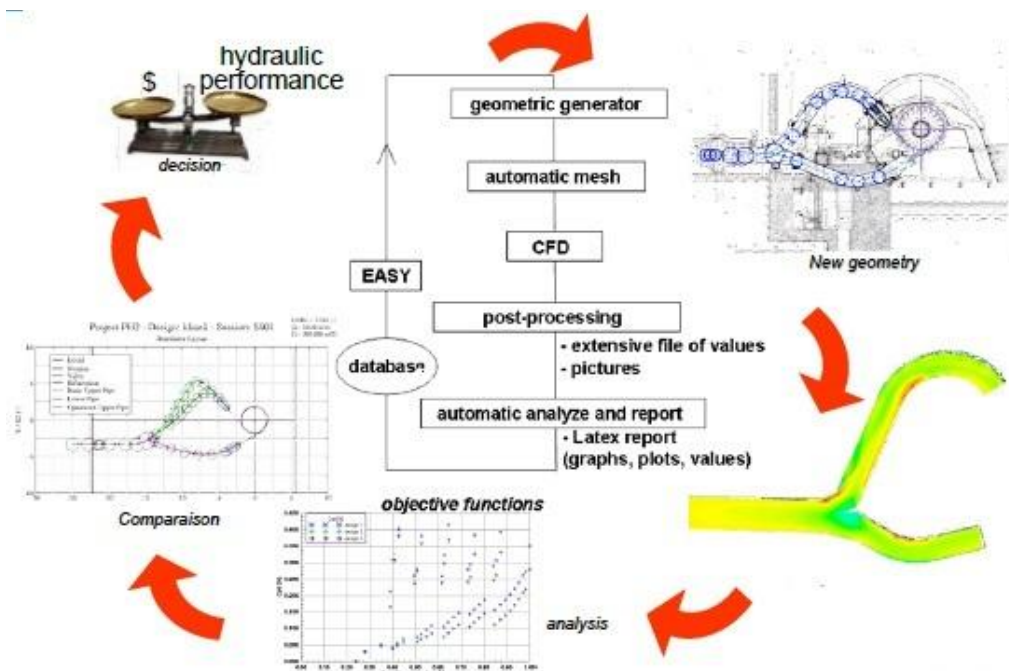
Angular Position	Observations	CFD	Interpretation
-40°			
-20°			
-10°			
5°			
20°			

Σχήμα 1.34 Οπτικοποίηση, αριθμητική προσομείωση και σχηματική απεικόνιση της ροής σε διάφορες θέσεις του σκαφιδίου (Perrig, Parkinson, & Avellan, 2006)

Κεφάλαιο 2: Υπολογιστική ρευστομηχανική

2.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική ή CFD (Computational Fluid Dynamics) είναι η επιστήμη που σαν αντικείμενο μελέτης έχει την πρόβλεψη ιδιοτήτων των ρευστών και της ροής χωρίς να είναι απαραίτητη η διενέργεια πειράματος. Για την μελέτη των ιδιοτήτων της ροής γίνεται επίλυση μαθηματικών σχέσεων που διέπουν τις διεργασίες αυτές, με χρήση αριθμητικών μεθόδων, σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Με αυτόν τον τρόπο, με μικρό κόστος και σε μικρό χρονικό διάστημα, παρέχονται στοιχεία που αφορούν όλο το πεδίο της ροής και όχι μεμονωμένα στοιχεία του χώρου, όπως συμβαίνει με τα περισσότερα πειράματα. Ακόμη, είναι δυνατή η διεξοδική διερεύνηση των ιδιοτήτων της ροής για διάφορες περιπτώσεις και συνθήκες, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την βελτιστοποίηση (Μπεργελές, 2006). Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται εποπτικά η διαδικασία βελτιστοποίησης διανομέα υδροστροβίλου με χρήση CFD.



Σχήμα 2.1 Διαδικασία βελτιστοποίησης υδροστροβίλου με χρήση CFD (Andritz Hydro)

Όπως γίνεται αντιληπτό, με τη χρήση μιας τέτοιας μεθόδου, σε συνδυασμό με πειράματα, είναι συνήθως δυνατή η πλήρης περιγραφή του εξεταζόμενου φαινομένου. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η όποια λύση προκύπτει, έχει την ακρίβεια του αντίστοιχου μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Σε κάθε περίπτωση το σφάλμα είναι αναπόφευκτο δεδομένου ότι χρησιμοποιείται αριθμητική μέθοδος επίλυσης και μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης των φυσικών φαινομένων. Αυτό που ουσιαστικά επιδιώκεται είναι η κατά το δυνατόν μικρότερη τάξη του αριθμητικού σφάλματος και η μικρότερη απόκλιση από τα πειραματικά αποτελέσματα όταν αυτά υπάρχουν.

2.1.1 Οι εξισώσεις που διέπουν τη ροή του ρευστού

Οι διάφορες μέθοδοι προσομοίωσης της ροής έχουν στόχο τη διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου προκειμένου να επιλυθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση των ρευστών. Οι εξισώσεις αυτές σε συντηρητική μορφή για, Νευτώνειο ρευστό, είναι οι:

1. Εξίσωση της συνέχειας (διατήρηση της μάζας)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0$$

η οποία στην περίπτωση ασυμπίεστου ρευστού, όπως το νερό, στους υδροστροβίλους όπου η πυκνότητα είναι σταθερή γίνεται:

$$\text{div} \vec{u} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

2. Εξίσωση της ορμής (διατήρηση της ορμής)

Η εξίσωση της ορμής δηλώνει ότι η χρονική μεταβολή της ορμής ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται σε ρευστοστοιχείο. Για κάθε άξονα του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων θα είναι:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \cdot \text{grad}u) + S_{Mx}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \cdot \text{grad}v) + S_{My}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \cdot \text{grad}w) + S_{Mz}$$

3. Διατήρηση της ενέργειας

Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας εκφράζει τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής.

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot i \cdot \vec{u}) = -p \cdot \text{div} \vec{u} + \text{div}(k \cdot \text{grad}T) + \Phi + S_i$$

Η εξίσωση αυτή σε περίπτωση ασυμπίεστου ρευστού εκφυλίζεται σε εξίσωση θερμοκρασίας, αφού $\rho = \text{const}$ και $\text{div} \vec{u} = 0$ και $i = cT$:

$$\rho \cdot c \frac{\partial(T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot i \cdot \vec{u}) = \text{div}(k \cdot \text{grad}T) + \Phi + S_i$$

Όπου

ρ : πυκνότητα του ρευστού

u, v, w : η ταχύτητα του ρευστοστοιχείου στις άξονες x, y, z αντίστοιχα

μ : η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού

p : η στατική πίεση

S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz} : η προδιδόμενη ορμή, από την επίδραση των εξωτερικών δυνάμεων, ανά μονάδα όγκου και χρόνου στο ρευστοστοιχείο στους τρεις άξονες

i : εσωτερική ενέργεια που στην περίπτωση ασυμπίεστου έχει γραμμική εξάρτηση μόνο από τη θερμοκρασία

Φ : συνάρτηση αναντιστρέπτων απωλειών τριβής (συνεκτικότητας) (dissipation function)

k : θερμική αγωγιμότητα

S_i : πηγή ενέργειας που ορίζεται ως $S_i = S_E - \vec{u} \cdot \vec{S}_M$ όπου S_E προδιδόμενη στο ρευστό ενέργεια εξωτερικά

Συνήθως αναφερόμαστε σε αυτές τις εξισώσεις ως εξισώσεις Navier-Stokes. Στην περίπτωση των υδροστροβίλων το ρευστό είναι ασυμπίεστο (νερό σε φυσιολογικές συνθήκες) ενώ συχνά η εξίσωση της ενέργειας (θερμοκρασίας για ασυμπίεστα ρευστά) παραλείπεται καθώς η θερμοκρασία του νερού θεωρείται πρακτικά σταθερή.

2.1.2 Μοντελοποίηση της τύρβης

Όλες οι περιπτώσεις ροής σε μηχανολογικές εφαρμογές γίνονται ασταθείς πάνω από κάποιον αριθμό Reynolds (υπενθυμίζεται ότι $Re = \frac{U \cdot L}{\nu}$ όπου U η χαρακτηριστική ταχύτητα, L η χαρακτηριστική ταχύτητα της ροής και ν η κινηματική συνεκτικότητα) ανάλογα με την περίπτωση. Στην περίπτωση της ροής σε σωλήνα η οριακή τιμή αυτή είναι $Re_{crit} = 4000$. Κάτω από αυτό το όριο η ροή θεωρείται στρωτή ενώ πάνω από αυτό θεωρείται τυρβώδης. Στην τυρβώδη περιοχή, μία χαοτική και τυχαία κινητική κατάσταση δημιουργείται στην οποία η ταχύτητα και η πίεση αλλάζουν συνεχώς με τον χρόνο σε συγκεκριμένες περιοχές της ροής. Η μελέτη της τύρβης είναι πολύ σημαντική σε αρκετές περιπτώσεις (όπως στη ροή στον διανομέα και την δέσμη του υδροστροβίλου) και έχουν αναπτυχθεί μοντέλα προσομοίωσης της στην υπολογιστική ρευστομηχανική.

Ακόμα και σε περιπτώσεις ροής όπου οι κύριες ταχύτητες έχουν μόνο μία ή δύο διαστάσεις στο χώρο, οι τυρβώδεις διακυμάνσεις εξελίσσονται πάντα στις τρεις διαστάσεις. Η οπτικοποίηση της τύρβης δείχνει περιστρεφόμενες δομές διαφόρων μεγεθών στη ροή που λέγονται δίνες. Περιοχές του ρευστού που αρχικά έχουν απόσταση μεταξύ τους μπορεί να έρθουν κοντά λόγω των δινών σε τυρβώδεις ροές. Αυτό έχει σαν συνέπεια ανταλλαγή μάζας, θερμότητας και ορμής μεταξύ αυτών των περιοχών. Αυτή η ανάμειξη οδηγεί σε υψηλούς συντελεστές διάχυσης της μάζας, της ορμής και της θερμότητας που έχει ως αποτέλεσμα τις αυξημένες ενεργειακές απώλειες στις τυρβώδεις ροές.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι δίνες έχουν μεγάλη διακύμανση στο μέγεθος τους. Για παράδειγμα σε μια διατομή δέκα εκατοστών με ροή σε υψηλούς αριθμού Reynolds οι δίνες μπορεί να φτάνουν μέχρι τα 50μm. Για να αποδοθούν αυτά τα φαινόμενα σε ένα υπολογισμό θα χρειαζόνταν ένα πλέγμα της τάξης των 10^9 με 10^{12} στοιχείων. Παράλληλα, η έντονη χρονική διακύμανση των δινών θα απαιτούσε πολύ μικρό χρονικό βήμα στην επίλυση της τάξης των 100μs. Τα παραπάνω δείχνουν το μέγεθος της υπολογιστικής ισχύος που θα χρειαζόταν για να προσομοιωθεί η τύρβη απευθείας από τις καταστατικές εξισώσεις. Με τις σημερινές δυνατότητες των ηλεκτρονικών υπολογιστών κάτι τέτοιο είναι αδύνατο. Προκειμένου να μπορέσουν να προσομοιωθούν, σε ένα βαθμό, τα φαινόμενα της τύρβης αναπτύχθηκαν κάποια υπολογιστικά μοντέλα με γνώμονα το μεγάλο εύρος του πεδίου εφαρμογών τους, την απλότητα και την εξοικονόμηση υπολογιστικής ισχύος. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα τύρβης δίνονται στον επόμενο πίνακα. Στις εξισώσεις της ροής που περιγράφηκαν προηγουμένως προστίθενται οι όροι των μοντέλων τύρβης και προκύπτουν οι τελικές εξισώσεις προς επίλυση αφού πρώτα μετασχηματιστούν στην μορφή RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Για περαιτέρω μελέτη αυτών των μοντέλων ο αναγνώστης παραπέμπεται στην βιβλιογραφία (Versteeg & Malalasekera, 1995)(Ferziger & Peric, 2002), (www.cfdonline.com).

Classical models	Based on (time-averaged) Reynolds equations 1. zero equation model – mixing length model 2. two-equation model – $k-\epsilon$ model 3. Reynolds stress equation model 4. algebraic stress model
Large eddy simulation	Based on space-filtered equations

Σχήμα 2.2 Μοντέλα τύρβης

Η χρονική ολοκλήρωση απλοποιεί μεν το πρόβλημα της μαθηματικής περιγραφής τυρβωδών πεδίων, αφού οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι μόνιμες, πλην όμως εισάγει ως επιπλέον αγνώστους τις τάσεις Reynolds. Εφόσον οι διαθέσιμες εξισώσεις δεν επιτρέπουν τον υπολογισμό των τάσεων αυτών, αντικείμενο της μοντελοποίησης της τύρβης είναι ο συσχετισμός τους με τις μέσες τιμές των μεγεθών του πεδίου ροής. Κατ'

αυτόν τον τρόπο το σύστημα κλείνει, επειδή οι εξισώσεις διατήρησης περιλαμβάνουν πλέον ως αγνώστους μόνο τις μέσες τιμές των μεταβλητών και όχι των διακυμάνσεων τους. Ο συσχετισμός των τάσεων Reynolds με τις μέσες τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών βασίζεται στην υπόθεση Boussinesq, η οποία έγινε το 1897. Σύμφωνα με αυτήν οι τυρβώδεις τάσεις συνδέονται με τις μέσες τιμές των ταχυτήτων μέσω της τυρβώδους συνεκτικότητας (μ_t), αντιστοίχως προς την τυχαία μοριακή κίνηση, η οποία εκφράζεται με τη δυναμική συνεκτικότητα (μ).

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι το standard k-ε. Αυτό αναπτύχθηκε, αρχικά, από τους Jones and Launder το 1973. Οι βασικές παραδοχές του είναι ότι ισχύει η υπόθεση Boussinesq και ότι η τύρβη είναι ισότροπη. Η τυρβώδης συνεκτικότητα δίνεται από τη σχέση:

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

όπου:

ρ : η πυκνότητα του ρευστού

C_μ : σταθερά που δίνεται στη βιβλιογραφία 0.09

k : η τυρβώδης κινητική ενέργεια που ορίζεται ως $k = \frac{1}{2} \cdot (u'u' + v'v' + w'w')$

ε : ρυθμός καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας που ορίζεται ως

$$\varepsilon = \nu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \cdot \frac{\partial u''}{\partial y}$$

Τα k και ε υπολογίζονται επιλύοντας δύο διαφορετικές εξισώσεις για τη μεταφορά τους. Η εξίσωση μεταφοράς του k προκύπτει από τις εξισώσεις Navier-Stokes πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη με τις διαταραχές ταχύτητας u'' , ολοκληρώνοντας χρονικά και μετά αφαιρώντας την εξίσωση μέσης κινητικής ενέργειας του πεδίου. Η τελευταία διατυπώνεται πολλαπλασιάζοντας τις ολοκληρωμένες χρονικά εξισώσεις ορμής με τις μέσες τιμές των ταχυτήτων \tilde{u}_i . Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και για το ε .

Το μοντέλο k-ε παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά, ωστόσο έχει και αδυναμίες κυρίως λόγω των υποθέσεων στις οποίες βασίζεται η ανάπτυξή του. Έχει διαπιστωθεί ότι σε περιοχές ανακυκλοφορίας της ροής η ανομοιογένεια μπορεί να γίνει σημαντική. Ακόμη, σημειώνεται ότι λόγω της υπόθεσης Boussinesq οι τάσεις Reynolds είναι πάντα θετικές, γεγονός που αποκλείει την ανάστροφη μετάδοση ενέργειας από τις μικρές στις μεγάλες δίνες (back – scatter), η οποία εμφανίζεται σε σημεία ανακοπής ή ανακυκλοφορίας (Βαρώνος, 1999).

2.1.3 Συναρτήσεις τοιχώματος

Το τυρβώδες οριακό στρώμα εμφανίζεται στο στερεό τοίχωμα του αγωγού και έχει σημαντική επίδραση στο πεδίο ροής. Το ρευστό δέχεται μακροσκοπικά μεγαλύτερη διατμητική τάση λόγω των τυρβωδών διαταραχών η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη στις εξισώσεις ορμής. Πειραματικά έχει διαπιστωθεί ότι στην περίπτωση τυρβώδους οριακού στρώματος η ταχύτητα της ροής παρουσιάζει δύο κλίσεις. Συγκεκριμένα, πολύ κοντά στο τοίχωμα η ταχύτητα εμφανίζει γραμμική κλίση και πιο μακριά από αυτό λογαριθμική κλίση. Για να είναι δυνατή η εξέταση των δύο κλίσεων με το μοντέλο k-ε απαιτείται πλέγμα μεγάλης πυκνότητας κοντά στα τοιχώματα. Για την απλοποίηση των υπολογισμών χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις τοιχώματος (wall functions). Για την χρήση αυτών των συναρτήσεων γίνεται αφ' ενός η παραδοχή ότι η ροή πολύ κοντά στο τοίχωμα συμπεριφέρεται σαν μονοδιάστατη ροή Couette και αφ' εταίρου η παραδοχή ότι στο οριακό στρώμα η παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας ισούται με το ρυθμό καταστροφής της. Η μορφή του οριακού στρώματος προδιαγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$V_{//}^+ = \begin{cases} y^+ & \text{αν } y^+ \leq 11.63 \\ \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) & \text{αν } y^+ > 11.63 \end{cases}$$

όπου

$$V_{//}^+ = \frac{V_{//}}{\sqrt{\tau_w/\rho}}, \quad y^+ = \frac{\rho \cdot y}{\mu} \cdot \sqrt{\tau_w/\rho}$$

Στις ανωτέρω εξισώσεις με $V_{//}$ συμβολίζεται η παράλληλη στο τοίχωμα συνισταμένη της ταχύτητας και με τ_w η συνισταμένη διατμητική τάση. Με y συμβολίζεται η κάθετη απόσταση από το τοίχωμα, με κ η σταθερά Von Karman ($\kappa = 0.4187$) και με E η λογαριθμική σταθερά ($E=9.793$). Ο εκθέτης + συμβολίζει την αδιάστατη (για το οριακό στρώμα) ταχύτητα και κάθετη απόσταση από το τοίχωμα αντιστοίχως.

Εφαρμόζοντας την προηγούμενη εξίσωση στις διακριτοποιημένες εξισώσεις των κελιών που συνορεύουν με το τοίχωμα, στην ουσία προδιαγράφεται το προφίλ του οριακού στρώματος και η διατμητική τάση που εξασκείται λόγω της ύπαρξης του στο ρευστό. Στην πράξη απαιτείται να υπολογιστεί πρώτα η αδιάστατη απόσταση από το τοίχωμα (y^+), η οποία από την προηγούμενη εξίσωση και με την παραδοχή ότι η παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας ισούται με τον ρυθμό καταστροφής της δίνεται από τη σχέση:

$$y_P^+ = \left[\frac{\rho \cdot C_\mu^{1/4} \cdot k^{1/2}}{\mu} \right]_P \cdot y_P$$

όπου το P αντιστοιχεί στο κέντρο του κελιού που συνορεύει με το τοίχωμα. Επομένως με βάση την τιμή του y_P^+ μπορεί να υπολογιστεί η συνιστώσα της διατμητικής τάσης τ_w , η οποία εισάγεται στους όρους πηγής των διακριτοποιημένων εξισώσεων Navier-Stokes (Βαρώνος, 1999).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οι Standard Wall Functions που περιλαμβάνονται στο υπολογιστικό πακέτο Fluent. Αυτές περιλαμβάνουν μόνο την λογαριθμική περιοχή που είναι από $y^+ 30$ ως 300 . Αλλιώς χρησιμοποιούνται άλλες συνθήκες τοιχώματος (όπως οι Enhanced Wall Functions που έχει το Fluent) ή δεν χρησιμοποιούνται συναρτήσεις τοιχώματος αλλά απαιτείται πυκνό πλέγμα. Το y^+ έχει, συνεπώς, επιτρεπόμενες τιμές $30 < y^+ < 300$ για τα κελιά που συνορεύουν με τον τοίχο των οποίων η απαίτηση για ικανοποίηση έπαιξε σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση του τελικού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε εδώ για την μοντελοποίηση.

2.1.4 Κατηγοριοποίηση μεθόδων προσομοίωσης

Με βάση τον τρόπο περιγραφής του πεδίου της ροής οι μέθοδοι προσομοίωσης χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες τις Eulerian και τις Lagrangian:

Στην Eulerian θεώρηση του πεδίου ροής παρακολουθείται η κινητική κατάσταση αυτού σε κάποια θέση, χωρίς ουσιαστικά να ενδιαφέρει ποιό στοιχείο του ρευστού κατέχει την θέση αυτή σε κάθε χρονική στιγμή. Μία τέτοιου είδους παρακολούθηση της ροής απαιτεί τον καθορισμό του διανύσματος της ταχύτητας σε υπολογιστικού στοιχείου καθώς με την πάροδο του χρόνου, το ένα μετά το άλλο τα ρευστοστοιχεία, σαν μια αλυσίδα διέρχονται από την θέση που εξετάζεται. Τα υπολογιστικά στοιχεία στην προσέγγιση αυτή μένουν ακίνητα. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν αυτήν την προσέγγιση είναι πλεγματικές, δηλαδή απαιτούν δημιουργία πλέγματος για την διακριτοποίηση του χώρου σε υπολογιστικά στοιχεία των οποίων η συνδεσιμότητα δεν αλλάζει. Στην συντριπτική πλειοψηφία των εμπορικών προγραμμάτων CFD (συμπεριλαμβανομένου και του Fluent) χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος. Κάποια από τα πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι η καταλληλότητα τους σε έγκλειστες ροές και ροές με σταθερά όρια (ροές σε ακροφύσια, σωλήνες κλπ.) καθώς και το γεγονός ότι έχουν μεγάλη ιστορία και έχουν εξελιχθεί αρκετά, αποτελώντας ώριμη μέθοδο προσομοίωσης με αποδεδειγμένη αξιοπιστία. Στα μειονεκτήματα τους περιλαμβάνονται η δύσκολη/χρονοβόρα προσομοίωση γεωμετριών με κινούμενα τοιχώματα και το ότι δεν μπορούν να διαχειριστούν εύκολα ροές με ασυνέχειες (π.χ. ελεύθερη επιφάνεια μεταξύ νερού και αέρα).

Η Lagrangian θεώρηση του πεδίου ροής είναι επέκταση στη μηχανική των ρευστών του τρόπου απεικόνισης της κίνησης των υλικών σημείων όπως αυτή παρουσιάζεται στην κλασική μηχανική. Στην περίπτωση αυτή παρακολουθείται η κίνηση κάποιου ρευστοστοιχείου καθώς διατρέχει την τροχιά του από την αρχική χρονική στιγμή οπότε και βρίσκεται στην αρχική του θέση. Η σωματιδιακή φάση θεωρείται διακριτή και διασκορπιζόμενη στη συνεχή φάση του ρευστού μέσου. Η θεώρηση αυτή οδηγεί στον υπολογισμό των τροχιών των σωματιδίων μέσω των οποίων περιγράφεται το πεδίο της σωματιδιακής ροής. Οι μέθοδοι αυτές είναι, συνήθως, μη πλεγματικές ενώ τα υπολογιστικά στοιχεία είναι φαινομενικά ασύνδετα μεταξύ τους. Ο λόγος είναι ότι χρησιμοποιούνται συναρτήσεις που ρυθμίζουν την επίδραση του κάθε στοιχείου με όλα τα γειτονικά του. Πλεονέκτημα τους είναι η εύκολη προσομοίωση προβλημάτων με κινούμενες/μεταβαλλόμενες γεωμετρίες και διεπιφάνειες. Μειονέκτημα τους είναι ότι όντας σχετικά πρόσφατες, δεν έχουν μελετηθεί πλήρως, βρίσκονται ακόμα σε φάση διερεύνησης. Τέτοιες μέθοδοι συναντώνται συνήθως σε οικείους κώδικες CFD πανεπιστημίων και ερευνητικών κέντρων.

2.1.5 Πως δουλεύει ένας κώδικας CFD

Ένας κώδικας CFD δομείται γύρω από τους αριθμητικούς αλγόριθμους που επιλύουν την ροή του ρευστού. Συνήθως έχουν γραφικό περιβάλλον για ρύθμιση των παραμέτρων εισόδου. Τα βασικά τμήματα ενός τέτοιου προγράμματος είναι το τμήμα εισαγωγής δεδομένων (pre-processor), το τμήμα επίλυσης (solver) και το τμήμα επεξεργασίας αποτελεσμάτων (post-processor).

Pre-processor

Ο pre-processor είναι το τμήμα όπου εισάγουμε τα δεδομένα του προβλήματος. Σε αυτόν τα δεδομένα μετατρέπονται σε μορφή κατάλληλη για επεξεργασία από τον solver. Πιο συγκεκριμένα σε αυτό το τμήμα περιλαμβάνονται:

- Ο ορισμός-δημιουργία της γεωμετρίας του προβλήματος. Μερικά εμπορικά προγράμματα έχουν την δυνατότητα εισαγωγής στον pre-processor γεωμετρίας από προγράμματα CAD.
- Η δημιουργία του πλέγματος, ο διαχωρισμός της γεωμετρίας δηλαδή σε μικρότερα μη επικαλυπτόμενα τμήματα που λέγονται κελιά ή όγκοι ελέγχου. Τα κελιά ενός πλέγματος, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους, όταν μιλάμε για τρισδιάστατη γεωμετρία μπορεί να είναι πολυεδρικά, εξαεδρικά, τετραεδρικά ή και ένας συνδυασμός αυτών. Ακόμη, εδώ γίνεται τοπική πύκνωση ή αραιώση του

πλέγματος προκειμένου να υπολογιστούν αναλυτικότερα κάποιες περιοχές (όπως το οριακό στρώμα και οι συναρτήσεις τοιχώματος σε τυρβώδεις ροές).

- Η επιλογή των φυσικών ή χημικών φαινομένων προς προσομοίωση.
- Ο ορισμός των συνοριακών συνθηκών. Ο ορισμός των ιδιοτήτων, δηλαδή, των επιφανειών με τα οποία συνορεύουν τα όρια του ρευστού (π.χ. τοίχος, είσοδος κ.λ.π.).
- Ο ορισμός των ιδιοτήτων του(ή των) ρευστού.

Η επίλυση της ροής γίνεται με δύο μεθόδους:

- Staggered (μετατοπισμένα)
- Collocated (ομόθετα)

Στην πρώτη, οι ταχύτητες υπολογίζονται στα κέντρα των συνοριακών επιφανειών ενός κελιού ενώ η πίεση στο κέντρο του. Στη δεύτερη, ταχύτητα και πίεση υπολογίζονται στο κέντρο. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιείται στα περισσότερα προγράμματα. Τα υπόλοιπα σημεία υπολογίζονται κατόπιν με παρεμβολές. Η ακρίβεια της λύσης που θα προκύψει εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλέγμα. Αν δεν είναι αρκετά πυκνό δεν θα έχει καλή ακρίβεια η λύση ή σε ακραίες περιπτώσεις δεν θα αποδίδονται καν κάποια φαινόμενα. Το πάνω όριο τίθεται από την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ και από τον χρόνο που διατίθεται (παίζει σημαντικό ρόλο σε περίπτωση που χρειάζεται η δοκιμή πολλών εναλλακτικών όπως στην βελτιστοποίηση). Αυτός είναι ένας ακόμα λόγος που χρειάζεται η τοπική πύκνωση ή αραίωση του πλέγματος. Η κατασκευή του κατάλληλου πλέγματος μπορεί να είναι μια αρκετά περίπλοκη διαδικασία ανάλογα με το πρόβλημα και την εμπειρία του χρήστη. Κάποια προγράμματα (όπως τα CFX και Hexpress) δίνουν τη δυνατότητα αυτόματης προσαρμογής του πλέγματος.

Solver

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αριθμητικής επίλυσης που χρησιμοποιούνται στο τμήμα επίλυσης του προγράμματος. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών, των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων όγκων. Οι κύριες διαφορές τους έχουν να κάνουν με τον τρόπο που προσεγγίζονται οι μεταβλητές της ροής (u, v, w, p, ρ , μεταβλητές μοντέλου τύρβης) και τις διαδικασίες διακριτοποίησης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως στους εμπορικούς κώδικες και στο Fluent είναι αυτή των πεπερασμένων όγκων.

Ο αριθμητικός αλγόριθμος της μεθόδου περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Τυπική ολοκλήρωση των εξισώσεων της ροής σε όλους τους όγκους ελέγχου του πλέγματος.

2. Διακριτοποίηση η οποία περιλαμβάνει την αντικατάσταση διαφόρων μορφών προσεγγίσεων (του τύπου πεπερασμένων διαφορών) για τους όρους που προέκυψαν στις ολοκληρωμένες εξισώσεις και αναπαριστούν φαινόμενα που μεταβάλλουν τη ροή όπως η διάχυση, η συναγωγή και οι πηγές.
3. Επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων με χρήση επαναληπτικών μεθόδων.

Το πρώτο βήμα της μεθόδου είναι αυτό που τη διαφοροποιεί από τις υπόλοιπες. Αυτό εξασφαλίζει ότι ικανοποιούνται οι εξισώσεις διατήρησης σε κάθε ξεχωριστό όγκο ελέγχου (κελί). Ακόμα στον κώδικα επίλυσης περιέχονται και πιο εξειδικευμένες τεχνικές διακριτοποίησης κατάλληλες για τα διάφορα φαινόμενα. Η διακριτοποίηση καταλήγει σε ένα αλγεβρικό σύστημα γραμμικών εξισώσεων. Η πολυπλοκότητα και το μέγεθος αυτού εξαρτάται από τις διαστάσεις του προβλήματος, των αριθμών των κόμβων και τις τεχνικές διακριτοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται συνηθέστερα για την επίλυση του είναι η μέθοδος του τριδιαγώνιου αλγόριθμου πινάκων TDMA (αλγόριθμος Thomas) λόγω της απλότητας του και των μικρών απαιτήσεων σε μνήμη. Ακόμα για την σωστή σύνδεση μεταξύ της πίεσης και της ταχύτητας ο υπολογισμός των οποίων μπορεί να μην γίνεται ταυτόχρονα (coupled) αλλά ξεχωριστά (segregated) χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι που βασίζονται στην προσέγγιση της πρόβλεψης-διόρθωσης όπως οι SIMPLE, PISO και άλλες. (Versteeg & Malalasekera, 1995).

Επίσης, η μεταβλητή του χρόνου μπορεί να μην ληφθεί υπόψη (μόνιμη κατάσταση) ή να ληφθεί υπόψη (μη μόνιμη κατάσταση). Η επίλυση μπορεί να γίνει χωρίς να θεωρούνται τα μεταβατικά φαινόμενα (steady state), με απαλοιφή του χρόνου με χρήση διάφορων χειριστικών μεθόδων όπως αυτή του ψευδο-χρόνου. Ακόμα η επίλυση μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη την μεταβλητή του χρόνου (unsteady state) σε συγκεκριμένα χρονικά βήματα. Η επίλυση αυτή είναι σημαντική όταν μας ενδιαφέρουν τα μεταβατικά φαινόμενα της ροής, έχει όμως αυξημένο υπολογιστικό κόστος.

Γενικά, οι επιλογές που δίνονται στην κατασκευή του πλέγματος και τους τρόπους επίλυσης από τους κώδικες CFD είναι πολλές. Ο καταλληλότερος συνδυασμός διαφέρει κάθε φορά και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το είδος και τις ιδιαιτερότητες του κάθε φυσικού προβλήματος, τα είδη των φαινομένων που επιθυμείται να παρατηρηθούν και η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς. Το τελικό κριτήριο είναι πάντα η σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά όπου αυτά υπάρχουν.

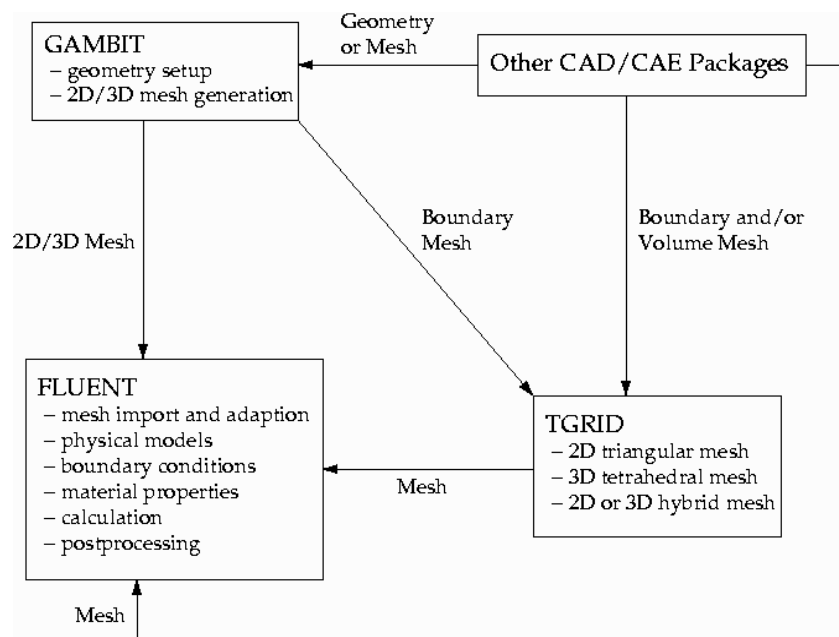
Post-processor

Στο τμήμα αυτό του κώδικα γίνεται η επεξεργασία και οπτικοποίηση των τελικών αποτελεσμάτων της επίλυσης. Μπορούν να υπολογιστούν εδώ νέες μεταβλητές που παράγονται από τις βασικές που υπολόγισε το τμήμα επίλυσης. Η γραφική απεικόνιση των διαφόρων μεγεθών μπορεί να γίνει με 2D ή 3D απεικονίσεις, ισοϋψείς καμπύλες (contours), διανύσματα και άλλα. Οι σύγχρονοι κώδικες έχουν μεγάλες ικανότητες

απεικόνισης και δημιουργίας video. Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον για καλύτερη και ευκολότερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων των προγραμμάτων CAE (Computer Aided Engineering) έχει οδηγήσει στην δημιουργία εξειδικευμένων προγραμμάτων οπτικοποίησης όπως το Tecplot, που χρησιμοποιήθηκε εδώ, τα οποία τροφοδοτούνται από αρχεία δεδομένων σε κατάλληλη μορφή που εξάγουν τα προγράμματα επίλυσης.

2.2 Το υπολογιστικό πακέτο Fluent

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστεί πιο διεξοδικά το υπολογιστικό πακέτο Fluent της Ansys που χρησιμοποιήθηκε για τις αριθμητικές προσομοιώσεις σε αυτήν την εργασία. Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε είναι η 6.3.26 (64bit). Ο pre-processor του πακέτου λέγεται Gambit και είναι ξεχωριστό πρόγραμμα, η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε είναι η 2.4.6 (32bit). Ο post-processor έχει μαζί με τον solver το ίδιο περιβάλλον εργασίας (Fluent documentaion). Παρακάτω δίνεται ένα σχήμα που παρουσιάζει συνοπτικά την δομή του υπολογιστικού πακέτου Fluent.



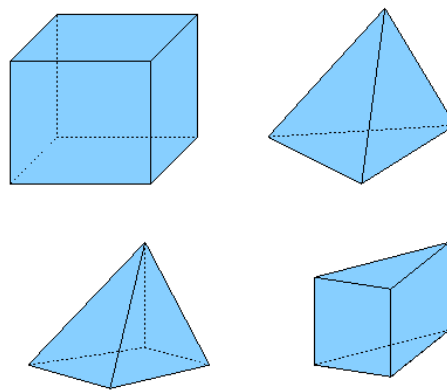
Σχήμα 2.3 Δομή υπολογιστικού πακέτου Fluent

2.2.1 Gambit

Το Gambit έχει την δυνατότητα τόσο να κατασκευάσει την γεωμετρία όσο και το υπολογιστικό πλέγμα. Παράλληλα σε αυτό ρυθμίζονται οι συνοριακές συνθήκες για όλες τις επιφάνειες του μοντέλου και το είδος του ρευστού.

Για την δημιουργία της γεωμετρίας παρέχεται ένα περιβάλλον που μοιάζει αρκετά με αυτά των προγραμμάτων CAD. Δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας σημείων (vertices), καμπυλών (edges), επιφανειών (faces) και όγκων (volumes) στον τρισδιάστατο χώρο ξεχωριστά ή βηματικά ξεκινώντας από το σημείο και καταλήγοντας στον όγκο. Ακόμα κάθε γεωμετρική ενότητα μπορεί να επεξεργαστεί με διάφορες εντολές ενώ οι επιφάνειες και οι όγκοι μπορούν να τροποποιηθούν μεταξύ τους με χρήση των πράξεων της άλγεβρας Bool (Boolean operations). Γενικά, παρέχονται αρκετές δυνατότητες για την δημιουργία αρκετά σύνθετων γεωμετριών. Τέλος, το Gambit έχει δυνατότητα εισαγωγής και εξαγωγής γεωμετριών από και προς προγράμματα σχεδίασης CAD όπως τα Inventor, CATIA, Solidworks και άλλα.

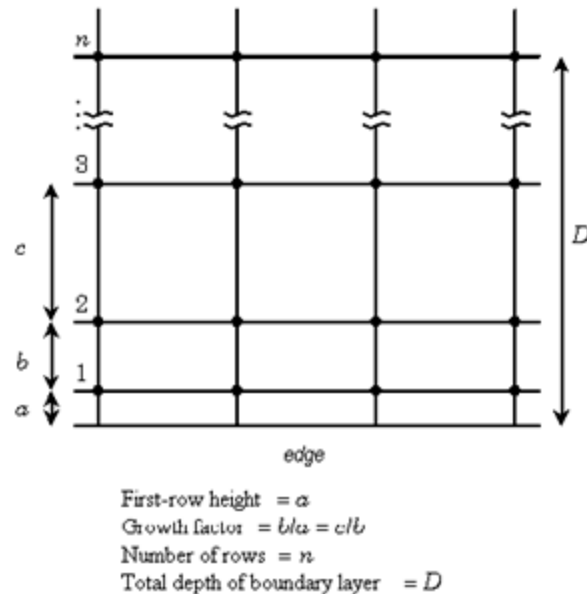
Για τη δημιουργία του πλέγματος προσφέρονται αρκετές δυνατότητες. Μπορεί να κατασκευαστεί πλέγμα σε ακμές, επιφάνειες ή και απευθείας στους όγκους της γεωμετρίας γεγονός που δίνει μεγάλη ευελιξία στον χρήστη. Το πλέγμα στον όγκο μπορεί να δημιουργηθεί απευθείας βάσει εργαλείων που παρέχονται είτε διαδοχικά ξεκινώντας από την τοποθέτηση των κόμβων στις ακμές, κατόπιν στο πλέγμα των επιφανειών που ορίζουν αυτές και τέλος στον όγκο που ορίζεται από τις επιφάνειες. Τα στοιχεία του πλέγματος μπορεί να είναι εξαεδρικά (Hex), συνδυασμός εξαεδρικών (κυρίως) και σφηνοειδών στοιχείων (Hex/Wedge), συνδυασμός τετραεδρικών και πολυεδρικών στοιχείων (Tet/Hybrid).



Σχήμα 2.4 Εξαεδρικά, τετραεδρικά, πυραμειδοειδή και σφηνοειδή στοιχεία 3D πλέγματος

Παράλληλα, μπορεί να γίνει τοπική πύκνωση κοντά στα τοιχώματα σε επιλεγμένες επιφάνειες βάσει επιλογής παραμέτρων με χρήση αυτοματοποιημένου εργαλείου ή με την τοποθέτηση από το χρήστη. Η τοπική πύκνωση είναι πολύ σημαντική στις τυρβώδεις ροές όπου εμφανίζεται το τυρβώδες οριακό στρώμα πολύ κοντά στο τοίχωμα και εφαρμόζονται οι συναρτήσεις τοιχώματος. Στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα αρκετά πυκνό πλέγμα κοντά στο τοίχωμα που να περιλαμβάνει μέσα του το οριακό στρώμα ώστε να ληφθούν υπόψη τα έντονα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα εκεί και επηρεάζουν όλη τη ροή αλλά και το υπόλοιπο πλέγμα να είναι αραιότερο ώστε να εξοικονομείται υπολογιστική ισχύς. Στο

επόμενο σχήμα δίνεται μια απεικόνιση της τοπικής πύκνωσης του πλέγματος κοντά στον τοίχο και των παραμέτρων που την καθορίζουν. Από εδώ και πέρα για λόγους συντομίας αυτή η τοπική πύκνωση του πλέγματος θα αναφέρεται ως οριακό στρώμα (όπως ονομάζεται και το αντίστοιχο εργαλείο στο gambit).



Σχήμα 2.5 Τοπική πύκνωση κοντά στο τοίχωμα και οι παραμέτρους που την ορίζουν

Ως προς την συνδεσιμότητα (προσδιορισμός των γειτονικών στοιχείων) του πλέγματος, αυτό μπορεί να είναι δομημένο (structured), μη δομημένο (unstructured) ή υβριδικό (hybrid). Ένα δομημένο πλέγμα χαρακτηρίζεται από την απλή συνδεσιμότητα (connectivity) των υπολογιστικών στοιχείων που εκφράζεται σαν ένας πίνακας δύο ή τριών διαστάσεων που αποθηκεύεται στη μνήμη του υπολογιστή. Τα στοιχεία του μπορεί να είναι μόνο τετραγωνικά (2D) ή εξαεδρικά (3D). Οι απλές σχέσεις της συνδεσιμότητας μας δίνουν την δυνατότητα εξοικονόμησης χώρου (μνήμης) αφού αυτές μπορούν να καθοριστούν απευθείας από τον τρόπο με τον οποίο αποθηκεύτηκαν στον υπολογιστή. Επιπλέον κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει ανάλογα με το αν το πλέγμα είναι σύμμορφο ή όχι. Σε ένα μη δομημένο πλέγμα η συνδεσιμότητα δεν παράγεται από απλές σχέσεις και δεν εκφράζεται άμεσα σαν ένας πίνακας δύο ή τριών διαστάσεων στην μνήμη του υπολογιστή. Αυτό επιτρέπει την χρήση οποιουδήποτε είδους στοιχείου στο πλέγμα. Σε σύγκριση με τα δομημένα πλέγματα οι απαιτήσεις σε μνήμη για ένα μη δομημένο πλέγμα μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερες αφού η συνδεσιμότητα των γειτονικών στοιχείων δεν ορίζεται ρητά από κάποια απλή σχέση. Υβριδικό θεωρείται ένα πλέγμα που περιλαμβάνει τμήματα με δομημένο και με μη δομημένο πλέγμα. Όπως έχει τονισθεί και προηγουμένως το είδος και η πυκνότητα του πλέγματος είναι πολύ σημαντικά για την σωστή προσέγγιση και επίλυση κάθε φυσικού προβλήματος.

Μετά την κατασκευή της γεωμετρίας, μέσα από το Gambit ρυθμίζονται οι συνοριακές συνθήκες που ισχύουν σε κάθε επιφάνεια μέσω του χαρακτηρισμού της. Υπάρχουν αρκετές επιλογές όπως τοίχος, εσωτερικό, είσοδος και άλλες. Τέλος υπάρχουν κάποιες πιο εξειδικευμένες επιλογές όπως η ρύθμιση περιστρεφόμενου πλέγματος και ο έλεγχος-επιδιόρθωση τοπικά της γεωμετρίας και του πλέγματος (Gambit documentation).

Το Gambit είναι ένα πρόγραμμα που παρέχει αρκετές δυνατότητες τόσο για την δημιουργία της γεωμετρίας όσο και για την δημιουργία-τροποποίηση του υπολογιστικού πλέγματος. Όμως, η εταιρεία Ansys έχει σταματήσει από την έκδοση 6 και μετά του Fluent να χρησιμοποιεί και να υποστηρίζει αυτόν τον pre-processor. Στις νεότερες εκδόσεις (η πλέον πρόσφατη είναι η 14.1) χρησιμοποιείται το αρκετά πιο απλοποιημένο (αλλά και με λιγότερες δυνατότητες προσαρμογής) εργαλείο Design Modeler το οποίο είναι ενσωματωμένο στο κυρίως πρόγραμμα επίλυσης. Γενικά, στις πιο σύγχρονες εκδόσεις οι εμπορικοί κώδικες CFD στο τμήμα της δημιουργίας της γεωμετρίας δίνουν βάρος στην εισαγωγή της από προγράμματα CAD ενώ η δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος τείνει να απλοποιηθεί με αυτοματοποιημένα εργαλεία. Το τελευταίο απαιτεί λιγότερες γνώσεις και δοκιμές (άρα και λιγότερο χρόνο) από τον χρήστη αλλά του δίνει και λιγότερες δυνατότητες προσαρμογής στο εκάστοτε πρόβλημα.

2.2.2 Fluent

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας δημιουργίας του υπολογιστικού πλέγματος αυτό εισάγεται στον solver του Fluent για την επίλυση των εξισώσεων της ροής. Ο κώδικας είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού C ενώ η αρχιτεκτονική του επιτρέπει να εκτελείται και παράλληλα. Εδώ ρυθμίζονται οι διάφοροι παράμετροι της αριθμητικής επίλυσης καθώς και έλεγχος και τροποποίηση του πλέγματος όπως η τοπική πυκνωση ή αραιώση του. Ακόμα, ενσωματωμένος σε αυτό το τμήμα είναι και ο post-processor της Ansys.

Οι ρυθμίσεις που παρέχονται είναι πολλές και περιλαμβάνουν ένα μεγάλο εύρος φυσικών προβλημάτων που μπορούν να επιλυθούν. Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει αναφορά μόνο στις επιλογές που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία, ενώ για τις γενικότερες δυνατότητες του προγράμματος ο αναγνώστης παραπέμπεται στη βιβλιογραφία (Fluent documentation).

Οι επιλογές του επιλύτη περιλαμβάνουν την παράμετρο του χρόνου (μόνιμη ή μη μόνιμη κατάσταση) και της διακριτοποίησης του, τον καθορισμό του είδους και των ιδιοτήτων του ρευστού, τα μοντέλα τύρβης, τη μέθοδο σύζευξης ταχυτήτων και πίεσης, τους συντελεστές υποχαλάρωσης των επαναληπτικών μεθόδων, τις συνθήκες που επικρατούν στα διάφορα όρια (π.χ. πίεση στην έξοδο ή ταχύτητα στην είσοδο), τις αρχικές τιμές από όπου θα ξεκινήσουν οι επαναλήψεις, το κριτήριο σύγκλισης και άλλα.

Οι επιλογές που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές προσομοιώσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία περιλαμβάνουν:

- Παρά το γεγονός ότι τα φαινόμενα που εξετάζονται (όπως οι δευτερεύουσες ροές) δεν είναι μόνιμα από τη φύση τους θεωρήθηκε αρκετά καλή η προσέγγιση της μόνιμης κατάστασης ως προς το χρόνο (Steady Time) τόσο για την εξαγωγή των συμπερασμάτων όσο και την εξοικονόμηση χρόνου και ισχύος.
- Η σύζευξη πίεσης-ταχυτήτων έγινε με βάση την πίεση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο SIMPLE που τις λύνει ξεχωριστά και τον αλγόριθμο COUPLED που βασίζεται και αυτός στην πίεση υπολογίζοντας όμως ταυτόχρονα τις μεταβλητές. Παρέχονται ακόμα οι αλγόριθμοι SIMPLER και PISO που βασίζονται στην πίεση ενώ (για τις περιπτώσεις συμπιεστού ρευστού) παρέχονται και αλγόριθμοι που βασίζονται στην πυκνότητα.
- Στα μοντέλα τύρβης υπάρχει μεγάλη δυνατότητα επιλογής μεταξύ των οποίων τα k-ε, k-ω, Reynolds Stress Model, Large Eddy Simulation (LES). Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο k-ε που χρησιμοποιεί δύο εξισώσεις και βασίζεται στην παραδοχή ότι η τύρβη είναι ισότροπη καθώς και στην υπόθεση Boussinesq. Οι σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν για αυτό το μοντέλο είναι αυτές που πρότεινε ως προεπιλεγμένες το Fluent. Για την επίλυση κοντά στο τοίχωμα παρέχονται τρία διαφορετικά μοντέλα (Standard Wall Functions, Non-equilibrium Wall Functions, Enhanced Wall Treatment) καθώς και η δυνατότητα ορισμού συνάρτησης από τον χρήστη. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις τοιχώματος Standard Wall Functions. Για να δουλέψουν σωστά αυτές πρέπει η αδιάστατη κάθετη απόσταση από το τοίχωμα (y^+) να είναι μεταξύ 30 και 300. Βάσει αυτού του περιορισμού έγινε τοπική αραίωση και πυκνωση του πλέγματος με χρήση του εργαλείου προσαρμογής πλέγματος (adapt).
- Η εξίσωση της ενέργειας παραλείφθηκε με την θεώρηση σταθερής θερμοκρασίας σε όλο το ασυμπίεστο ρευστό.
- Χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα αναδιάταξης των κελιών του πλέγματος (Reorder domain) με χρήση του αλγορίθμου Reverse Cuthill-McKee, με σκοπό την αποδοτικότερη αξιοποίηση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος.
- Η διακριτοποίηση των εξισώσεων έγινε με σχήματα δευτέρας τάξης για όλες τις εξισώσεις ενώ από το Fluent προσφέρονται ακόμα και άλλα σχήματα όπως τα πρώτης τάξεως, QUICK, Power Law και άλλα.
- Οι συντελεστές υποχαλάρωσης των μεθόδων μπορούν επίσης να μεταβληθούν από το χρήστη σε περίπτωση που αυτό κριθεί σκόπιμο.
- Τα κριτήρια σύγκλισης μπορούν να ρυθμιστούν με βάση την σχετική διαφορά μεταξύ των τιμών διαδοχικών επαναλήψεων για τις μεταβλητές της ροής (p, u, v, w, k, ϵ στην περίπτωση μας) αλλά και βάσει συγκεκριμένων μεγεθών όπως ο συντελεστής αντίστασης (C_D).

Οι παραπάνω είναι κάποιες από τις βασικές επιλογές που διατίθενται από το Fluent. Γενικά, υπάρχουν πολλές διαθέσιμες επιλογές στο τρόπο και στα μοντέλα επίλυσης και ο συνδυασμός των κατάλληλων για κάθε περίπτωση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Πιο αναλυτική παρουσίαση των επιλογών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία θα γίνει στο κεφάλαιο 4.

2.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Πέρα από την κατασκευή του πλέγματος και την επίλυση των εξισώσεων της ροής πολύ σημαντική είναι η σωστή οπτικοποίηση των κατάλληλων μεγεθών στα σημεία ενδιαφέροντος για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Το ίδιο το Fluent παρέχει την δυνατότητα για δημιουργία τομών, εναλλαγές στις όψεις, ισούψεις καμπύλες για διαφορές μεταβλητές, απεικόνιση διανυσμάτων καθώς και προσδιορισμό νέων μεταβλητών από τον χρήστη ή προκαθορισμένες.

Παρά τις δυνατότητες του post-processor του Fluent, επιλέχθηκε η χρήση του προγράμματος οπτικοποίησης Tecplot 360 στην έκδοση 2010 (64bit). Το Tecplot είναι ένα εύχρηστο εργαλείο οπτικοποίησης με πολλές δυνατότητες στην δημιουργία 2D, 3D και XY διαγραμμάτων καθώς και στην δημιουργία animation. Έχει την δυνατότητα να εισάγει δεδομένα τόσο σε αρχεία data όσο και απευθείας από τα περισσότερα εμπορικά πακέτα όπως και το Fluent.

Επίσης, σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων το Excel καθώς και κώδικας στην Fortran που έγραψε ο υποψήφιος διδάκτορας Κουκουβίνης Φοίβος. Αναλυτικότερα θα γίνει αναφορά σε αυτά στο κεφάλαιο 4. Στο παράρτημα που βρίσκεται στο τέλος της εργασίας δίνεται ο κώδικας της Fortran.

Κεφάλαιο 3: Πρώτη προσέγγιση του προβλήματος-Ροή σε αγωγό με κλίση 90°

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί η ροή σε μία απλούστερη περίπτωση από αυτήν του τελικού τμήματος του συστήματος έγχυσης του υδροστροβίλου. Πιο συγκεκριμένα, θα μελετηθεί η ροή σε αγωγό με κλίση 90°. Ακόμα θα γίνει η διαδικασία επικύρωσης (validation) όπως ορίζει ο φορμαλισμός μιας αριθμητικής προσομοίωσης CFD, με σύγκριση των αποτελεσμάτων του κώδικα που χρησιμοποιείται με πειραματικά για την περίπτωση της τυρβώδους ροής σε αγωγό κλίσης 90°.

3.1 Ροή σε αγωγό με κλίση 90°

Ως πρώτη προσέγγιση του προβλήματος, θα αναλυθεί η ροή σε αγωγό με κλίση 90°. Η τελική γεωμετρία που θα εξεταστεί θα είναι η ροή σε τέτοιου είδους αγωγό με εσωτερική διαμόρφωση (βάκτρο-πτερύγια). Συνεπώς είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πως επηρεάζεται η ροή μόνο από την αλλαγή κλίσης του αγωγού.

Αρχικά, οι απώλειες (εκφρασμένες σε m στήλης υγρού) που οφείλονται στην αποκόλληση, δηλαδή στο ότι το ρευστό δεν ακολουθεί ακριβώς τη γεωμετρία των τοιχωμάτων λόγω αλλαγών που συμβαίνουν σε αυτή, ανήκουν στις εντοπισμένες υδραυλικές απώλειες. Η εμπειρική σχέση βάση της οποίας υπολογίζονται αυτές οι απώλειες είναι (Douglas, Gasiorek, Swaffield, & Jack, 2005):

$$h = K \cdot (\bar{u}^2 / 2g)$$

όπου:

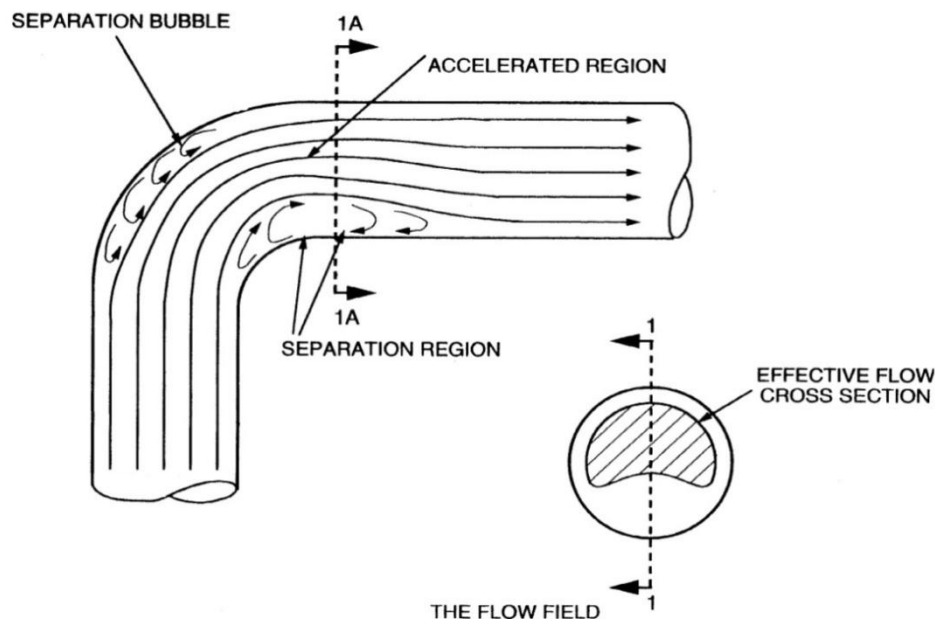
K:αδιάστατος συντελεστής απωλειών λόγω αποκόλλησης. Για την περίπτωση αλλαγή κλίσης 90° δίνεται στην βιβλιογραφία ίσος με 0.9

\bar{u} : μέση ταχύτητα στην κύρια διεύθυνση της ροής

g: επιτάχυνση της βαρύτητας

Όπως έχει αναπτυχθεί στο πρώτο κεφάλαιο, αυτό που ενδιαφέρει περισσότερο στη περίπτωση του συστήματος διανομής στροβίλου είναι η κατανομή των ταχυτήτων και το είδος των δευτερευουσών ροών. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τις γραμμές ροής μέσα σε ένα τέτοιο αγωγό. Παρατηρούμε ότι στην είσοδο οι γραμμές ροής είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στην διατομή του αγωγού. Στο εσωτερικό και στο εξωτερικό τμήμα της γωνίας φαίνεται η αποκόλληση των γραμμών ροής από τα τοιχώματα. Η αποκόλληση δημιουργεί κάποιες περιοχές ανακυκλοφορίας του ρευστού στις ίδιες θέσεις καθώς και εφαιπτομενικές ταχύτητες που οδηγούν στην δημιουργία δινών. Στην απεικόνιση της

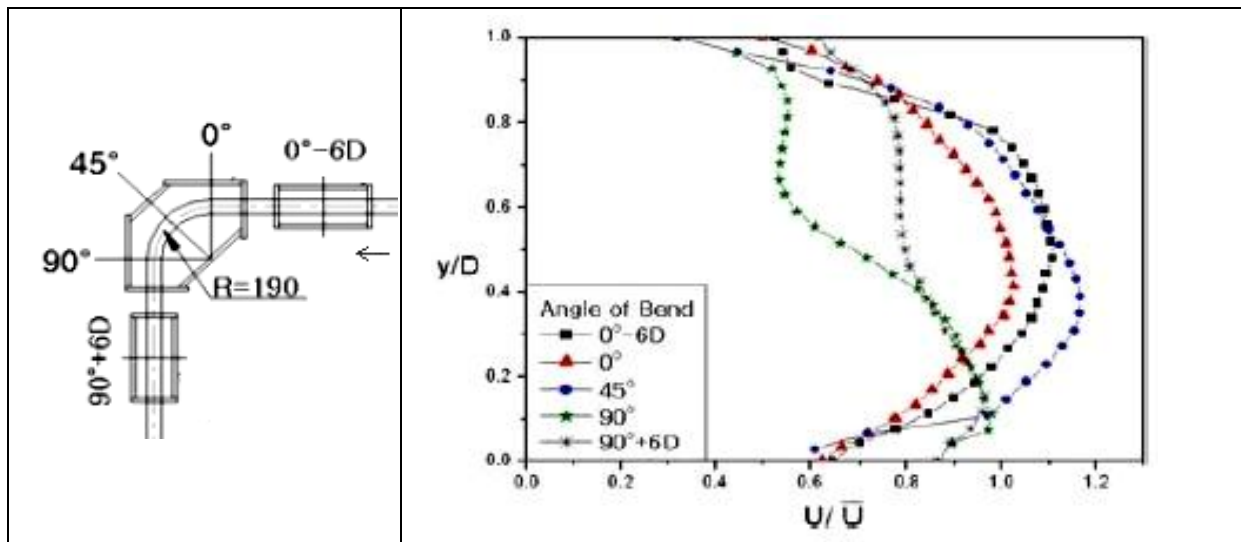
διατομής A-A παρατηρείται η μικρότερη διατομή με το χαρακτηριστικό σχήμα που έχει η ροή μετά τη γωνία λόγω αυτών των περιοχών ανακυκλοφορίας. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται επιτάχυνση της ροής η οποία είναι αναμενόμενη λόγω της τοπικής μείωσης της διατομής. Αυτές οι διαταραχές στη ροή προκαλούν αύξηση των εφαιπτομενικών ταχυτήτων στην κύρια κατεύθυνση αλλά και εντονότερη καταπόνηση από διάβρωση και σπηλαιώση στα σημεία που παρατηρείται ανακυκλοφορία. Σε κάποιο μήκος μετά την περιοχή αποκόλλησης παρατηρούμε ότι η ροή αρχίζει να ομαλοποιείται ξανά και να ακολουθεί τα φυσικά όρια (σημείο επανακόλλησης).



Σχήμα 3.1 Ροή σε αγωγό με κλίση 90°

Η επίδραση της κλίσης του αγωγού στο πεδίο ταχυτήτων της ροής είναι ένα αντικείμενο που ενδιαφέρει σε πολλές μηχανολογικές κατασκευές. Πειραματικές και αριθμητικές διερευνήσεις γίνονται με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό των επιδράσεων αυτών. Οι Chang και Lee το 2003 (Chang & Lee, 2003) δημοσίευσαν πειραματικά αποτελέσματα, με τη χρήση της μεθόδου PIV, για αυτό το θέμα. Πιο συγκεκριμένα μελέτησαν τη ροή σε πειραματική διάταξη γωνίας 90° για υψηλούς αριθμούς Reynolds στην αμιγώς τυρβώδη περιοχή ($10,15,20,25 \times 10^3$) σε δύο περιπτώσεις και τις σύγκριναν μεταξύ τους. Στην πρώτη περίπτωση το ρευστό εισερχόταν αξονικά στην είσοδο ενώ στην δεύτερη η είσοδος του ρευστού έγινε υπό κλίση προκειμένου να είναι τυρβώδης η ροή από την είσοδο. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αναμενόμενη συμπεριφορά της ροής στη γωνία. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα προφίλ των κύριων ταχυτήτων (αδιαστατοποιημένων ως προς τη μέση) σε διάφορες θέσεις ως προς τη γωνία (οι οποίες φαίνονται στο αριστερό τμήμα του σχήματος) για την περίπτωση της ροής με αξονική είσοδο και $Re=25000$. Παρατηρούμε ότι στην διατομή ανάντι της γωνίας το προφίλ προσεγγίζει το πλήρως διαμορφωμένο παραβολικό που αναμένεται. Στις 0, 45 και 90 μοίρες της γωνίας παρατηρούμε πως μετασχηματίζεται το προφίλ υπό την επίδραση της

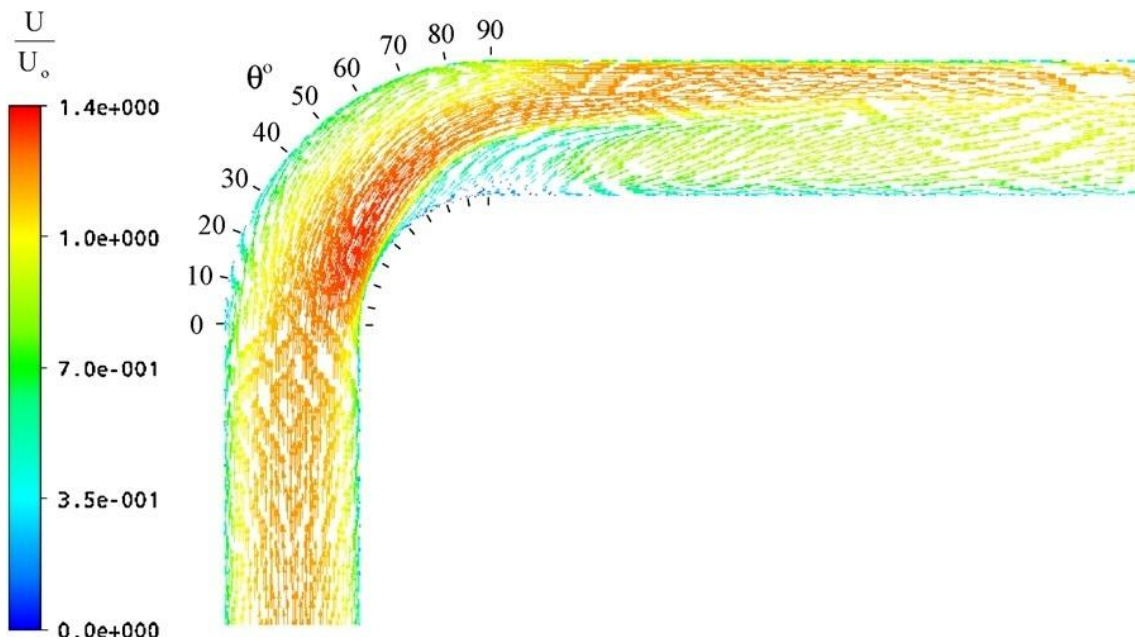
γωνίας. Από την είσοδο του σωλήνα, η θέση της μέγιστης αξονικής ταχύτητας μετακινείται από το κέντρο προς τα τοιχώματα της διατομής. Ιδίως, στις θέσεις των 45 και 90 μοιρών φαίνεται η έντονη μετατόπιση της μέγιστης ταχύτητας προς το τοίχωμα. Αυτό αποδίδεται στην φυγόκεντρο δύναμη που ασκείται λόγω της κλίσης του αγωγού. Ακόμα, παρατηρούμε ότι η επίδραση της γωνίας στο προφίλ των ταχυτήτων είναι ακόμα έντονη στην διατομή σε απόσταση 6D κατάντι της γωνίας. Τέλος, η ροή παρουσίασε την ίδια συμπεριφορά και για τους άλλους αριθμούς Reynolds που εξετάστηκαν.



Σχήμα 3.2 Προφίλ ταχυτήτων σε διάφορες θέσεις για $Re=25000$ (Chang & Lee, 2003)

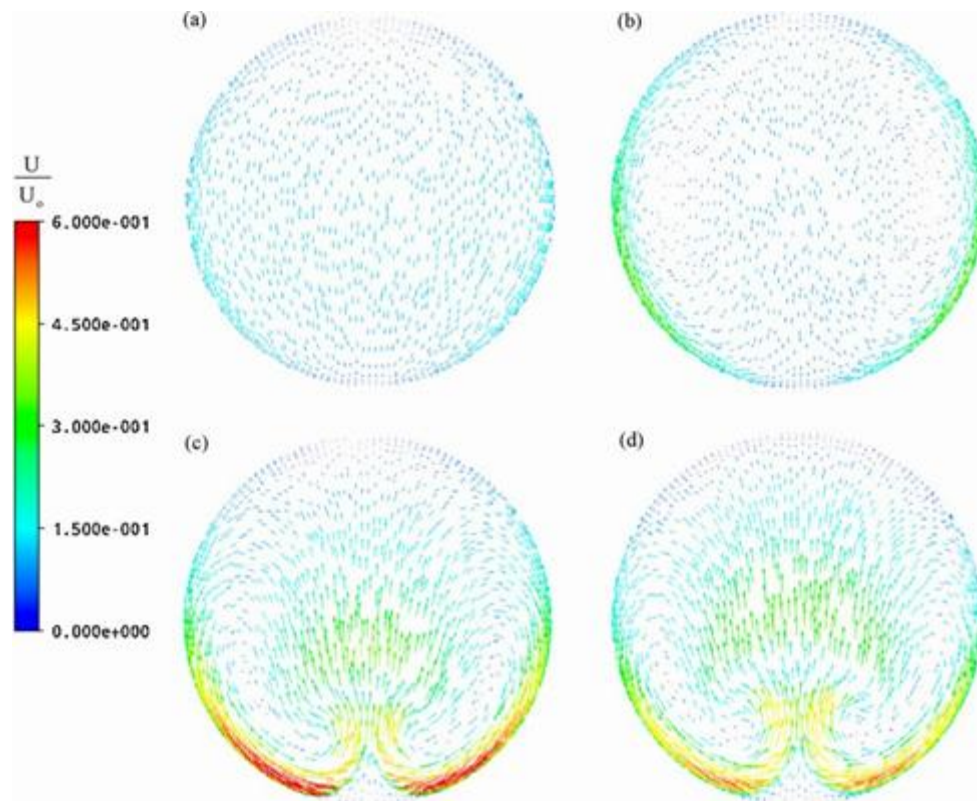
Το 2009 οι El-Gammal et al. (El-Gammal, Mazhar, & Cotton, 2010) διερεύνησαν αριθμητικά τη ροή σε αγωγό με κλίση 90° προκειμένου να μελετήσουν την επίδρασή της στην τοπική επιφανειακή διάβρωση του αγωγού. Η αριθμητική προσομοίωση έγινε με το Fluent, αριθμό Reynolds $Re=40.000$ (τυρβώδης περιοχή) και θεωρώντας πλήρως διαμορφωμένη ροή στην είσοδο. Για την μοντελοποίηση της τύρβης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο RSM (Reynolds Stress Model) και οι συναρτήσεις τοιχώματος Standard Wall Functions. Στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.3) φαίνονται τα διανύσματα της ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας του αγωγού. Παρατηρούμε ότι η ροή επιταχύνεται προσεγγίζοντας την γωνία. Η αποκόλληση από το εσωτερικό τοίχωμα λαμβάνει χώρα περίπου στη θέση των 85 μοιρών από την είσοδο της γωνίας, δημιουργώντας μια περιοχή ανακυκλοφορίας ενώ το σημείο επανακόλλησης της ροής βρίσκεται σε απόσταση περίπου $0.5D$ από το τέλος της γωνίας. Επίσης, κατά μήκος του εξωτερικού τοιχώματος της γωνίας η ροή επιβραδύνεται λόγω της αντίξοης βαθμίδας πίεσης (adverse pressure gradient).

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζονται τα διανύσματα των εφαπτομενικών ταχυτήτων σε διάφορες εγκάρσιες τομές του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε τα διανύσματα στις 0 (είσοδος γωνίας), $20,80$ και 90 (έξοδος γωνίας) μοίρες. Παρατηρείται ότι δημιουργούνται δύο συμμετρικές δίνες (δίνες Dean) με αντίθετη φορά ως προς το κάθετο επίπεδο συμμετρίας. Αυτές ξεκινάνε στη θέση των 20 μοιρών. Είναι οι χαρακτηριστικές δίνες (όπως



Σχήμα 3.3 Αδιαστατοποιημένα διανύσματα του μέτρου της ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας του αγωγού (El-Gammal, Mazhar, & Cotton, 2010)

έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 1) που δημιουργούνται σε αγωγούς με αλλαγή κλίσης και αποδίδονται στις επιδράσεις των φυγόκεντρων δυνάμεων που αναπτύσσονται λόγω της καμπυλότητας της γωνίας. Οι δίνες αυτές παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ροής



Σχήμα 3.4 Διανύσματα εφαπτομενικών ταχυτήτων στις θέσεις με α) $\theta=0^\circ$, β) $\theta=20^\circ$, γ) $\theta=80^\circ$, δ) $\theta=90^\circ$ (El-Gammal, Mazhar, & Cotton, 2010)

στον πυρήνα της, όπου βρίσκεται και η μέγιστη ταχύτητα. Οι δίνες κατευθύνουν τον πυρήνα προς την εξωτερική πλευρά της γωνίας αρχικά ενώ στην συνέχεια τον εκτρέπουν προς τα εσωτερικά τοιχώματα της γωνίας. Λόγω της έντονης εκτροπής της ροής και της αλλαγής κατεύθυνσης του αγωγού δημιουργείται μία περιοχή αποκόλλησης στα εσωτερικά τοιχώματα της γωνίας στην περιοχή ανάμεσα στις δύο δίνες. Επίσης οι εφαπτομενικές ταχύτητες παρατηρούνται έντονα ελαττωμένες σε αυτήν την περιοχή.

3.2 Επικύρωση (validation) του κώδικα

Στις προσομοιώσεις που γίνονται μέσω CFD ακολουθούνται κάποιες διαδικασίες προκειμένου να εκτιμάται ο βαθμός στον οποίο είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Η ανάπτυξη και ευρεία χρήση των μεθόδων CFD είναι σχετικά πρόσφατη και δεν υπάρχουν συγκεκριμένα πρωτόκολλα για τις προσομοιώσεις, υπάρχουν όμως κάποιες διαδικασίες που έχουν καθιερωθεί προκειμένου να υπάρχει μία βάση για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Οι δύο κυριότερες είναι η επικύρωση (validation) και η εξακρίβωση (verification).

Η πρώτη διαδικασία είναι η επικύρωση του κώδικα. Η επικύρωση είναι η διαδικασία του προσδιορισμού του βαθμού στον οποίο ένα υπολογιστικό μοντέλο είναι ακριβής αναπαράσταση του πραγματικού φαινομένου το οποίο θα προσομοιωθεί. Δεν είναι δυνατό να γίνει επικύρωση ολόκληρου του κώδικα. Είναι εφικτό να γίνει η επικύρωση του κώδικα για συγκεκριμένες μόνο εφαρμογές. Συνεπώς αυτή γίνεται κάθε φορά για το συγκεκριμένο πρόβλημα που εξετάζεται. Επίσης απαιτείται η ύπαρξη κάποιων πειραματικών δεδομένων, για αντιπαραβολή, πάνω στο συγκεκριμένο είδος εφαρμογής.

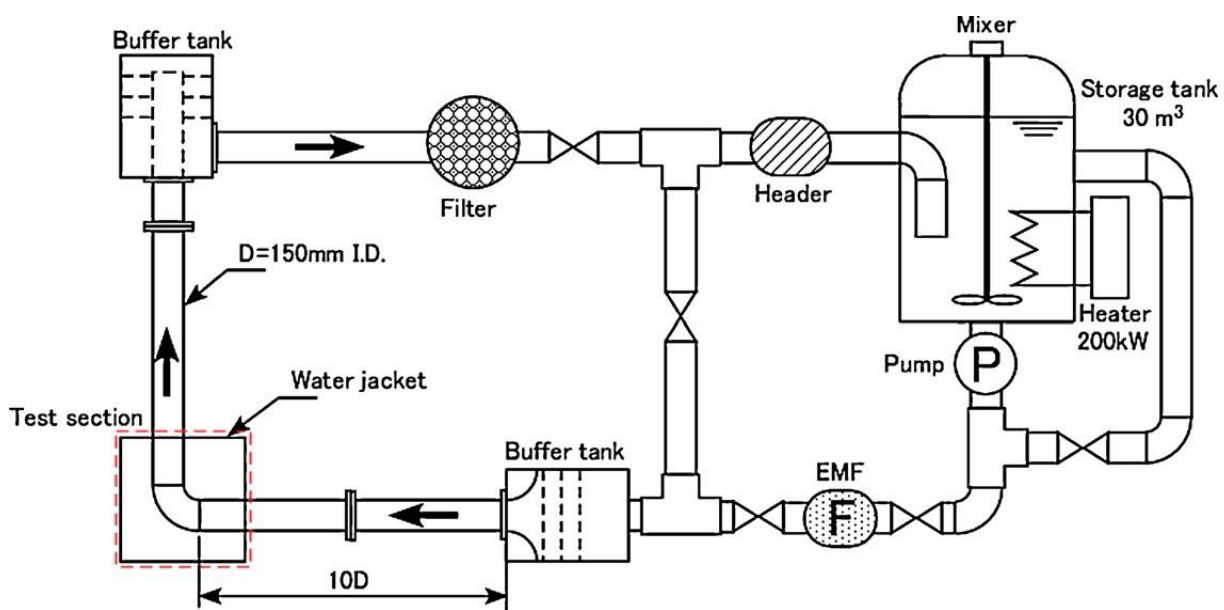
Η επικύρωση εξετάζει το κατά πόσο τα υπολογιστικά μοντέλα, που ενσωματώνονται και επιλέγονται προς χρήση σε ένα κώδικα CFD συμφωνούν με τις πειραματικές παρατηρήσεις. Στόχος είναι ο προσδιορισμός και η ποσοτικοποίηση του σφάλματος και της αβεβαιότητας μέσω της σύγκρισης με πειραματικά αποτελέσματα. Τα πειραματικά αποτελέσματα όμως, ενέχουν και αυτά σφάλματα λόγω της πειραματικής διαδικασίας γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην αξιολόγηση. Η ακρίβεια που απαιτείται στην διαδικασία της επικύρωσης εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής και του βαθμού στον οποίο ενδιαφέρει να εξεταστεί το κάθε φαινόμενο (Slater, 2008).

Στην περίπτωση αυτής της εργασίας η εύρεση πειραματικών αποτελεσμάτων ήταν ο κύριος παράγοντας που θέτει τα όρια στην επικύρωση. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί και να προσομοιωθεί ένα φυσικό μοντέλο πρέπει να υπάρχουν τα ακριβή δεδομένα και γεωμετρικά στοιχεία του. Στις περισσότερες πειραματικές δημοσιευμένες μελέτες σαν αυτές που παρουσιάστηκαν στο πρώτο κεφάλαιο δεν δίνονται αυτά τα στοιχεία. Συνεπώς επιλέχθηκε μια απλή σχετικά περίπτωση πειραματικής διάταξης που μελετά τη ροή νερού σε κυκλικό αγωγό με γωνία 90° .

3.2.1 Παρουσίαση του πειράματος

Τα πειραματικά αποτελέσματα με τα οποία θα συγκριθούν αυτά του μοντέλου προσομοίωσης είναι των Ono et al. (Ono, Kimura, & Kamide, 2010). Σκοπός του πειράματος ήταν η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της αποκόλλησης και των δευτερευουσών ροών που εμφανίζονται λόγω της αλλαγής κλίσης του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, έγιναν μετρήσεις των πεδίων ταχυτήτων σε δύο σωλήνες με γωνία 90 μοιρών με μόνη διαφορά μεταξύ τους την ακτίνα καμπυλότητας. Στην πρώτη περίπτωση, της κοντής γωνίας, η αναλογία της ακτίνας καμπυλότητας της γωνίας προς την διάμετρο της (r/d) ήταν ίση με 1 ενώ στην δεύτερη περίπτωση της μακριάς γωνίας ήταν 1.5. Για κάθε μία περίπτωση έγιναν πειράματα με νερό και δύο αριθμούς Reynolds $Re=1.8 \cdot 10^5$ και $Re=5.4 \cdot 10^5$ (αμιγώς τυρβώδης περιοχή και στις δύο περιπτώσεις). Η μέθοδος οπτικοποίησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η PIV (Particle Image Velocimetry) και οι εικόνες που καταγράφηκαν ήταν ανά 0.5 ms για την περιγραφή των πεδίων ταχύτητας. Τα αποτελέσματα αυτά επεξεργάστηκαν με ειδικό λογισμικό με αποτέλεσμα να δίνονται και αποτελέσματα μεσοσταθμισμένα ως προς το χρόνο.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Το ρευστό ήταν νερό στους 28°C . Οι διάφανοι σωλήνες της πειραματικής διάταξης είναι φτιαγμένοι από ακρυλική ρητίνη ενώ το τμήμα της γωνίας από ρητίνη πολυουρεθάνης. Η διάμετρος του αγωγού είναι 150mm. Στην διάταξη περιλαμβάνεται και μονάδα θέρμανσης στην δεξαμενή προκειμένου να ελέγχεται η θερμοκρασία του νερού. Ακόμα, στην είσοδο της περιοχής καταγραφής (test section) είναι τοποθετημένη δεξαμενή απόσβεσης (buffer tank) προκειμένου να δημιουργείται επίπεδο προφίλ αξονικών ταχυτήτων στη ροή. Η απόσταση της εισόδου όπου βρίσκεται η δεξαμενή απόσβεσης από την γωνία ισούται με 10 διαμέτρους.



Σχήμα 3.5 Πειραματική διάταξη (Ono, Kimura, & Kamide, 2010)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις γεωμετρίας, αυτή της 'κοντής γωνιάς' με $r/D=1$ και αυτή της 'μακριάς γωνιάς' με $r/D=1.5$, σε δύο αριθμούς Reynolds της τυρβώδους περιοχής. Συγκεντρωτικά, οι συνθήκες κάθε πειράματος δίνονται στον επόμενο πίνακα.

Case name	Mean flow velocity, U_m [m/s]	Temperature [$^{\circ}$ C]	Re number [-]
Short-elbow			
Low velocity case	1.0	28	1.8×10^5
High velocity case	3.0	28	5.4×10^5
Long-elbow			
High velocity case	3.0	28	5.4×10^5
Low velocity case	1.0	28	1.8×10^5

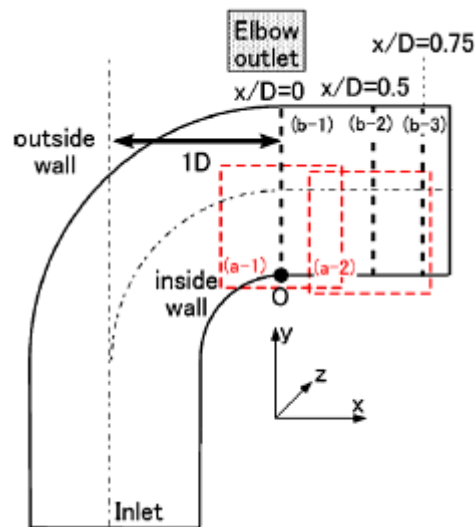
Σχήμα 3.6 Πειραματικές συνθήκες

Η περίπτωση για τη οποία θα συγκριθούν τα αριθμητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα είναι αυτή της κοντής γωνιάς στην περίπτωση με τον υψηλότερο αριθμό Reynolds. Αυτή η επιλογή έγινε διότι στην περίπτωση του συστήματος έγχυσης που εξετάζεται σε αυτήν την εργασία ο αριθμός Reynolds της ροής είναι $4.5 \cdot 10^5$ ενώ η αναλογία r/D είναι 2.2. Η πιο κοντινή περίπτωση είναι αυτή της μακριάς γωνιάς με τον υψηλότερο αριθμό Reynolds, όμως στη δημοσίευση των Ono et al. δεν υπήρχαν αρκετά αποτελέσματα για αυτήν. Συνεπώς επιλέχθηκε η κοντή γωνία με τον υψηλότερο αριθμό Reynolds.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η τοπολογία της κοντής γωνιάς και οι θέσεις μέτρησης των ταχυτήτων στο πείραμα. Ως έξοδος της γωνιάς θεωρείται το σημείο που τελειώνει η καμπυλότητα στην κατάντι πλευρά της γωνιάς. Η έξοδος βρίσκεται σε απόσταση $1D$ από τον άξονα του αγωγού εισόδου. Η αξονική διεύθυνση της ροής στην έξοδο είναι αυτή του άξονα x των συντεταγμένων, ο άξονας y είναι στην κατεύθυνση του άξονα της εισόδου της γωνιάς ενώ ο άξονας z είναι κάθετος στο επίπεδο xy . Το σημείο O στο εσωτερικό τοίχωμα της διατομής εξόδου της γωνιάς θεωρείται η αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Η ίδια τοπολογία ακολουθήθηκε και στο υπολογιστικό μοντέλο που θα παρουσιαστεί στην επόμενη ενότητα. Οι αποστάσεις και στους τρεις άξονες δίνονται στη συνέχεια αδιαστατοποιημένες με την διάμετρο του αγωγού. Η μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων γινόταν κάθε φορά σε δυο διαστάσεις. Για το επίπεδο xy η μέτρηση των ταχυτήτων (V_x και V_y) έγινε στις θέσεις a-1 και a-2 που φαίνονται στο σχήμα με σκοπό την παρατήρηση της αποκόλλησης και ανακυκλοφορίας της ροής. Στο επίπεδο yz η μέτρηση των ταχυτήτων (V_y και V_z) έγινε στις διατομές b-1 ($x/D=0$), b-2 ($x/D=0.5$) και b-3 ($x/D=0.75$) του σχήματος στοχεύοντας στην παρατήρηση της εξέλιξης και δημιουργίας των εφαπτομενικών (στην κύρια) ταχυτήτων και των δευτερευουσών ροών.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των ταχυτήτων και την επεξεργασία των δεδομένων εκτιμάται ότι περιέχουν σφάλματα της τάξης των 0.15 m/s (περίπου 3-5% για τα εύρη των ταχυτήτων του προβλήματος). Ακόμα δυσκολίες υπήρχαν στην μέτρηση του πεδίου ταχύτητας πολύ κοντά στο τοίχωμα λόγω των αντανάκλασεων

του φωτός πάνω στα τοιχώματα του αγωγού (halation). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μια μικρή μείωση της ακρίβειας των μετρήσεων σε αυτές τις περιοχές.



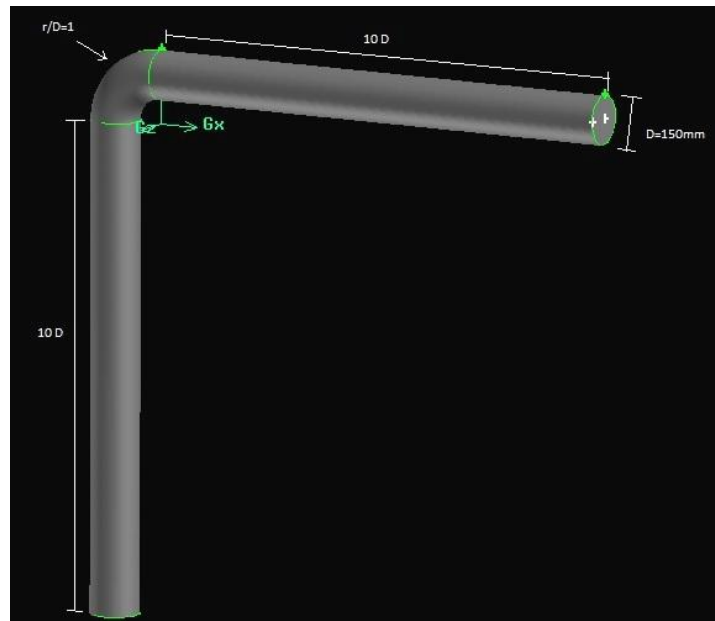
Σχήμα 3.6 Κοντή γωνία και θέσεις μέτρησης των ταχυτήτων (Ono, Kimura, & Kamide, 2010)

3.2.2 Παρουσίαση του αριθμητικού μοντέλου

Ο σκοπός της επικύρωσης του κώδικα, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.1 είναι να ελεγχθούν τα αριθμητικά μοντέλα στην συγκεκριμένη περίπτωση φυσικού προβλήματος. Συνεπώς, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε εδώ έχει υπολογιστικό πλέγμα αντίστοιχο με αυτό που θα χρησιμοποιηθεί και στις επόμενες ενότητες ενώ και οι επιλογές των μοντέλων και των παραμέτρων στο Fluent είναι ίδιες. Βέβαια, το γεγονός ότι δεν υπάρχουν εσωτερικές διαμορφώσεις στον αγωγό αντίστοιχες με αυτές των τελικών μοντέλων διαφοροποιεί σε ένα μικρό βαθμό το πλέγμα.

Για την δημιουργία της γεωμετρίας στο Gambit διατηρήθηκε ο προσανατολισμός της γωνίας του πειράματος που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Ακόμα, πριν και μετά την γωνία διατηρήθηκε το μήκος των δέκα διαμέτρων προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι θα είναι ίδιες με τις πειραματικές οι συνθήκες της ροής ανάντι και κατάντι της γωνίας. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η γεωμετρία.

Το υπολογιστικό πλέγμα στην γεωμετρία έγινε με εξαεδρικά (Hex) στοιχεία και χρήση του αυτοματοποιημένου εργαλείου πύκνωσης στα τοιχώματα. Η κατασκευή του ξεκίνησε με την δημιουργία του οριακού στρώματος στα τοιχώματα του αγωγού. Για το είδος των φαινομένων που επιθυμούμε να παρατηρήσουμε (ανακυκλοφορία, δευτερεύουσες ροές) σημαντικό ρόλο παίζει η πυκνότητα και το μέγεθος του οριακού στρώματος που θα χρησιμοποιηθεί. Αυτό συμβαίνει γιατί τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης της ροής με τον τοίχο στη γωνία (που λαμβάνουν χώρα εντός του οριακού στρώματος) είναι αυτά που καθορίζουν την εξέλιξη της ροής. Επίσης, η κατάλληλη επιλογή των



Σχήμα 3.7 Γεωμετρία στο Gambit

παραμέτρων του οριακού στρώματος είναι θεμελιώδους σημασίας για την σωστή εφαρμογή των μοντέλων τύρβης και των συναρτήσεων τοιχώματος στον solver του προγράμματος. Υπάρχουν διάφοροι εμπειρικοί κανόνες για τον υπολογισμό του οριακού στρώματος όμως λόγω των πολλών παραγόντων του κάθε ξεχωριστού προβλήματος χρειάζονται δοκιμές για την τελική επιλογή του.

Για την συγκεκριμένη περίπτωση η τελική επιλογή του οριακού στρώματος ήταν να είναι ίδιο σε όλες τις περιοχές με 6 στρώματα που αυξάνονται σε πάχος προς το κέντρο. Πιο συγκεκριμένα η πρώτη σειρά έχει απόσταση από το τοίχωμα ίση με 0,0008 m, ενώ η αναλογία πάχους μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων (growth factor) είναι 1.2. Το συνολικό πάχος του οριακού στρώματος είναι 0.008 m.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε το πλέγμα το οποίο είναι μη δομημένο (unstructured) και αποτελείται από εξαεδρικά στοιχεία. Η κατασκευή του ξεκίνησε από την επιφάνεια της εξόδου του σωλήνα στην οποία δημιουργήθηκε επιφανειακό (2D) μη δομημένο πλέγμα αποτελούμενο από τετράπλευρα στοιχεία (quad) μεγέθους (κάθε πλευράς) 0.008 m με την μέθοδο Pave του Gambit. Στη συνέχεια με χρήση του αλγορίθμου cooper δημιουργήθηκε το πλέγμα στον όγκο. Ο αλγόριθμος cooper, προβάλλει το δισδιάστατο πλέγμα της επιφάνειας – αν υπάρχει - στην απέναντι επιφάνεια και χρησιμοποιώντας αυτές ως πηγές (source faces) δημιουργεί τρισδιάστατα στοιχεία σε όλο τον όγκο με τον χρήστη να ορίζει το μέγεθος ως προς την τρίτη διάσταση (οι άλλες δύο έχουν οριστεί ήδη από το επιφανειακό πλέγμα της πηγής). Η διάσταση αυτή (spacing) ορίστηκε 0.008 m. Τελικά, το πλέγμα αποτελείται από $308 \cdot 10^3$ στοιχεία. Η ποιότητα των τρισδιάστατων στοιχείων του πλέγματος ελέγχεται, συνήθως, στο Gambit μέσω της λοξότητας (skewness) των στοιχείων, η οποία εμφάνισε μέγιστη τιμή 0.445. Ο δείκτης αυτός μετρά την παραμόρφωση του κάθε κελιού μέσω των γωνιών των ακμών του. Ορίζεται ως:

$$\max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right]$$

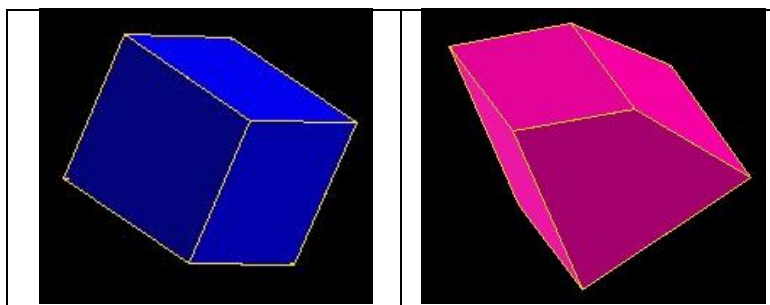
Όπου:

θ_{\max} : η μέγιστη γωνία του κελιού

θ_{\min} : η ελάχιστη γωνία του κελιού

θ_e : η γωνία που θα έπρεπε να έχει ιδανικά χωρίς παραμορφώσεις το κελί (90° για εξαεδρικά κελιά)

Η λοξότητα λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 1 με 0 την καλύτερη δυνατή (στην περίπτωση εξαεδρικού στοιχείου σημαίνει ότι αυτό είναι ορθογώνιο) και 1 την χειρότερη δυνατή. Στο επόμενο σχήμα παρατίθενται δύο εξαεδρικά στοιχεία με ακραίες τιμές λοξότητας όπου φαίνεται η έντονη παραμόρφωση του στοιχείου.



Σχήμα 3.8 Εξαεδρικό στοιχείο με λοξότητα 0,01(αριστερά) και 0,7 (δεξιά)

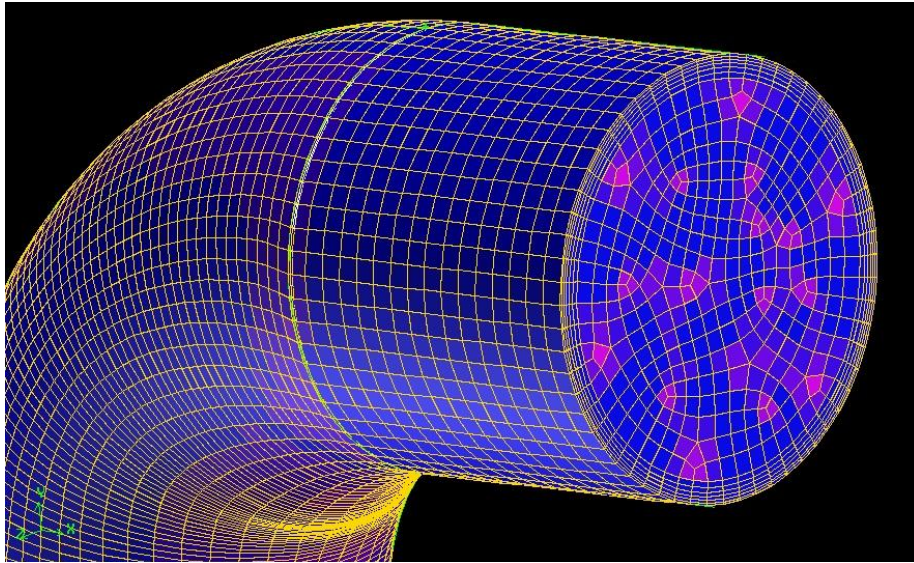
Προφανώς, όσο περισσότερα κελιά έχουν μικρές τιμές τόσο καλύτερο είναι το πλέγμα. Το Fluent μπορεί να δουλέψει μόνο με πλέγματα που το χειρότερο κελί τους δεν ξεπερνά την τιμή 0.97. Στο επόμενο σχήμα δίνεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με όλα τα στοιχεία του υπολογιστικού πλέγματος.

Οριακό Στρώμα	
Βάθος πρώτης σειράς (m)	0.0008
Growth factor	1.2
Στρώματα	6
Συνολικό Βάθος	0.008
Πλέγμα	
Είδος στοιχείων	Hex
Πλήθος στοιχείων	307.914
Spacing (m)	0.008
Skewness	0-0.445

Σχήμα 3.9 Χαρακτηριστικά του υπολογιστικού πλέγματος

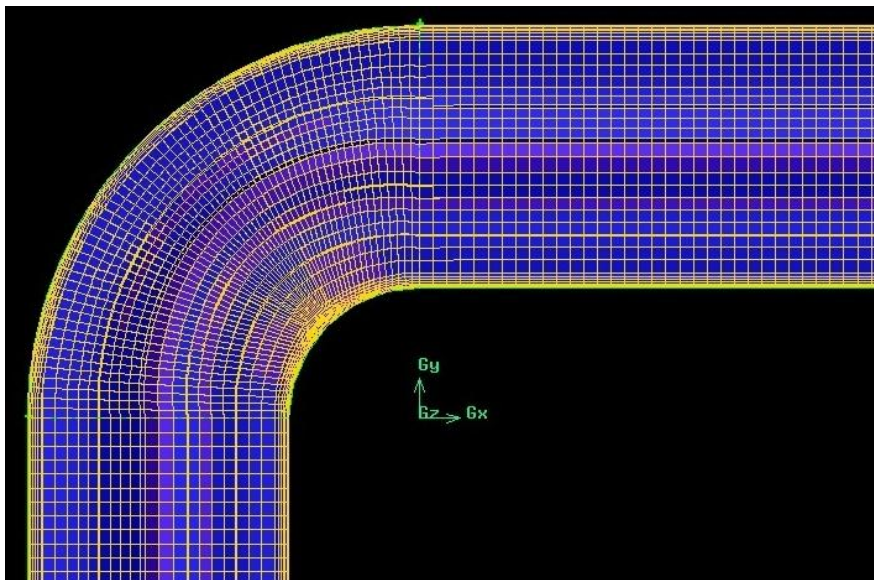
Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται δύο όψεις του υπολογιστικού πλέγματος. Στο σχήμα 3.9 φαίνεται η τομή του πλέγματος στο επίπεδο yz. Φαίνεται το οριακό στρώμα κοντά στα τοιχώματα, το πλέγμα στο εσωτερικό του αγωγού καθώς και το επιφανειακό

πλέγμα της εξωτερικής επιφάνειας του αγωγού. Ο χρωματισμός των στοιχείων γίνεται βάση της λοξότητας.



Σχήμα 3.9 Τομή υπολογιστικού πλέγματος στο επίπεδο yz

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η τομή του πλέγματος στο επίπεδο $z=0$ (επίπεδο συμμετρίας) στην περιοχή της γωνίας. Βλέπουμε ότι τα στοιχεία στα ευθεία τμήματα είναι πολύ καλής ποιότητας όντας ορθογώνια. Στην περιοχή της γωνίας τα στοιχεία φαίνεται ότι είναι λίγο χειρότερα λόγω της καμπυλότητας, όντας πιο παραμορφωμένα και λιγότερο ομοιόμορφα. Γενικά, η ποιότητα του πλέγματος είναι αρκετά καλή χωρίς μεγάλες παραμορφώσεις και έντονες διαφορές μεταξύ των κελιών του.



Σχήμα 3.10 Τομή υπολογιστικού πλέγματος στο επίπεδο $z=0$

Το υπολογιστικό πλέγμα στην συνέχεια εισήχθη στο Fluent προς επίλυση. Επιλέχθηκε το μοντέλο k-ε για την μοντελοποίηση της τύρβης ενώ οι συναρτήσεις τοιχώματος που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι Standard Wall Functions. Η διακριτοποίηση των εξισώσεων έγινε με σχήματα δευτέρας τάξης για όλες τις εξισώσεις. Η επίλυση έγινε για σταθερό χρόνο (steady time). Η σύζευξη πίεσης-ταχυτήτων έγινε με βάση την πίεση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο SIMPLE. Στην είσοδο τέθηκε η ταχύτητα εισόδου ίση με 3 m/s (επίπεδο προφίλ) ενώ στην έξοδο η πίεση ίση με την ατμοσφαιρική. Χρησιμοποιήθηκε ακόμα, η δυνατότητα αναδιάταξης των κελιών του πλέγματος (Reorder domain) με χρήση του αλγορίθμου Reverse Cuthill-McKee, με σκοπό την αποδοτικότερη αξιοποίηση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος. Τα κριτήρια σύγκλισης, με βάση την σχετική διαφορά μεταξύ των τιμών διαδοχικών επαναλήψεων, ορίστηκαν στο 10^{-6} για τις ταχύτητες και την πίεση ενώ για τα k και ε στο 10^{-4} .

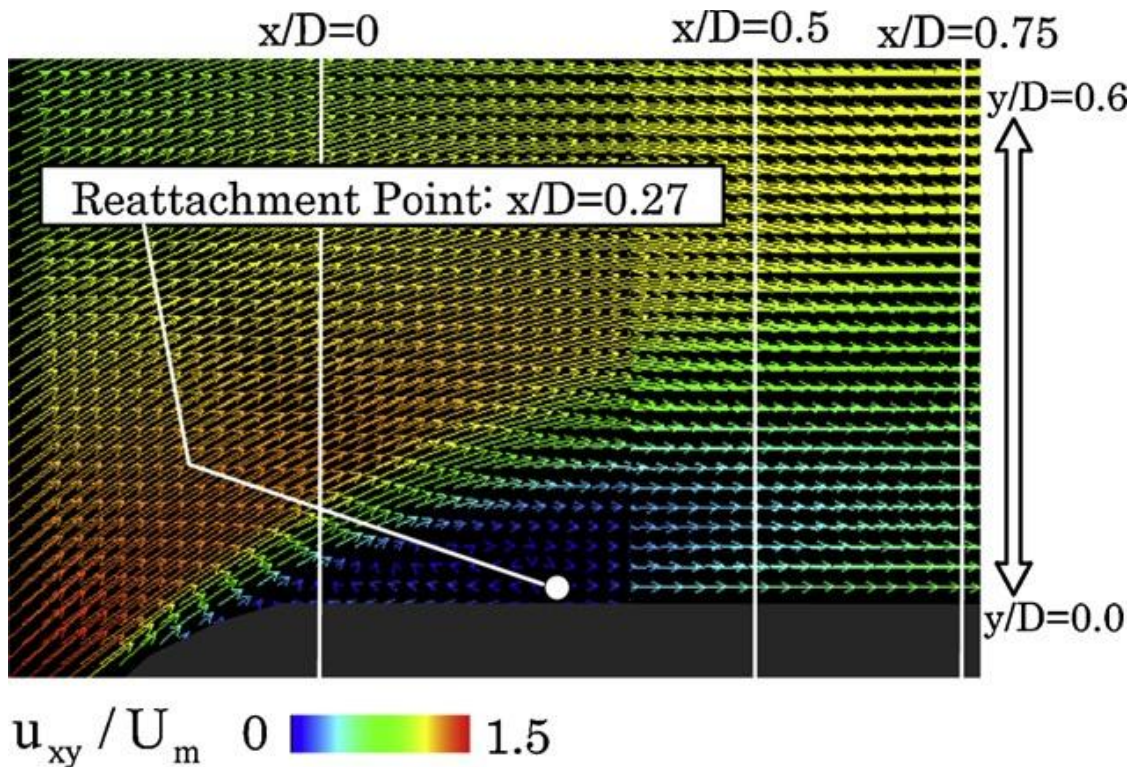
3.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2.1 στο πείραμα οι μετρήσεις έγιναν σε διάφορες χρονικές στιγμές (με βήμα 5ms) καταγράφοντας τα μη μόνιμα φαινόμενα της ροής. Στη συνέχεια έγινε επεξεργασία τους για την εξαγωγή σταθμισμένων ως προς το χρόνο αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση του αριθμητικού μοντέλου η επίλυση έγινε για σταθερό χρόνο. Συνεπώς, τα μόνα πειραματικά αποτελέσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την σύγκριση είναι τα χρονικά σταθμισμένα.

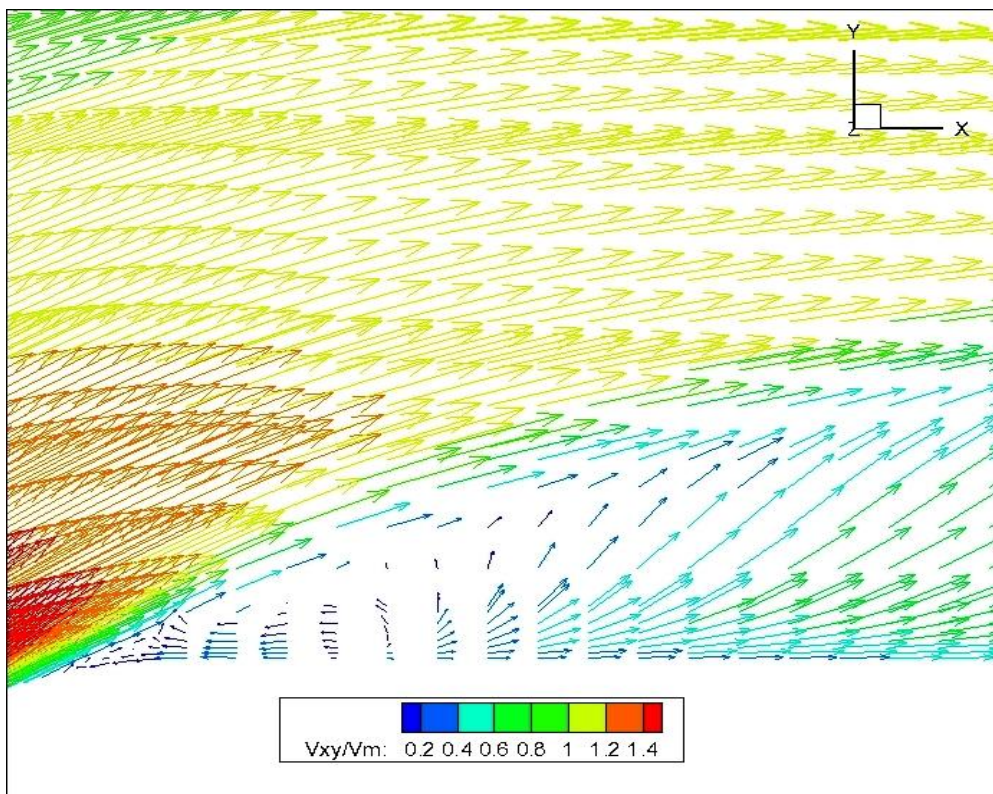
Αρχικά, παρουσιάζεται το πεδίο ταχυτήτων V_{xy} (αδιαστατοποιημένες με την μέση) κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα της γωνίας(σχ. 3.11 και 3.12). Παρατηρούμε ότι και στα δύο αποτελέσματα (πειραματικά και αριθμητικά) εμφανίζεται μια περιοχή χαμηλής ταχύτητας κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα. Η περιοχή αποκόλλησης σχηματίζεται σε αυτή τη θέση. Το σημείο επανακόλλησης της ροής υπολογίστηκε πειραματικά με χρήση των μετρήσεων από τις διαδοχικές χρονικές στιγμές (με χρήση του χρονικά εξαρτώμενου συντελεστή forward flow fraction (γ)) στην θέση $x/D=0.27$. Στην υπολογιστική προσομοίωση αυτό δεν ήταν δυνατό. Ακόμα και στα δύο σχήματα παρατηρούμε την ανακυκλοφορία του ρευστού εντός της περιοχής αποκόλλησης. Τα δύο σχήματα είναι στην ίδια θέση. Υπάρχουν διαφορές στην οπτικοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αριθμητικών αποτελεσμάτων ως προς την διακριτοποίηση του χώρου (άρα και το πλήθος-κατανομή των διανυσμάτων) αλλά και στο χρωματισμό της κλίμακας. Γενικά, παρατηρούμε ότι τα φαινόμενα της αποκόλλησης και της ανακυκλοφορίας εμφανίζονται στην ίδια κλίμακα και περίπου στην ίδια θέση. Αυτό είναι μια καλή ένδειξη ότι το υπολογιστικό μοντέλο συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα προφίλ των αξονικών ταχυτήτων σε διάφορες θέσεις μετά την έξοδο της γωνίας(σχήμα 3.13). Η απόσταση από το εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού (κατακόρυφος άξονας) είναι αδιαστατοποιημένη με τη διάμετρο ενώ οι αξονικές ως προς τη μέση ταχύτητα. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα

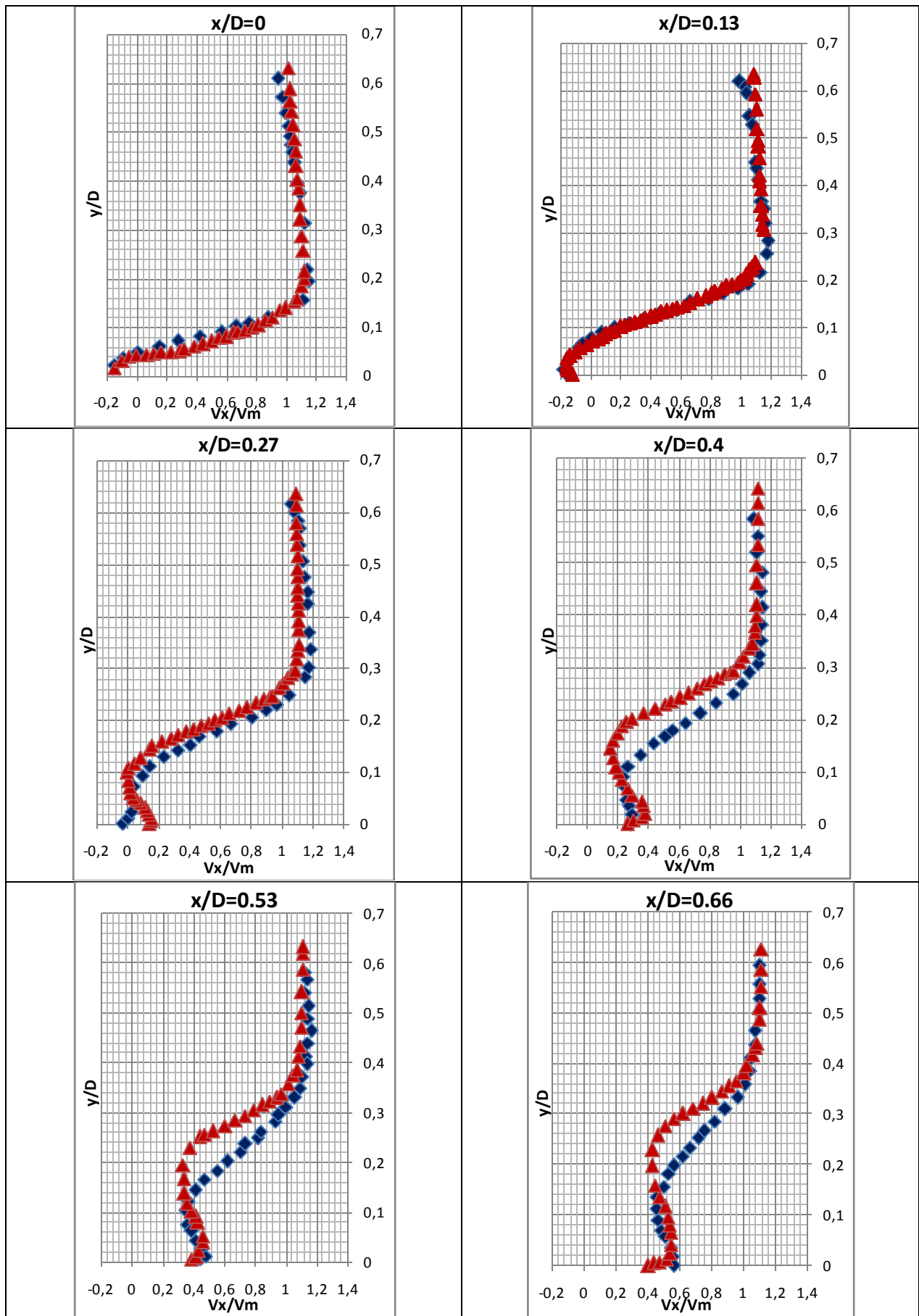
ενώ με κόκκινο τα αριθμητικά. Στις πρώτες δύο θέσεις ($x/D=0, 0.13$) παρατηρείται ότι υπάρχουν αρνητικές ταχύτητες και στα δύο αποτελέσματα λόγω της ανακυκλοφορίας κοντά στο τοίχωμα. Από την θέση 0.27 (σημείο επανακόλλησης σύμφωνα με το πείραμα)



Σχήμα 3.11 Πειραματικά αποτελέσματα (Ono, Kimura, & Kamide, 2010)



Σχήμα 3.12 Αριθμητικά αποτελέσματα



Σχ. 3.13 Προφίλ αξονικών ταχ. σε διάφορες θέσεις (κόκκινο: αριθμ., μπλε: πειραμ.)

παρατηρείται ότι υπάρχει τοπική επιτάχυνση της ροής (περιοχή $y/D=0-0.08$). Αυτή αποδίδεται στην επανένωση της ροής μετά την περιοχή αποκόλλησης καθώς και στην 'σύγκρουση' των δευτερευουσών ροών της περιοχής ανακυκλοφορίας με τα τοιχώματα. Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε αυτήν την περιοχή είναι πολύπλοκα και μη μόνιμα και δεν είναι δυνατό να αιτιολογηθούν πλήρως.

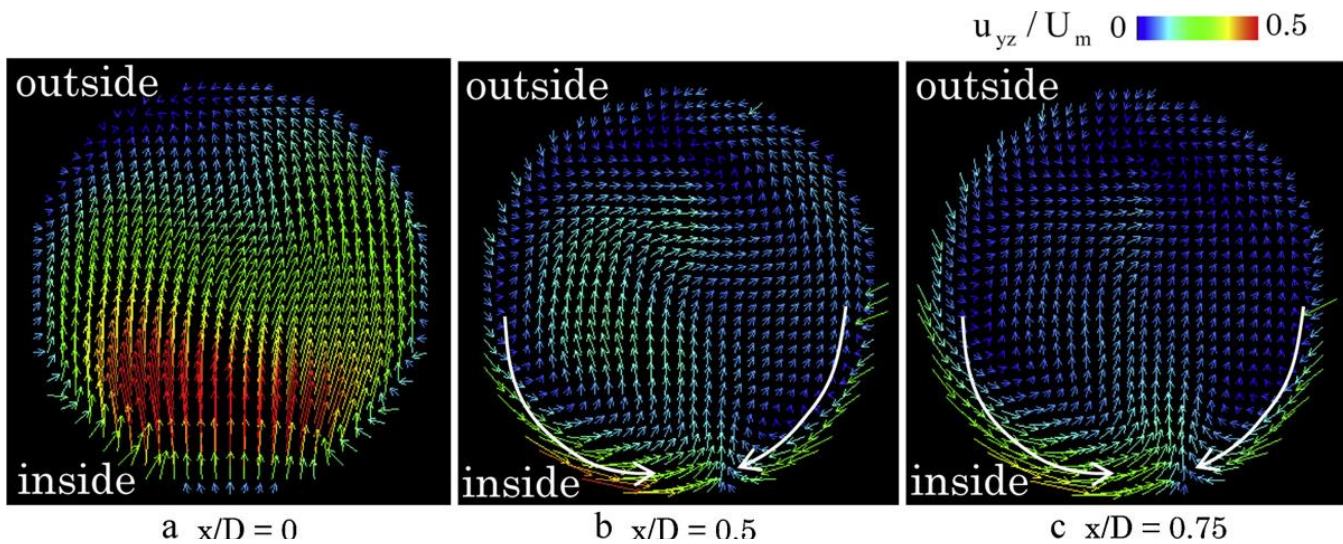
Ως προς την σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων παρατηρείται ότι στις θέσεις $x/D=0, 0.13, 0.27$ τα προφίλ συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό. Στις επόμενες τρεις θέσεις τα προφίλ διαφέρουν περισσότερο, με πιο έντονη απόκλιση στις θέσεις μεταξύ $y/D=0.1$ και $y/D=0.3$. Στην θέση $x/D=0.4$ η μέγιστη απόκλιση είναι $0.2 V_{xy}/V_m$ (που σε απόλυτα νούμερα είναι 0.6 m/s) στην θέση $y/D=0.18$. Στην θέση $x/D=0.53$ η μέγιστη απόκλιση παρατηρείται $0.28 V_{xy}/V_m$ (που σε απόλυτα νούμερα είναι 0.84 m/s) στην θέση $y/D=0.24$. Στην θέση $x/D=0.66$ η μέγιστη απόκλιση παρατηρείται $0.2 V_{xy}/V_m$ (που σε απόλυτα νούμερα είναι 0.6 m/s) στην θέση $y/D=0.24$. Στις άλλες θέσεις (εκτός της περιοχής $0.1-0.3$) η σύγκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων και στις τρεις αυτές περιπτώσεις είναι μεγάλη.

Ακόμα στις περισσότερες θέσεις παρατηρείται μια μικρή απόκλιση των προφίλ κοντά στο τοίχωμα (μεταξύ των θέσεων $y/D=0$ και 0.06). Αυτό οφείλεται αφενός στην ασάφεια των πειραματικών μετρήσεων στην περιοχή αυτή (όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.2.1) και αφετέρου στο υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε. Το οριακό στρώμα του πλέγματος φτάνει τα 8 mm , δηλαδή εκτίνεται μεταξύ των θέσεων $y/D=0$ και 0.053 . Αυτή η επιλογή σε συνδυασμό με την ακρίβεια του μοντέλου της τύρβης και των συναρτήσεων τοιχώματος που χρησιμοποιήθηκαν αιτιολογούν αυτήν την απόκλιση.

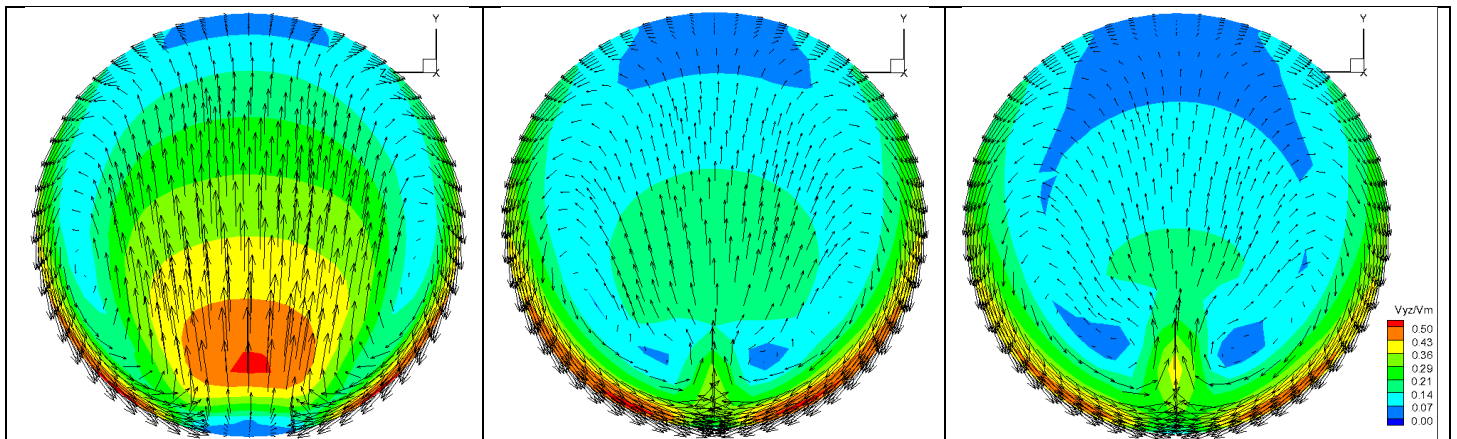
Γενικά, η σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών και αριθμητικών προφίλ ταχυτήτων είναι ικανοποιητική για την εφαρμογή που μας ενδιαφέρει όσο και απολύτως. Αυτό δείχνει ότι το συγκεκριμένο υπολογιστικό μοντέλο είναι κατάλληλο για τέτοιου είδους προβλήματα και θα χρησιμοποιηθεί στην επίλυση της ροής στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις εφαιπτομενικές (στην κύρια) ταχύτητες αδιαστατοποιημένες με την κύρια στις θέσεις $x/D=0, 0.5$ και 0.75 (σχήματα 3.14 και 3.15). Μεταξύ των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει μόνο ποιοτική σύγκριση, δηλαδή η διαπίστωση του κατά πόσο εμφανίζονται αντίστοιχα φαινόμενα, αφού υπάρχουν διαφορές στην διακριτοποίηση του χώρου, στον τρόπο οπτικοποίησης καθώς και στον χρωματισμό της κλίμακας.

Στην θέση $x/D=0$ παρατηρείται και στα δύο αποτελέσματα έντονη ροή από τα εσωτερικά προς τα εξωτερικά τοιχώματα ενώ οι δευτερεύουσες ροές δεν εμφανίζονται ακόμα. Αυτό αντιστοιχεί στην κύρια ροή που είχε μεγάλη αξονική ταχύτητα πάνω από την περιοχή αποκόλλησης. Στις θέσεις $x/D=0.5$ και 0.75 παρατηρούνται οι χαρακτηριστικές,



Σχήμα 3.14 Εφαπτομενικές ταχύτητες σε διάφορες θέσεις-Πειραματικά αποτελέσματα (Ono, Kimura, & Kamide, 2010)



Σχήμα 3.15 Εφαπτομενικές ταχύτητες σε διάφορες θέσεις ($x/D=0, 0.5, 0.75$)-Αριθμητικά αποτελέσματα

λόγω της γεωμετρίας (ενότητα 3.1), σχεδόν συμμετρικές δίνες με αντίθετες φορές περιστροφής. Στα αριθμητικά αποτελέσματα φαίνεται να είναι πιο συμμετρικές από ότι στα πειραματικά. Αυτή η διαφορά αποδίδεται στην μη μόνιμη φύση (που δεν λαμβάνεται υπόψη στα αριθμητικά) αυτών των φαινομένων καθώς και σε πιθανές μικρές ανομοιομορφίες λόγω της πειραματικής διάταξης της ροής. Ακόμη κοινή παρατήρηση των δύο αποτελεσμάτων (δεν φαίνεται εδώ) είναι ότι οι δευτερεύουσες αυτές ροές παρουσιάζονται κατάντι του σημείου επανακόλλησης της ροής. Οι δευτερεύουσες αυτές ροές προσδίδουν ορμή στην κύρια διεύθυνση της ροής εντός της περιοχής αποκόλλησης. Για αυτό το λόγο θεωρείται ότι συμβάλλουν στο φαινόμενο της αύξησης της ταχύτητας στην περιοχή πολύ κοντά στο εσωτερικό τοίχωμα που περιγράφηκε προηγουμένως.

Κεφάλαιο 4: Δημιουργία του τελικού υπολογιστικού μοντέλου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία δημιουργίας του αριθμητικού μοντέλου. Αρχικά παρουσιάζεται το φυσικό πρόβλημα και η μοντελοποίηση του. Ακολουθεί η διαδικασία δημιουργίας του τελικού πλέγματος και των εναλλακτικών που δημιουργήθηκαν αλλά τελικά απορρίφθηκαν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας εξακρίβωσης (verification), που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μέσω του ελέγχου ανεξαρτησίας του πλέγματος. Τέλος, γίνεται αναφορά στις τελικές επιλογές των αριθμητικών μεθόδων που επιλέχθηκαν για την επίλυση στο Fluent και παρουσίαση των περιπτώσεων που θα εξεταστούν.

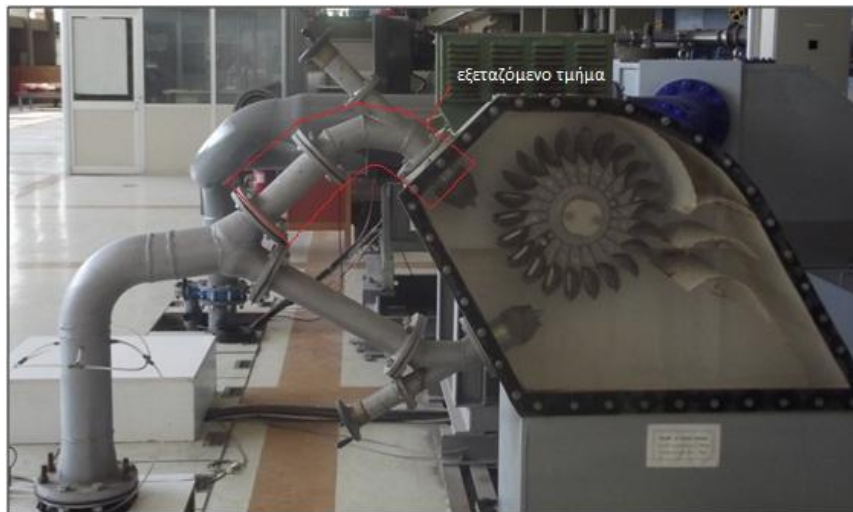
4.1 Παρουσίαση και μοντελοποίηση του φυσικού προβλήματος

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης στη ροή του τελικού τμήματος του διανομέα, του πειραματικού υδροστροβίλου Pelton του εργαστηρίου υδροδυναμικών μηχανών, των πτερυγίων στήριξης και του βάκτρου της βελόνης. Όπως περιγράφηκε στο πρώτο κεφάλαιο η 'ποιότητα' της δέσμης ύδατος που προσκρούει στα σκαφίδια του δρομέα επηρεάζει τον βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου. Οι δευτερεύουσες ροές που δημιουργούνται στον αγωγό του συστήματος έγχυσης ανάντι του ακροφυσίου επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της δέσμης. Στόχος της διερεύνησης είναι να μελετηθεί το αν και το κατά πόσο η θέση (γωνία τοποθέτησης), το πλήθος και το μήκος των πτερυγίων στήριξης της βελόνης και του βάκτρου επηρεάζουν αυτές τις δευτερεύουσες ροές στην συγκεκριμένη γεωμετρία του υδροστροβίλου του εργαστηρίου.

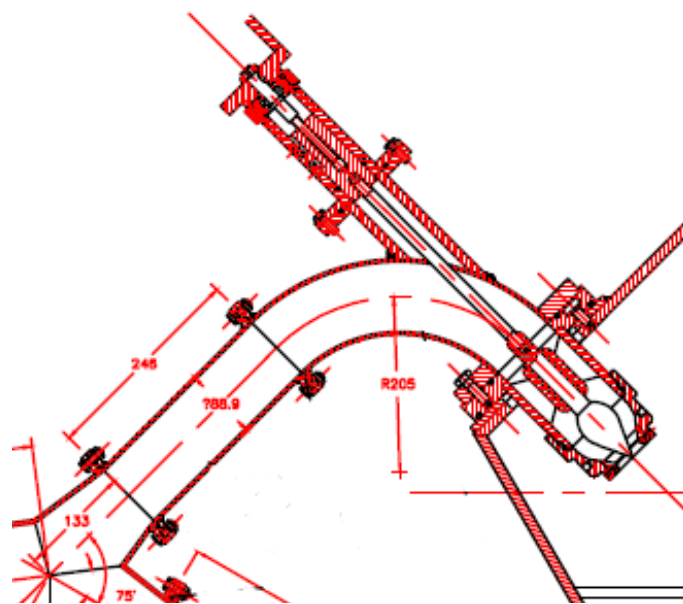
Στο παρακάτω σχήμα (σχ. 4.1) φαίνεται ο πειραματικός υδροστρόβιλος Pelton του εργαστηρίου υδροδυναμικών μηχανών. Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει δύο ακροφύσια ένα πάνω και ένα κάτω. Στη παρούσα εργασία θα εξεταστεί το τελικό τμήμα του αγωγού αμέσως πριν την βελόνη που επισημαίνεται στο σχήμα με κόκκινο. Η ρύθμιση του ανοίγματος της βελόνης γίνεται με μηχανικό τρόπο, χειροκίνητα από το μοχλό που φαίνεται στην αρχή του βάκτρου.

Για την κατασκευή της γεωμετρίας δεν υπήρχαν ακριβή κατασκευαστικά σχέδια. Η κατασκευή του υπολογιστικού μοντέλου έγινε με συνδυασμό εξωτερικών μετρήσεων στον υδροστρόβιλο και χρήση κάποιων, όχι τελικών, κατασκευαστικών σχεδίων. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται ένα από αυτά τα κατασκευαστικά σχέδια. Συνεπώς η τελική γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται σε αυτήν του υδροστροβίλου αλλά δεν είναι ακριβώς αυτή. Εντούτοις, η συγκεκριμένη διάταξη (με αγωγό κλίσης 90° και μηχανική ρύθμιση της

βελόνης) συναντάται συχνά σε υδροστροβίλους Pelton μικρής ισχύος με δύο ακροφύσια και τα συμπεράσματα ως προς την επίδραση των πτερυγίων έχουν πρακτικό ενδιαφέρον.



Σχήμα 4.1 Πειραματικός υδροστρόβιλος εργαστηρίου υδροδυναμικών μηχανών



Σχήμα 4.2 Κατασκευαστικό σχέδιο αγωγού πάνω ακροφυσίου

Η υπολογιστική προσομοίωση κάθε φυσικού προβλήματος περιλαμβάνει κάποιες απλουστευτικές παραδοχές που γίνονται σε κάθε περίπτωση. Ο βαθμός των απλουστεύσεων αυτών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι κυριότεροι εκ των οποίων είναι:

- Το είδος των φαινομένων και η ακρίβεια που μας ενδιαφέρει στην κάθε εφαρμογή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση μας ενδιαφέρουν οι δευτερεύουσες ροές λόγω επαπτομενικών ταχυτήτων που δημιουργούνται στον αγωγό υπό την επίδραση μόνο των πτερυγίων.

- Από την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ και τον χρόνο που μπορεί να διατεθεί για την επίλυση και εξαγωγή αποτελεσμάτων. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν 14 διαφορετικές διατάξεις πτερυγίων.
- Προσαρμογή της γεωμετρίας και του πλέγματος ώστε να μπορούν να εξεταστούν κάποια τοπικά φαινόμενα και να επιλυθούν από τα διαθέσιμα αριθμητικά μοντέλα.
- Περιορισμοί από τα διαθέσιμα εργαλεία προσομοίωσης. Στην περίπτωση μας τα εργαλεία αυτά είναι το Gambit και το Fluent.

Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα έγιναν κάποιες παραδοχές στο τελικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε. Αρχικά, ως προς την γεωμετρία επιλέχθηκε μεγαλύτερο μήκος στα ευθύγραμμα τμήματα πριν και μετά τη γωνία. Αυτό έγινε ώστε αφενός να είναι πλήρως διαμορφωμένη η ροή στην είσοδο της γωνίας με δεδομένο ότι στην είσοδο θεωρείται ομοιόμορφο προφίλ και αφετέρου να παρατηρηθεί η εξέλιξη της ροής σε μεγαλύτερο μήκος κατάντι των πτερυγίων. Ακόμα τα πτερύγια μοντελοποιήθηκαν σαν επιφάνειες χωρίς πάχος που όμως διατηρούν τις ιδιότητες του τοιχώματος με τη χρήση της δυνατότητας Shadow walls που δίνει το Fluent όταν υπάρχει επιφάνεια χωρίς πάχος με περιοχές ρευστού εκατέρωθεν. Τα πτερύγια έχουν πολύ μικρό πάχος στην πραγματικότητα με αποτέλεσμα να είναι αμελητέα η επίδραση του στη μείωση της διατομής και τα φαινόμενα κρούσης του ρευστού στην αξονική κατεύθυνση ενώ παράλληλα η διαδικασία δημιουργίας της γεωμετρίας και του πλέγματος είναι πολύ πιο σύνθετη για την περίπτωση με πάχος. Επίσης, οι αλλαγές διαμέτρου του βάκτρου στις διάφορες θέσεις καθώς και το έδρανο ολίσθησης αυτού στα πτερύγια δεν ελήφθησαν υπόψη για λόγους απλότητας του μοντέλου. Τέλος, η επιφανειακή τραχύτητα του αγωγού (θεωρήθηκε μηδενική) καθώς και οι κολλήσεις και ραφές που υπάρχουν σε διάφορα σημεία δεν μοντελοποιήθηκαν.

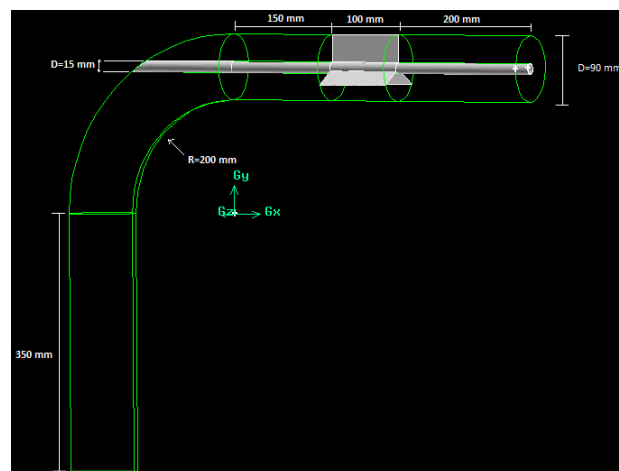
Ως προς τα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, η κύρια παραδοχή που έγινε (πέρα των περιορισμών που ούτως ή άλλως θέτουν από τη φύση τους τα ίδια τα μοντέλα) ήταν η εξέταση της ως μόνιμης. Τα φαινόμενα που μελετάμε, όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι μη-μόνιμα, με έντονη μεταβολή στον χρόνο. Εδώ θεωρήθηκαν μόνιμα και λύθηκαν με την επιλογή για σταθερό χρόνο (steady time) στο Fluent. Αυτό έγινε λόγω του πολλαπλάσιου χρόνου που απαιτεί η επίλυση στην μη μόνιμη κατάσταση με το δεδομένο των πολλών διαφορετικών γεωμετριών που εξετάστηκαν. Ακόμα τα αποτελέσματα μας ενδιαφέρει να εξεταστούν συγκριτικά μεταξύ τους και όχι ως απόλυτα μεγέθη. Επίσης, στην προσομοίωση δεν λήφθηκε υπόψη η επίδραση της βαρύτητας καθώς και η εξίσωση της ενέργειας θεωρώντας ίδια θερμοκρασία σε όλες τις περιοχές του ρευστού. Η επίδραση των τελευταίων στη ροή είναι πολύ μικρή στην πραγματικότητα και συνεπώς μπορεί να αμεληθεί.

Με δεδομένα ότι μας ενδιαφέρει αφενός η επίδραση των πτερυγίων στη ροή (και όχι η ακριβής μοντελοποίηση του διανομέα του υδροστροβίλου) και αφετέρου ο περιορισμός που τίθεται από την ισχύ του προσωπικού υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε,

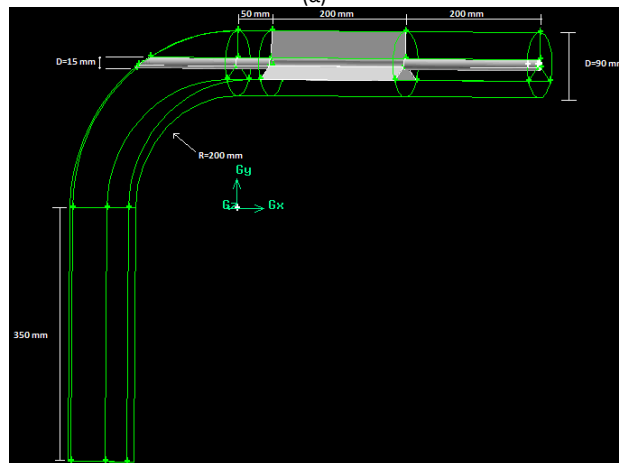
οι παραπάνω παραδοχές κρίθηκαν ικανοποιητικές. Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί η διαδικασία δημιουργίας του τελικού υπολογιστικού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.

4.2 Δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος

Αρχικά παρουσιάζεται η τελική γεωμετρία για τις δυο εναλλακτικές ως προς το μήκος των κοντών πτερυγίων (σχ. 4.3). Στην πρώτη εικόνα φαίνεται η γεωμετρία με τα κοντά πτερύγια ενώ στη δεύτερη αυτή με τα μακριά. Το ευθύγραμμο τμήμα εισόδου είναι παράλληλο στον άξονα y και το τμήμα εξόδου είναι παράλληλο στον άξονα x . Η διατομή εισόδου της γωνίας βρίσκεται στο επίπεδο $y=0$ και η διατομή εξόδου της στο $x=0$. Το επίπεδο συμμετρίας του αγωγού είναι το $z=0$. Η διάμετρος του αγωγού είναι 90 mm, του βάρκρου 15 mm και η ακτίνα καμπυλότητας είναι $r=200$ mm με αναλογία $r/D=2.2$. Πάνω σε αυτές τις δύο βασικές γεωμετρίες βασίζονται και οι υπόλοιπες οι οποίες διαφέρουν ως προς το πλήθος των πτερυγίων (2,3 και 4), την γωνία ως προς τον άξονα συμμετρίας του αγωγού και την σχετική γωνία μεταξύ τους. Επίσης, δημιουργήθηκε μια περίπτωση χωρίς καθόλου πτερύγια προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση μόνο του βάρκρου στη ροή και να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα για σύγκριση.



(α)



(β)

Σχήμα 4.3 Τελική γεωμετρία με κοντά (α) και μακριά πτερύγια (β)

4.2.1 Εναλλακτικά πλέγματα

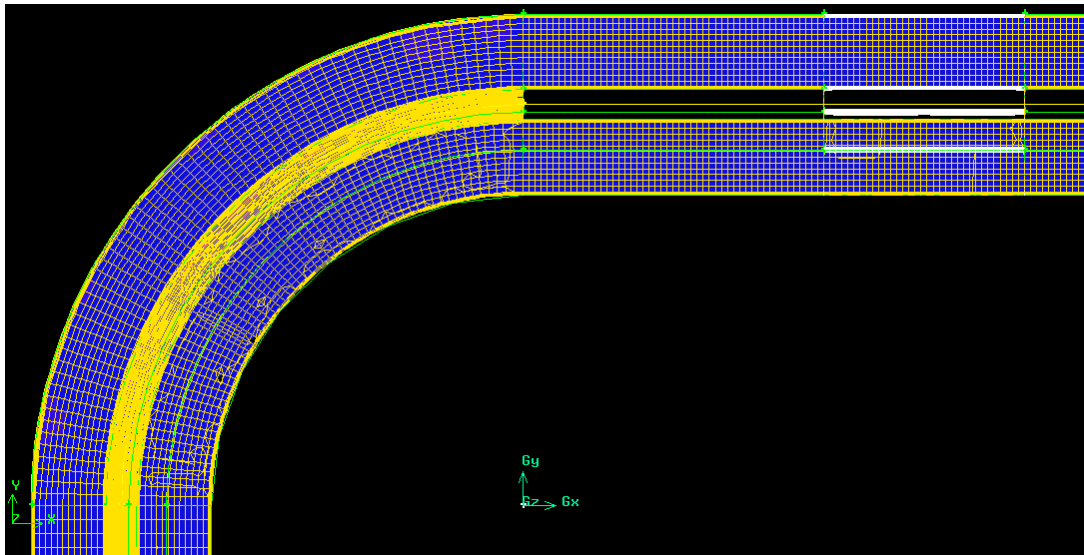
Όπως έχει αναφερθεί στο δεύτερο κεφάλαιο υπάρχουν πολλές επιλογές για την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα έγιναν διάφορες δοκιμές μέχρι να επιλεγεί ο τελικός τύπος του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε. Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν αυτά τα εναλλακτικά πλέγματα. Η παρουσίαση θα γίνει για την πρώτη περίπτωση των τριών πτερυγίων και στη συνέχεια θα παρουσιαστούν όλες οι διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν στην επόμενη ενότητα.

Αρχικά επιδιώχθηκε να δημιουργηθεί εξαεδρικό πλέγμα με οριακό στρώμα αντίστοιχο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία της επικύρωσης (validation) που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό δεν ήταν δυνατό λόγω της ιδιομορφίας της γεωμετρίας στο τμήμα της γωνίας που περιέχει και το βάκτρο. Προκειμένου να δημιουργηθεί αυτό το πλέγμα στην γεωμετρία αποφασίστηκε να παραληφθεί το τμήμα του βάκτρου που βρίσκεται στο τμήμα της γωνίας.

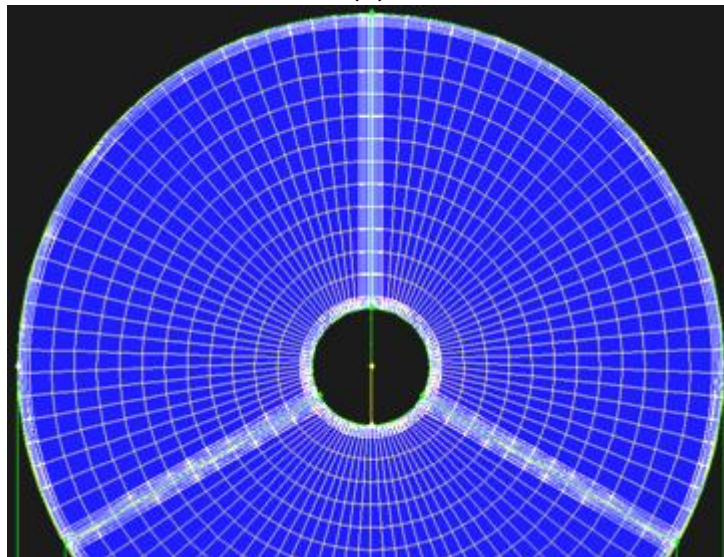
Η γεωμετρία τροποποιήθηκε ώστε το βάκτρο να ξεκινάει από την θέση $x=0$. Δημιουργήθηκε πρώτα το εξαεδρικό μη δομημένο πλέγμα στο τμήμα εξόδου. Σε αυτό, αρχικά, τοποθετήθηκε οριακό στρώμα στις επιφάνειες του αγωγού, των πτερυγίων και του βάκτρου με 5 στρώματα, growth factor 1.2 και βάθος πρώτης σειράς 0.0003m. Το πλέγμα στον όγκο δημιουργήθηκε με τον αλγόριθμο Cooper χρησιμοποιώντας ως πηγή τα επιφανειακά πλέγματα των διατομών αρχής και τέλους των πτερυγίων. Το spacing τέθηκε 0.003m. Στη συνέχεια προκειμένου να είναι ομοιόμορφο και συνεχές το πλέγμα και το οριακό στρώμα σε όλες τις περιοχές (τμήματα εισόδου, γωνίας και εξόδου) διατηρήθηκε η διαμόρφωση του βάκτρου σε όλα τα τμήματα του αγωγού. Στην γωνία και στην είσοδο αυτό ορίστηκε ως τμήμα του εσωτερικού (interior) ενώ στο τμήμα εξόδου ως τοίχος (wall) από την επιλογή οριακών συνθηκών του Gambit. Το πλέγμα δημιουργήθηκε στα υπόλοιπα τμήματα με τον αλγόριθμο Cooper και spacing 0.005m στη γωνία και 0.007m στην είσοδο. Ο λόγος που επιλέγεται πυκνότερο το πλέγμα στην έξοδο είναι αφενός το ότι επιθυμούμε να μελετήσουμε τα φαινόμενα της ροής αναλυτικά στα πτερύγια και ανάντι και αφετέρου η εξοικονόμηση μεγέθους του πλέγματος. Τελικά το πλέγμα αποτελούνταν από 814.000 στοιχεία και το χειρότερο στοιχείο είχε λοξότητα 0.57.

Το τελικό πλέγμα παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Φαίνονται δύο τομές στα επίπεδα $z=0$ και $x=0.2m$. Παρατηρείται ότι το πλέγμα είναι πυκνότερο στις περιοχές που έχει διατηρηθεί η διαμόρφωση του βάκτρου στα τμήματα της εισόδου και της γωνίας. Ακόμα, το πλέγμα είναι ομοιόμορφο με κάποια μόνο τμήματα ανομοιομορφίας των κελιών στην εσωτερική περιοχή της γωνίας.

Στη συνέχεια το πλέγμα εισήχθη στο Fluent και επιλύθηκε με αριθμητικά μοντέλα αντίστοιχα με αυτά της ενότητας 3.2.2. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η αλλαγή στο



(α)

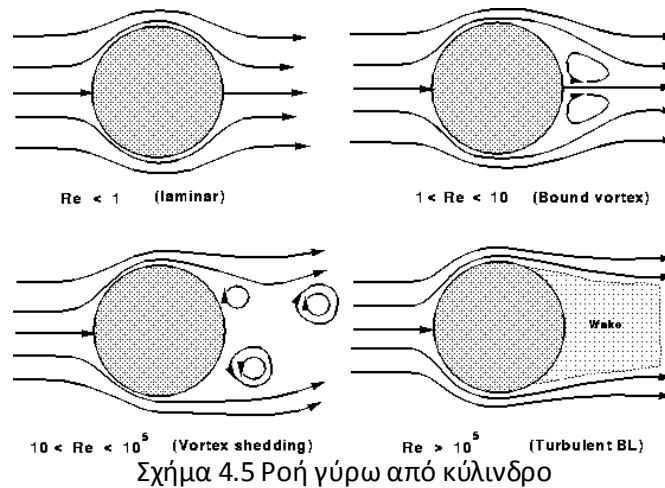


(β)

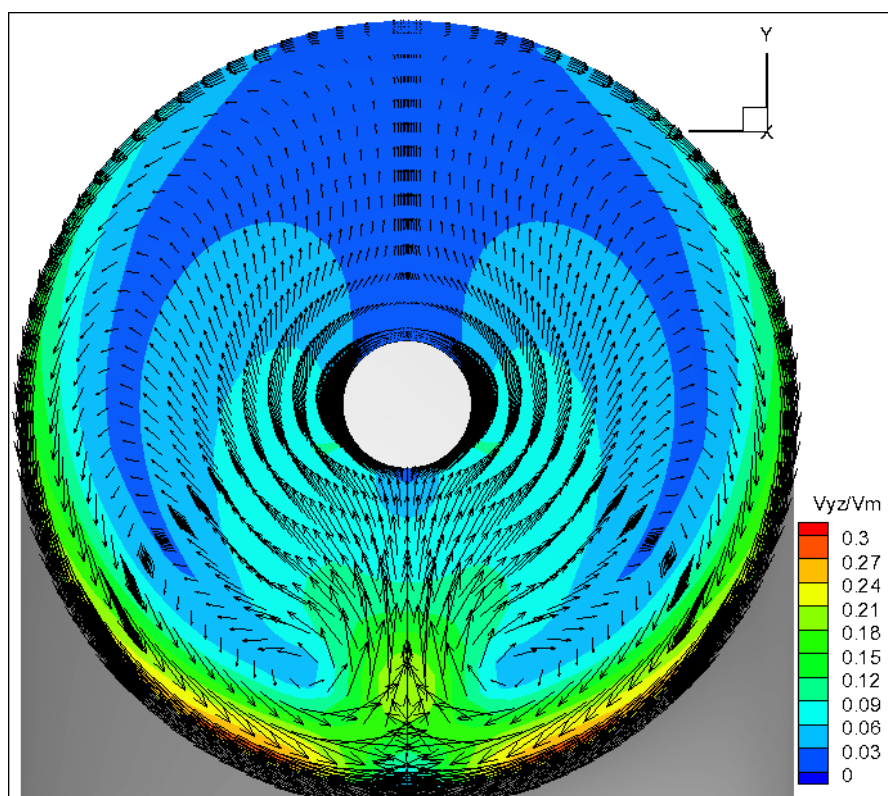
Σχήμα 4.4 Τομές του πλέγματος με κοντό βάκτρο στα επίπεδα $z=0$ (α) και $x=0.2m$ (β)

μήκος του βάκτρου δεν ήταν σωστή μοντελοποίηση του φυσικού προβλήματος. Η ροή συναντά το βάκτρο μετά το τέλος της γωνίας με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζονται τα αναμενόμενα φαινόμενα: Σύμφωνα με την θεωρία και την βιβλιογραφία της μηχανικής των ρευστών, όταν υπάρχει παράλληλη ροή γύρω από κυκλικό κύλινδρο (όπως είναι το βάκτρο εδώ) από κάποιο αριθμό Reynolds και πάνω υπάρχει αποκόλληση της ροής. Η ροή σταματά να ακολουθεί τα τοιχώματα, ενώ όσο αυξάνει ο αριθμός Reynolds αναμένεται να δημιουργηθούν κάποιες δίνες πίσω από τον κύλινδρο. Ο αριθμός Re πάνω από τον οποίο εμφανίζεται αποκόλληση είναι 1 ενώ στην περιοχή 1 με 10 περιμένουμε να δημιουργηθούν κάποιες συμμετρικές μόνιμες δίνες στην περιοχή της αποκόλλησης. Σε υψηλότερους αριθμούς Re ($10-10^5$) παρατηρείται μεγάλη αστάθεια της ροής και φαινόμενα όπως οι δίνες Von Carman. Τα παραπάνω φαίνονται και στο σχήμα 4.5. Στην περίπτωση μας ο αριθμός Re είναι της τάξης του $8 \cdot 10^4$ (χαρακτηριστικό μήκος λαμβάνεται η διάμετρος του κυλίνδρου)

αν και δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια γιατί η ροή δεν είναι παράλληλη ακριβώς με τον κύλινδρο. Ακόμα ο υπολογισμός έχει γίνει για σταθερό χρόνο οπότε δεν περιμένουμε να δούμε τα μεταβατικά φαινόμενα. Σε κάθε περίπτωση όμως, αναμένεται ότι θα δημιουργηθούν κάποιες τέτοιες δίνες λόγω του βάρκρου μετά την γωνία.

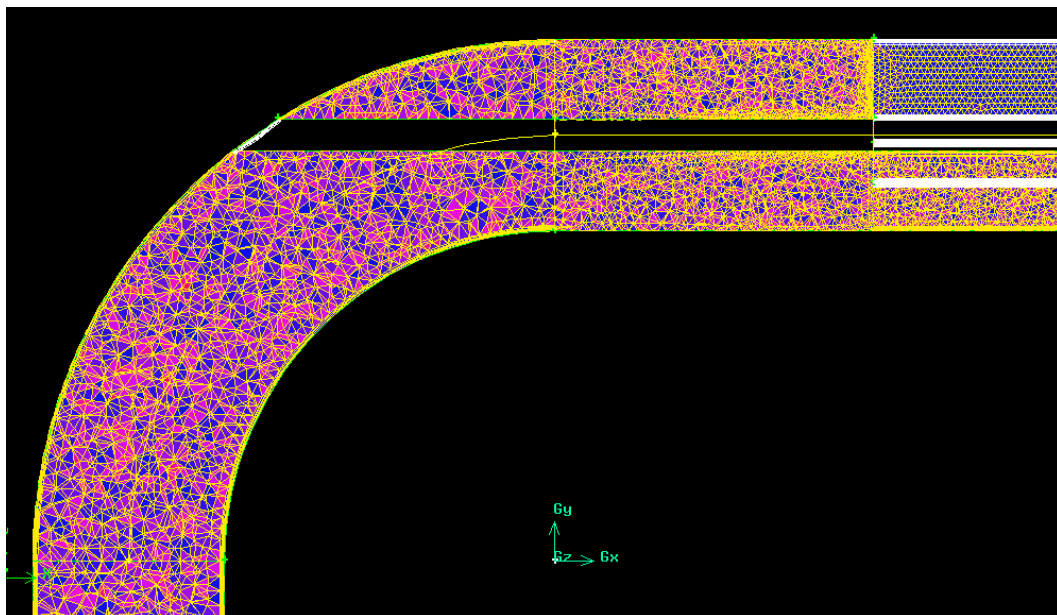


Στο επόμενο σχήμα φαίνεται μία τομή του αγωγού στην θέση $x=0.05$ m που είναι μεταξύ της γωνίας και των πτερυγίων. Στο σχήμα παρουσιάζονται οι, αδιαστατοποιημένες (με την μέση), εφαπτομενικές ταχύτητες. Παρατηρούνται οι δύο συμμετρικές δίνες προς τα εσωτερικά τοιχώματα της γωνίας που αναμένονταν λόγω της γωνίας των 90° . Όμως, δεν παρατηρούνται οι δίνες λόγω της επίδρασης του βάρκρου στην ροή.

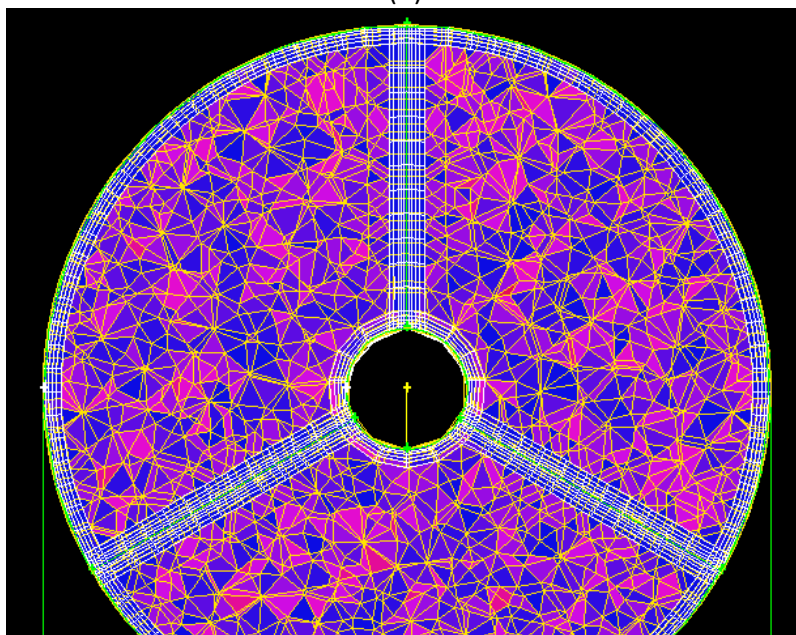


Σχήμα 4.6 Αδιαστατοποιημένες με την μέση εφαπτομενικές ταχύτητες στο επίπεδο $x=0.05$ m

Στη συνέχεια, με δεδομένο ότι η γεωμετρία έπρεπε να διατηρηθεί ακέραια, δημιουργήθηκε μη δομημένο πλέγμα, αποτελούμενο αποκλειστικά από τετραεδρικά (πυραμιδοειδή) στοιχεία. Αρχικά, τοποθετήθηκε και εδώ οριακό στρώμα στις επιφάνειες του αγωγού, των πτερυγίων και του βάρκρου με 5 στρώματα, growth factor 1.2 και βάθος πρώτης σειράς 0.0003m. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το πλέγμα στους όγκους με τον αλγόριθμο TGrid που δημιουργεί τα τετραεδρικά στοιχεία. Το spacing επιλέχθηκε ίδιο με την προηγούμενη περίπτωση 0.003 m στο τμήμα εξόδου, 0.005 m στη γωνία και 0.007 m στην είσοδο. Τελικά το πλέγμα αποτελούνταν από 810.000 στοιχεία και το χειρότερο στοιχείο είχε λοξότητα 0.85. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το πλέγμα σε δύο τομές, στο επίπεδο $z=0$ και στο $x=0.2$ m.



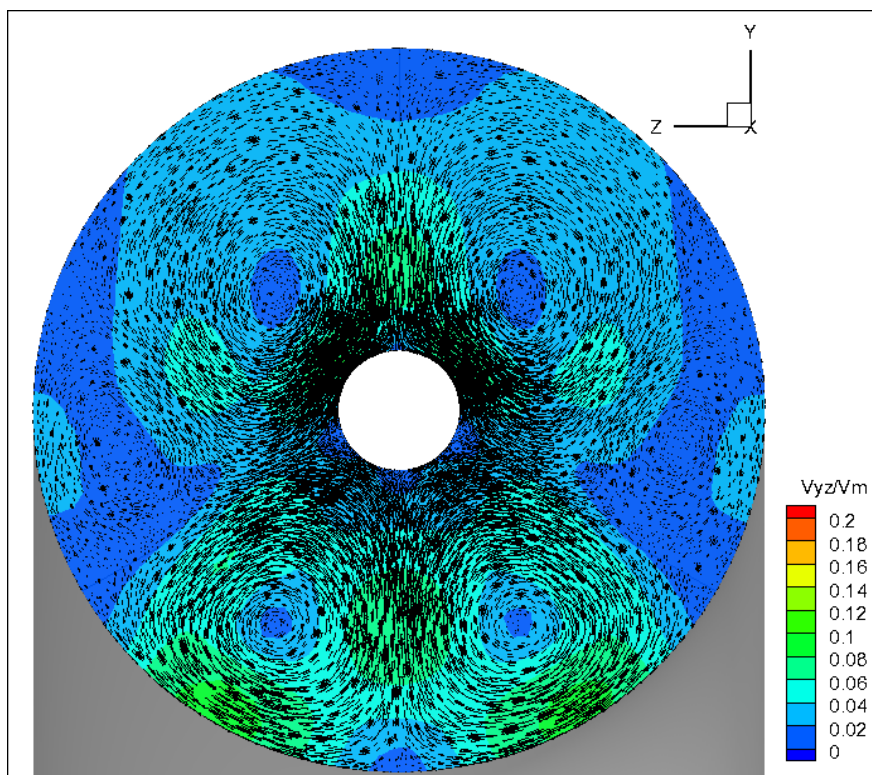
(α)



(β)

Σχήμα 4.7 Τομές του πλέγματος με κοντό βάρκρο στα επίπεδα $z=0$ (α) και $x=0.2$ m (β)

Τα αποτελέσματα της επίλυσης αυτού του πλέγματος στο Fluent έδειξαν ότι αποτυπώνουν τα φαινόμενα που ενδιαφέρουν. Όμως υπήρχαν προβλήματα με την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων αυτού του πλέγματος. Προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τη ροή και να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα είναι σημαντική η καλή οπτικοποίηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Έγιναν δοκιμές με πύκνωση του πλέγματος στα διάφορα τμήματα όμως δεν άλλαξε κάτι ως προς την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι εφαπτομενικές ταχύτητες αδιαστατοποιημένες ως προς τη μέση στην θέση $x=0.34$ μία διάμετρο μετά τα πτερύγια. Παρατηρούνται οι δύο συμμετρικές δίνες λόγω της γωνίας προς τα εσωτερικά τοιχώματα της γωνίας καθώς και οι δίνες λόγω της επίδρασης του βάρους. Ακόμα φαίνεται το πρόβλημα οπτικοποίησης των διανυσμάτων των ταχυτήτων.



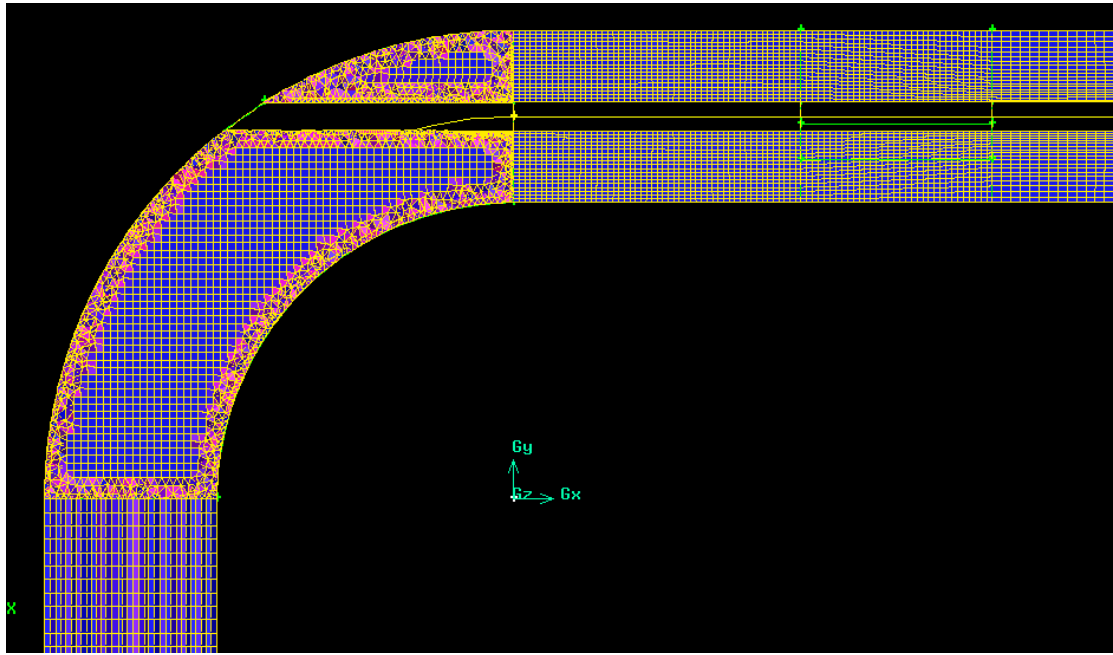
Σχήμα 4.8 Αδιαστατοποιημένες με την μέση εφαπτομενικές ταχύτητες στο επίπεδο $x=0.34$ m

Το επόμενο πλέγμα αποφασίστηκε να είναι υβριδικό, με διαφορετικού είδους στοιχεία σε κάθε τμήμα του. Στο τμήμα εξόδου του αγωγού, που περιλαμβάνει και τα πτερύγια, αποφασίστηκε να τοποθετηθεί εξαεδρικό δομημένο πλέγμα. Στο τμήμα της γωνίας χρησιμοποιήθηκε ένα υβριδικό είδος πλέγματος με εξαεδρικά στοιχεία στον πυρήνα του και κάποιες στοιβάδες τετραεδρικών στοιχείων, κοντά στα τοιχώματα, με τον αλγόριθμο Hex Core Native του Gambit. Στο τμήμα εισόδου δημιουργήθηκε πλέγμα με σφηνοειδή στοιχεία (wedges). Η διαδικασία δημιουργίας του ήταν πιο πολύπλοκη από αυτές των προηγούμενων περιπτώσεων.

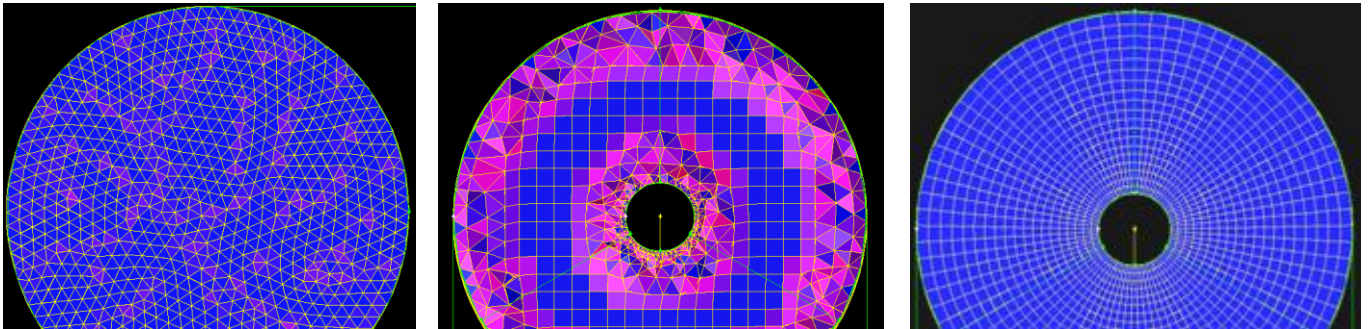
Βασικό μειονέκτημα σε αυτού του είδους το πλέγμα είναι ότι δεν μπορεί να τοποθετηθεί οριακό στρώμα με χρήση του σχετικού εργαλείου του Gambit. Πρέπει στις περιοχές που ενδιαφέρουν να δημιουργηθεί και να τροποποιηθεί το πλέγμα στις ακμές των πλευρών ώστε να πυκνωθεί προς τα τοιχώματα, στη συνέχεια να δημιουργηθεί το πλέγμα στην επιφάνεια που περικλείεται από τις ακμές και στη συνέχεια να δημιουργηθεί το πλέγμα στον όγκο που περικλείεται από τις επιφάνειες.

Η δημιουργία του πλέγματος ξεκίνησε από την περιοχή των πτερυγίων όπου αφού έγινε η τοπική πυκνωση προς τα τοιχώματα, δημιουργήθηκε το δομημένο πλέγμα από εξαεδρικά στοιχεία με τη χρήση του αλγόριθμου Cooper. Στη συνέχεια με πηγές τις επιφάνειες στις διατομές αρχής και τέλους των πτερυγίων δημιουργήθηκε το πλέγμα στις υπόλοιπες περιοχές του τμήματος εξόδου. Στην περιοχή της γωνίας δημιουργήθηκε το μη δομημένο πλέγμα με τον αλγόριθμο Hex Core Native με πέντε στοιβάδες τετραεδρικών στοιχείων και εξαεδρικό πυρήνα. Στη συνέχεια με πηγή την επιφάνεια της διατομής εισόδου της γωνίας δημιουργήθηκε το πλέγμα με σφηνοειδή στοιχεία στο τμήμα εισόδου με τη χρήση του αλγόριθμου Cooper. Το πλέγμα αυτό παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα (σχ 4.9). Τα χειρότερα στοιχεία, όπως αναμενόταν, εμφανίζονται στο τμήμα εξόδου της γωνίας όπου ενώνονται μέσω της κοινής επιφάνειας τα δύο διαφορετικά είδη πλέγματος. Το χειρότερο στοιχείο είχε λοξότητα 0.96, τιμή οριακή για το Fluent που όμως δεν κατέστη εφικτό να βελτιωθεί παρά τις αλλαγές στο spacing των τμημάτων και της πυκνωσης του πλέγματος.

Τα αποτελέσματα μετά την επίλυση σε αυτό το πλέγμα ήταν ικανοποιητικά. Συνεπώς αποφασίστηκε να διατηρηθεί αυτό το πλέγμα ως τελικό. Όμως, στη συνέχεια κατά την διαδικασία εξακρίβωσης (verification) μέσω του ελέγχου ανεξαρτησίας του πλέγματος όπου δοκιμάστηκαν διάφορα spacing στο πλέγμα παρατηρήθηκε ότι όσο πυκνωνε το πλέγμα παρουσιαζόταν μία στρέβλωση του στις περιοχές του τμήματος εξόδου εκτός των πτερυγίων. Αυτή η στρέβλωση παρατηρήθηκε και στα αποτελέσματα. Η περιοχή μετά τα πτερύγια στο τμήμα εξόδου είναι αυτή στην οποία ενδιαφέρουν τα αποτελέσματα για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την επίδραση των πτερυγίων στη ροή με αποτέλεσμα να κριθεί ακατάλληλο αυτό το πλέγμα. Το πρόβλημα αυτό αποδίδεται στην χρήση του αλγόριθμου Cooper για την δημιουργία του πλέγματος στην περιοχή αυτή. Το τμήμα των πτερυγίων έχει διαφορετική εσωτερική διαμόρφωση από τα γειτονικά του που δεν έχουν καμία εκτός του βάρους. Το επιφανειακό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε ως πηγή για την δημιουργία του πλέγματος στον όγκο περιείχε αυτές τις διαμορφώσεις καθώς και την τοπική πυκνωση προς τα τοιχώματα (του αγωγού και των πτερυγίων). Αυτό είχε ως συνέπεια την ανομοιομορφία-καμπύλωση του πλέγματος στον όγκο η οποία γινόταν εντονότερη όσο πυκνωνε το πλέγμα. Αυτό αντιμετωπίστηκε στο επόμενο πλέγμα (τελικό) που δημιουργήθηκε και παρουσιάζεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.



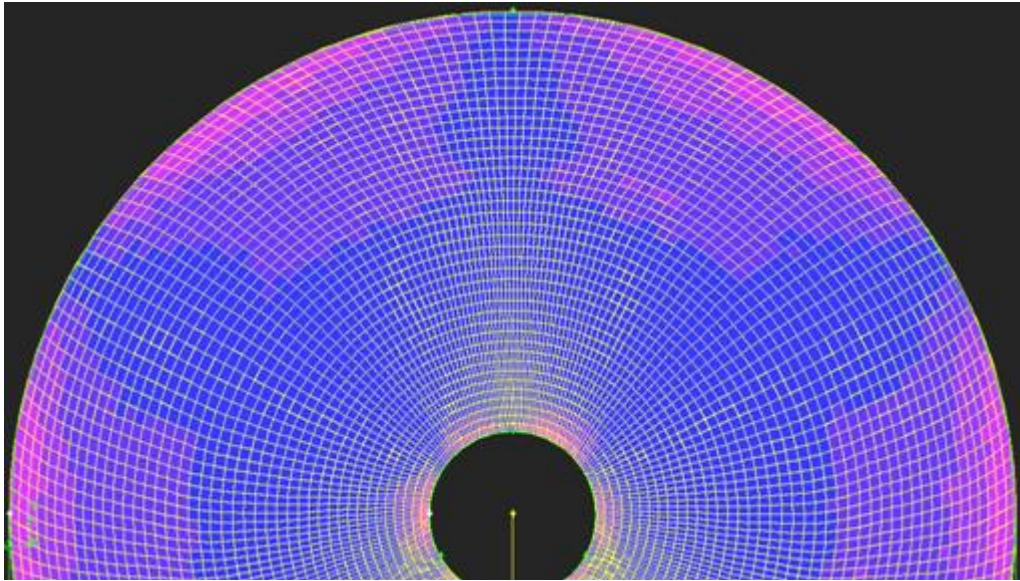
(α)



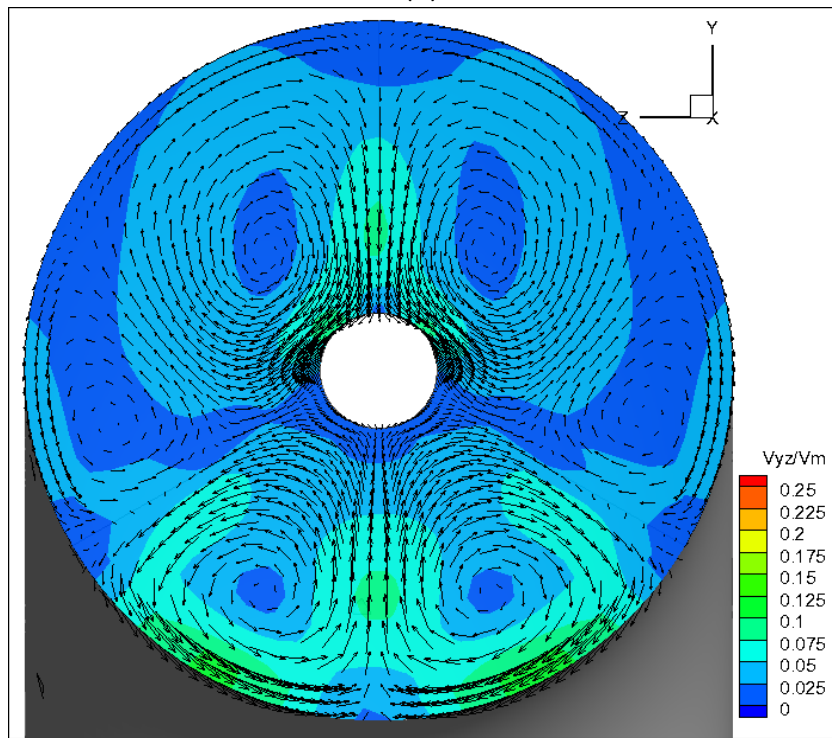
(β)

Σχήμα 4.9 Υβριδικό πλέγμα-τομή στο επίπεδο $z=0$ (α) και παρουσίαση του πλέγματος στα διάφορα τμήματα (είσοδος-γωνία-έξοδος)

Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζονται το πλέγμα και τα αποτελέσματα στο επίπεδο $x=0.34$ m (μία διάμετρος μετά το τέλος των πτερυγίων), που είναι και μία από τις θέσεις που θα εξεταστούν στη συνέχεια. Παρατηρείται ότι το πλέγμα έχει κάποιες παραμορφώσεις σε αυτή τη θέση. Οι ακμές των κελιών είναι ελαφρώς καμπυλωμένες ενώ παράλληλα δεν υπάρχει απόλυτη συμμετρία ως προς το επίπεδο συμμετρίας ($z=0$). Αντίστοιχα στα αποτελέσματα, όπου παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες εφαιπτομενικές ταχύτητες στην διατομή, φαίνεται αυτή η ασυμμετρία εκατέρωθεν του επιπέδου συμμετρίας η οποία δεν δικαιολογείται από τα φαινόμενα της ροής και δεν είχε παρατηρηθεί στις άλλες περιπτώσεις.



(α)



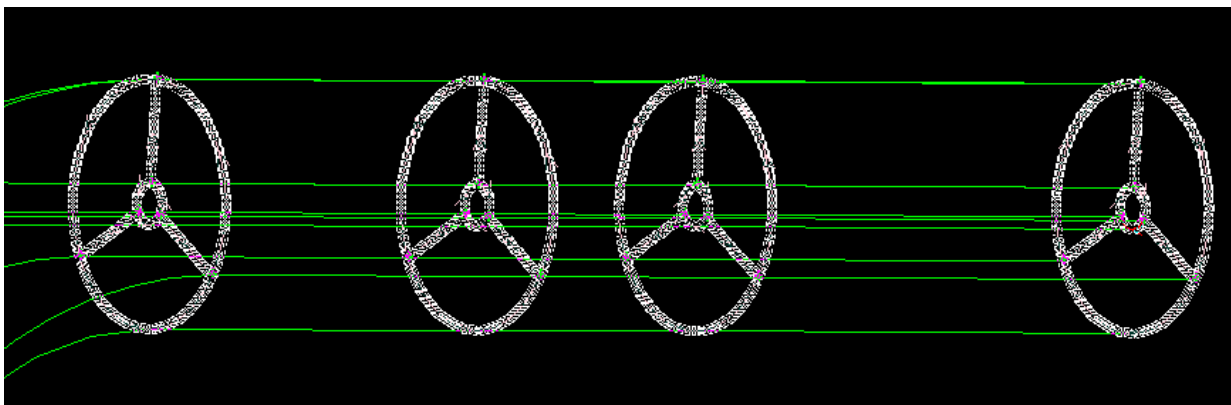
(β)

Σχήμα 4.10 Πλέγμα και αποτελέσματα (εφαπτομενικές ταχύτητες αδιαστατοποιημένες με τη μέση) στο επίπεδο $x=0.34$

4.2.2 Τελικό πλέγμα

Το τελικό πλέγμα βασίστηκε στο υβριδικό πλέγμα που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που παρουσίαζε αυτό, διατηρήθηκε η διαμόρφωση των πτερυγίων σε όλο το τμήμα εξόδου του αγωγού με στόχο να είναι ομοιόμορφο παντού. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να ακολουθείται παντού ίδια η γεωμετρία στο τμήμα εξόδου και να μην υπάρχουν παραμορφώσεις των στοιχείων του πλέγματος εκτός των πτερυγίων. Τα καινούρια τμήματα που προστέθηκαν στην γεωμετρία μετά την δημιουργία του πλέγματος χαρακτηρίστηκαν ως τμήματα του εσωτερικού του ρευστού (interior) με αποτέλεσμα να μην αλλάξει τίποτα τελικά στην γεωμετρία. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η διαδικασία δημιουργίας αυτού του πλέγματος. Τα στοιχεία που δίνονται για το spacing είναι αυτά που τέθηκαν στο πλέγμα που τελικά χρησιμοποιήθηκε μετά την διαδικασία εξακρίβωσης (ενότητα 4.3).

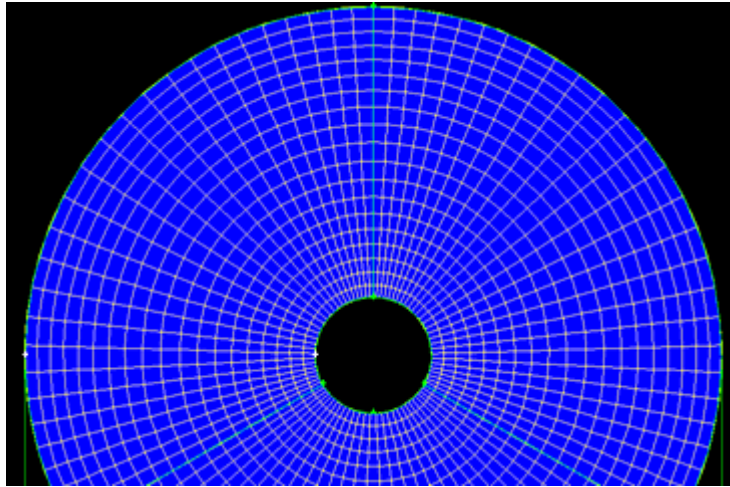
Αρχικά τοποθετήθηκαν οι κόμβοι του πλέγματος στις ακμές (συνολικά 36) των επιφανειών που ορίζουν τους 3 όγκους (κυλίνδρους) του τμήματος εξόδου. Η τοπική πύκνωση του πλέγματος έγινε μέσω της πύκνωσης των κόμβων κάθε ακμής προς τα τοιχώματα. Στις ακτινικές ακμές τοποθετήθηκαν 19 κόμβοι με αναλογία πύκνωσης των διαδοχικών κόμβων προς τα τοιχώματα (και προς τις δύο πλευρές) 1.04. Στις περιμετρικές τοποθετήθηκαν 27 κόμβοι με αναλογία πύκνωσης 1,05. Αυτές οι τιμές προέκυψαν ως ο καλύτερος συμβιβασμός μεταξύ της πύκνωσης του πλέγματος προς τα τοιχώματα και της αποδεκτής ποιότητας των στοιχείων κατόπιν δοκιμών. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι αλλαγές στην γεωμετρία του τμήματος εισόδου και οι ακμές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την πύκνωση προς τα τοιχώματα.



Σχήμα 4.11 Τμήμα εξόδου τελικού πλέγματος

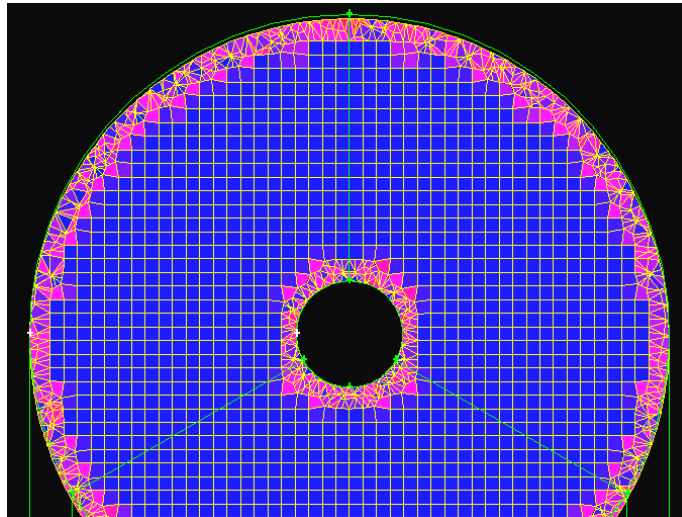
Στη συνέχεια βάσει αυτών των κόμβων δημιουργήθηκαν τα τετραγωνικά, επιφανειακά, δομημένα πλέγματα στις συνοριακές επιφάνειες των όγκων. Αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως πηγές για τον αλγόριθμο Cooper με χρήση του οποίου έγιναν τα πλέγματα των όγκων. Το spacing τέθηκε 0.00068 m και το τελικό πλέγμα είναι δομημένο αποτελούμενο από εξαεδρικά στοιχεία. Το χειρότερο στοιχείο αυτού του τμήματος έχει

λοξότητα 0.03. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το πλέγμα στο τμήμα εξόδου, όπου παρατηρείται η πύκνωση του προς τα τοιχώματα καθώς και η απουσία παραμορφώσεων.



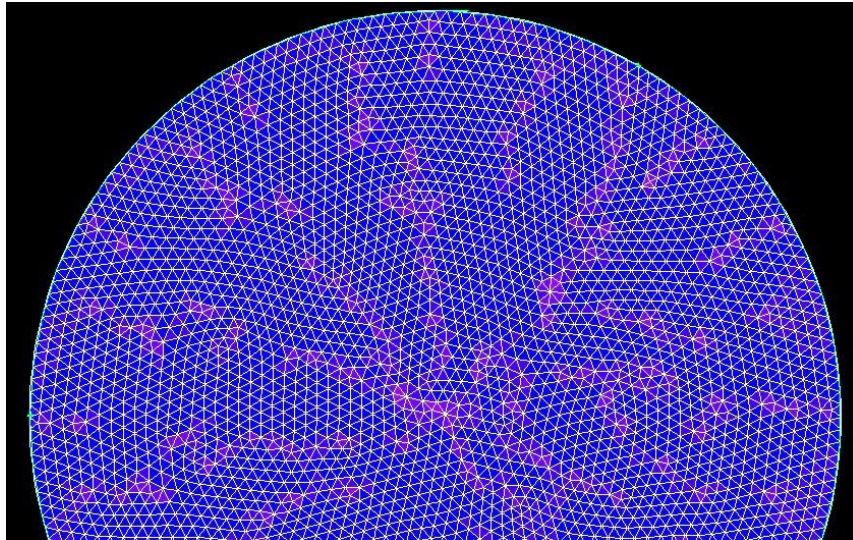
Σχήμα 4.12 Τμήμα εξόδου τελικού πλέγματος

Κατόπιν, δημιουργήθηκε το πλέγμα στην γωνία με χρήση του αλγόριθμου Hex Core Native με 3 στρώματα τετραεδρικών στοιχείων να περιβάλλουν τον εξαεδρικό πυρήνα. Το spacing τέθηκε 0.00138. Το χειρότερο στοιχείο αυτού του τμήματος έχει λοξότητα 0.93 με τα χειρότερα στοιχεία να βρίσκονται κοντά στην κοινή επιφάνεια με το τμήμα εξόδου. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το πλέγμα στο τμήμα της γωνίας.



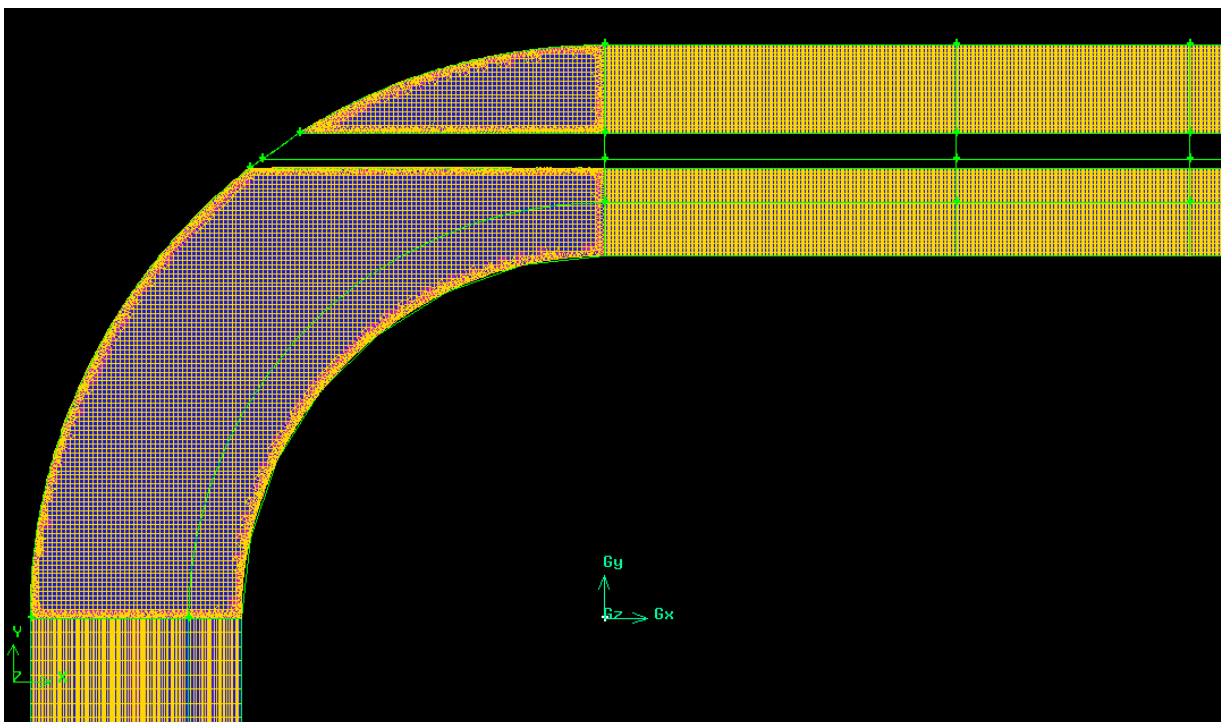
Σχήμα 4.13 Τμήμα γωνίας τελικού πλέγματος

Το πλέγμα του τμήματος εισόδου δημιουργήθηκε με χρήση του αλγόριθμου Cooper με πηγή το τριγωνικό επιφανειακό πλέγμα του τμήματος εισόδου. Το πλέγμα αυτό είναι μη δομημένο και αποτελείται από σφηνοειδή στοιχεία (wedges). Το spacing εδώ επιλέχθηκε 0.006 m, αρκετά μεγαλύτερο από τα άλλα τμήματα για εξοικονόμηση μνήμης και υπολογιστικής ισχύος στην επίλυση. Το χειρότερο στοιχείο είχε λοξότητα 0.38. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το πλέγμα του τμήματος εισόδου.



Σχήμα 4.14 Τμήμα εισόδου τελικού πλέγματος

Συνολικά το τελικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για τις αριθμητικές προσομοιώσεις αποτελούνταν από 2.200.000 στοιχεία. Η πυκνότητα του στις διάφορες περιοχές και το συνολικό πλήθος στοιχεία αποφασίστηκαν μέσω της διαδικασίας της εξακρίβωσης (verification) που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα. Αυτό το πλέγμα είναι κοινό σε όλες τις περιπτώσεις με μόνες αλλαγές στο μήκος του τμήματος των πτερυγίων, της γωνίας τοποθέτησης και του πλήθους αυτών. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η τομή του συνολικού τελικού πλέγματος στο επίπεδο $z=0$.



Σχήμα 4.15 Τελικό πλέγμα στο επίπεδο $z=0$

4.3 Εξακρίβωση (verification) μέσω ελέγχου ανεξαρτησίας πλέγματος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως υπάρχουν κάποιες διαδικασίες που έχουν καθιερωθεί προκειμένου να υπάρχει μία βάση για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων μέσω CFD. Οι δύο κυριότερες είναι η επικύρωση (validation) η οποία παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2 και η εξακρίβωση (verification).

Εξακρίβωση είναι η διαδικασία του προσδιορισμού του βαθμού στον οποίο η εφαρμογή ενός υπολογιστικού μοντέλου επηρεάζει την λύση. Αυτό μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους ανάλογα με την εφαρμογή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται έλεγχος του κατά πόσο το μέγεθος του πλέγματος επηρεάζει την λύση, μέσω του ελέγχου ανεξαρτησίας του πλέγματος. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με επίλυση τριών ή περισσότερων διαδοχικά πυκνότερων (αν είναι δυνατό με διπλασιασμό των στοιχείων κάθε φορά) πλεγμάτων και σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσμάτων. Όσο το πλέγμα πυκνώνει (άρα και τα στοιχεία μικραίνουν) τα σφάλματα λόγω διακριτοποίησης του χώρου πρέπει να μικραίνουν, μέχρι κάποιου σημείου πάνω από το οποίο συμπίπτουν ασυμπτωτικά και πέρα από αυτό δεν αλλάζει κάτι στη λύση με την πυκνωση (Slater, 2008).

Όπως και στην περίπτωση του validation, ο βαθμός ανεξαρτησίας που απαιτείται εξαρτάται στην κάθε περίπτωση από πολλούς (συχνά αντικρουόμενους) παράγοντες όπως η επιθυμητή ακρίβεια της λύσης, η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ και ο διαθέσιμος χρόνος επίλυσης. Στην περίπτωση που εξετάζεται εδώ, τα όρια τέθηκαν από τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ και τον διαθέσιμο χρόνο για την επίλυση κάθε περίπτωσης.

Το πλέγμα που χρησιμοποιείται έχει κάποιες ιδιομορφίες και κάποιους περιορισμούς. Το πλέγμα δεν είναι ίδιου είδους σε όλα τα τμήματα του, ενώ παράλληλα τα φαινόμενα που μας ενδιαφέρουν βρίσκονται στο τμήμα εξόδου. Συνεπώς η πυκνωση κάθε φορά για τον έλεγχο ανεξαρτησίας έπρεπε να γίνεται σε κάθε τμήμα ξεχωριστά προκειμένου να εξασφαλίζεται όχι μόνο ότι το πλήθος των στοιχείων είναι το επιθυμητό αλλά και το ότι κάθε τμήμα έχει αντίστοιχα πυκνότερο πλέγμα. Όμως, το Gambit που είναι ένα πρόγραμμα βασισμένο σε αρχιτεκτονική 32bit και σε συνδυασμό με την μνήμη του προσωπικού υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε δεν επέτρεψαν να γίνει παντού αντίστοιχη πυκνωση. Το τμήμα της γωνίας με το υβριδικό πλέγμα ειδικότερα ήταν αυτό που μετά την δεύτερη πυκνωση δεν ήταν δυνατό να μικρύνουν τα στοιχεία του αντίστοιχα με τα άλλα τμήματα. Ακόμα η χρήση του αλγόριθμου Cooper και το γεγονός ότι τα διαφορετικά πλέγματα ενώνονται σε κοινές επιφάνειες απαιτούσε κατάλληλο συνδυασμό με δοκιμές της πυκνότητας κάθε πλέγματος ώστε να διατηρηθεί η ποιότητα του πλέγματος σε κάθε τμήμα. Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη έγινε προσπάθεια να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη η πυκνωση του πλέγματος σε κάθε περίπτωση.

Οι επιλογές της πυκνωσης του πλέγματος προς τα τοιχώματα μέσω της διάταξης των κόμβων στις ακμές διατηρήθηκαν σταθερές σε όλα τα πλέγματα που θα

παρουσιαστούν στη συνέχεια. Ακόμα όλες οι επιλογές αριθμητικών μοντέλων στο Fluent διατηρήθηκαν ίδιες σε όλες τις περιπτώσεις και είναι αυτές που παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα (4.4). Γενικά, η κάθε μία περίπτωση που παρουσιάζεται στη συνέχεια διαφέρει από τις άλλες μόνο ως προς την επιλογή του spacing στη δημιουργία του πλέγματος κάθε τμήματος στο Gambit.

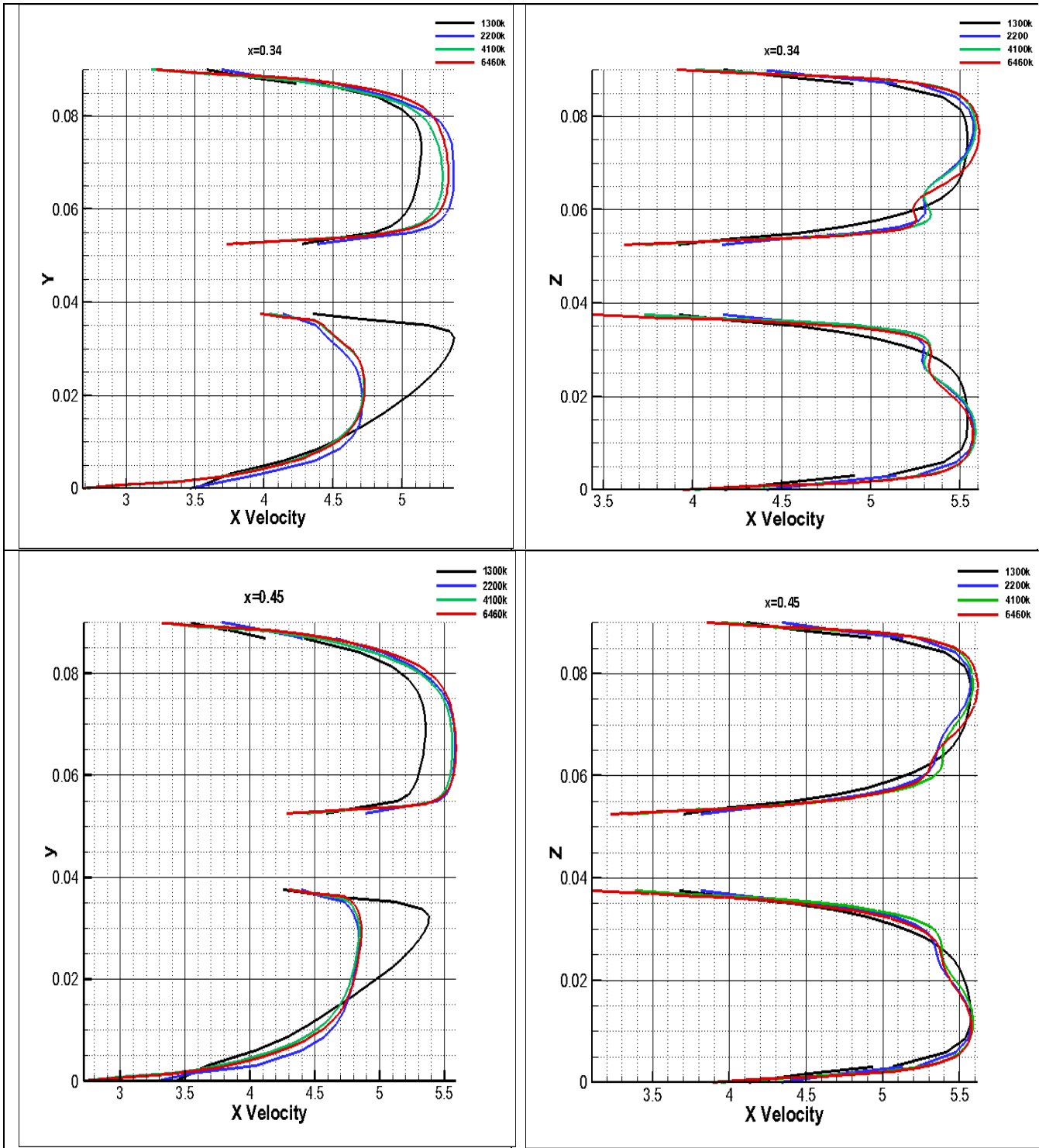
Συνολικά δημιουργήθηκαν 4 πλέγματα με διαφορετική πυκνότητα. Αρχικά, το αραιότερο πλέγμα αποτελούνταν από 1.300.000 στοιχεία, τα επόμενα 2.200.000, 4.100.000 και το πυκνότερο 6.460.000 στοιχεία. Στον πίνακα του επόμενου σχήματος παρατίθενται συγκεντρωτικά τα στοιχεία κάθε πλέγματος στα διάφορα τμήματα.

Πλέγμα	Στοιχεία στα τμήματα			Συνολικά
	Είσοδος	Γωνία	Έξοδος	
1	81.000	242.000	977.000	1.300.000
2	280.000	587.000	1.333.000	2.200.000
3	600.000	842.000	2.658.000	4.100.000
4	1.200.000	990.000	4.270.000	6.460.000

Σχήμα 4.16 Στοιχεία πλεγμάτων

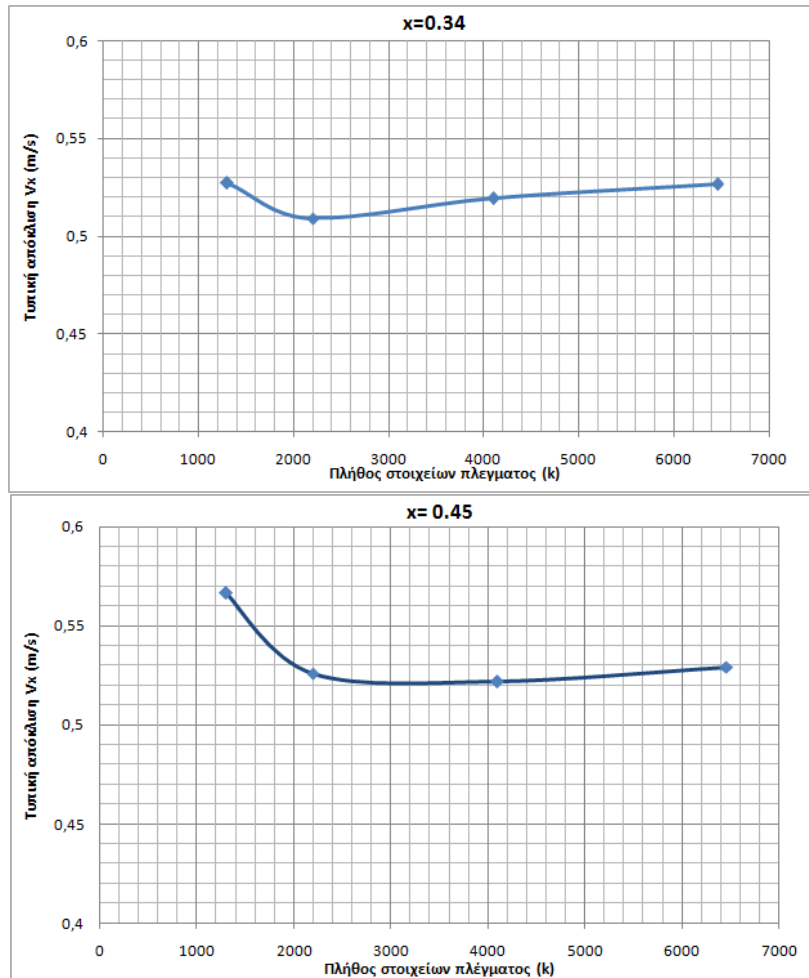
Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν στις διατομές $x=0.34$ m (μία διάμετρος μετά τα πτερύγια) και $x=0.45$ m (διατομή εξόδου του αγωγού) τα προφίλ των αξονικών ταχυτήτων, η τυπική απόκλιση της αξονικής ταχύτητας και η συνολική πτώση στατικής πίεσης μεταξύ των διατομών εισόδου και εξόδου του αγωγού. Τα προφίλ των αξονικών ταχυτήτων υπολογίστηκαν κατά μήκος των αξόνων y και z . Η τυπική απόκλιση της αξονικής ταχύτητας υπολογίστηκε σε κάθε διατομή με βάση την ταχύτητα στο κέντρο κάθε κελιού της και βάρος το εμβαδό του (αναλυτικά όλα τα μεγέθη που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5) .

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα προφίλ των αξονικών ταχυτήτων στις δύο διατομές. Αρχικά, παρατηρείται ότι οι ταχύτητες στα τοιχώματα (του βάκτρου και του αγωγού) δεν είναι μηδενικές και στις περιοχές κοντά σε αυτά υπάρχουν κάποιες ασυνέχειες στις καμπύλες. Αυτό το σφάλμα αποδίδεται στην αδυναμία κατασκευής αρκετά πυκνού οριακού στρώματος λόγω της ιδιομορφίας του πλέγματος και σε αδυναμία σωστής οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων στο Tecplot. Ακόμα παρατηρείται ότι τα προφίλ στο αραιότερο πλέγμα αποκλίνουν αρκετά από τα υπόλοιπα, γεγονός που το καθιστά ακατάλληλο. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων πλεγμάτων συγκλίνουν σε μεγάλο βαθμό και σε κάθε περίπτωση έχουν αντίστοιχη συμπεριφορά. Στη θέση $x=0.34$ m η σημαντικότερη απόκλιση παρατηρείται στον άξονα z κοντά στο βάκτρο ($z=0.55-0.65$) όπου το πυκνότερο πλέγμα εμφανίζει διαφορετική κλίση. Η μέγιστη διαφορά είναι 0.1 m/s στη θέση $y=0.075$ m. Στη θέση $x=0.45$ τα προφίλ συγκλίνουν σε μεγαλύτερο βαθμό χωρίς διαφορές στις κλίσεις. Η μέγιστη διαφορά εντοπίζεται στην θέση $z=0.0625$ και ισούται με 0,08 m/s.



Σχήμα 4.17 Προφίλ αξονικών ταχυτήτων

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις τυπικές αποκλίσεις της αξονικής ταχύτητας στις δύο διατομές. Παρατηρείται και εδώ πως τα αποτελέσματα του αραιότερου πλέγματος διαφέρουν πολύ από τα υπόλοιπα. Τα υπόλοιπα πλέγματα, στη θέση $x=0.34$ m παρουσιάζουν την αναμενόμενη ασυμπτωτική συμπεριφορά με την τυπική απόκλιση να αυξάνεται ελαφρώς στα διαδοχικά πυκνότερα πλέγματα. Στη θέση $x=0.45$ m

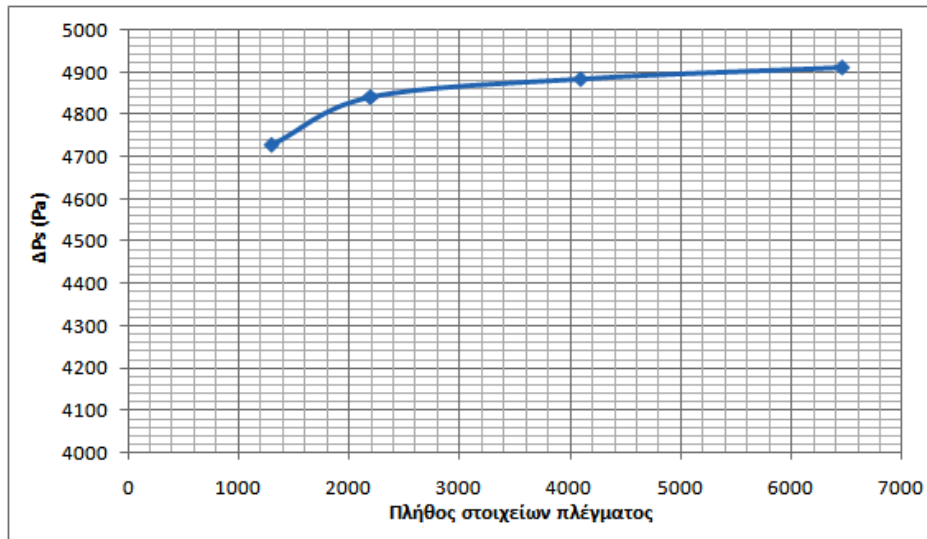


Σχήμα 4.18 Τυπική απόκλιση αξονικών ταχυτήτων στις δύο διατομές

παρατηρείται μια μικρή ταλάντωση με το πλέγμα των 2200k στοιχείων να παρουσιάζει μεγαλύτερη τυπική απόκλιση κατά 0.004 m/s από αυτό των 4100k. Γενικά, από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι τα 3 πυκνότερα πλέγματα διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους και μπορούν να θεωρηθούν όλα αξιόπιστα για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του αγωγού. Όπως αναμενόταν η διάφορα πίεσης αυξάνει όσο πυκνώνει το πλέγμα. Επιβεβαιώνεται και εδώ ότι το αραιότερο πλέγμα αποκλίνει από τα υπόλοιπα. Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων των πλεγμάτων 2200k και 4100k είναι 44 Pa (0.9 % η σχετική διαφορά) ενώ μεταξύ των πλεγμάτων 4100k και 6460k είναι 25 Pa (0.5% η σχετική διαφορά).

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σε αυτήν την ενότητα προκύπτει ότι το αραιότερο πλέγμα δεν είναι κατάλληλο για την παρούσα περίπτωση ενώ τα υπόλοιπα πλέγματα έχουν μικρές διαφορές μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα των 3 πυκνότερων πλεγμάτων συγκλίνουν σε μεγάλο βαθμό. Με δεδομένα ότι μας ενδιαφέρει η συγκριτική μελέτη των περιπτώσεων που θα εξετασθούν, την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ (το πλέγμα



Σχήμα 4.19 Διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου

των 6460k στοιχείων χρειάστηκε 14 ώρες για την επίλυση) και το πλήθος των εξεταζόμενων περιπτώσεων (14 συνολικά) αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το πλέγμα με τα 2.200k στοιχεία σε όλες τις περιπτώσεις.

4.4 Τελικές επιλογές αριθμητικών μοντέλων

Όλες οι περιπτώσεις που θα εξεταστούν στην εργασία (ενότητα 4.5) έχουν το πλέγμα που παρουσιάστηκε προηγουμένως και επιλύθηκαν με τα ίδια αριθμητικά μοντέλα και επιλογές του Fluent. Αυτές παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα.

Προκειμένου να αξιοποιηθεί πλήρως η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς, χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα του Fluent για παράλληλη επίλυση. Για να γίνει αυτό, κάθε πλέγμα μετά την δημιουργία του στο Gambit έπρεπε να επεξεργαστεί με το εργαλείο troy του Fluent πριν εισαχθεί σε αυτό. Το εργαλείο troy δεν είναι ενσωματωμένο στο γραφικό περιβάλλον του Fluent, αλλά καλείται μέσω του command prompt. Χρησιμοποιείται όταν υπάρχει υβριδικό τμήμα στο πλέγμα (Hex Core) και μετατρέπει τα εξαεδρικά στοιχεία σε πολυεδρικά προκειμένου να γίνει ο διαχωρισμός του πλέγματος και των μεταβλητών στις παράλληλες διαδικασίες του Fluent.

Το Fluent σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκε με την επιλογή 3D, διπλής ακριβείας (double precision) με δύο παράλληλες διαδικασίες. Η επίλυση έγινε για σταθερό χρόνο (steady time). Για την μοντελοποίηση της τύρβης επιλέχθηκε το μοντέλο standard k-ε με τις προεπιλεγμένες επιλογές ενώ οι συναρτήσεις τοιχώματος που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι Standard Wall Functions. Η διακριτοποίηση των εξισώσεων (η εξίσωση της ενέργειας και η επίδραση της βαρύτητας παραλείφθηκαν) έγινε με σχήματα δεύτερης τάξης για όλες τις εξισώσεις. Η σύζευξη πίεσης-ταχυτήτων έγινε με βάση την πίεση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Coupled με μείωση των προεπιλεγμένων συντελεστών

υποχαλάρωσης. Προτιμήθηκε από τον αλγόριθμο SIMPLE, παρά το γεγονός ότι κάθε επανάληψη διαρκούσε περισσότερο, αφού παρατηρήθηκε ότι έφτανε στην ίδια λύση με λιγότερες επαναλήψεις και συνολικά λιγότερο χρόνο.

Χρησιμοποιήθηκε ακόμη η δυνατότητα αναδιάταξης των κελιών του πλέγματος (Reorder domain) με χρήση του αλγορίθμου Reverse Cuthill-McKee, με σκοπό την αποδοτικότερη αξιοποίηση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος. Επίσης, έγινε τοπική αραίωση και πύκνωση του πλέγματος μετά τις πρώτες επαναλήψεις με χρήση του εργαλείου προσαρμογής πλέγματος (adapt) του Fluent ώστε η αδιάστατη κάθετη απόσταση από το τοίχωμα (y^+) να είναι μεταξύ 30 και 300 όπως απαιτείται από τις συναρτήσεις τοιχώματος.

Στις επιλογές των συνοριακών συνθηκών τέθηκε στην είσοδο (velocity inlet) η ταχύτητα του ρευστού 5 m/s με ομοιόμορφο προφίλ ταχυτήτων (επίπεδο) που είναι και η ταχύτητα στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου του εργαστηρίου. Στην έξοδο (pressure outlet) θεωρήθηκε ατμοσφαιρική πίεση. Ακόμα στην είσοδο και στην έξοδο ο προσδιορισμός της τύρβης (turbulence specification method) έγινε βάσει της έντασης της τύρβης (turbulent intensity) που τέθηκε 5% και της υδραυλικής διαμέτρου που είναι 0.09 m. Στα τοιχώματα θεωρήθηκε μηδενικό ύψος επιφανειακής τραχύτητας και σταθερά τραχύτητας 0.5 (προεπιλεγμένα από το Fluent) ενώ ως ρευστό επιλέχθηκε το νερό.

Σημαντικές για την σωστή και γρήγορη αριθμητική επίλυση των εξισώσεων είναι οι αρχικές συνθήκες που τίθενται στις μεταβλητές ($\rho, u, v, w, k, \epsilon$). Όσο πιο κοντά είναι αυτές στην τελική λύση τόσο λιγότερες επαναλήψεις απαιτούνται ενώ μειώνονται οι πιθανότητες να συγκλίνει σε λάθος τιμές η τελική λύση. Με στόχο την καλύτερη αρχικοποίηση των τιμών των μεταβλητών χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος FMG (Full MultiGrid) initialization. Ο αλγόριθμος αυτός κάνει μια γρήγορη προσέγγιση της λύσης με σχήματα πρώτης τάξεως, αμελώντας τους όρους συνεκτικότητας δίνοντας κάποιες "καλύτερες" τιμές στην πίεση και τις ταχύτητες. Οι τιμές των k και ϵ αρχικοποιήθηκαν βάσει των επιλογών για την τύρβη που έγιναν για την είσοδο.

Τέλος, τα κριτήρια σύγκλισης τέθηκαν με βάση την σχετική διαφορά μεταξύ των τιμών διαδοχικών επαναλήψεων. Αυτή ορίστηκε στο 10^{-6} για τις ταχύτητες και την πίεση ενώ για τα k και ϵ στο 10^{-4} . Μετά το τέλος της επίλυσης γινόταν ένας βασικός έλεγχος της λύσης μέσω του Fluent με τους εξής τρόπους:

- Επιβεβαίωση ότι η παροχή στην είσοδο και στην έξοδο είναι ίδια (τουλάχιστον μέχρι το πέμπτο δεκαδικό). Η παροχή που διακινούνταν συνολικά ήταν 31.74 kg/s.
- Έλεγχος, σε διάφορες θέσεις του τμήματος εξόδου, της μέσης αξονικής ταχύτητας. Αυτή ήταν 5.14 m/s, λίγο μεγαλύτερη από αυτή της εισόδου λόγω της μείωσης της διατομής στην έξοδο εξαιτίας του βάρους.

- Επιβεβαίωση ότι η διαφορά στατική πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου είναι στη σωστή τάξη μεγέθους που αναμενόταν.

4.5 Παρουσίαση των εξεταζόμενων διατάξεων

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.1 οι μεταβλητές της γεωμετρίας που εξετάστηκαν στην εργασία αυτή είναι η θέση (γωνία τοποθέτησης), το πλήθος και το μήκος των πτερυγίων στήριξης. Η βασική γεωμετρία και η τοπολογία του αγωγού για τις δύο περιπτώσεις μήκους παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2. Στην περίπτωση των κοντών πτερυγίων αυτά έχουν μήκος 100 mm και βρίσκονται μεταξύ των θέσεων $x=0.15$ m και $x=0.25$ m. Στην περίπτωση των μακρύτερων πτερυγίων αυτά έχουν διπλάσιο μήκος (200 mm) και βρίσκονται μεταξύ των θέσεων $x=0.05$ m και $x=0.25$ m. Πάνω σε αυτές τις δύο βασικές γεωμετρίες βασίζονται και οι υπόλοιπες οι οποίες διαφέρουν ως προς το πλήθος των πτερυγίων (2,3 και 4), την γωνία ως προς τον άξονα συμμετρίας του αγωγού και την σχετική γωνία μεταξύ τους.

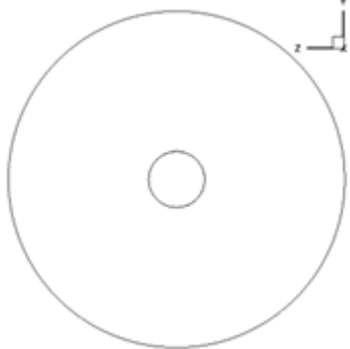
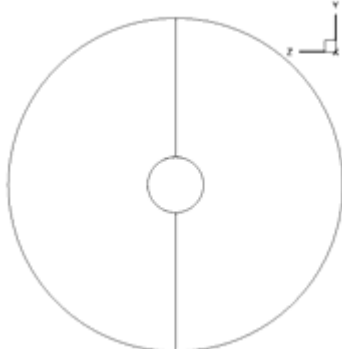
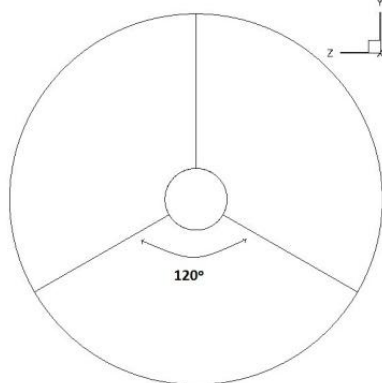
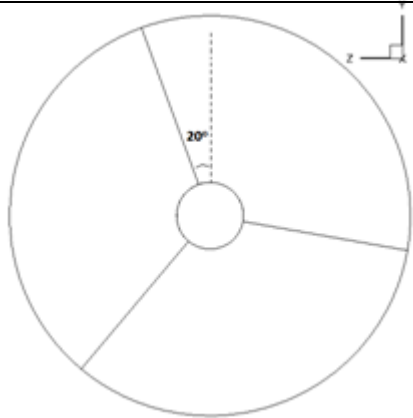
Αρχικά δημιουργήθηκε μία περίπτωση χωρίς πτερύγια, μόνο με το βάκτρο. Αυτή επιλέχθηκε προκειμένου να μελετηθεί η ροή χωρίς καμία επίδραση από τα πτερύγια και κατόπιν βάσει αυτής να συγκριθούν οι επιδράσεις των εναλλακτικών διατάξεων των πτερυγίων.

Ως προς την διάταξη των πτερυγίων μελετήθηκαν διατάξεις με 2,3 και 4 πτερύγια. Στη διάταξη με τα 2 πτερύγια αυτά έχουν γωνία μεταξύ τους 180° και βρίσκονται στο επίπεδο συμμετρίας του αγωγού ($z=0$). Αυτή η διάταξη παρά το ότι είχε μικρότερη επίδραση στη μείωση των εφαιπτομενικών ταχυτήτων από τις άλλες (όπως αναμενόταν) εξετάστηκε διότι συναντάται συχνά σε μικρούς υδροστροβίλους και πειραματικές διατάξεις σαν αυτές που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 1. Η διάταξη των 2 πτερυγίων θεωρήθηκε μόνο στην περίπτωση των κοντών πτερυγίων.

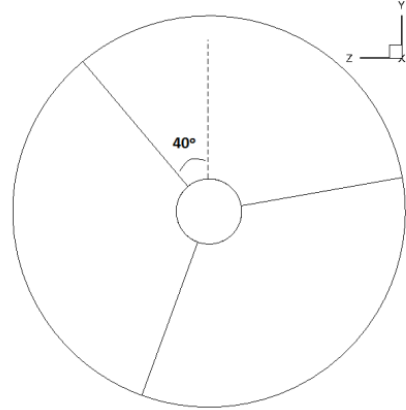
Στη διάταξη των 3 πτερυγίων αυτά έχουν γωνία μεταξύ τους 120° όντας συμμετρικά τοποθετημένα. Η τοποθέτησή τους ως προς τον άξονα συμμετρίας $z=0$ έγινε στις 0° , 20° , 40° και 60° . Η επιλογή αυτή έγινε προκειμένου να σαρωθούν όλες οι δυνατές θέσεις με βήμα 20° . Οι διατάξεις των 3 πτερυγίων θεωρήθηκαν και στις δύο περιπτώσεις μήκους.

Στη διάταξη με τα 4 πτερύγια εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη ήταν συμμετρικά τοποθετημένα με γωνία μεταξύ τους 90° και με τον άξονα συμμετρίας 45° . Αυτή είναι η συνηθέστερη διάταξη που συναντάται στην πραγματικότητα όπως και στον υδροστρόβιλο του εργαστηρίου. Η διάταξη αυτή θεωρήθηκε και στις δύο περιπτώσεις μήκους. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν μη συμμετρικά τα 4 πτερύγια. Οι γωνίες τοποθέτησής τους επιλέχθηκαν ώστε να συμπίπτουν με τα κέντρα των δινών, στη μέση θέση της περιοχής των πτερυγίων, όπως αυτές υπολογίστηκαν από την περίπτωση χωρίς πτερύγια. Για τη περίπτωση των κοντών πτερυγίων αυτά είχαν γωνία με τον άξονα

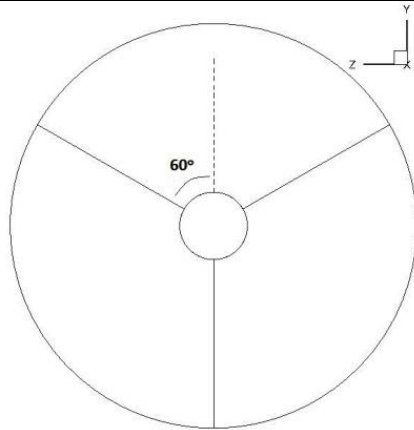
συμμετρίας 43° τα πάνω και 26° τα κάτω. Στην περίπτωση των μακριών πτερυγίων τα πάνω πτερύγια τοποθετήθηκαν με γωνία 41° ως προς τον άξονα συμμετρίας και τα κάτω με 28° . Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται συνολικά όλες οι διατάξεις που εξετάστηκαν.

Χωρίς πτερύγια	
<p>Μόνο το βάκτρο, χρησιμοποιείται σαν περίπτωση αναφοράς για τις επόμενες.</p>	
Κοντά πτερύγια	
2 Πτερύγια	
<p>Τα δύο πτερύγια βρίσκονται στο επίπεδο $z=0$.</p>	
3 Πτερύγια	
<p>Γωνία μεταξύ των πτερυγίων 120°, γωνία τοποθέτησης των πτερυγίων ως προς το επίπεδο συμμετρίας 0°.</p>	
<p>Γωνία μεταξύ των πτερυγίων 120°, γωνία τοποθέτησης των πτερυγίων ως προς το επίπεδο συμμετρίας 20°.</p>	

Γωνία μεταξύ των πτερυγίων 120° , γωνία τοποθέτησης των πτερυγίων ως προς το επίπεδο συμμετρίας 40° .

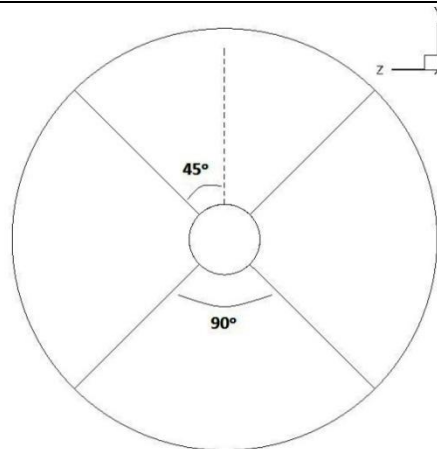


Γωνία μεταξύ των πτερυγίων 120° , γωνία τοποθέτησης των πτερυγίων ως προς το επίπεδο συμμετρίας 60° .

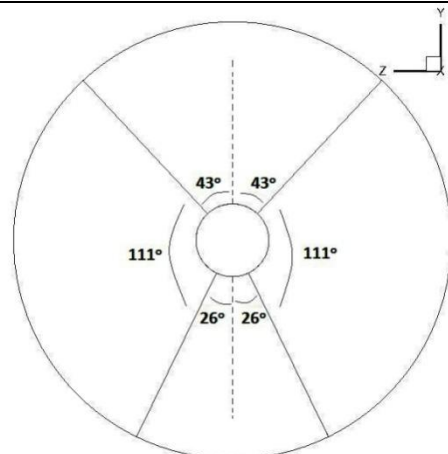


4 Πτερύγια

Συμμετρικά τοποθετημένα πτερύγια με γωνία μεταξύ τους 90° και γωνία 45° με τον άξονα συμμετρίας.

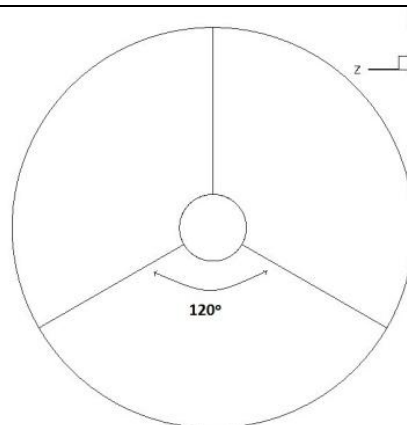


Τα πτερύγια έχουν τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπίπτουν με τα κέντρα των δινών, στη μέση θέση της περιοχής των πτερυγίων ($x=0.2\text{ m}$), όπως αυτές υπολογίστηκαν από την περίπτωση χωρίς πτερύγια. Τα δύο πάνω πτερύγια σχηματίζουν γωνία 43° με τον άξονα συμμετρίας ενώ τα κάτω 26° .

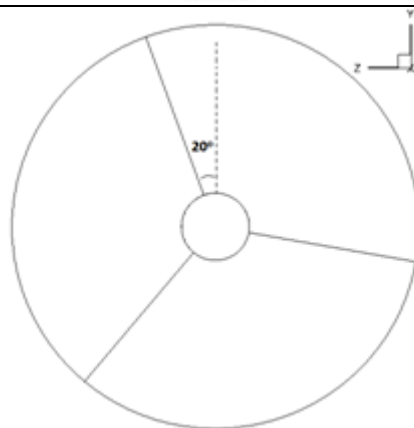


Μακριά πτερύγια**3 Πτερύγια**

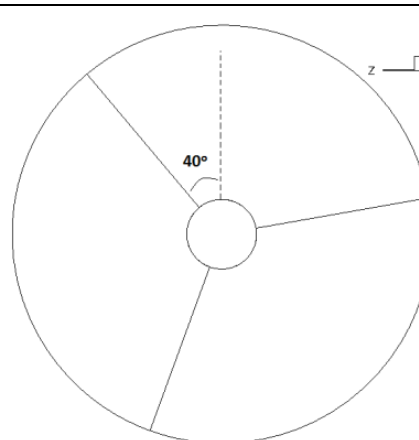
Γωνία μεταξύ των πτερυγίων 120° , γωνία τοποθέτησης των πτερυγίων ως προς το επίπεδο συμμετρίας 0° .



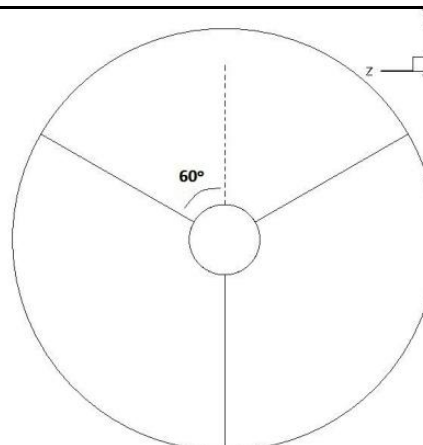
Γωνία μεταξύ των πτερυγίων 120° , γωνία τοποθέτησης των πτερυγίων ως προς το επίπεδο συμμετρίας 20° .



Γωνία μεταξύ των πτερυγίων 120° , γωνία τοποθέτησης των πτερυγίων ως προς το επίπεδο συμμετρίας 40° .

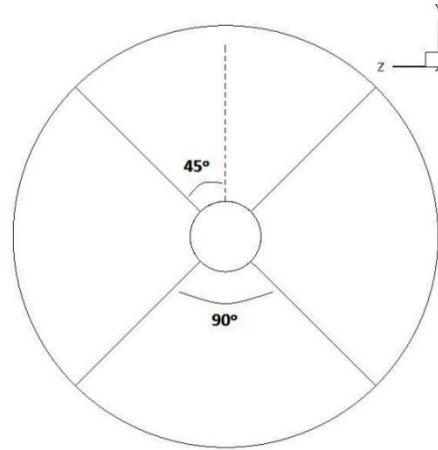


Γωνία μεταξύ των πτερυγίων 120° , γωνία τοποθέτησης των πτερυγίων ως προς το επίπεδο συμμετρίας 60° .

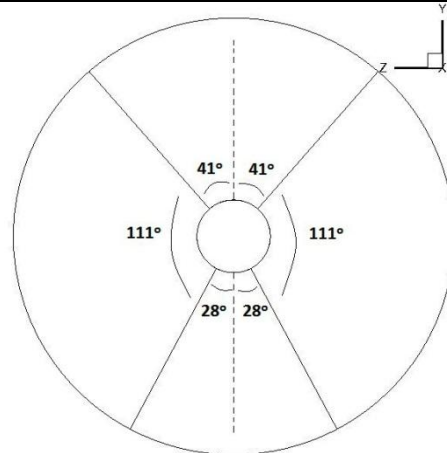


4 Πτερύγια

Συμμετρικά τοποθετημένα πτερύγια με γωνία μεταξύ τους 90° και γωνία 45° με τον άξονα συμμετρίας.



Τα πτερύγια έχουν τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπίπτουν με τα κέντρα των δινών, στη μέση θέση της περιοχής των πτερυγίων ($x=0.15$ m), όπως αυτές υπολογίστηκαν από την περίπτωση χωρίς πτερύγια. Τα δύο πάνω πτερύγια σχηματίζουν γωνία 41° με τον άξονα συμμετρίας ενώ τα κάτω 28° .



Σχήμα 4.20 Εναλλακτικές γεωμετρικές διατάξεις που εξετάζονται

Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρήθηκε ταχύτητα εισόδου 5 m/s με επίπεδο προφίλ αξονικών ταχυτήτων στην είσοδο του αγωγού. Η παροχή για αυτήν την ταχύτητα είναι:

$$Q = \rho \cdot v \cdot A = 998 \cdot 5 \cdot (\pi \cdot 0.045^2) = 31.74 \text{ (kg/s)}$$

Η ταχύτητα αυτή είναι η ταχύτητα της ροής στον αγωγό στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου του εργαστηρίου, για λειτουργία και με τα δύο ακροφύσια. Ο αριθμός Reynolds της ροής, υπολογισμένος στην είσοδο, προκύπτει $4.5 \cdot 10^5$ για αυτήν την ταχύτητα.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης ανά περίπτωση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης κάθε περίπτωσης. Αρχικά, στην ενότητα της εισαγωγής συνοψίζονται τα μεγέθη και οι εξεταζόμενες διατομές των αποτελεσμάτων που θα παρουσιαστούν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάθε γεωμετρίας ξεχωριστά χωρισμένα σε τρεις ενότητες. Στην πρώτη παρουσιάζονται αυτά για την περίπτωση του αγωγού χωρίς πτερύγια, στη δεύτερη τα αποτελέσματα για τα κοντά πτερύγια και στην τρίτη αυτά για τα μακριά.

5.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια, στόχος της αριθμητικής διερεύνησης είναι να μελετηθεί η επίδραση των πτερυγίων στη ροή. Πιο συγκεκριμένα, μας ενδιαφέρει το αν και κατά πόσο η κάθε διαφορετική διάταξη των πτερυγίων περιορίζει τις ανεπιθύμητες δευτερεύουσες ροές που δημιουργούνται λόγω της γεωμετρίας και του βάρους του αγωγού. Για να συγκριθούν τα αποτελέσματα μεταξύ τους, εκτός των σχηματικών απεικονίσεων των μεγεθών υπολογίστηκαν και οι τιμές κάποιων χαρακτηριστικών μεγεθών της ροής.

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων επιλεχθήκαν οι τομές του αγωγού στα επίπεδα $z=0$ (επίπεδο συμμετρίας του αγωγού), $x=0.34$ m (μία διάμετρος μετά την περιοχή των πτερυγίων) και $x=0.45$ m (έξοδος του αγωγού). Το επίπεδο συμμετρίας επιλέχθηκε προκειμένου να παρουσιαστούν εποπτικά κάποια μεγέθη της ροής για ολόκληρο τον αγωγό. Οι δύο άλλες διατομές, μετά τα πτερύγια, θεωρήθηκαν προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των πτερυγίων πολύ κοντά σε αυτά, στη θέση που η ροή θα εισέρχονταν στο ακροφύσιο ($x=0.34$ m) αλλά και η διαμόρφωση της ροής αν υπήρχε μεγαλύτερο μήκος αγωγού στην έξοδο πριν το ακροφύσιο.

Τα μεγέθη που θα παρουσιαστούν σχηματικά με διαγράμματα ισοϋψών καμπυλών (contours) και διανυσμάτων είναι τα εξής:

- Ταχύτητες (m/s)
- Εφαπτομενικές, στην κύρια, ταχύτητες (m/s)
- Αξονικές ταχύτητες (m/s)
- Στροβιλότητα (vorticity) (s^{-1})
- Ελικότητα (helicity)

Από την τοπολογία του αγωγού προκύπτει ότι οι αξονικές ταχύτητες στο τμήμα εξόδου έχουν την κατεύθυνση του άξονα x (V_x). Οι εφαπτομενικές ταχύτητες συνεπώς στις διατομές μετά τα πτερύγια είναι οι V_{yz} . Η αδιαστατοποίηση των ταχυτήτων έχει γίνει με τη

μέση αξονική ταχύτητα της διατομής, η οποία στο τμήμα εξόδου του αγωγού είναι 5.14 m/s, μεγαλύτερη από τα 5 m/s στην είσοδο λόγω της μείωσης της διατομής εξαιτίας του βάρους.

Η στροβιλότητα ($\vec{\omega}$) του διανυσματικού πεδίου ταχύτητας είναι ένα διανυσματικό μέγεθος που ορίζεται ως το curl του πεδίου ταχύτητας: $\vec{\omega}(x, y, z) = \vec{\nabla} \times \vec{u}(x, y, z)$. Μια διανυσματική συνάρτηση παρουσιάζει δίνες αν η συνάρτηση ορίζει κλειστές διαδρομές. Δηλαδή, αν κάποιος ακολουθώντας τα διανύσματά της συνάρτησης (ταχύτητα στην περίπτωση μας), υπάρχει τρόπος από ένα σημείο να ξανασυναντήσει το συγκεκριμένο σημείο. Αν η συνάρτηση δεν περιέχει δίνες, τότε η στροβιλότητα της είναι μηδέν. Συνεπώς, η στροβιλότητα είναι ένα μέτρο των δινών που εμφανίζονται στη ροή. Τα διανύσματα της στροβιλότητας είναι κάθετα στο επίπεδο περιστροφής του ρευστού. Στην περίπτωση που εξετάζεται εδώ μας ενδιαφέρουν οι δευτερεύουσες ροές λόγω των επαπτομενικών ταχυτήτων και συνεπώς παρουσιάζονται αποτελέσματα της στροβιλότητας στον άξονα x. Τέλος το πρόσημο της στροβιλότητας ορίζεται σύμφωνα με τον εμπειρικό κανόνα του δεξιού χεριού, δηλαδή είναι θετική όταν έχει ανθρωπολογική φορά η περιστροφή του ρευστού και αρνητική για την αντίθετη.

Η ελικότητα (H) του πεδίου ταχύτητας είναι ένα βαθμωτό μέγεθος που ορίζεται ως το εσωτερικό γινόμενο της ταχύτητας με την στροβιλότητα: $H = \vec{u} \cdot \vec{\omega} = \vec{u} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{u})$. Η ελικότητα είναι ένα μέτρο του κατά πόσο οι δίνες που παρουσιάζονται στη ροή ακολουθούν ελικοειδή κίνηση παράλληλη με τη ροή. Η σήμανση του προσήμου της είναι ίδια με αυτήν της στροβιλότητας.

Τα μεγέθη της στροβιλότητας και της ελικότητας υπολογίστηκαν μέσω του Tecplot από τα αποτελέσματα για τις ταχύτητες στο κέντρο κάθε κελιού του πλέγματος που υπολογίστηκαν στην επίλυση στο Fluent.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που υπολογίστηκαν σε κάθε περίπτωση προκειμένου να γίνει σύγκριση μεταξύ τους είναι:

- Διαφορά στατικής και ολικής πίεσης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του αγωγού
- Σταθμισμένη μέση επαπτομενική ταχύτητα στις δύο διατομές
- Σταθμισμένη μέση επαπτομενική ταχύτητα στο τετράγωνο στις δύο διατομές
- Σταθμισμένη τυπική απόκλιση (s) της αξονικής ταχύτητας στις δύο διατομές που εξετάζονται
- Σταθμισμένη διακύμανση (s^2) της αξονικής ταχύτητας στις δύο διατομές
- Σταθμισμένη τυπική απόκλιση επαπτομενικών ταχυτήτων στις δύο διατομές

Οι πιέσεις υπολογίστηκαν μέσα από το Fluent μετά το τέλος της επίλυσης κάθε περίπτωσης. Οι απώλειες πίεσης λόγω των τοιχωμάτων, της αλλαγής κλίσης και των

διαμορφώσεων του αγωγού δεν επηρεάζουν τις δευτερεύουσες ροές. Ακόμα λόγω της πανομοιότυπης γεωμετρίας του αγωγού σε κάθε περίπτωση οι διαφορές ήταν πολύ μικρές μεταξύ των διαφορετικών γεωμετριών όπως αναμενόταν.

Η σταθμισμένη μέση εφαπτομενική ταχύτητα και η σταθμισμένη μέση εφαπτομενική ταχύτητα στο τετράγωνο υπολογίστηκαν σε κάθε εξεταζόμενη διατομή με βάση την τιμή της μεταβλητής (V_x και V_x^2) στο κέντρο κάθε κελιού και βάρος το εμβαδό της επιφάνειας κάθε κελιού στην διατομή από τη σχέση:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N A_i}$$

όπου:

\bar{x} : η σταθμισμένη μέση τιμή της μεταβλητής

x_i : η τιμή της μεταβλητής στο κέντρο του i κελιού

N : το πλήθος των κελιών στην διατομή

A_i : το εμβαδό της επιφάνειας κάθε κελιού στη διατομή

Αυτά τα μεγέθη παρουσιάζονται και αδιαστατοποιημένα με τη μέση ταχύτητα της διατομής (5.14 m/s) και το τετράγωνο της (26.42 m²/s²) αντίστοιχα. Προφανώς, αφού μας ενδιαφέρει η μείωση των δευτερευουσών ροών, στόχος είναι οι τιμές αυτών των μεγεθών να είναι κατά το δυνατόν μικρότερες.

Η σταθμισμένη τυπική απόκλιση (s) και διακύμανση (s^2) είναι δύο στατιστικά μεγέθη που δείχνουν το πόσο απέχουν κατά μέσο όρο οι διάφορες τιμές των μεγεθών από την μέση τιμή αυτών. Όσο πιο μεγάλα είναι αυτά τα δύο μεγέθη τόσο περισσότερο απέχουν από τη μέση τιμή τα στοιχεία. Η τυπική απόκλιση έχει ευρύτερη χρήση διότι εκφράζεται με την ίδια μονάδα που εκφράζονται και οι παρατηρήσεις (m/s). Στην δική μας περίπτωση όσο αυξάνονται αυτά τα μεγέθη για τις αξονικές και εφαπτομενικές ταχύτητες της ροής τόσο πιο έντονη είναι η ανομοιομορφία της κατανομής των ταχυτήτων στη διατομή. Συνεπώς, θέλουμε οι τιμές τους να είναι μικρές.

Ο υπολογισμός της σταθμισμένης τυπικής απόκλισης έγινε σε κάθε εξεταζόμενη διατομή με βάση την τιμή της μεταβλητής (V_x και V_x^2) στο κέντρο κάθε κελιού και βάρος το εμβαδό της επιφάνειας κάθε κελιού στην διατομή από τη σχέση:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N A_i \cdot (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N A_i}}$$

όπου:

\bar{x} : η μέση τιμή της μεταβλητής που στην περίπτωση των αξονικών ταχυτήτων ήταν 5.14 m/s ενώ για τις εφαπτομενικές ταχύτητες σε κάθε περίπτωση θεωρήθηκε η τιμή που υπολογίστηκε από την προηγούμενη σχέση

Ακόμα, παρουσιάζονται και αδιαστατοποιημένες οι τυπικές αποκλίσεις με τη μέση τιμή στη διατομή (5.14 m/s). Τέλος, η διακύμανση είναι το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης και υπολογίζεται από τον ίδιο τύπο με την τυπική απόκλιση χωρίς την τετραγωνική ρίζα.

Τα προηγούμενα μεγέθη υπολογίστηκαν με χρήση προγράμματος που γράφτηκε στην Fortran από τον διδακτορικό σπουδαστή Κουκουβίνη Φοίβο. Μετά την επίλυση στο Fluent γινόταν εξαγωγή αρχείου data με τα στοιχεία των κόμβων του πλέγματος και του πεδίου ταχυτήτων για τα κέντρα των κελιών στις επιφάνειες των εξεταζόμενων διατομών. Για κάθε διατομή ξεχωριστά διάβαζε το πρόγραμμα τα δεδομένα και έδινε τα αποτελέσματα των στατιστικών μεγεθών που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Ο κώδικας της Fortran που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

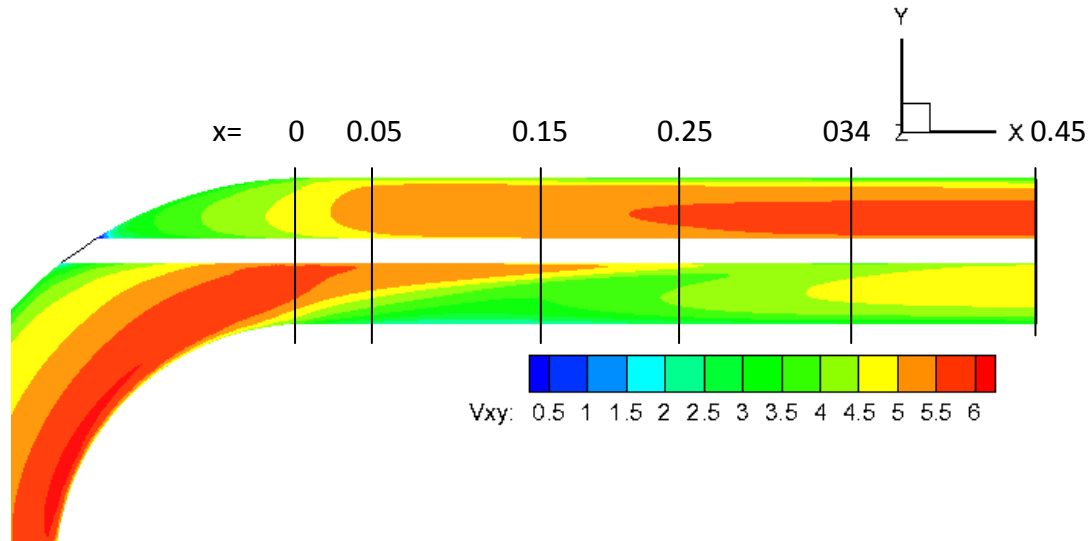
5.2 Αγωγός με βάκτρο χωρίς πτερύγια

Η περίπτωση του αγωγού χωρίς πτερύγια είναι σημαντική διότι σε αυτήν μπορούν να μελετηθούν οι δευτερεύουσες ροές που εμφανίζονται εξαιτίας της γωνίας και του βάκτρου. Στη συνέχεια βάσει αυτών των αποτελεσμάτων θα συγκριθούν οι διάφορες διατάξεις των πτερυγίων ως προς την επίδραση τους στη μείωση αυτών των φαινομένων.

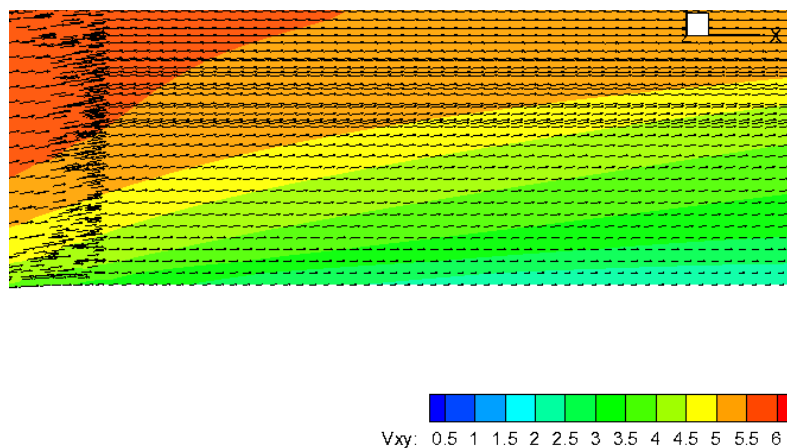
Η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 4593 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 3768 Pa. Η τιμή της ολικής πίεσης είναι μικρότερη της στατικής λόγω της αύξησης της ταχύτητας στο τμήμα εξόδου, που οφείλεται στην μείωση της διατομής. Αυτές οι τιμές είναι οι μικρότερες από όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν πράγμα αναμενόμενο αφού δεν υπάρχουν εσωτερικές διαμορφώσεις που θα αύξαναν τις τριβές με τα τοιχώματα.

Αρχικά, παρουσιάζονται στα δύο επόμενα σχήματα οι εφαπτομενικές ταχύτητες (V_{xy}) στο επίπεδο $z=0$. Στο πρώτο (σχ. 5.1) φαίνεται η κατανομή των ταχυτήτων στο τμήμα της γωνίας και της εξόδου του αγωγού. Παρατηρείται ότι η ροή επιταχύνεται προσεγγίζοντας την γωνία κοντά στα εσωτερικά τοιχώματα. Λόγω του βάκτρου και της σχετικά μεγάλης καμπυλότητας ($r/D=2.2$) δεν παρατηρείται αποκόλληση της ροής και συνεπώς δεν υπάρχει περιοχή ανακυκλοφορίας μετά το τμήμα της γωνίας. Αυτό φαίνεται και στο επόμενο σχήμα (σχ. 5.2) με τα διανύσματα και των ταχυτήτων σε αυτήν την περιοχή όπου δεν εμφανίζονται αρνητικές ταχύτητες. Η ροή υπό την επίδραση της φυγόκεντρου επιβραδύνεται σε αυτό το τμήμα και η περιοχή του πυρήνα της ροής με τις υψηλότερες ταχύτητες μετατοπίζεται προς τα εξωτερικά τοιχώματα. Αυτή η μετατόπιση του πυρήνα

συνεχίζει και στις πιο κάτω θέσεις όπου οι ταχύτητες είναι μεγαλύτερες στις περιοχές πάνω από το βάκτρο. Ακόμα στο δεύτερο σχήμα φαίνεται η ανομοιομορφία του πλέγματος στη διατομή εξόδου της γωνίας όπου ενώνονται τα δύο διαφορετικά είδη πλέγματος με την κοινή επιφάνεια.

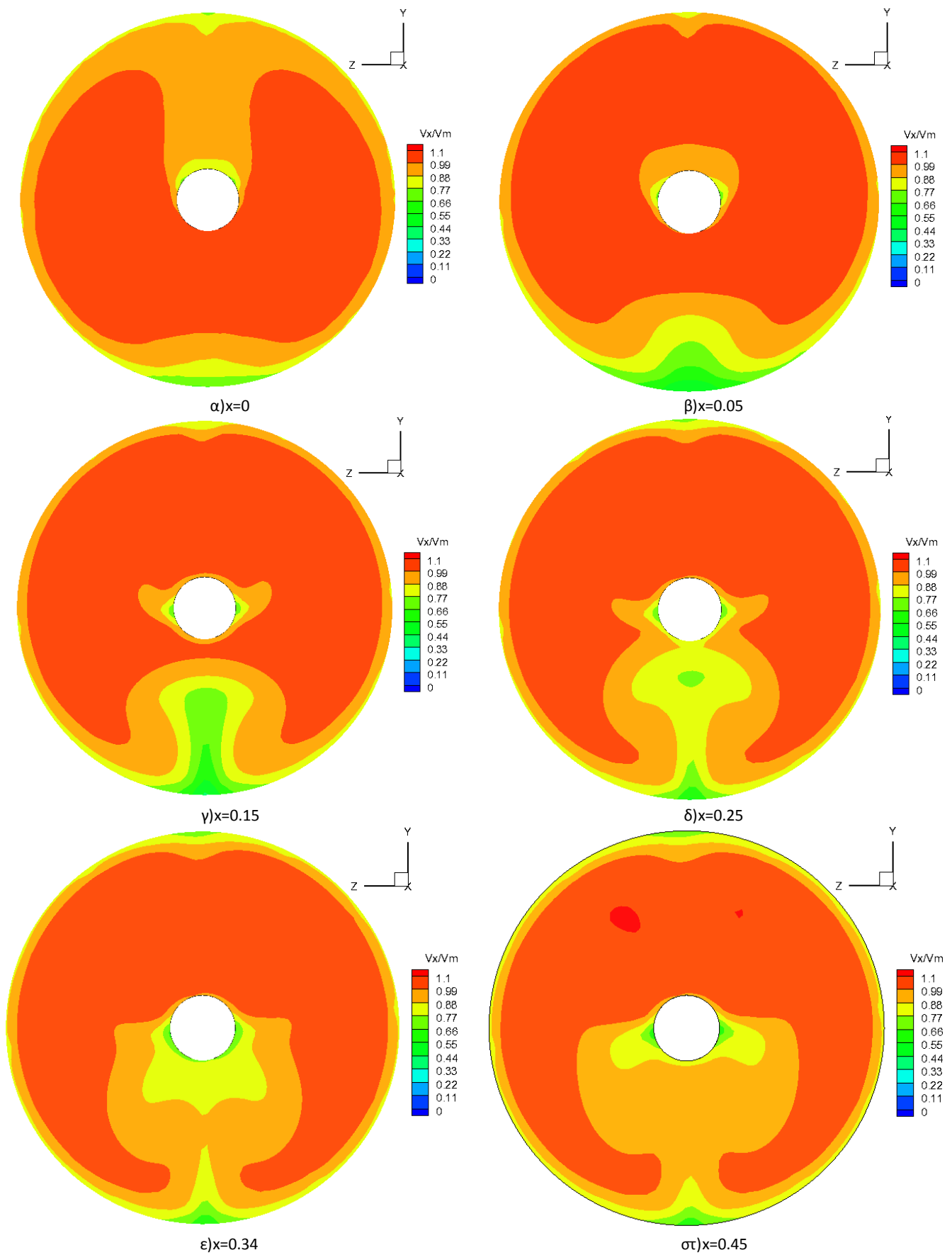


Σχήμα 5.1 Contours ταχύτητας (V_{xy}) στο επίπεδο $z=0$



Σχήμα 5.2 Contours και διανύσματα ταχυτήτων V_{xy} στο επίπεδο $z=0$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες σε διάφορες διατομές. Στη θέση $x=0$ που είναι η έξοδος της γωνίας φαίνεται η μετατόπιση της ροής προς τα εξωτερικά τοιχώματα λόγω της γωνίας καθώς και η επίδραση του βάκτρου το οποίο επιβραδύνει τη ροή δημιουργώντας μια περιοχή χαμηλότερων ταχυτήτων πάνω από αυτό. Οι θέσεις $x=0.05$ και $x=0.15$ είναι οι διατομές που ξεκινάνε τα μακριά και τα κοντά πτερύγια αντίστοιχα και παρουσιάζονται ώστε να υπάρχει μια αποτύπωση της ροής πριν την είσοδο της στην περιοχή των πτερυγίων. Όσο προχωράμε κατάντι της ροής φαίνεται ότι συνεχίζει η μετατόπιση της ροής προς τα εξωτερικά τοιχώματα ενώ γύρω από το βάκτρο οι περιοχές αποκτάνε πιο ομοιόμορφο προφίλ. Η θέση $x=0.25$ είναι η διατομή εξόδου των πτερυγίων σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Σε αυτήν η περιοχή χαμηλών αξονικών

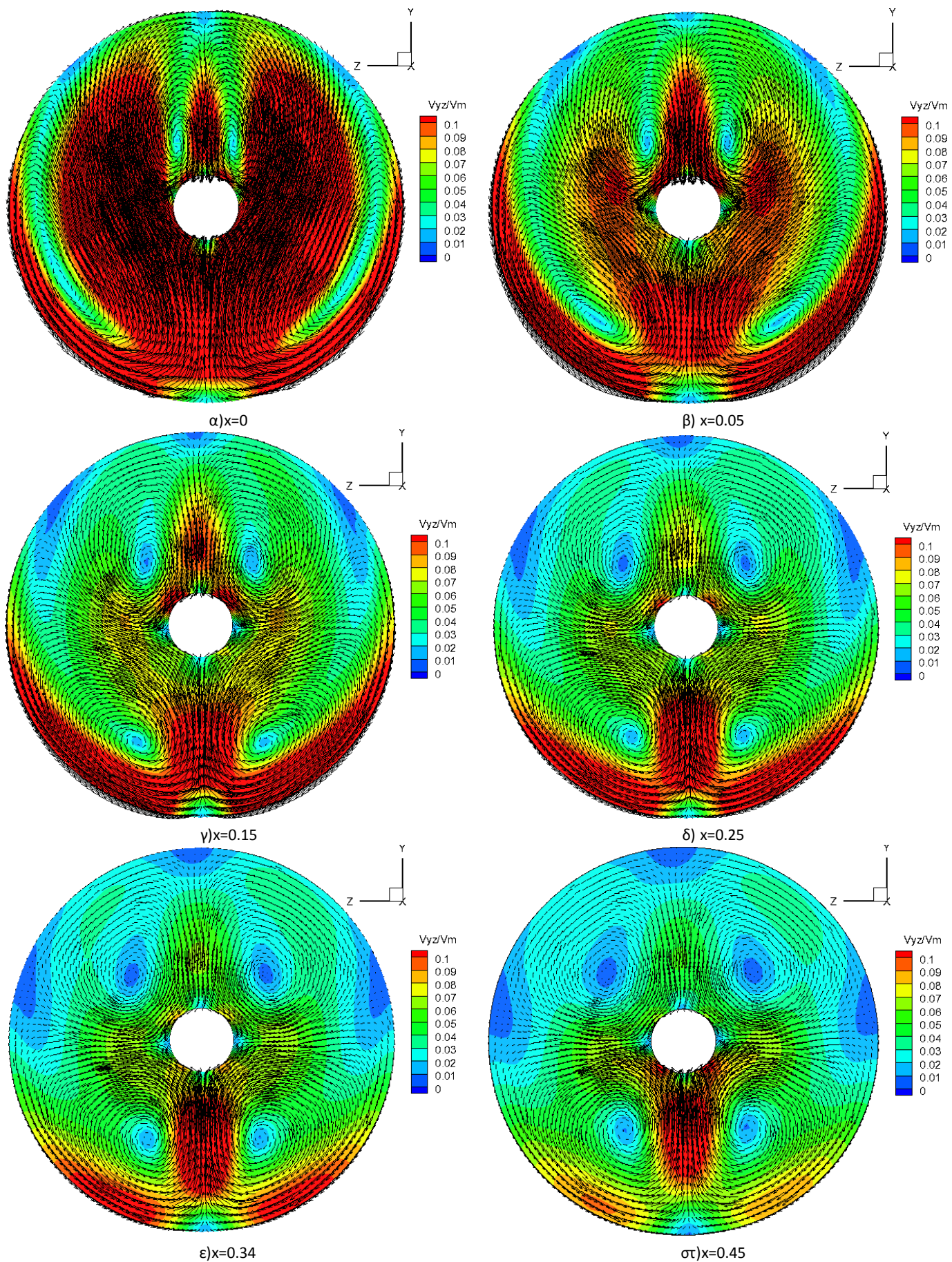


Σχήμα 5.3 Αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες σε διάφορες θέσεις του τμήματος εξόδου

ταχυτήτων κάτω από το βάκτρο έχει αυξηθεί και επιταχυνθεί φτάνοντας μέχρι το βάκτρο ενώ δημιουργείται και μια δεύτερη περιοχή με τοπικά χαμηλότερες ταχύτητες. Στην θέση $x=0.34$ η επίδραση του βάκτρου και της γωνίας στις αξονικές ταχύτητες έχει αρχίσει να μειώνεται με την περιοχή με τις μειωμένες ταχύτητες να έχει αυξηθεί μεν αλλά και επιταχυνθεί όντας και πιο ομοιόμορφα τα προφίλ. Στην έξοδο (θέση $x=0.45$) παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά της ροής με την προηγούμενη θέση. Ακόμα εδώ παρατηρούνται και δύο μικρές περιοχές πάνω από το βάκτρο όπου υπάρχει τοπική αύξηση της αξονική ταχύτητας. Η τυπική απόκλιση των αξονικών ταχυτήτων υπολογίστηκε 0.4717 m/s στην θέση $x=0.34$ και 0.4655 m/s στην έξοδο.

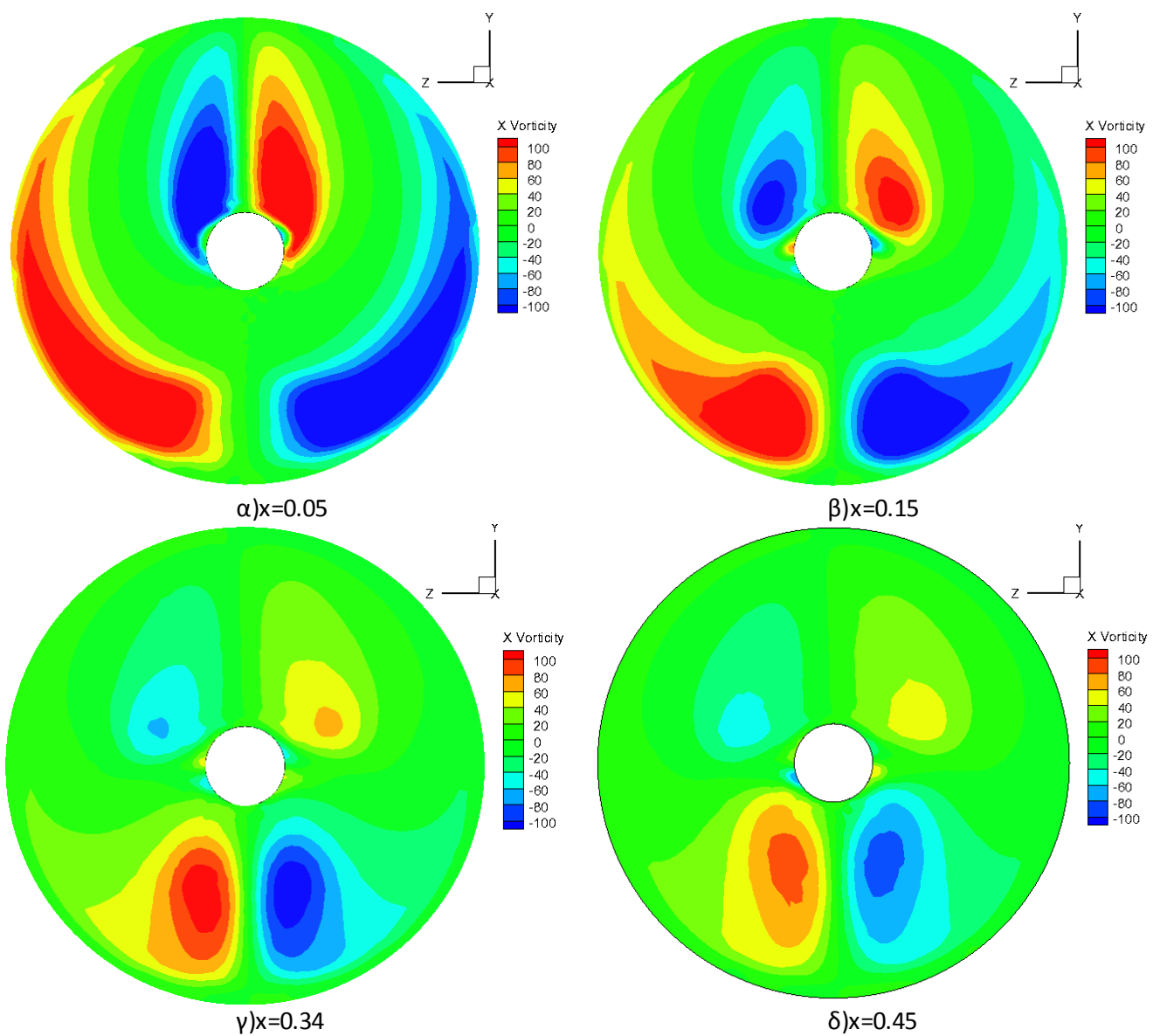
Οι αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες παρουσιάζονται για τις ίδιες θέσεις στο επόμενο σχήμα (σχ. 5.4). Στη θέση $x=0$ οι ταχύτητες είναι μεγαλύτερες από τις άλλες θέσεις. Βρισκόμαστε στην έξοδο της γωνίας και παρατηρούνται οι δύο δίνες (τα κέντρα των δινών είναι οι θέσεις με τις χαμηλότερες ταχύτητες) που αρχίζουν να σχηματίζονται πάνω από το βάκτρο. λόγω του κυλινδρικού σχήματος του. Ακόμα, υπό την επίδραση της γωνίας δημιουργούνται δευτερεύουσες ροές περιφερειακά οι οποίες αποκτούν πιο συμπαγή μορφή στη συνέχεια. Στις θέσεις $x=0.05$ και $x=0.15$ φαίνεται η διαμόρφωση των εφαπτομενικών ταχυτήτων στην είσοδο των περιοχών των πτερυγίων. Παρατηρείται ότι μειώνονται τα μέτρα των ταχυτήτων όσο προχωράμε κατά μήκος του αγωγού με τις μεγαλύτερες να εμφανίζονται προς τα εσωτερικά τοιχώματα του αγωγού. Σχηματίζονται εμφανώς τέσσερις δίνες οι οποίες ανά δύο (πάνω και κάτω από το βάκτρο) είναι συμμετρικές και περιστρέφονται αντίθετα. Συγκρίνοντας αυτά τα αποτελέσματα με την περίπτωση του αγωγού στο τρίτο κεφάλαιο επιβεβαιώνεται ότι το βάκτρο είναι η αιτία της δημιουργίας των δύο πάνω δινών. Από τις θέσεις των κέντρων των δινών στις διατομές $x=0.10$ (δεν φαίνεται στο σχήμα) και $x=0.15$, που είναι τα μέσα των περιοχών των πτερυγίων, καθορίστηκαν οι θέσεις των πτερυγίων στις περιπτώσεις με τα 4 μη συμμετρικά πτερύγια. Στην θέση $x=0.25$ μειώνονται περαιτέρω οι ταχύτητες ενώ γίνεται εμφανέστερη η μείωση τους στο πάνω τμήμα του αγωγού. Στην θέση $x=0.34$ η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε $0,2480 \text{ m/s}$ ενώ αδιαστατοποιημένη $0,04825$. Οι 4 δίνες συνεχίζουν να υφίστανται έχοντας μικρότερη ένταση. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες παρουσιάζονται στο τμήμα μεταξύ των δύο κάτω δινών και κοντά στα εσωτερικά τοιχώματα του αγωγού. Στην θέση $x=0.45$ η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε $0,2198 \text{ m/s}$ και αδιαστατοποιημένη $0,04276$. Όπως φαίνεται οι 4 δίνες συνεχίζουν να υπάρχουν μέχρι και την έξοδο του αγωγού με τις μεγαλύτερες εφαπτομενικές ταχύτητες να εντοπίζονται τμήμα μεταξύ των δύο κάτω δινών.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι εμφανίζονται έντονες δευτερεύουσες ροές στο τμήμα εξόδου του αγωγού. Το μέγιστο μέτρο των εφαπτομενικών ταχυτήτων που παρατηρήθηκε είναι 0.822 m/s που αντιστοιχεί στο 16% της κύριας. Από τη έξοδο της γωνίας αρχίζουν να σχηματίζονται 4 κύριες δίνες οι οποίες διατηρούνται με μειούμενη ένταση μέχρι την έξοδο του αγωγού με τις εφαπτομενικές ταχύτητες να είναι μεγαλύτερες στο τμήμα του αγωγού κάτω από το βάκτρο.



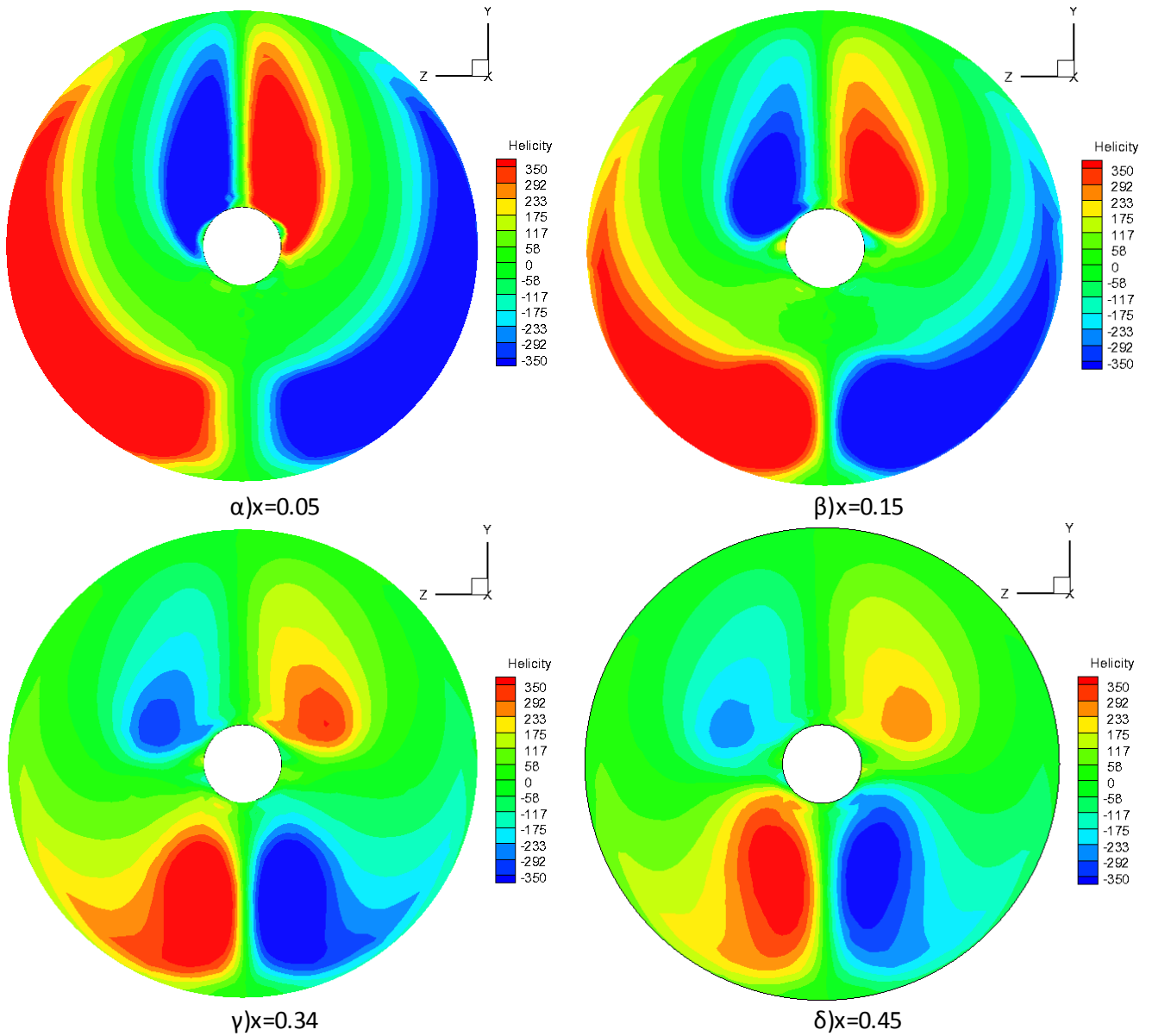
Σχήμα 5.4 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες-Contours και διανύσματα

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την στροβιλότητα (σχ. 5.4). Η στροβιλότητα είναι μεγαλύτερη στις περιοχές του ρευστού που εμφανίζεται μεγαλύτερη περιστροφή αυτού. Στη θέση $x=0.05$ παρατηρούνται οι περιοχές μεγάλης στροβιλότητας πάνω από το βάκτρο και στα εσωτερικά τοιχώματα. Στη θέση $x=0.15$ περιορίζονται αυτές οι περιοχές όπως συμβαίνει και με τις εφαπτομενικές ταχύτητες. Στη θέση $x=0.34$ η μεγαλύτερη απόλυτη τιμή της στροβιλότητας είναι 115 s^{-1} και παρουσιάζεται κοντά στα κέντρα των κάτω δινών. Αντίστοιχα στη θέση $x=0.45$ η μέγιστη τιμή είναι 90 s^{-1} στις ίδιες περιοχές. Γενικά παρατηρούμε ότι η στροβιλότητα ακολουθεί, όπως αναμενόταν, παρόμοια συμπεριφορά με τις εφαπτομενικές ταχύτητες στις διάφορες θέσεις, μειούμενη προς την έξοδο.



Σχήμα 5.5 Contours στροβιλότητας

Τα contours της ελικότητας στις ίδιες διατομές παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Η ελικότητα παρουσιάζει παραπλήσια συμπεριφορά με την στροβιλότητα. Οι μεγαλύτερες τιμές της εμφανίζονται στις περιοχές που είναι εντονότερη η περιστροφή του ρευστού κοντά στα κέντρα των δινών.



Σχήμα 5.7 Contours ελικότητας

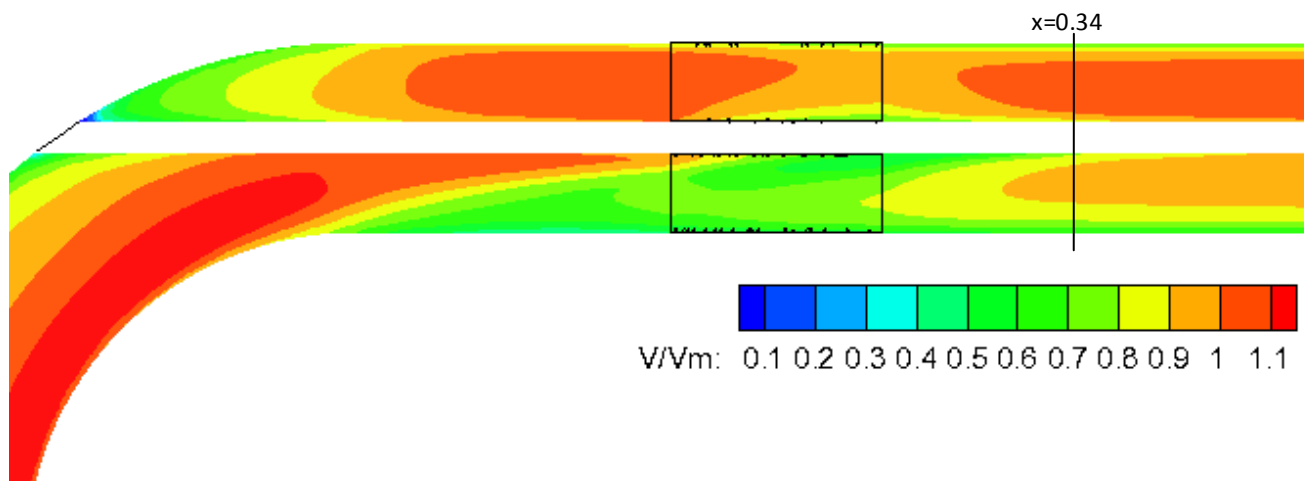
5.2 Κοντά πτερύγια

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τις γεωμετρίες με τα κοντύτερα πτερύγια. Οι συνολικά 7 τέτοιες γεωμετρίες που εξετάστηκαν, ομαδοποιήθηκαν με βάση το πλήθος των πτερυγίων (2,3 και 4) στις επόμενες τρεις υποενότητες.

5.2.1 Διάταξη με δύο πτερύγια

Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 4743 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 3904 Pa. Οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες όπως αναμενόταν από την προηγούμενη περίπτωση και μεγαλύτερες από όλες τις επόμενες που έχουν περισσότερα πτερύγια.

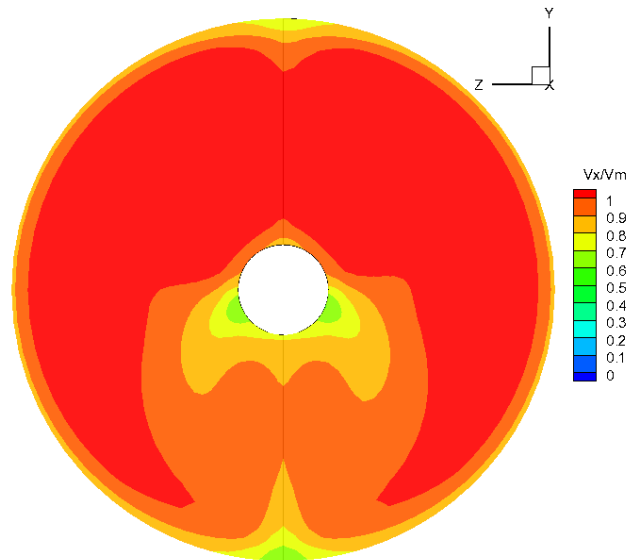
Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι ταχύτητες αδιαστατοποιημένες στο επίπεδο $z=0$ για τα τμήματα της γωνίας και της εξόδου.



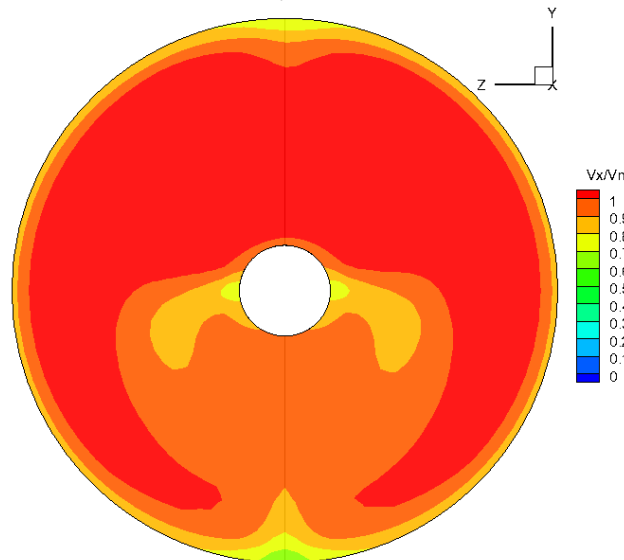
Σχήμα 5.8 Contours αδιαστατοποιημένων ταχυτήτων στο επίπεδο $z=0$

Τα αποτελέσματα για τις αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Παρατηρείται ότι η κατανομή των αξονικών ταχυτήτων είναι αντίστοιχη με την προηγούμενη περίπτωση με την περιοχή των χαμηλών ταχυτήτων να βρίσκεται κάτω από το βάκτρο. Στη θέση $x=0.34$ η τυπική απόκλιση των αξονικών ταχυτήτων υπολογίστηκε 0.5405 m/s και 0.4654 m/s (ίδια με την προηγούμενη) στη θέση $x=0.45$.

Οι αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες παρουσιάζονται στο σχήμα 5.10. Παρατηρείται ότι οι 4 δίνες συνεχίζουν να υπάρχουν στις αντίστοιχες θέσεις. Στη θέση



α) $x=0.34$

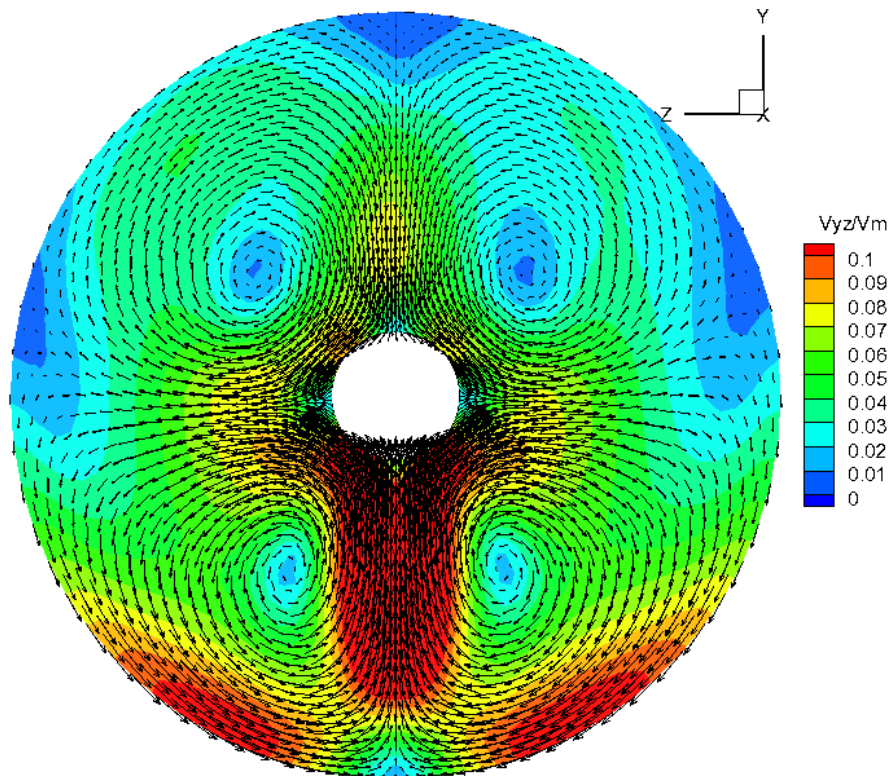


β) $x=0.45$

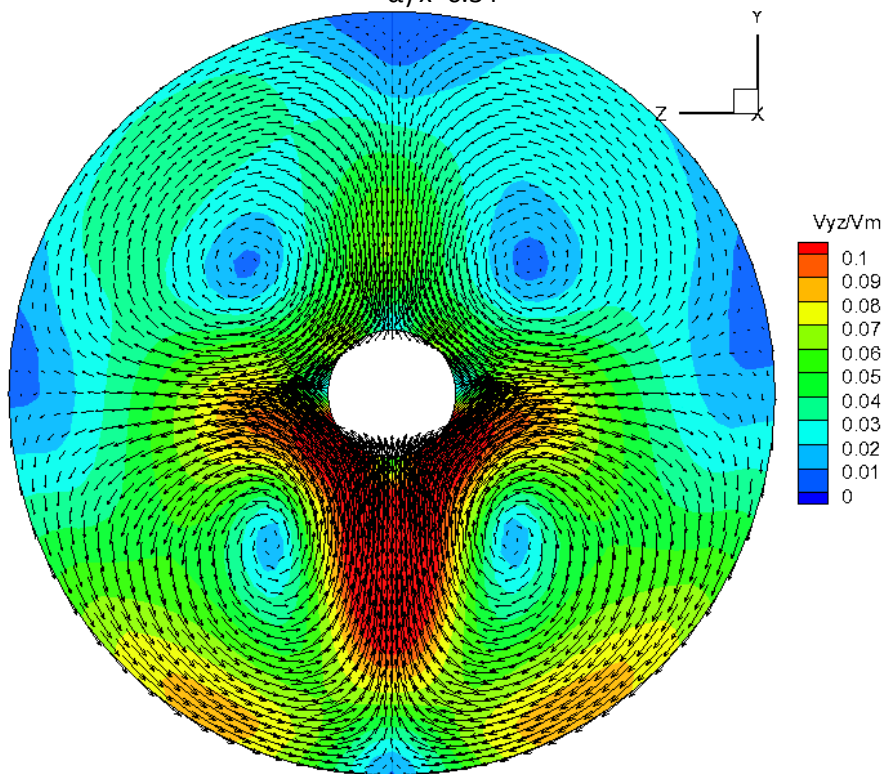
Σχήμα 5.9 Contours αδιαστατοποιημένων αξονικών ταχυτήτων

$x=0.34$ η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε $0,2636 \text{ m/s}$ ενώ αδιαστατοποιημένη $0,05129$. Αυτές οι τιμές είναι μεγαλύτερες από την περίπτωση χωρίς πτερύγια. Στη θέση $x=0.45$ η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε $0,2348 \text{ m/s}$ ενώ αδιαστατοποιημένη $0,04569$. Αυτή η διάταξη των πτερυγίων δεν φαίνεται να μειώνει τις δευτερεύουσες ροές αλλά αντίθετα να τις αυξάνει. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι τα πτερύγια βρίσκονται στο επίπεδο συμμετρίας του αγωγού αλλά και των δινών. Σημειώνεται ότι στην δημοσίευση των Zhang και Casey (Zhang & Casey, 2007) που παρουσιάστηκε στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται πως οι δευτερεύουσες ροές δεν επηρεάζονται από τα πτερύγια. Η γεωμετρία των πτερυγίων του πειράματος τους ήταν σαν της περίπτωσης που εξετάζεται εδώ ενώ έγιναν και δοκιμές με το πάχος των πτερυγίων προκειμένου να καταλήξουν στο προηγούμενο συμπέρασμα. Η παρατήρηση τους επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα αυτής της ενότητας. Όμως δεν ισχύει για όλες τις διατάξεις των πτερυγίων όπως θα φανεί

και στη συνέχεια. Για αυτό τον λόγο δεν εξετάστηκε αυτή η γεωμετρία και στην περίπτωση με τα μακριά πτερύγια.



α) $x=0.34$



β) $x=0.45$

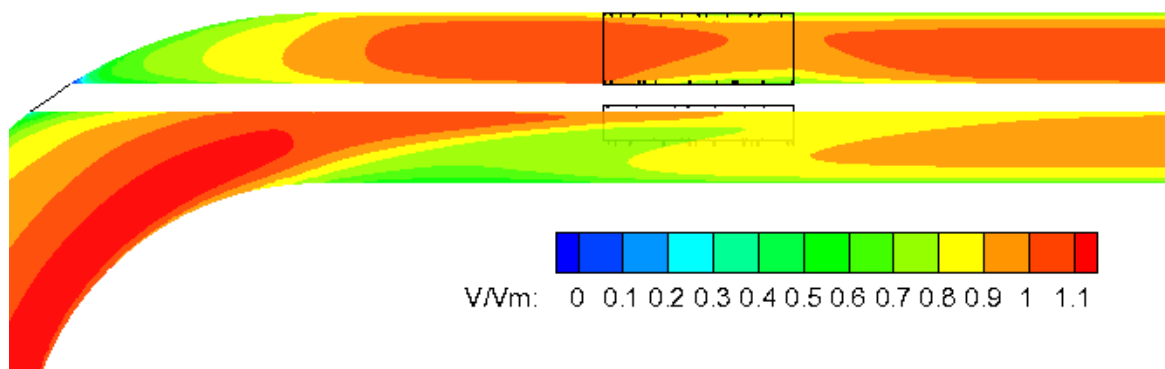
Σχήμα 5.10 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

5.2.2 Διατάξεις με τρία πτερύγια

Πτερύγια με γωνία 0°

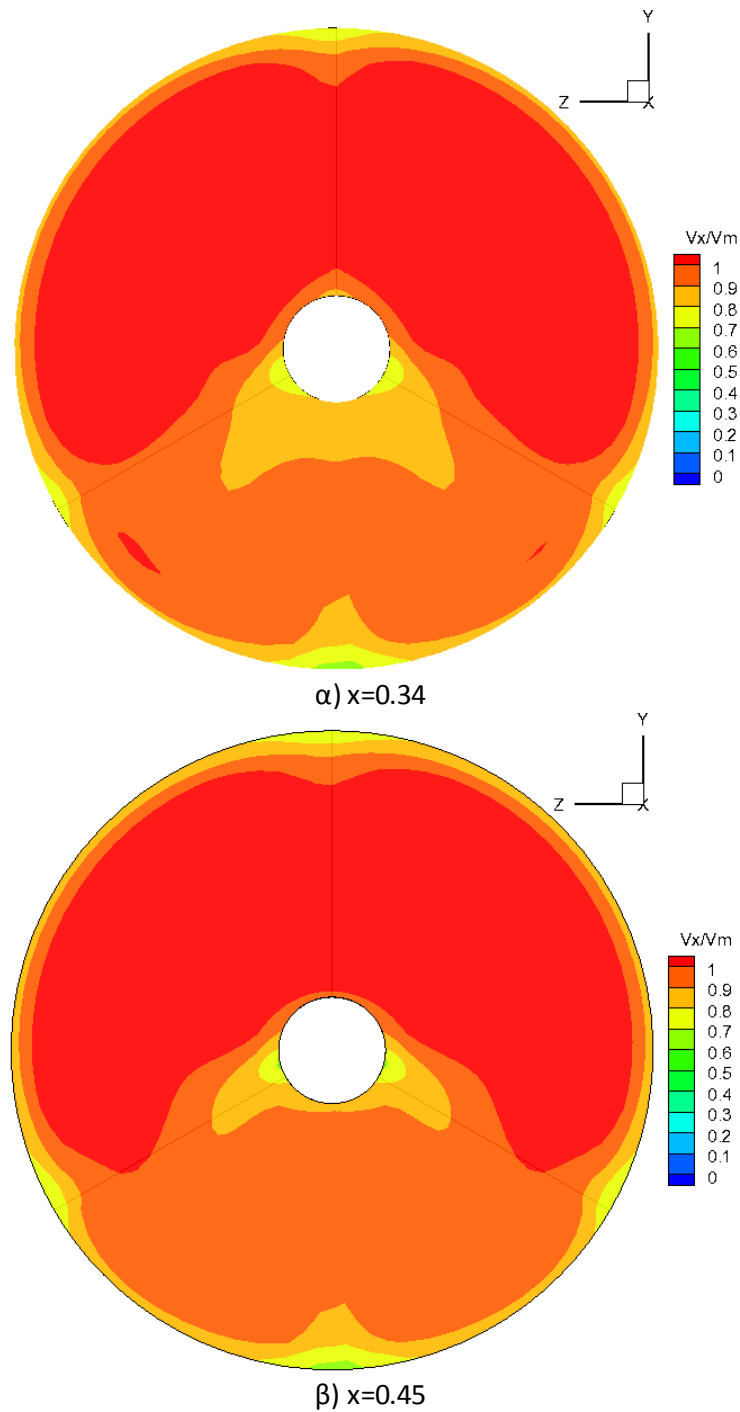
Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 4864 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 4005 Pa. Οι διαφορές των πιέσεων όλων των περιπτώσεων με τα 3 κοντά πτερύγια ήταν πολύ μικρές (της τάξης των 20 Pa) όπως αναμενόταν αφού οι απώλειες πίεσης εξαρτώνται από την κλίση του αγωγού (κοινή σε όλες) και τις τριβές με τα τοιχώματα των εσωτερικών διαμορφώσεων.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι ταχύτητες αδιαστατοποιημένες στο επίπεδο $z=0$ για τα τμήματα της γωνίας και της εξόδου.



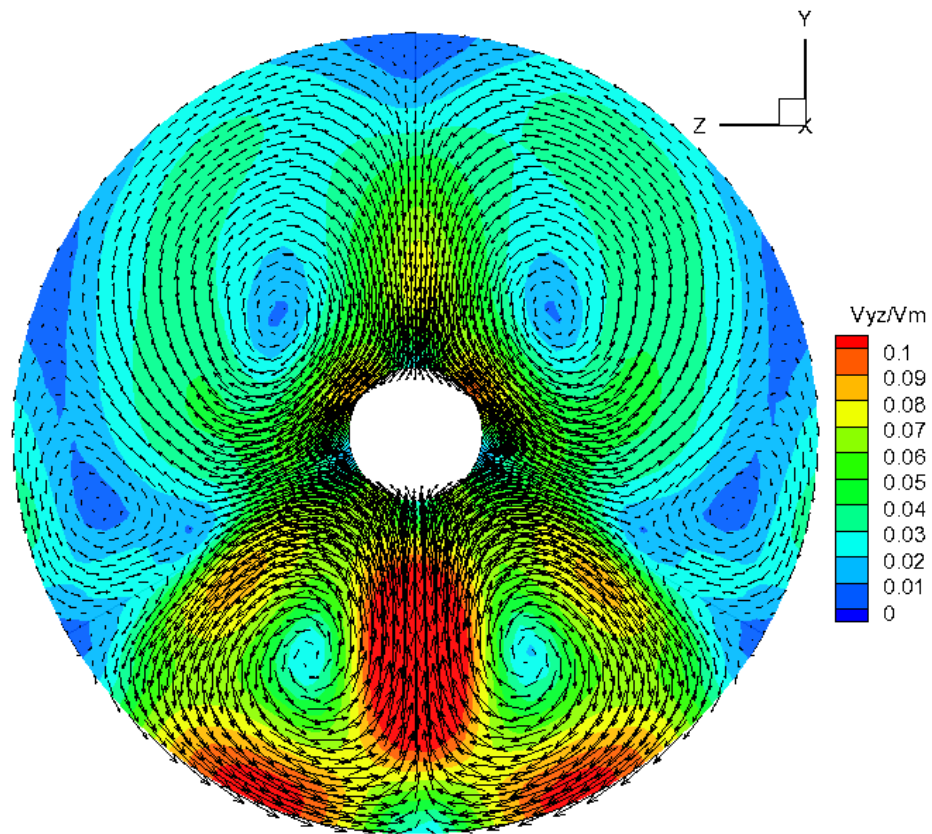
Σχήμα 5.11 Contours αδιαστατοποιημένων ταχυτήτων στο επίπεδο $z=0$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες (σχ. 5.12). Παρατηρείται ότι και στις δύο θέσεις η περιοχή των χαμηλότερων ταχυτήτων έχει μεγαλώσει καταλαμβάνοντας το χώρο μεταξύ των δύο κάτω πτερυγίων. Στις υπόλοιπες περιοχές η κατανομή των ταχυτήτων είναι αντίστοιχη με των προηγούμενων περιπτώσεων. Ακόμα, παρατηρείται ότι οι κατανομές στις δύο θέσεις είναι πιο κοντινές μεταξύ τους από ότι στις προηγούμενες περιπτώσεις. Αυτό δείχνει ότι υπό την επίδραση των 3 πτερυγίων οι αξονικές ταχύτητες αλλάζουν λιγότερο από θέση σε θέση. Στη θέση $x=0.34$ η τυπική απόκλιση των αξονικών ταχυτήτων υπολογίστηκε 0.4890 m/s ενώ στην έξοδο 0.4921 m/s. Αυτές οι τιμές ήταν οι μικρότερες που υπολογίστηκαν από όλες τις περιπτώσεις με τα 3 κοντά πτερύγια.

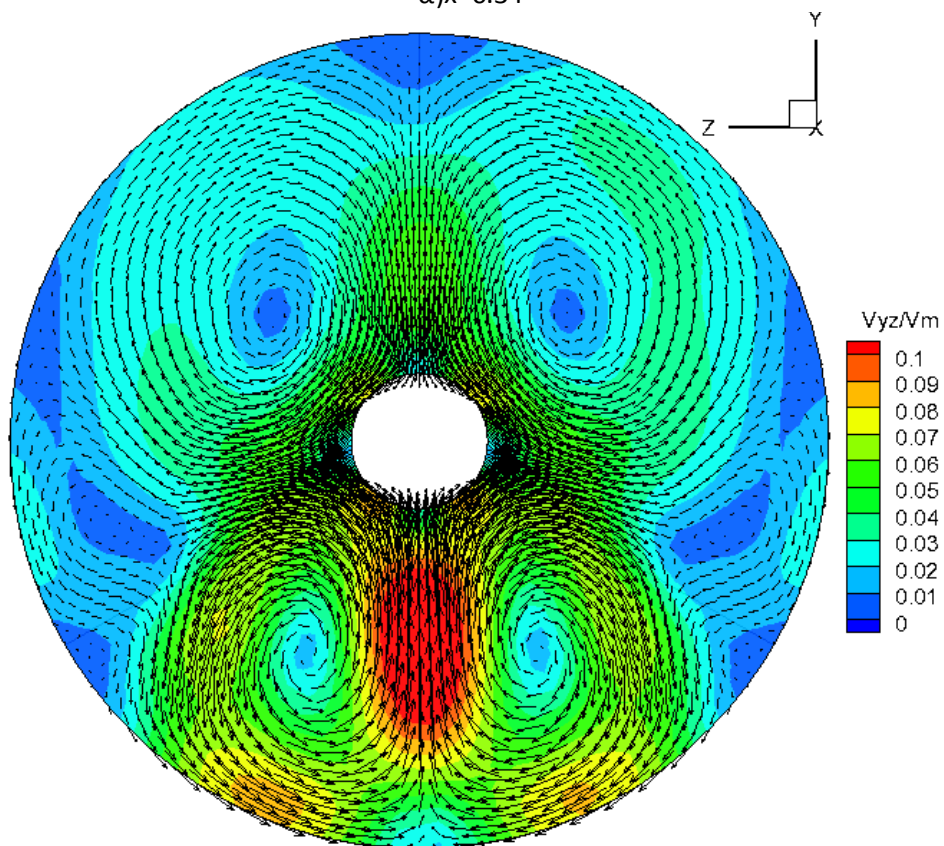


Σχήμα 5.12 Contours αδιαστατοποιημένων αξονικών ταχυτήτων

Οι αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Παρατηρείται και στις δύο θέσεις δημιουργούνται περισσότερες περιοχές διαφορετικών ταχυτήτων ενώ παράλληλα είναι εμφανώς μικρότερες οι ταχύτητες σε όλες τις θέσεις σε σχέση με τα προηγούμενα. Η περιοχή με τις μεγαλύτερες εφαπτομενικές ταχύτητες, αντίθετα με τις αξονικές, είναι αυτή που ορίζεται από τα δύο κάτω πτερύγια. Οι 4 δίνες βρίσκονται στις αντίστοιχες θέσεις με τα προηγούμενα αλλά έχουν μικρότερες



α) $x=0.34$

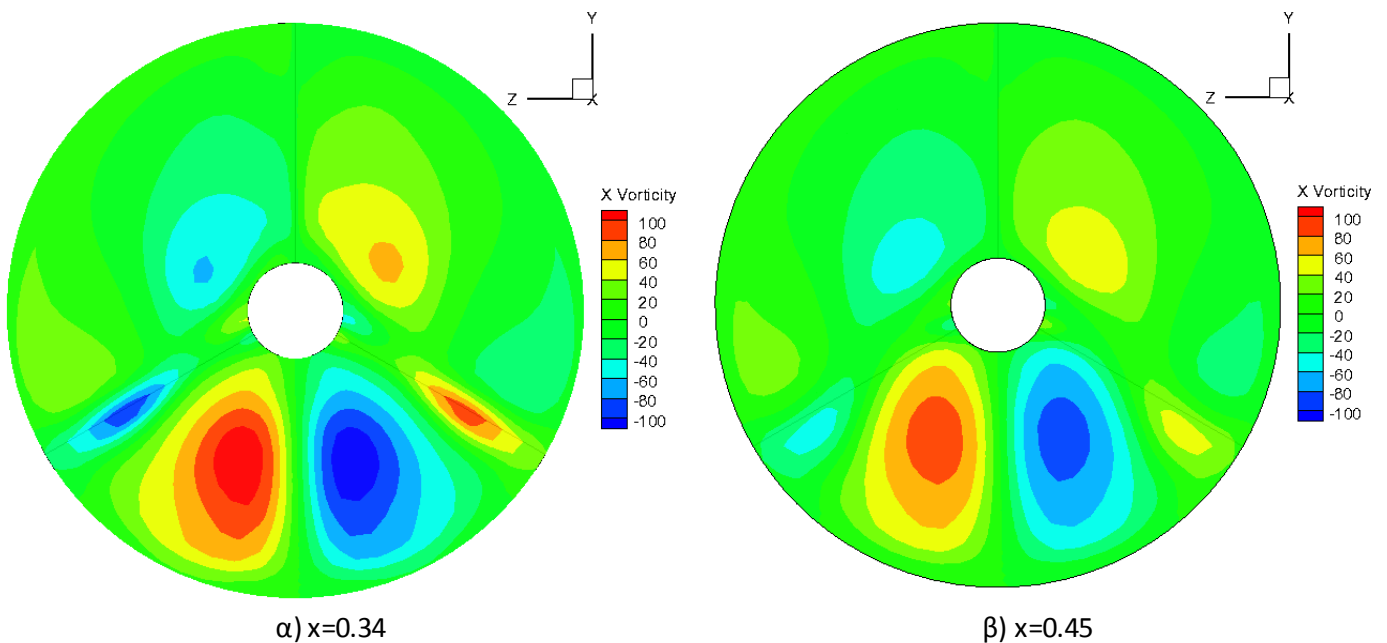


β) $x=0.45$

Σχήμα 5.13 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

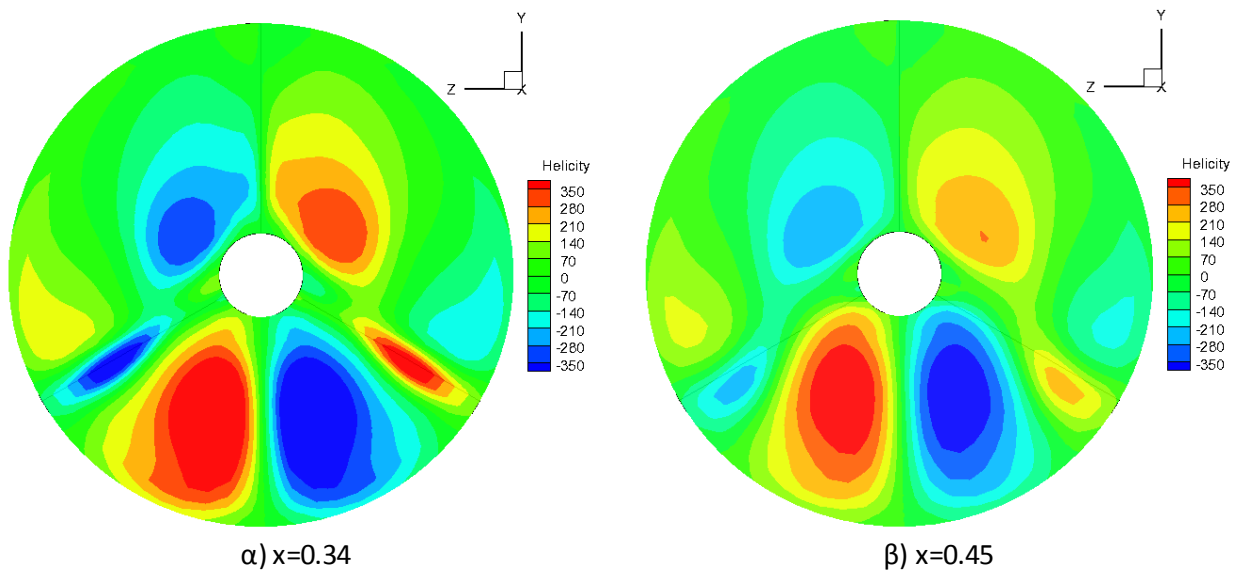
ταχύτητες. Στη θέση $x=0.34$ η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.2232 m/s (αδιαστατοποιημένη 0.0434). Παρατηρούνται δύο μικρότερες δίνες με κέντρα τις περιοχές χαμηλών ταχυτήτων, δεξιά και αριστερά κοντά στα τοιχώματα λίγο πάνω από τα πτερυγία, οι οποίες αποδίδονται στην ύπαρξη των πτερυγίων. Στη θέση $x=0.45$ η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.1958 m/s (αδιαστατοποιημένη 0.0381). Τα ίδια φαινόμενα παρατηρούνται και εδώ με μειωμένη ένταση.

Τα contours της στροβιλότητας στις δύο διατομές παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση ότι οι περιοχές με τη μεγαλύτερη στροβιλότητα είναι γύρω από τις δίνες. Επίσης φαίνονται οι δύο νέες περιοχές έντονης στροβιλότητας που δημιουργούνται λόγω των πτερυγίων. Η μεγαλύτερη απόλυτη τιμή στροβιλότητας μετρήθηκε και εδώ 115 s^{-1} στην περιοχή των δύο κάτω δινών στη διατομή $x=0.34$.



Σχήμα 5.14 Contours στροβιλότητας

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα contours της ελικότητας στις δύο διατομές. Επιβεβαιώνονται οι προηγούμενες παρατηρήσεις με την ελικότητα να εμφανίζει υψηλότερες τιμές στις περιοχές με την μεγαλύτερη στροβιλότητα. Ακόμα η ελικότητα μειώνεται όπως και τα προηγούμενα μεγέθη όσο απομακρυνόμαστε από την περιοχή των πτερυγίων.

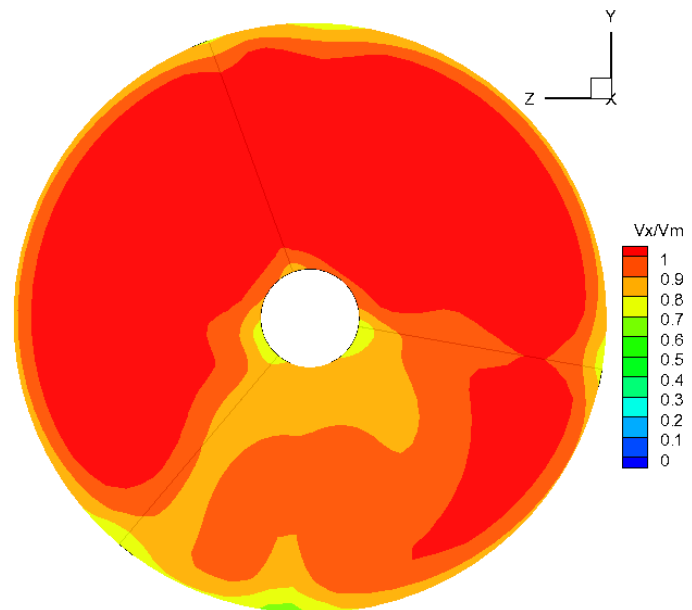


Σχήμα 5.15 Contours ελικότητας

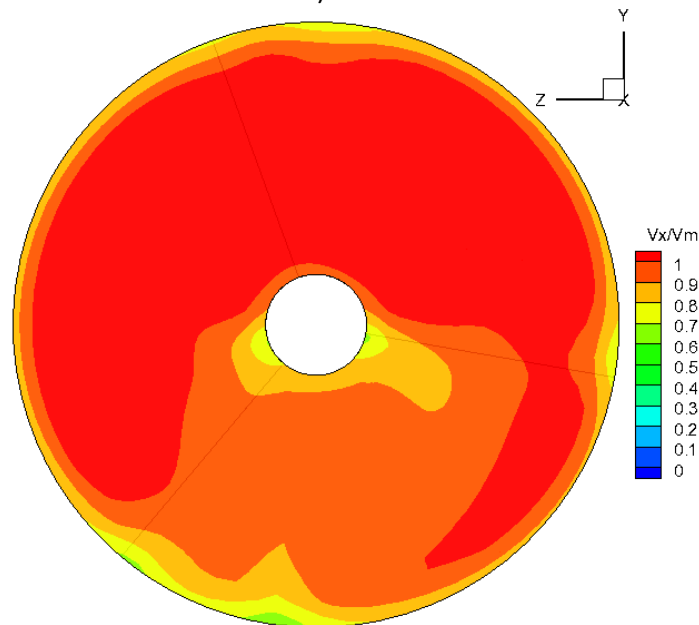
Πτερύγια με γωνία 20°

Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 4868 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 4007 Pa, πρακτικά ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες. Παρατηρείται ότι οι κατανομές των ταχυτήτων είναι επηρεασμένες από την γεωμετρία των πτερυγίων. Η περιοχή των χαμηλότερων ταχυτήτων έχει μετατοπιστεί στον χώρο μεταξύ των δύο κάτω πτερυγίων. Μέσα σε αυτήν υπάρχει και μια μικρότερη περιοχή υψηλών ταχυτήτων στην δεξιά πλευρά κοντά στα εσωτερικά τοιχώματα του αγωγού. Στη θέση $x=0.34$ η τυπική απόκλιση των αξονικών ταχυτήτων υπολογίστηκε 0.4923 m/s ενώ στην έξοδο 0.5018 m/s, λίγο μεγαλύτερες από την προηγούμενη περίπτωση.



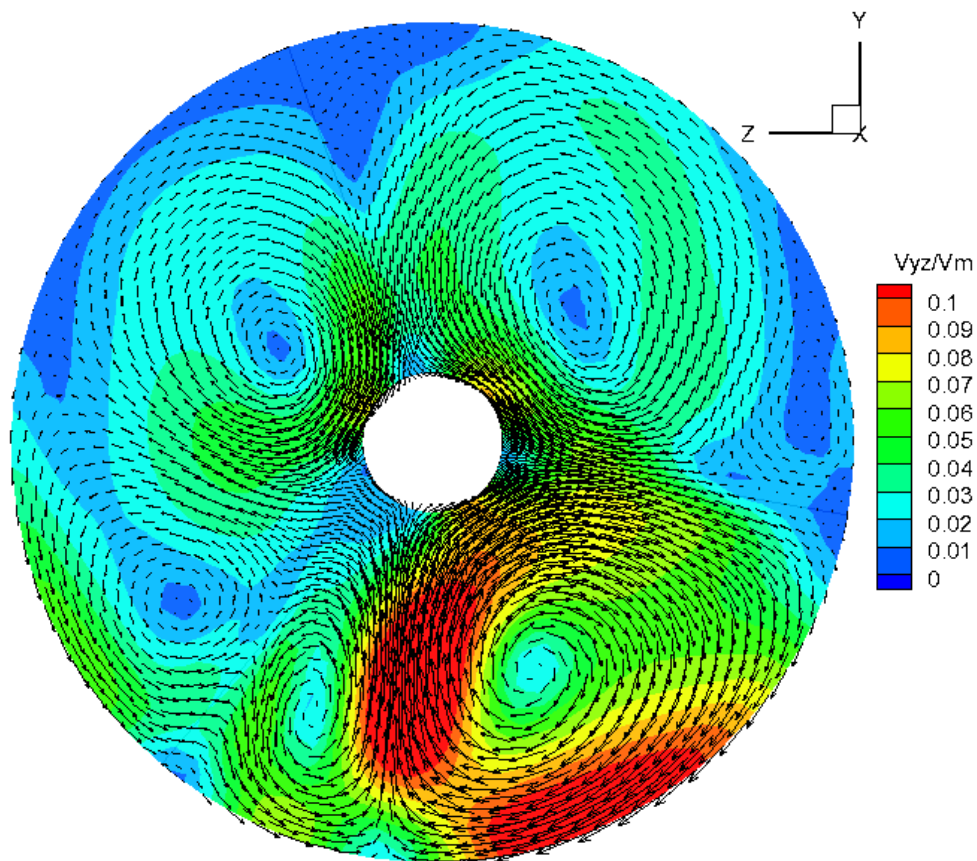
α) $x=0.34$



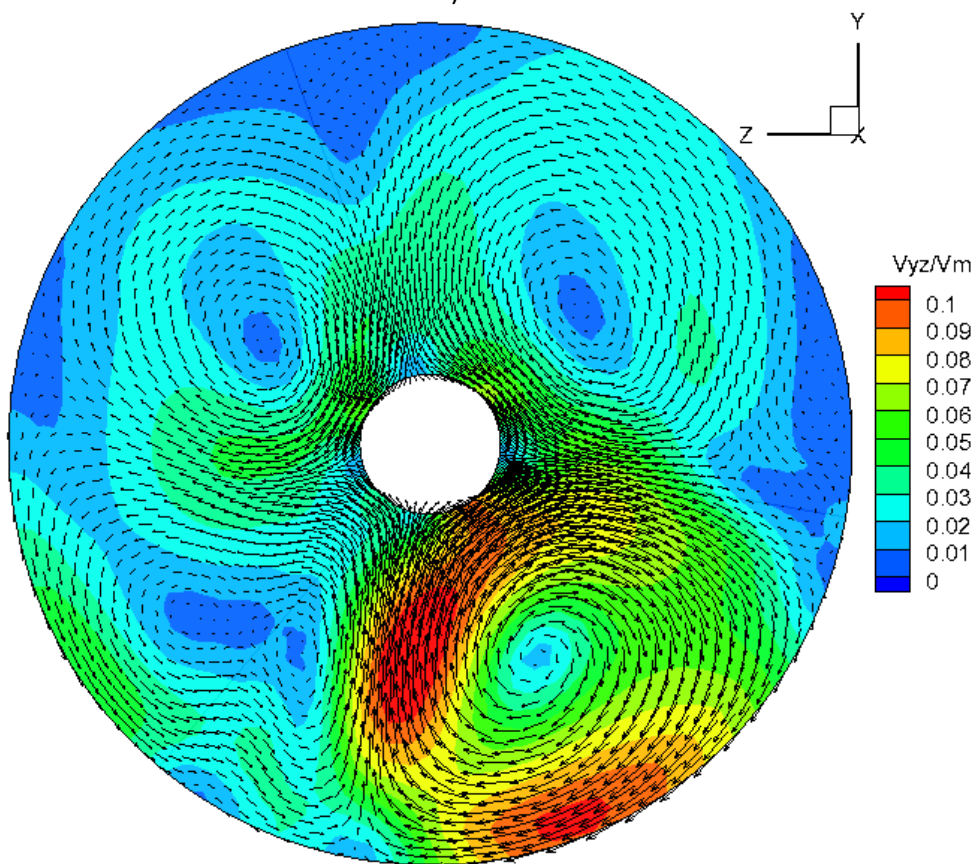
β) $x=0.45$

Σχήμα 5.16 Contours αδιαστατοποιημένων αξονικών ταχυτήτων

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες. Παρατηρείται ότι τα κέντρα των δινών έχουν μετατοπιστεί. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις η περιοχή μεταξύ των δύο κάτω πτερυγίων, παρ' ότι αυτά έχουν στραφεί κατά 20° , είναι η περιοχή που εμφανίζονται οι μεγαλύτερες ταχύτητες. Στη θέση $x=0.34$ οι δύο κύριες δίνες στα αριστερά του άξονα συμμετρίας του αγωγού έχουν αλλοιωθεί περισσότερο λόγω της γεωμετρίας. Η περιοχή υψηλών ταχυτήτων στην αριστερή πλευρά των τοιχωμάτων που παρατηρήθηκε στις προηγούμενες περιπτώσεις δεν εμφανίζεται αλλά έχουν επιταχυνθεί οι άλλες δύο. Πάνω από το αριστερό



α) $x=0.34$

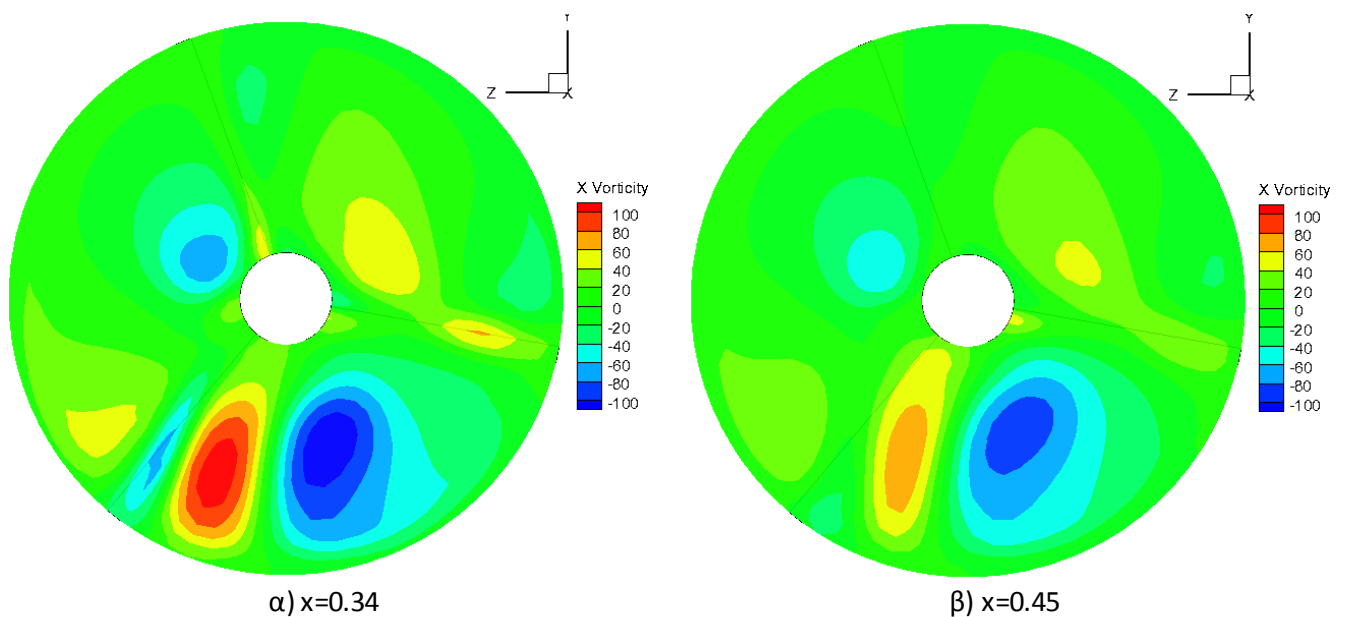


β) $x=0.45$

Σχήμα 5.17 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

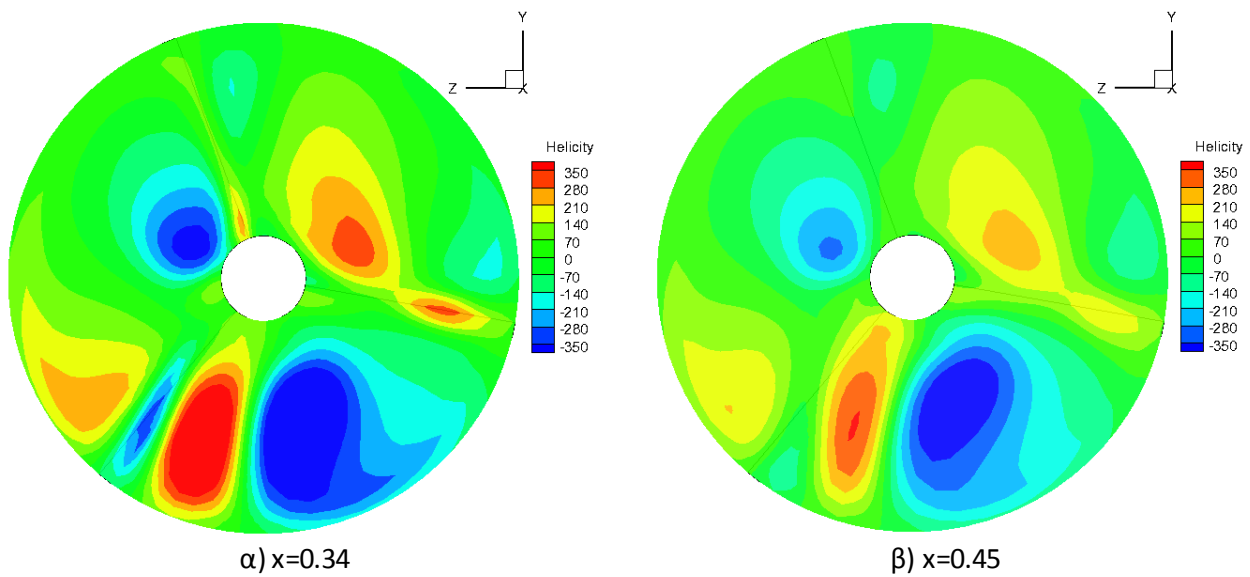
πτερύγιο παρατηρείται η δίνη που δημιουργείται εξαιτίας του, ενώ στο δεξί δεν σχηματίζεται. Η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.2039 m/s (αδιαστατοποιημένη 0.0397). Στη θέση $x=0.45$ οι ταχύτητες έχουν μειωθεί περεταίρω ενώ η κάτω αριστερά δίνη δεν παρατηρείται. Αντίθετα, διατηρείται η περιοχή με τις υψηλές ταχύτητες δεξιά κοντά στα εσωτερικά τοιχώματα που στις προηγούμενες περιπτώσεις δεν εμφανιζόταν στην ίδια διατομή. Η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε στη διατομή αυτή 0.1784 m/s (αδιαστατοποιημένη 0.0347).

Τα αποτελέσματα για την στροβιλότητα παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Στη θέση $x=0.34$ παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται στις περιοχές των κύριων δινών αλλά και σε δύο ακόμα θέσεις κοντά στα κάτω πτερύγια. Στη θέση $x=0.45$ η στροβιλότητα έχει ελαττωθεί σε μεγάλο βαθμό με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται στην περιοχή ανάμεσα στα δύο κάτω πτερύγια. Παρά το γεγονός ότι στην οπτικοποίηση των εφαπτομενικών δεν παρατηρείται η αριστερή δίνη εντούτοις στην περιοχή υπάρχει μεγάλη στροβιλότητα. Τέλος, στις περιοχές των δύο κάτω πτερυγίων η στροβιλότητα είναι πολύ μικρή σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση.



Σχήμα 5.18 Contours στροβιλότητας

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα contours της ελικότητας στις δύο διατομές. Αντίστοιχες παρατηρήσεις με αυτές τις στροβιλότητας μπορούν να γίνουν. Στην έξοδο παρουσιάζεται μειωμένη η ελικότητα σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις και οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται στις αντίστοιχες θέσεις με την στροβιλότητα.

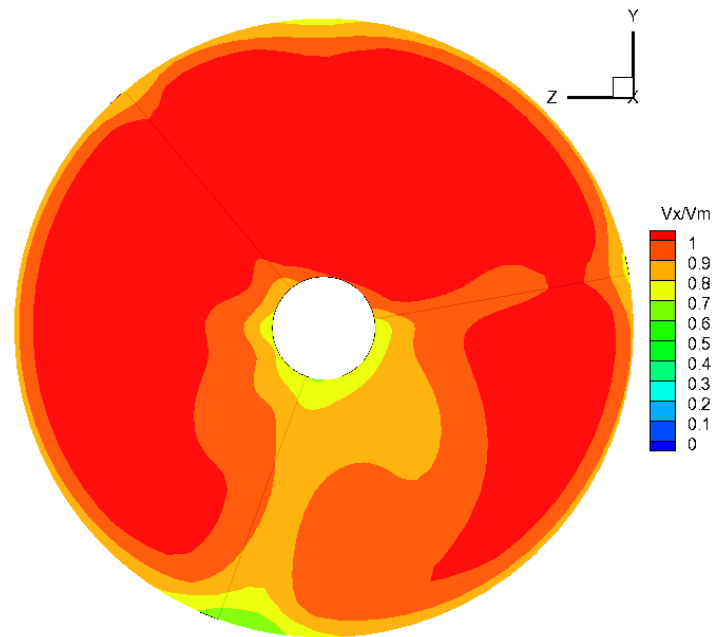


Σχήμα 5.19 Contours ελικότητας

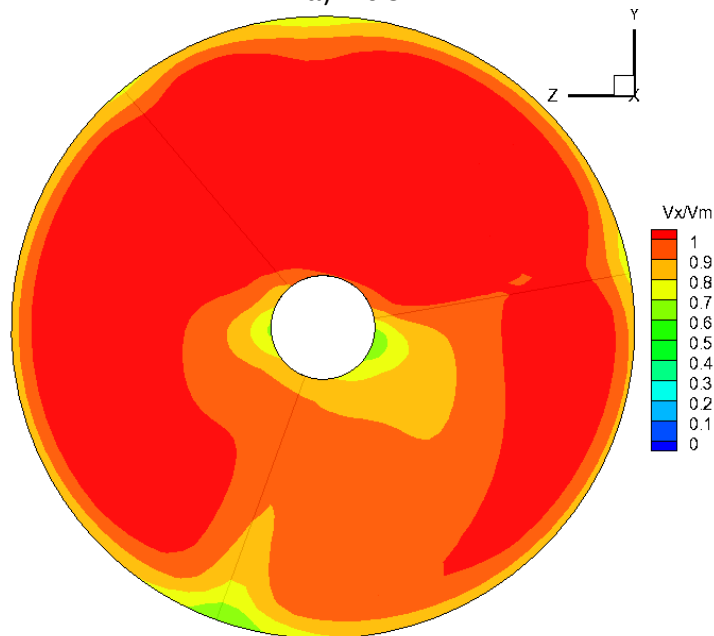
Πτερύγια με γωνία 40°

Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 4855 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 3995 Pa.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες. Οι ταχύτητες είναι και εδώ επηρεασμένες από την γεωμετρία. Η περιοχή χαμηλών ταχυτήτων έχει μετατοπιστεί στο χώρο μεταξύ των δύο κάτω πτερυγίων. Σε αυτήν εμφανίζονται υψηλότερες ταχύτητες στο δεξί της τμήμα. Αυτή η περιοχή παρατηρήθηκε και στην προηγούμενη περίπτωση και αποδίδεται στη θέση αυτού του πτερυγίου. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις τα προφίλ των αξονικών ταχυτήτων γίνονται ομαλότερα προς την έξοδο. Στη θέση $x=0.34$ η τυπική απόκλιση των αξονικών ταχυτήτων υπολογίστηκε 0.5270 m/s ενώ στην έξοδο 0.5176 m/s, μεγαλύτερες από την προηγούμενη περίπτωση.



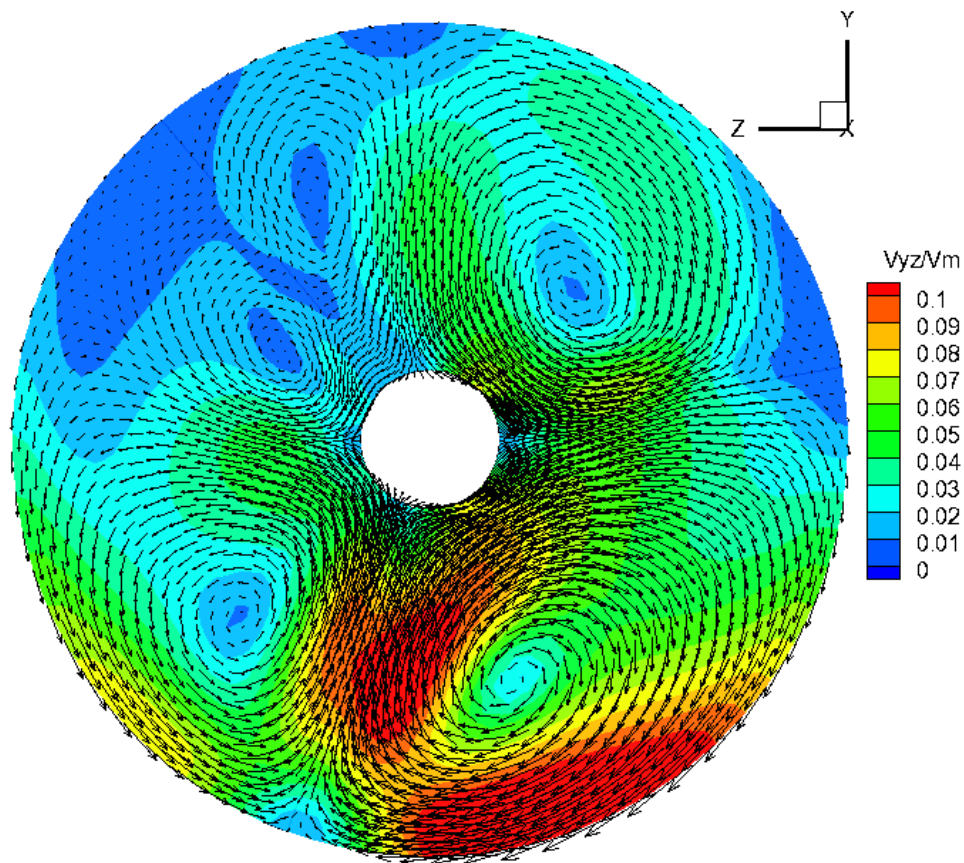
α) $x=0.34$



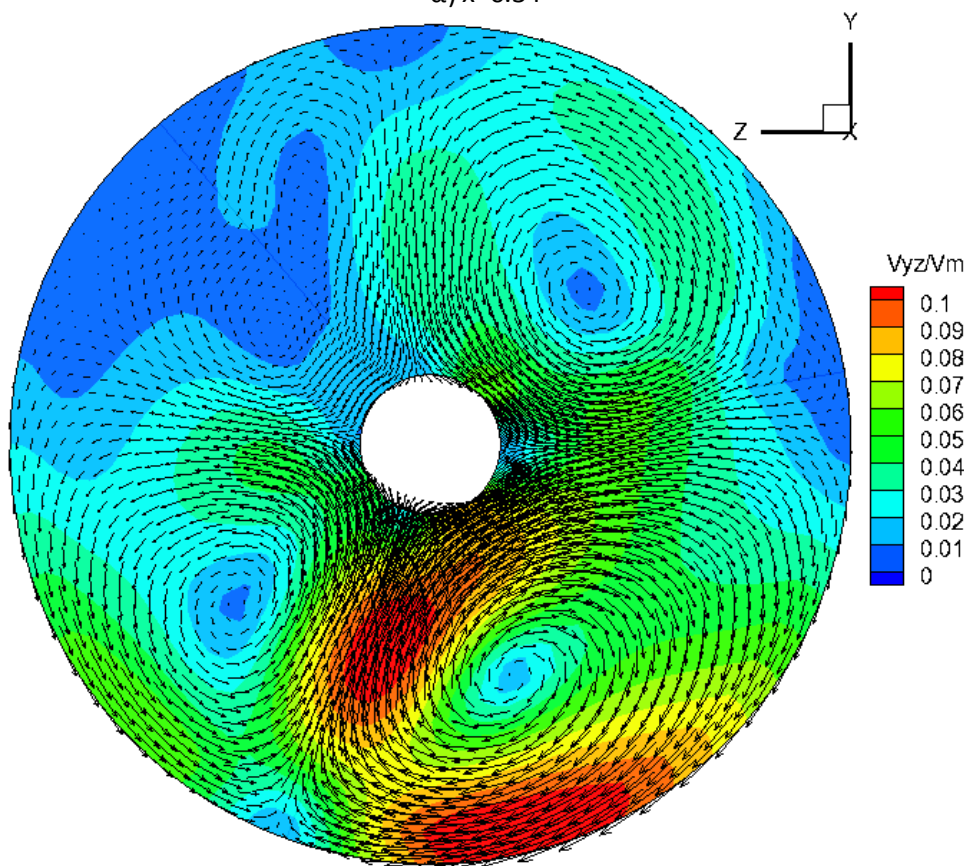
β) $x=0.45$

Σχήμα 5.20 Contours αδιαστατοποιημένων αξονικών ταχυτήτων

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες. Παρατηρείται ότι οι δίνες έχουν μετατοπιστεί σε μεγάλο βαθμό ακολουθώντας την αλλαγή κλίσης των πτερυγίων. Οι δίνες που παρατηρούνται στο σχήμα είναι τρεις (στις τρεις επιφάνειες που ορίζονται από τα πτερύγια ανά δύο) με την αριστερή από τις δύο κάτω που βλέπαμε στις προηγούμενες να μην εμφανίζεται. Η περιοχή υψηλών ταχυτήτων που εμφανιζόταν στα προηγούμενα σχεδόν κάθετη τώρα έχει μετασχηματιστεί και μετακινηθεί προς το κάτω αριστερά πτερύγιο, ενώ (όπως και στην προηγούμενη περίπτωση) υπάρχουν συνολικά 2 τέτοιες περιοχές. Ακόμα, σε αυτή τη γεωμετρία δεν παρατηρούνται οι μικρότερες δίνες, κοντά στα πτερύγια, που παρατηρήθηκαν στην



α) $x=0.34$

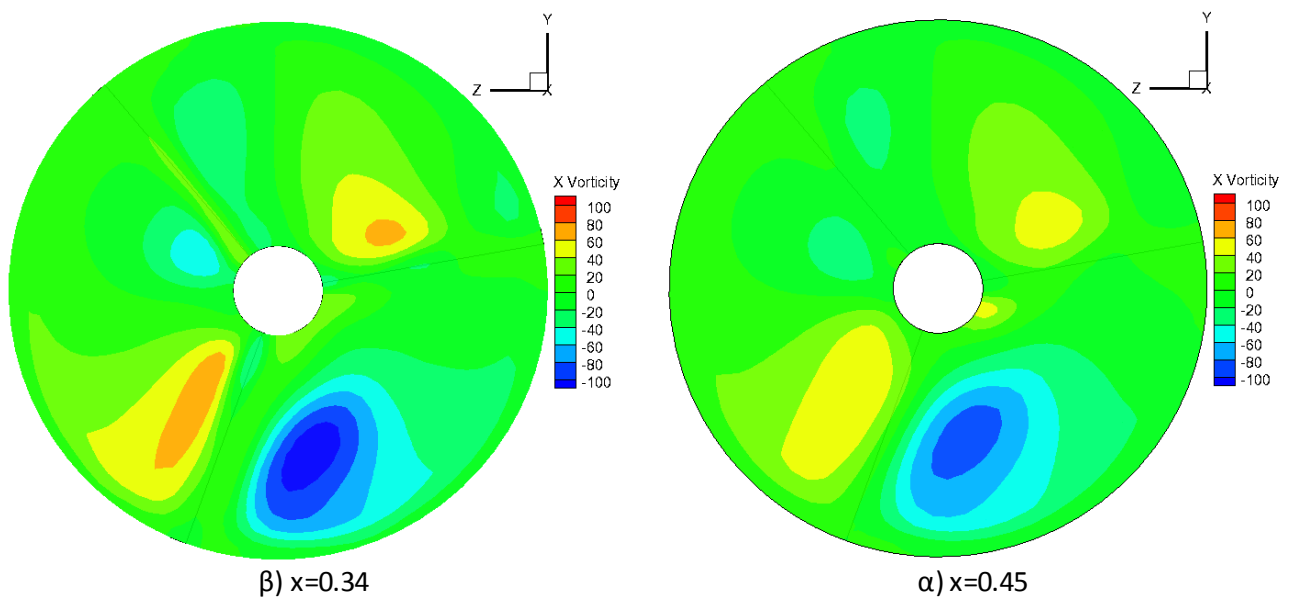


β) $x=0.45$

Σχήμα 5.21 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

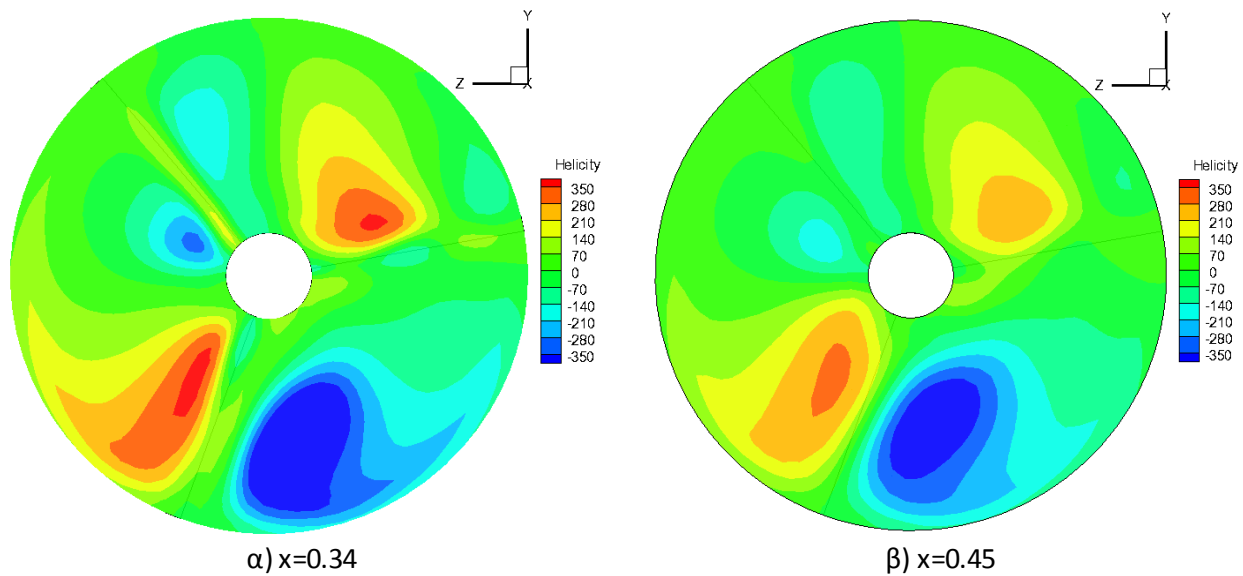
προηγούμενη. Στη θέση $x=0.34$ παρατηρήθηκαν δύο μικρότερης έντασης δίνες εκατέρωθεν του πάνω πτερυγίου. Εδώ, η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.2131 m/s και αδιαστατοποιημένη 0.0415 . Στην έξοδο τα ίδια μεγέθη υπολογίστηκαν 0.1908 m/s και 0.0371 αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές ήταν οι μεγαλύτερες από τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την στροβιλότητα. Παρατηρείται ότι και στις δύο διατομές υπάρχουν 3 περιοχές υψηλής στροβιλότητας στις περιοχές των δινών αντίθετα με όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις που ήταν 4. Η μέγιστη απόλυτη τιμή της στροβιλότητας είναι και εδώ 115 s^{-1} . Αυτή η παρατήρηση ισχύει για όλες τις περιπτώσεις με τα τρία πτερύγια και μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέγιστη αυτή τιμή δεν μεταβάλλεται με τις αλλαγές στην γεωμετρία των πτερυγίων.



Σχήμα 5.22 Contours στροβιλότητας

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα contours της ελικότητας. Οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι αντίστοιχες με αυτές της στροβιλότητας.

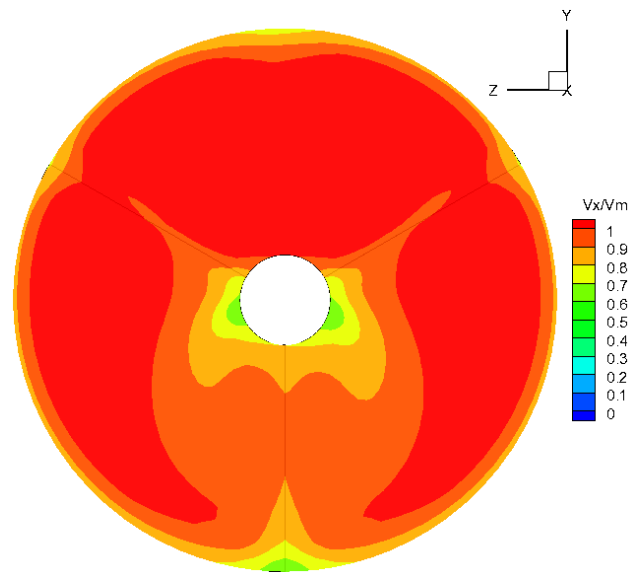


Σχήμα 5.23 Contours ελικότητας

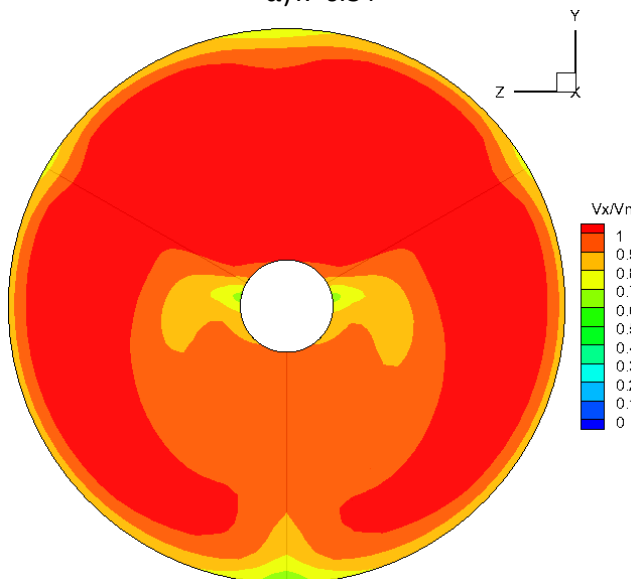
Πτερύγια με γωνία 60°

Σε αυτήν την περίπτωση, που είναι και η τελευταία διάταξη με 3 πτερύγια που εξετάστηκε, τα πτερύγια έχουν αναστραφεί σε σχέση με την πρώτη περίπτωση με τη γωνία των 0° μοιρών. Η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 4818 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 3971 Pa. Αυτές οι τιμές είναι οι μικρότερες από τις άλλες περιπτώσεις αν και οι διαφορές μεταξύ τους είναι πολύ μικρές.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες. Παρατηρείται ότι οι κατανομές των αξονικών ταχυτήτων στις δύο διατομές είναι πολύ κοντινές με αυτήν της περίπτωσης χωρίς πτερύγια. Η περιοχή με τις χαμηλότερες ταχύτητες εμφανίζεται στο κάτω τμήμα του αγωγού και χωρίζεται, σχεδόν συμμετρικά, σε δύο τμήματα από το κάθετο κάτω πτερύγιο. Στη θέση $x=0.34$ η τυπική απόκλιση των αξονικών ταχυτήτων υπολογίστηκε 0.5361 m/s και είναι η μεγαλύτερη από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις. Στην έξοδο, υπολογίστηκε 0.4725 m/s η οποία είναι η μικρότερη από τις προηγούμενες. Αυτό δεν είναι αναμενόμενο καθώς παρουσιάζεται πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο θέσεων που δεν παρατηρήθηκε σε άλλες περιπτώσεις και μπορεί να οφείλεται σε κάποιο σφάλμα στον υπολογισμό ή στα δεδομένα. Το αναμενόμενο θα ήταν να είναι και στην έξοδο η συγκριτικά μεγαλύτερη τιμή, όπως συμβαίνει και με τα άλλα μεγέθη που θα παρουσιαστούν παρακάτω. Το ίδιο φαινόμενο παρουσιάστηκε και στα αποτελέσματα για την ίδια διάταξη με τα μακριά πτερύγια.



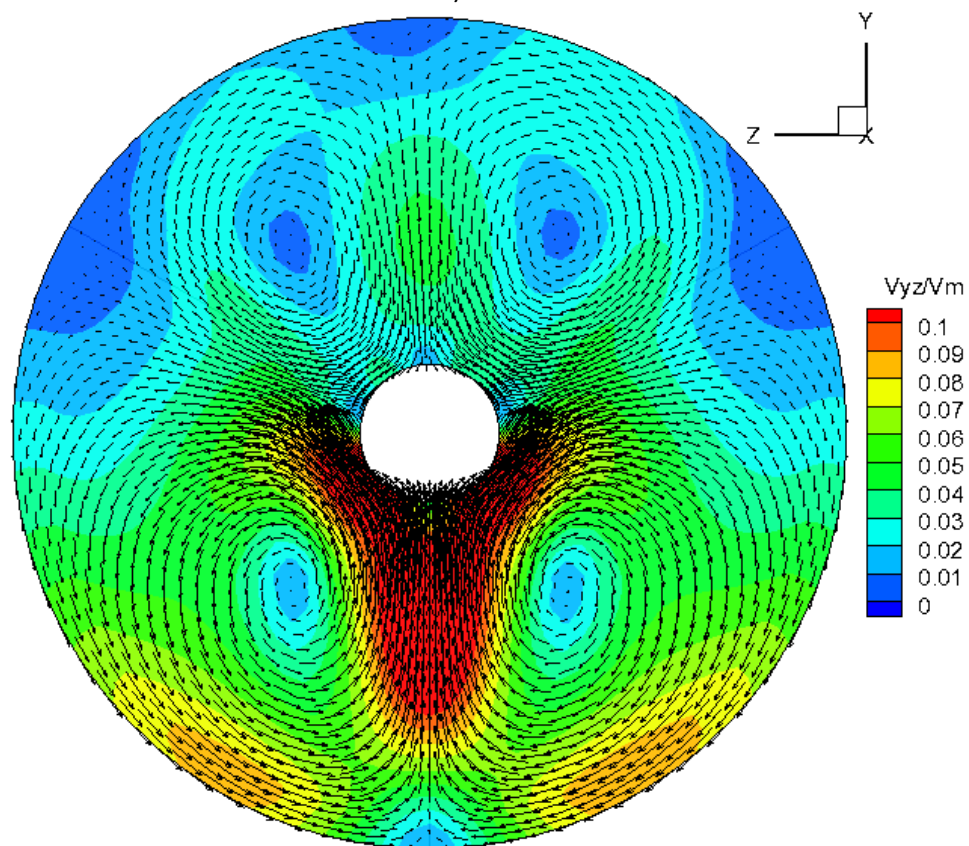
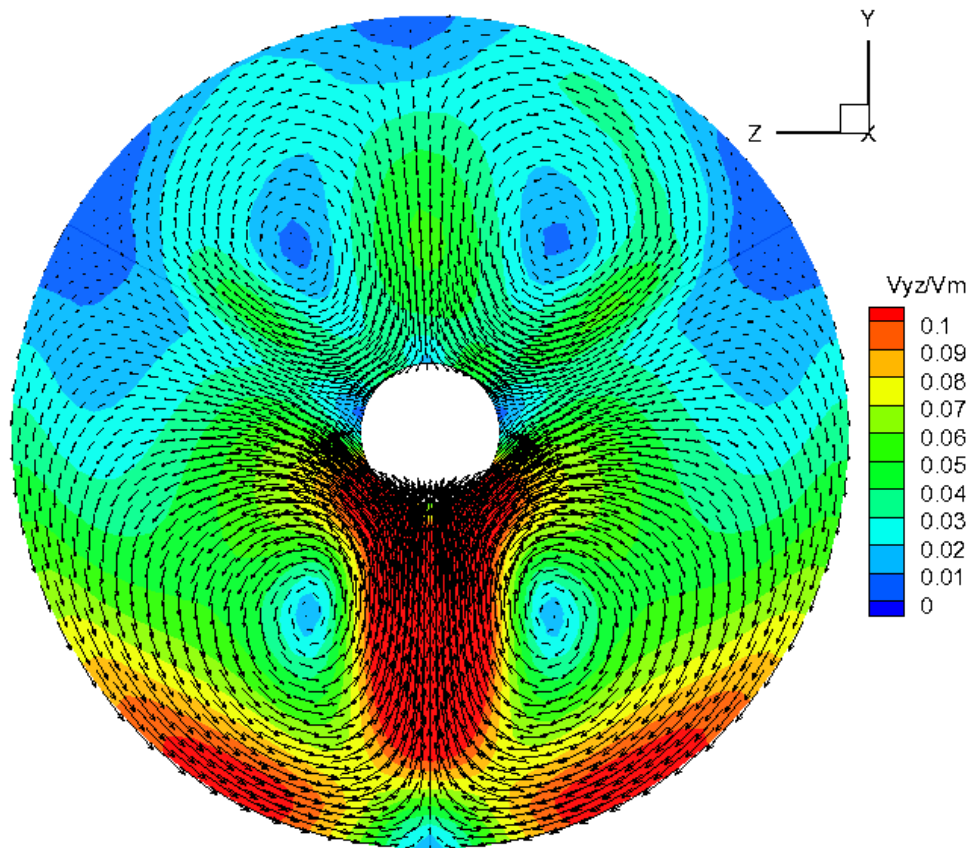
α) $x=0.34$



β) $x=0.45$

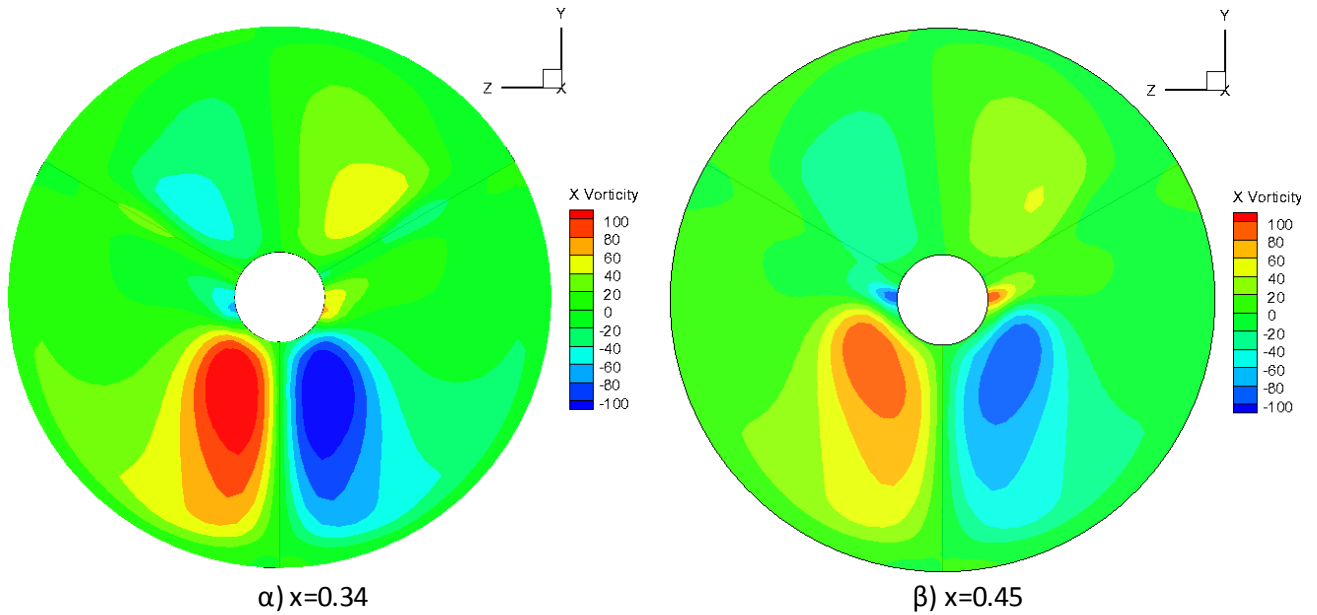
Σχήμα 5.24 Contours αδιαστατοποιημένων αξονικών ταχυτήτων

Τα αποτελέσματα για τις αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Παρατηρείται ότι και αυτά τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά σε αυτά της περίπτωσης χωρίς πτερύγια. Οι 4 κύριες δίνες εμφανίζονται και εδώ συμμετρικές στις ίδιες σχεδόν θέσεις. Οι δύο πάνω δίνες έχουν μετακινηθεί λίγο προς τον άξονα συμμετρίας λόγω της επίδρασης των δύο πάνω διατάξεων. Η περιοχή των χαμηλών ταχυτήτων δεν περιορίζεται από τα πτερύγια και είναι μεγαλύτερη από των προηγούμενων περιπτώσεων. Στη θέση $x=0.34$ η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.2440 m/s και αδιαστατοποιημένη 0.0475 . Στην έξοδο τα μεγέθη αυτά υπολογίστηκαν 0.2179 m/s και 0.0424 αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι μεγαλύτερες από όλες τις περιπτώσεις με τα τρία κοντά πτερύγια. Συνεπώς, η συγκεκριμένη διάταξη των πτερυγίων είναι η λιγότερο κατάλληλη, από αυτές με τα τρία πτερύγια, για την μείωση των δευτερευουσών ροών.



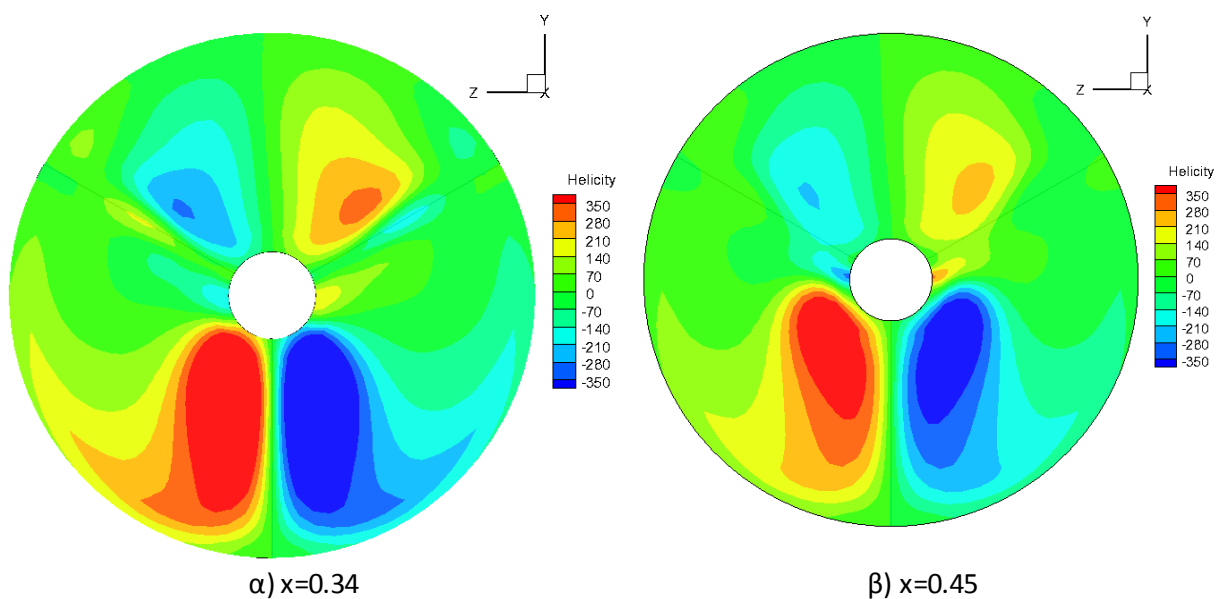
Σχήμα 5.25 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την στροβιλότητα στις δύο διατομές. Παρατηρείται ότι και αυτά τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντινά με την περίπτωση χωρίς πτερύγια. Οι περιοχές μεγάλης στροβιλότητας είναι αυτές κοντά στις δίνες. Οι δύο πάνω περιοχές έχουν μετασχηματιστεί και περιοριστεί στην περιοχή μεταξύ των πάνω πτερυγίων.



Σχήμα 5.26 Contours στροβιλότητας

Τα αποτελέσματα για την ελικότητα δεν παρουσιάζουν κάποια διαφοροποίηση, οι παρατηρήσεις είναι αντίστοιχες με αυτές της στροβιλότητας. Παρουσιάζονται, για λόγους πληρότητας στο επόμενο σχήμα.



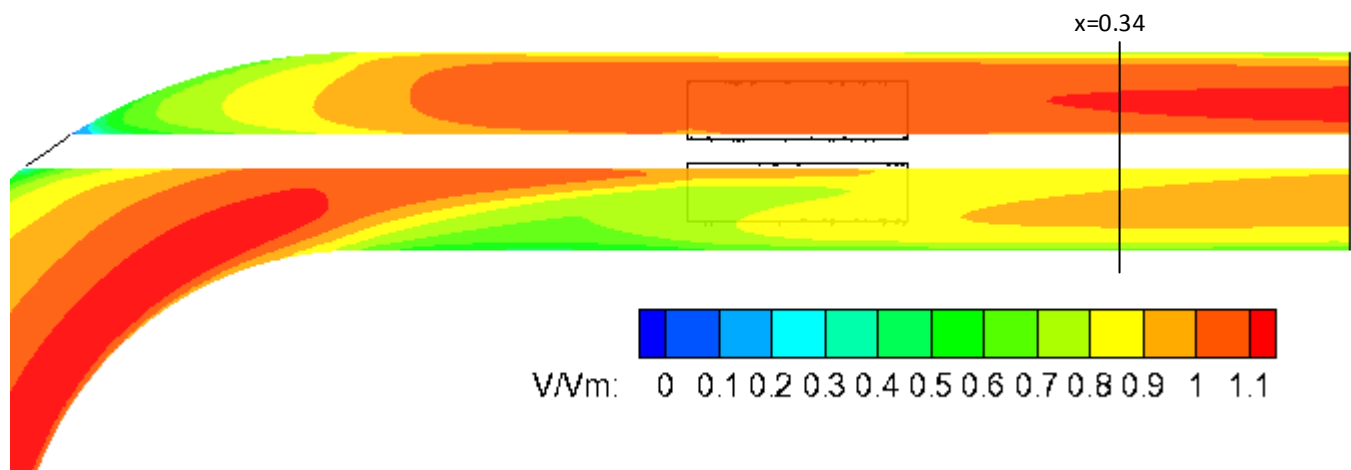
Σχήμα 5.27 Contours ελικότητας

5.2.3 Διατάξεις με τέσσερα πτερύγια

Συμμετρικά τοποθετημένα με γωνία 45°

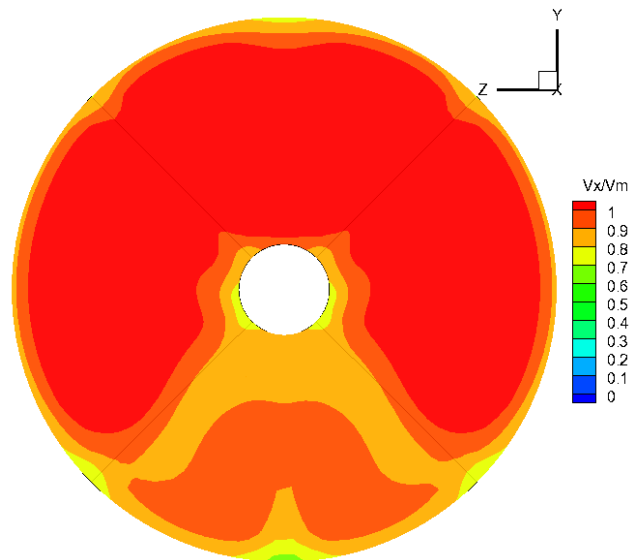
Στη διάταξη αυτή τα πτερύγια είναι συμμετρικά τοποθετημένα με γωνία 45° ως προς τον άξονα συμμετρίας και 90° μεταξύ τους. Η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 4963 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 4102 Pa. Όπως αναμενόταν οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες από τις προηγούμενες διατάξεις που είχαν λιγότερα πτερύγια.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι ταχύτητες αδιαστατοποιημένες στο επίπεδο $z=0$ για τα τμήματα της γωνίας και της εξόδου.

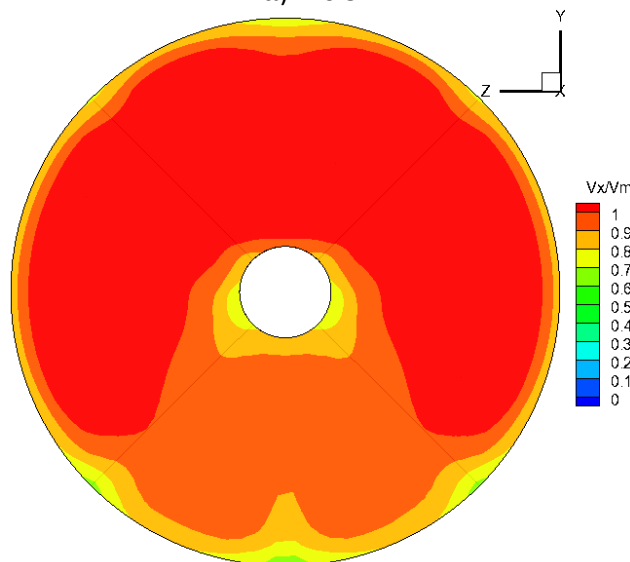


Σχήμα 5.28 Contours αδιαστατοποιημένων ταχυτήτων στο επίπεδο $z=0$

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες (σχ. 5.29). Παρατηρείται και εδώ αντίστοιχη συμπεριφορά της ροής με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Σχηματίζεται μια περιοχή χαμηλότερων ταχυτήτων στην επιφάνεια μεταξύ των δύο κάτω πτερυγίων και τα προφίλ των ταχυτήτων ομαλοποιούνται όσο προχωράμε προς την έξοδο. Στη θέση $x=0.34$ η τυπική απόκλιση των αξονικών ταχυτήτων υπολογίστηκε 0.5014 m/s ενώ στην έξοδο 0.5177 m/s. Οι τιμές αυτές είναι κοντά σε αυτές της περίπτωσης με τα 3 πτερύγια στις 40° και βρίσκονται περίπου στο μέσο μεταξύ των ακραίων τιμών που υπολογίστηκαν μέχρι τώρα.



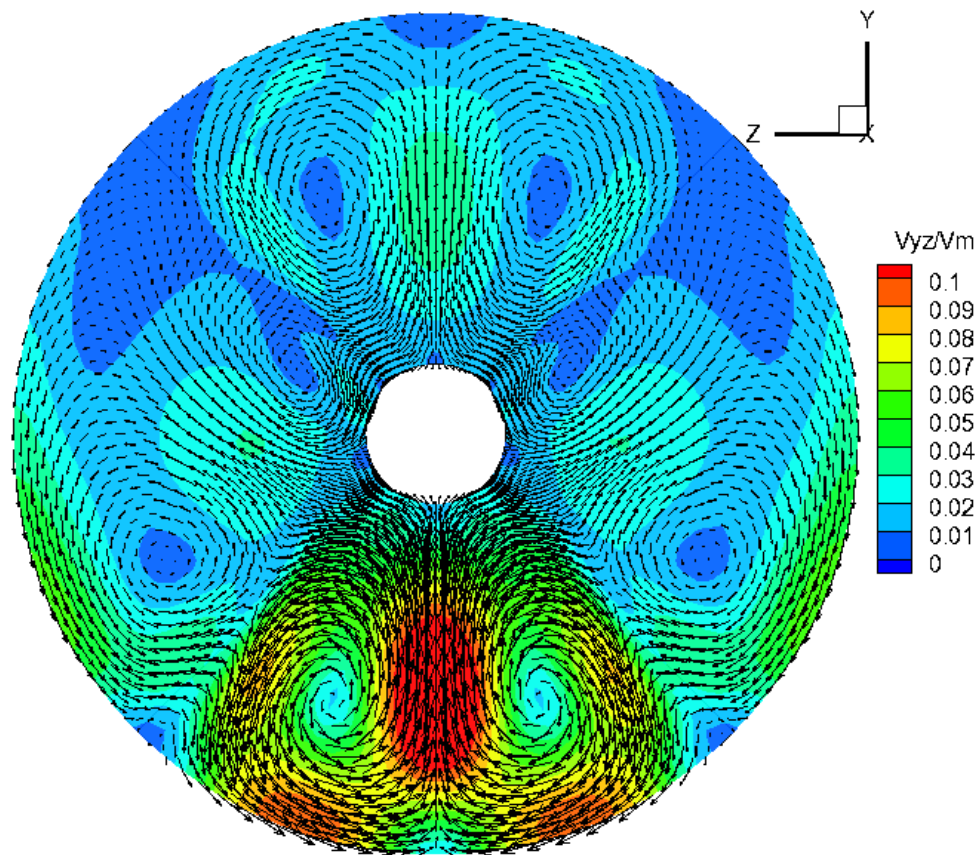
α) $x=0.34$



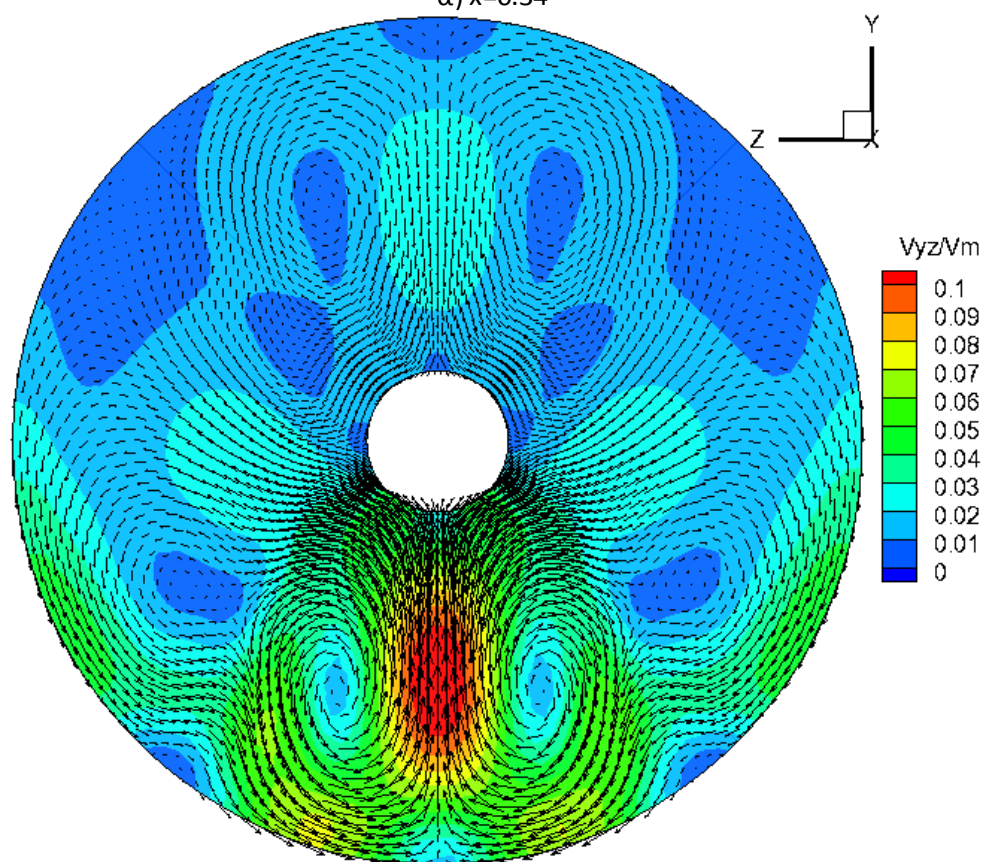
β) $x=0.45$

Σχήμα 5.29 Contours αδιαστατοποιημένων αξονικών ταχυτήτων

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες στις δύο θέσεις. Παρατηρείται ότι η περιοχή με τις μεγαλύτερες ταχύτητες και στις δύο διατομές βρίσκεται μεταξύ των δύο κάτω πτερυγίων. Αυτή η περιοχή, λόγω της γεωμετρίας, είναι μικρότερη από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Στη θέση $x=0.34$ παρατηρούνται συνολικά 6 δίνες ανά δύο συμμετρικές. Οι δύο με την μεγαλύτερη ένταση, που οφείλονται στην κλίση του αγωγού, βρίσκονται στην περιοχή των μεγαλύτερων ταχυτήτων. Οι άλλες 4, που οφείλονται στην παρουσία του βάρκρου (μεταξύ των πάνω πτερυγίων) και των πτερυγίων είναι πολύ πιο ασθενείς. Η περιοχή με τις υψηλότερες ταχύτητες είναι μεταξύ των δύο κάτω δινών ενώ στις δύο άλλες κοντά στα εσωτερικά τοιχώματα κάτω από τις δίνες οι ταχύτητες είναι μικρότερες από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.1543 m/s και



α) $x=0.34$

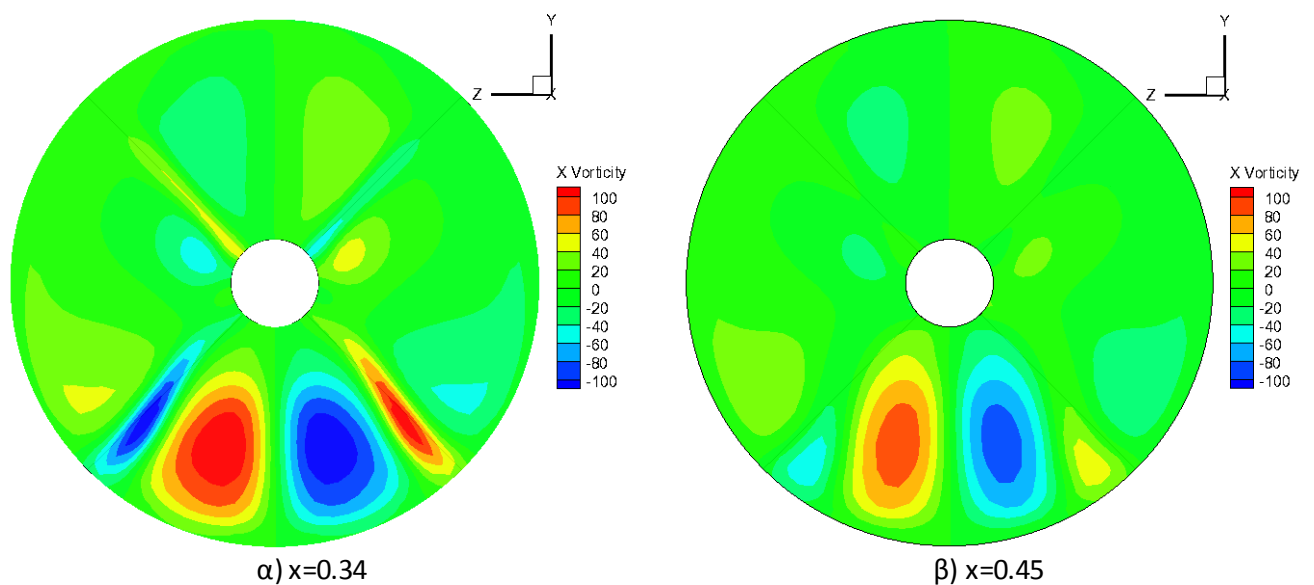


β) $x=0.45$

Σχήμα 5.30 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

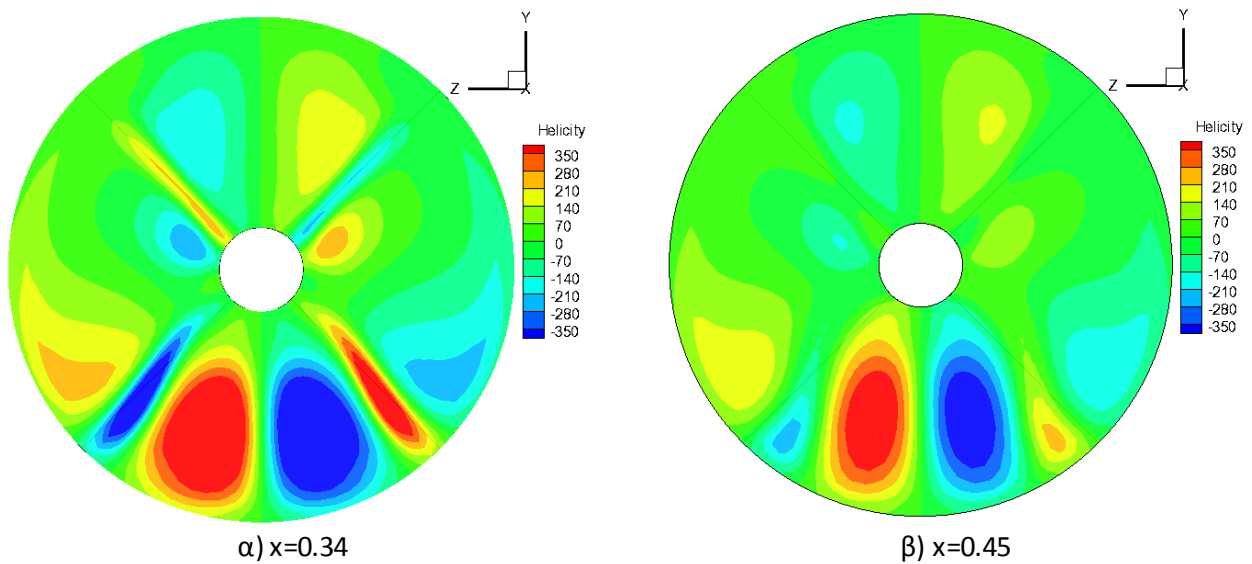
αδιαστατοποιημένη 0.0300. Αυτά τα αποτελέσματα είναι αρκετά μικρότερα από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις. Στη θέση $x=0.45$ οι δύο κύριες δίνες στην περιοχή μεταξύ των πτερυγίων συνεχίζουν να υπάρχουν ενώ οι άλλες έχουν εξασθενήσει σημαντικά. Η περιοχή με τις υψηλότερες ταχύτητες είναι αυτή μεταξύ των δύο δινών και δεν παρατηρούνται άλλες. Η μέση εφαπτομενική ταχύτητα εδώ υπολογίστηκε 0.1292 m/s και αδιαστατοποιημένη 0.0251. Οι τιμές αυτές και στις δύο διατομές ήταν σημαντικά μικρότερες από τις προηγούμενες περιπτώσεις γεγονός που δείχνει ότι αυτή η γεωμετρία είναι αποτελεσματικότερη στη μείωση των δευτερευουσών ροών.

Τα αποτελέσματα για την στροβιλότητα παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Στη θέση $x=0.34$ οι περιοχές με τη μεγαλύτερη στροβιλότητα είναι οι δύο στις θέσεις των δύο κύριων δινών και δύο ακόμα κοντά στα δύο κάτω πτερύγια. Οι υπόλοιπες περιοχές παρουσιάζουν χαμηλή στροβιλότητα. Η μέγιστη στροβιλότητα υπολογίστηκε και σε αυτήν την περίπτωση 115 s^{-1} όπως και σε όλες τις προηγούμενες. Στη θέση $x=0.45$ η στροβιλότητα έχει μειωθεί σε μεγάλο βαθμό. Οι περιοχές με τις μεγαλύτερες τιμές είναι και εδώ αυτές των κύριων δινών ενώ στις υπόλοιπες περιοχές είναι κοντά στο μηδέν. Γενικά, παρατηρείται ότι και στις δύο θέσεις οι περιοχές με την υψηλότερη στροβιλότητα είναι μικρότερες από αυτές των προηγούμενων διατάξεων.



Σχήμα 5.31 Contours στροβιλότητας

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα contours της ελικότητας στο σχήμα που ακολουθεί. Οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι αντίστοιχες με αυτές για την στροβιλότητα.

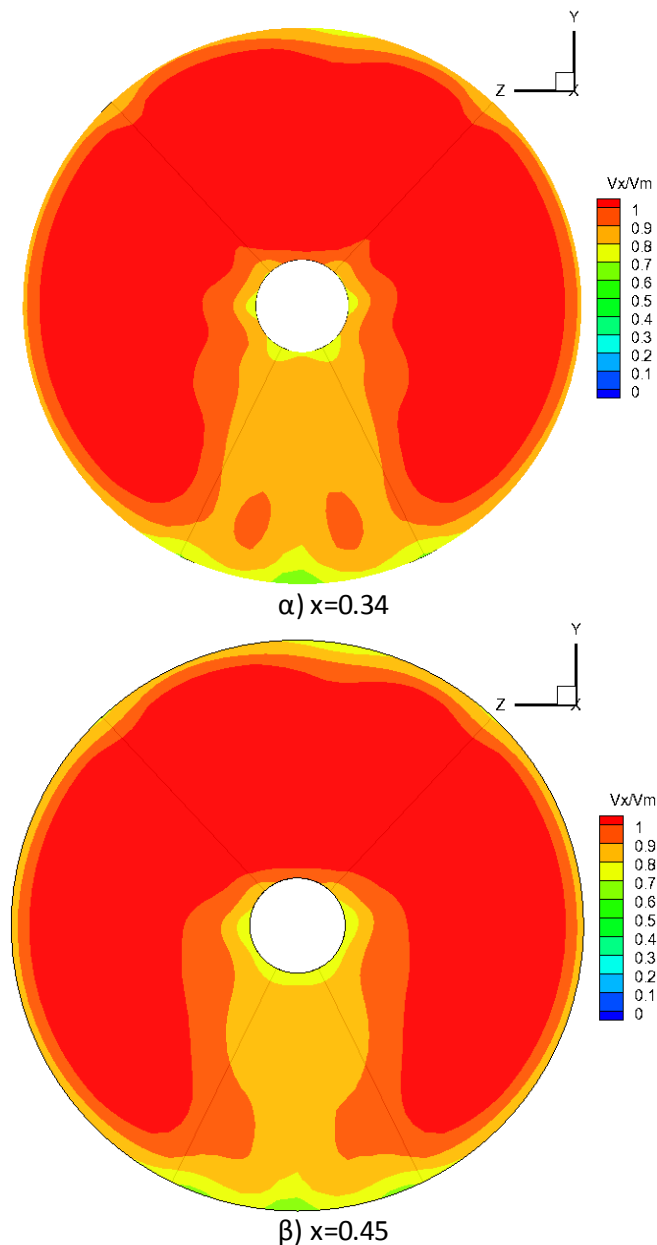


Σχήμα 5.32 Contours ελικότητας

Πτερύγια τοποθετημένα μη συμμετρικά

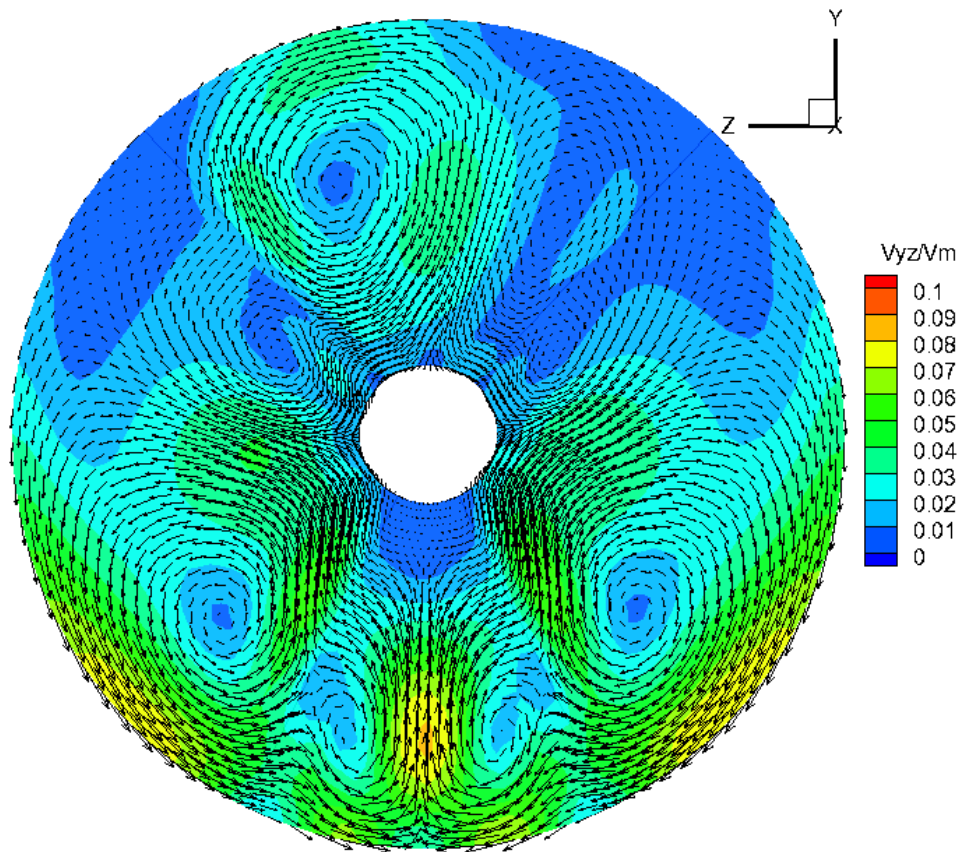
Σε αυτήν τη διάταξη τα πτερύγια έχουν τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπίπτουν με τα κέντρα των κύριων δινών, στη μέση θέση των πτερυγίων, όπως αυτά υπολογίστηκαν στην περίπτωση χωρίς πτερύγια. Η επιλογή αυτή έγινε με στόχο την περαιτέρω μείωση των δευτερευουσών ροών στον αγωγό. Η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 4949 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 4076 Pa, σχεδόν ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες. Παρατηρείται ότι η περιοχή των χαμηλότερων ταχυτήτων είναι και εδώ μεταξύ των κάτω πτερυγίων. Αυτή η περιοχή είναι μικρότερη από τις προηγούμενες αφού τα κάτω πτερύγια είναι τοποθετημένα με γωνία 26° ως προς τον άξονα συμμετρίας. Στη θέση $x=0.45$ παρατηρείται ότι η περιοχή με τις χαμηλότερες ταχύτητες δεν έχει επιταχυνθεί όπως στα προηγούμενα αποτελέσματα αλλά αντίθετα οι ταχύτητες στον πυρήνα της παρουσιάζονται μειωμένες. Στη θέση $x=0.34$ η τυπική απόκλιση των αξονικών ταχυτήτων υπολογίστηκε 0.5290 m/s ενώ στην έξοδο 0.5460 m/s , μεγαλύτερες από την προηγούμενη περίπτωση.

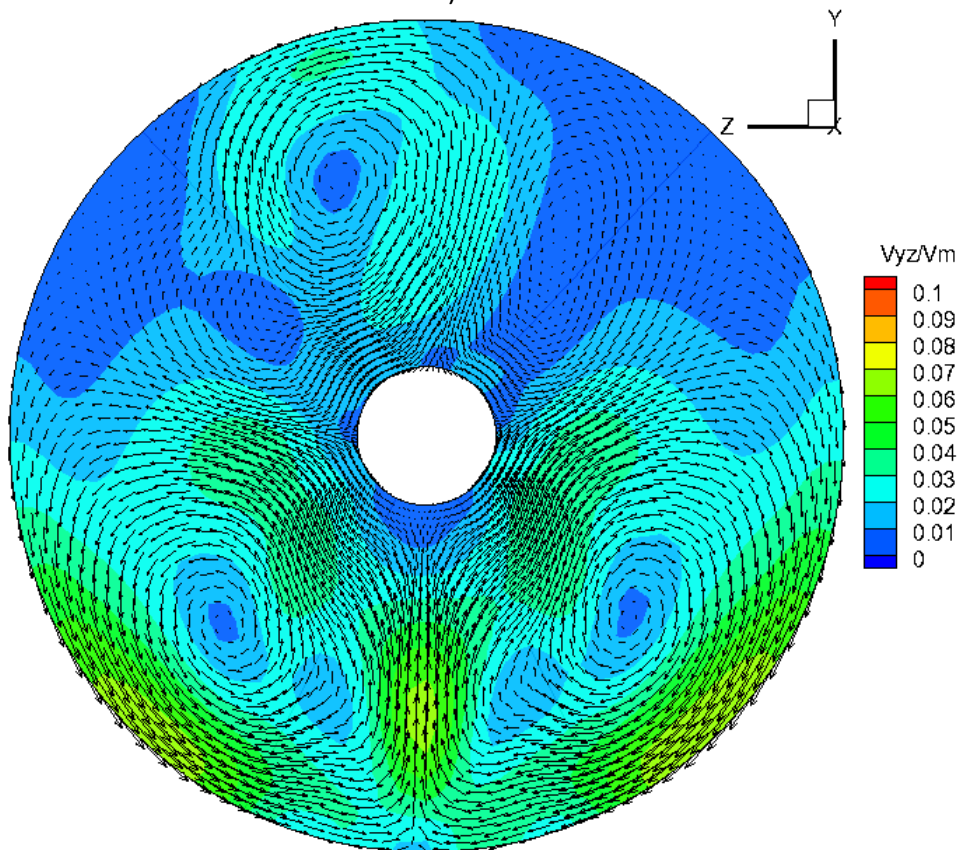


Σχήμα 5.33 Contours αδιαστατοποιημένων αξονικών ταχυτήτων

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες. Οι ταχύτητες και στις διατομές είναι εμφανώς μικρότερες από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Στη θέση $x=0.34$ η μέγιστη εφαπτομενική ταχύτητα που υπολογίστηκε ήταν 0.0860 της κύριας, αρκετά μικρότερη από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Οι δίνες που παρατηρούνται έχουν διαφορετική τοπολογία από τις προηγούμενες περιπτώσεις ενώ έχουν και μικρότερη ένταση. Στο πάνω τμήμα του αγωγού σχηματίζεται μία μοναδική δίνη ανάμεσα στα πτερύγια με ωρολογιακή φορά λίγο αριστερότερα από τον άξονα συμμετρίας. Στο κάτω τμήμα εμφανίζονται 4 δίνες ανά δύο συμμετρικές εκατέρωθεν των επιφανειών των πτερυγίων. Οι υψηλότερες ταχύτητες εμφανίζονται κοντά στα εσωτερικά τοιχώματα του αγωγού με μικρότερο μέτρο από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Η μέση εφαπτομενική ταχύτητα εδώ υπολογίστηκε 0.1165 m/s



α) $x=0.34$

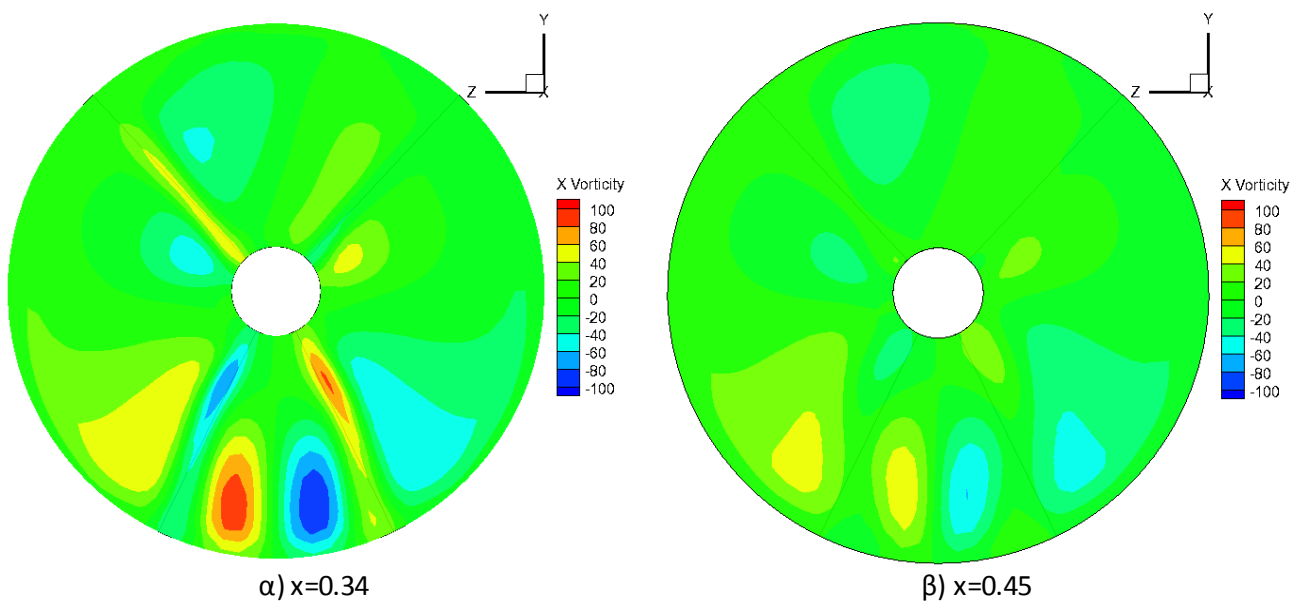


β) $x=0.45$

Σχήμα 5.34 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

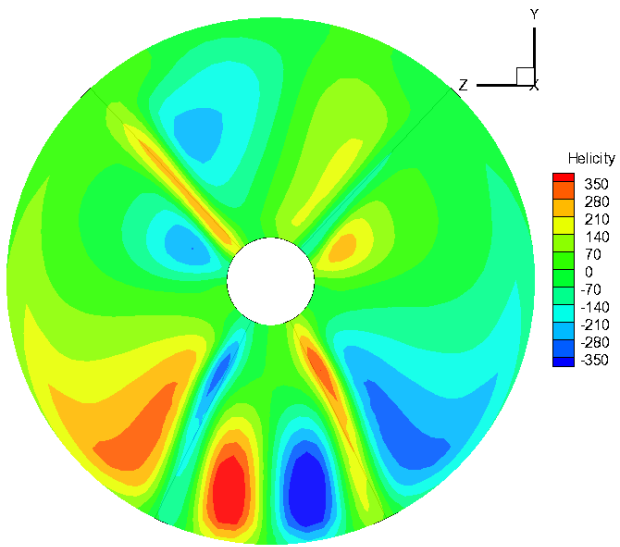
και αδιαστατοποιημένη 0.0227. Αυτές οι τιμές είναι οι απολύτως μικρότερες που υπολογίστηκαν για τις περιπτώσεις των κοντών πτερυγίων. Στη θέση $x=0.45$ οι ταχύτητες έχουν μειωθεί περαιτέρω με την μέγιστη εφαπτομενική ταχύτητα να είναι 0.0626. Σχηματίζονται τρεις δίνες με την πάνω να είναι σε παρόμοια θέση με την προηγούμενη διατομή και τις δύο συμμετρικές κάτω να βρίσκονται στην εξωτερική πλευρά των δύο πτερυγίων. Η μέση εφαπτομενική ταχύτητα, εδώ, υπολογίστηκε 0.1165 m/s και αδιαστατοποιημένη 0.022. Οι τιμές είναι και εδώ οι απολύτως μικρότερες μέχρι τώρα. Αυτή η γεωμετρία ήταν η αποδοτικότερη από την άποψη της μείωσης των εφαπτομενικών ταχυτήτων σε σχέση με αυτές που εξετάστηκαν για τα κοντά πτερύγια.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την στροβιλότητα. Παρατηρείται ότι το μέτρο της στροβιλότητας είναι εμφανώς ελαττωμένο στις δύο διατομές σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Η μέγιστη απόλυτη τιμή υπολογίστηκε 96 s^{-1} στη θέση $x=0.34$ και είναι η μόνη περίπτωση μέχρι τώρα που αυτή η τιμή ήταν μικρότερη από 115 s^{-1} που υπολογίστηκε σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις. Στην ίδια θέση οι περιοχές με την μεγαλύτερη στροβιλότητα είναι αυτές των δινών καθώς και δύο αρκετά μικρότερες κοντά στα τοιχώματα των κάτω πτερυγίων προς το βάκτρο οι οποίες δεν εμφανίζονται στην επόμενη. Στην έξοδο η στροβιλότητα είναι πολύ μικρή με τις μεγαλύτερες τιμές (της τάξης των 50 s^{-1}) να εμφανίζονται στις περιοχές των δύο κάτω δινών.

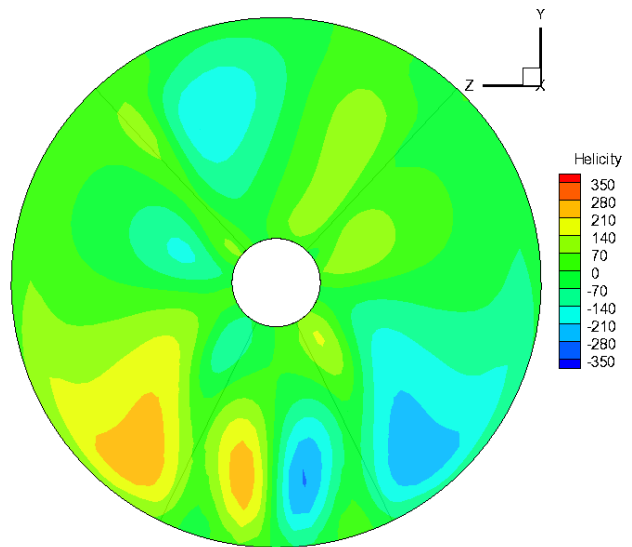


Σχήμα 5.35 Contours στροβιλότητας

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την ελικότητα στις δύο διατομές. Οι τιμές της είναι εμφανώς ελαττωμένες παντού σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Οι περιοχές με μεγάλες τιμές είναι αντίστοιχες με αυτές της στροβιλότητας.



α) $\alpha=0.34$



β) $\alpha=0.45$

Σχήμα 5.36 Contours ελικότητας

5.3 Μακριά πτερύγια

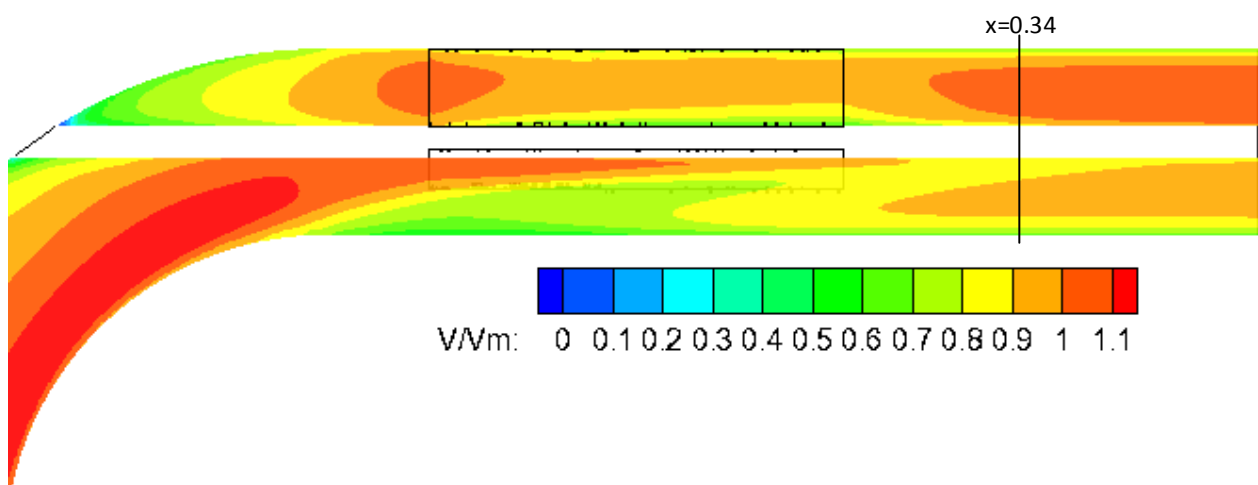
Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τις γεωμετρίες με τα μακρύτερα πτερύγια (διπλάσιο μήκος από τα προηγούμενα). Οι συνολικά 6 τέτοιες γεωμετρίες που εξετάστηκαν ομαδοποιήθηκαν με βάση το πλήθος των πτερυγίων (3 και 4) στις επόμενες δύο υποενότητες.

5.3.1 Διατάξεις με τρία πτερύγια

Πτερύγια με γωνία 0°

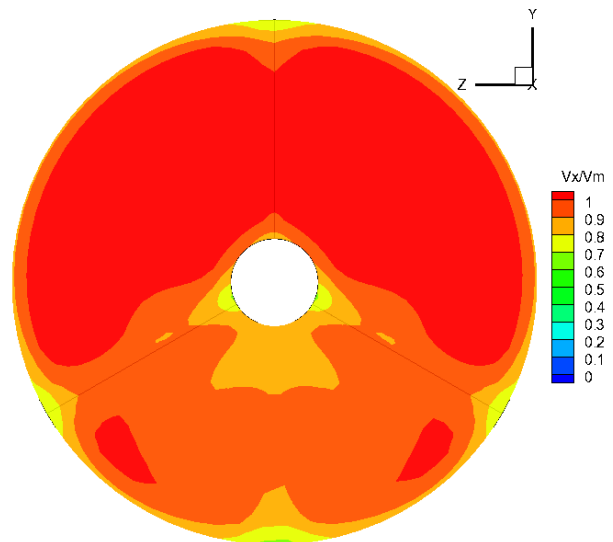
Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 5084 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 4224 Pa. Αυτές είναι λίγο μεγαλύτερες από τις περιπτώσεις για τα κοντά πτερύγια. Όπως και προηγουμένως οι τιμές όλων των περιπτώσεων με τρία μακριά πτερύγια είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι ταχύτητες αδιαστατοποιημένες στο επίπεδο $z=0$ για τα τμήματα της γωνίας και της εξόδου.

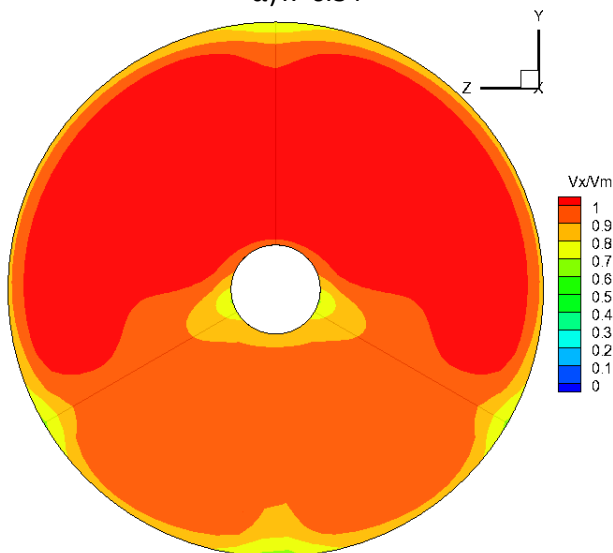


Σχήμα 5.37 Contours αδιαστατοποιημένων ταχυτήτων στο επίπεδο $z=0$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες. Οι παρατηρήσεις για την κατανομή των ταχυτήτων στις δύο διατομές είναι αντίστοιχες με αυτές για την ίδια γεωμετρία με τα κοντά πτερύγια (βλ. σχ. 5.12). Στη θέση $x=0.34$ η τυπική απόκλιση των αξονικών ταχυτήτων υπολογίστηκε 0.4869 m/s ενώ στην έξοδο 0.4958 m/s. Ο τιμές αυτές είναι λίγο μικρότερες (διαφέρουν στο τρίτο δεκαδικό) από αυτές για τα κοντά πτερύγια. Ακόμη, είναι οι μικρότερες τιμές που υπολογίστηκαν σε όλες τις περιπτώσεις με τα μακριά πτερύγια.



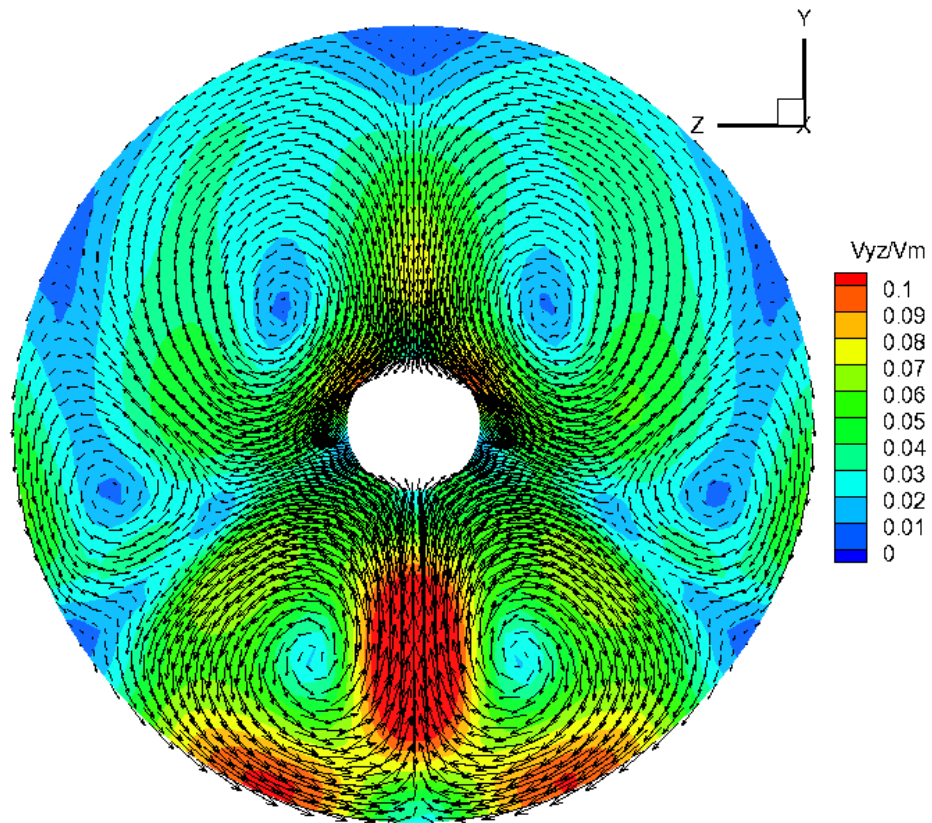
α) $x=0.34$



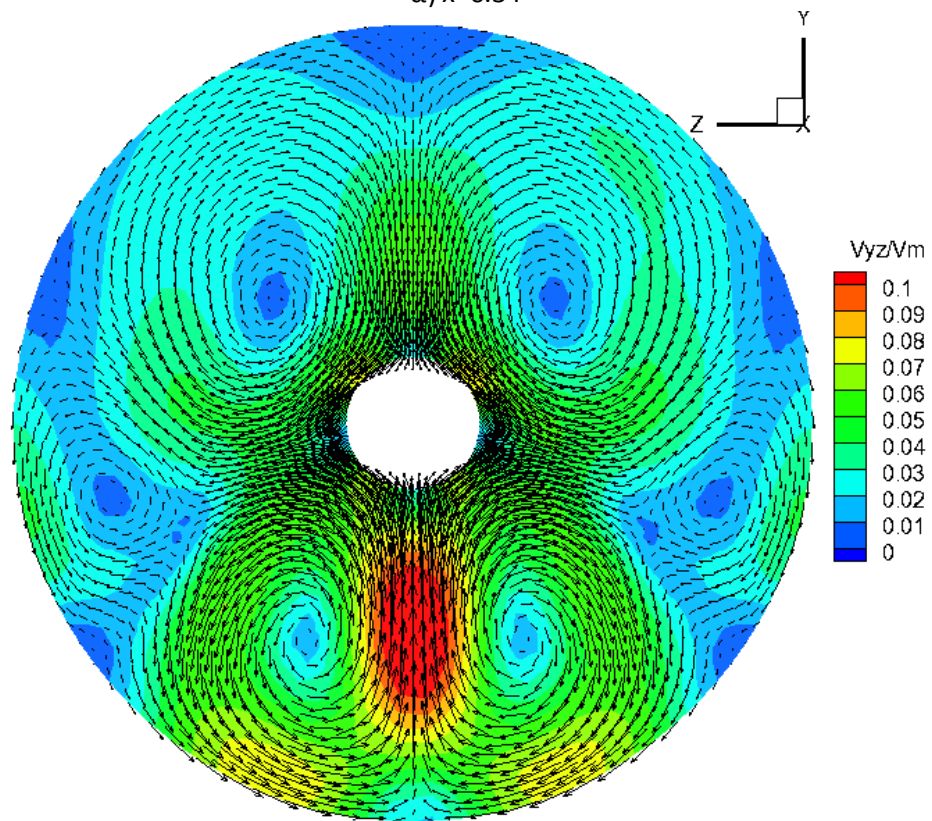
β) $x=0.45$

Σχήμα 5.38 Contours αδιαστατοποιημένων αξονικών ταχυτήτων

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα contours και τα διανύσματα των εφαπτομενικών ταχυτήτων στις δύο διατομές. Οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν για τις ταχύτητες είναι και εδώ αντίστοιχες με αυτές της ίδιας διάταξης που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα (βλ. σχ. 5.13). Στη θέση $x=0.34$ η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.2159 m/s και αδιαστατοποιημένη 0.0420 . Στην έξοδο τα μεγέθη αυτά υπολογίστηκαν 0.1862 m/s και 0.0362 αντίστοιχα. Οι παραπάνω τιμές είναι πολύ κοντά σε αυτές της αντίστοιχης περίπτωσης με τα κοντά πτερύγια.



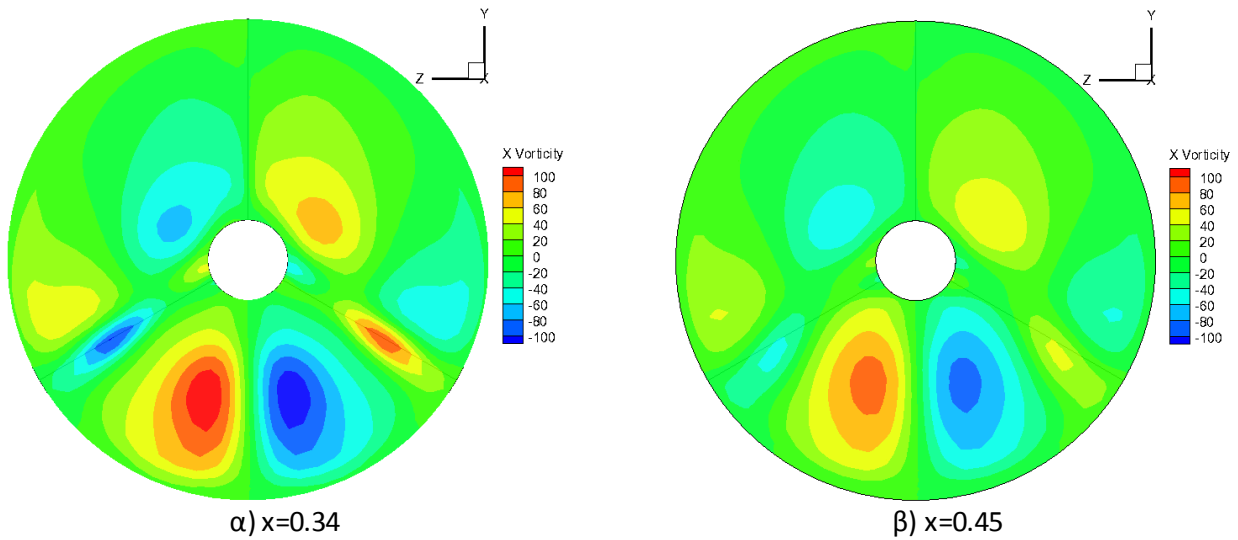
α) $x=0.34$



β) $x=0.45$

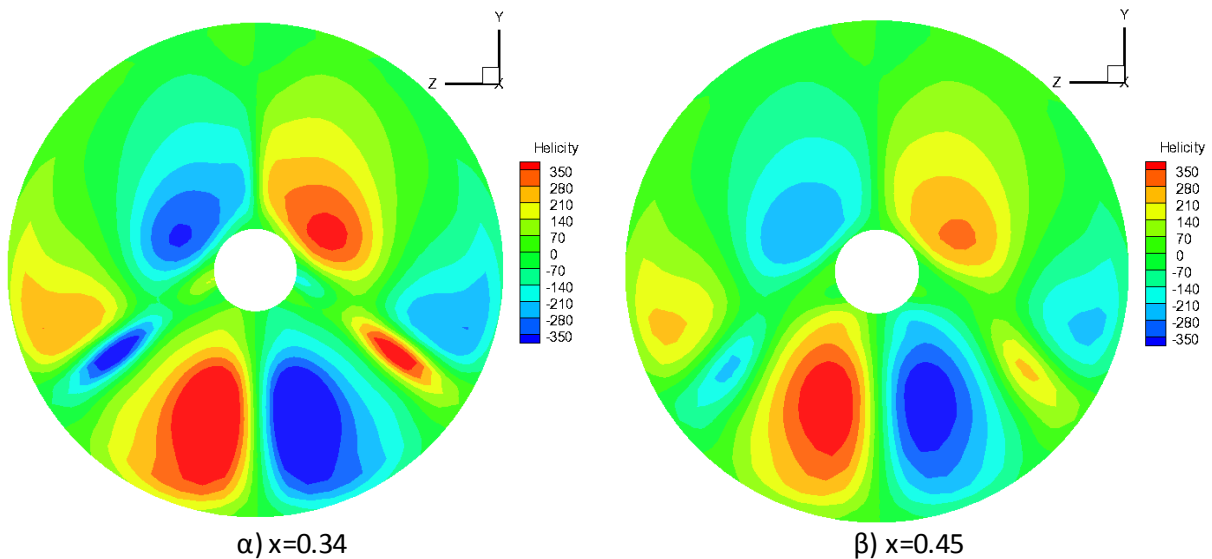
Σχήμα 5.39 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

Τα αποτελέσματα για την στροβιλότητα παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνου είναι και εδώ ίδιες με αυτές της αντίστοιχης διάταξης στην προηγούμενη ενότητα (βλ. σχ. 5.14). Σημειώνεται ότι και σε αυτήν την περίπτωση η μέγιστη απόλυτη τιμή στροβιλότητας υπολογίστηκε 115 s^{-1} στη θέση $x=0.34$.



Σχήμα 5.40 Contours στροβιλότητας

Τα ίδια ισχύουν και για τα contours της ελικότητας στις δύο εξεταζόμενες διατομές που παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



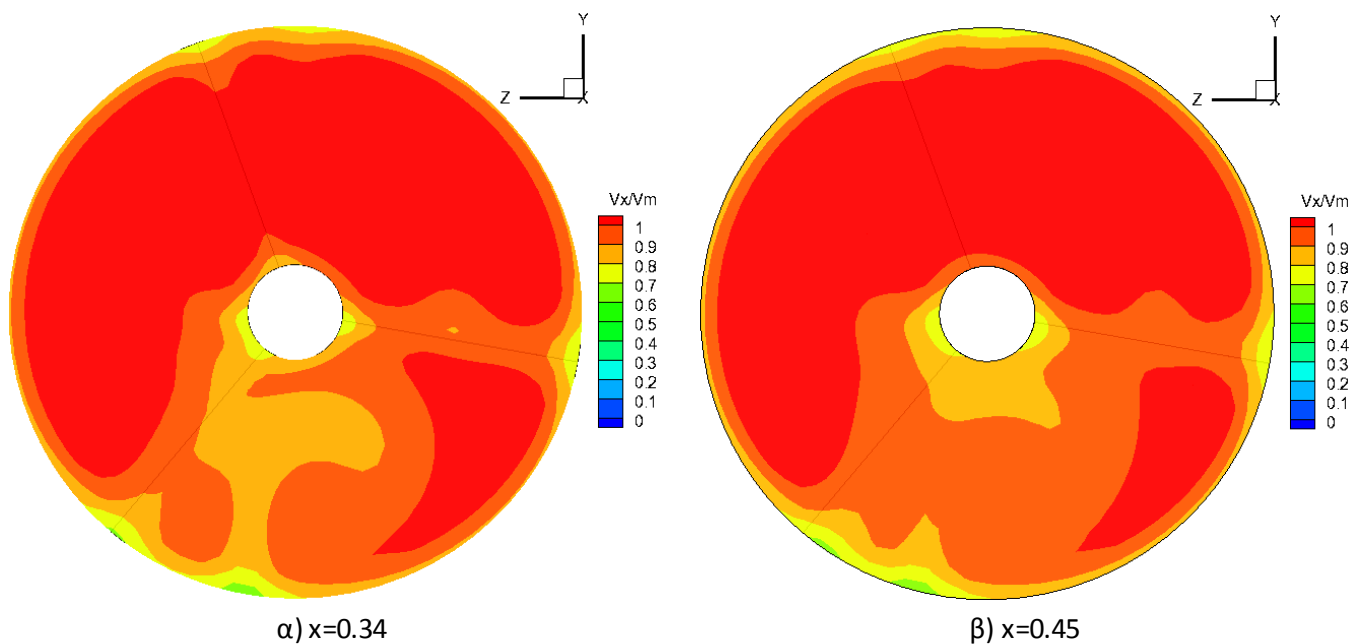
Σχήμα 5.41 Contours ελικότητας

Όπως φαίνεται από τα προηγούμενα αποτελέσματα οι απεικονίσεις των διάφορων μεγεθών στις εξεταζόμενες διατομές μεταξύ της ίδιας διάταξης με μακριά και κοντά πτερύγια διαφέρουν ελάχιστα. Αυτό ισχύει και για τις επόμενες περιπτώσεις. Συνεπώς η παρουσίαση τους θα γίνει πιο συνοπτικά με επισήμανση των διαφορών που μπορεί να υπάρχουν σε κάθε περίπτωση.

Πτερύγια με γωνία 20°

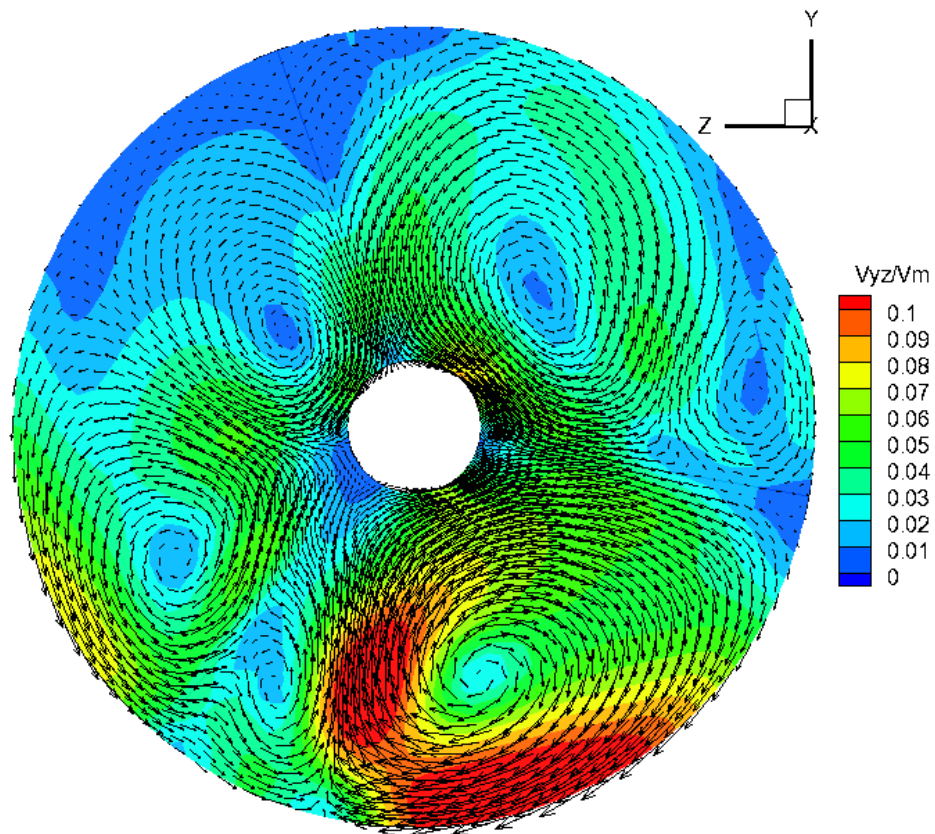
Σε αυτήν την περίπτωση, η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 5094 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 4230 Pa. Οι τιμές αυτές είναι πρακτικά ίδιες με της προηγούμενης διάταξης.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες. Η τυπική απόκλιση στην διατομή $x=0.34$ υπολογίστηκε 0.4970 m/s και στην έξοδο 0.5073 m/s, λίγο μεγαλύτερες από την διάταξη με τα κοντά πτερύγια, με την οποία.

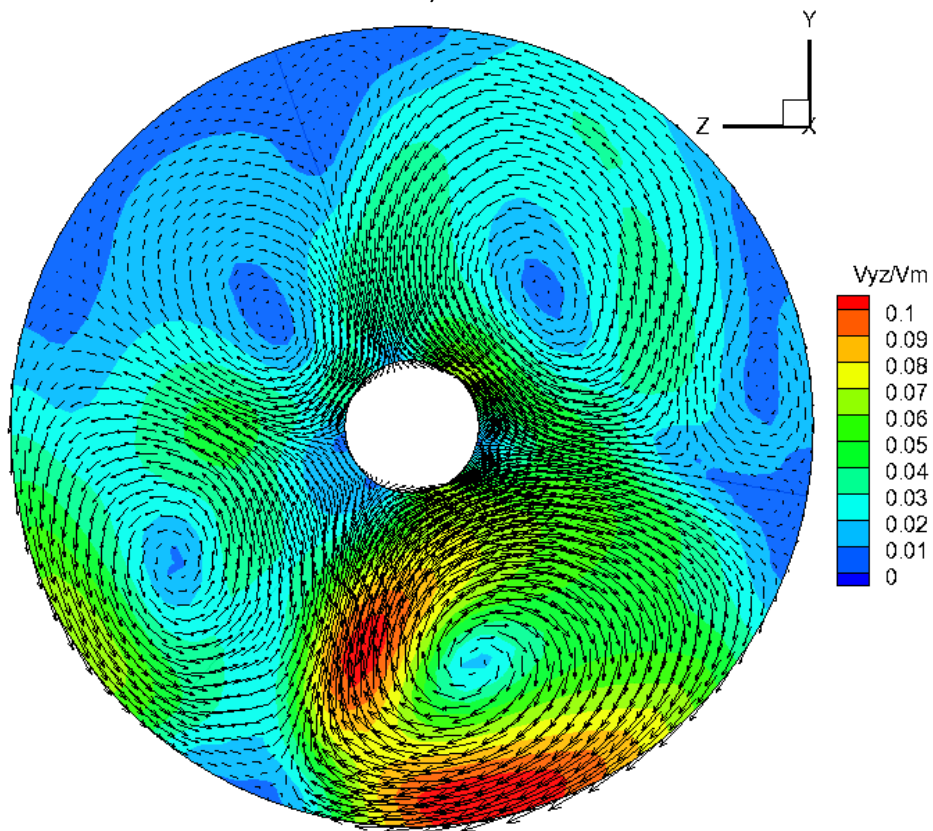


Σχήμα 5.42 Contours αδιαστατοποιημένων αξονικών ταχυτήτων

Στο επόμενο σχήμα παρατίθενται τα αποτελέσματα για τις εφαπτομενικές ταχύτητες. Η σημαντικότερη διαφορά που παρατηρείται σε σχέση με την περίπτωση με τα κοντά πτερύγια (βλ. σχ. 5.17) είναι στη θέση $x=0.45$. Σχηματίζεται σαφώς μια δίνη αριστερότερα από το κάτω αριστερό πτερύγιο όπου εμφανίζεται μια περιοχή με υψηλότερες ταχύτητες από ότι προηγουμένως. Στη θέση $x=0.34$ η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.1982 m/s και αδιαστατοποιημένη 0.0386. Στην έξοδο τα μεγέθη αυτά υπολογίστηκαν 0.1743 m/s και 0.0339 αντίστοιχα. Αυτά είναι και πάλι λίγο



α) $x=0.34$

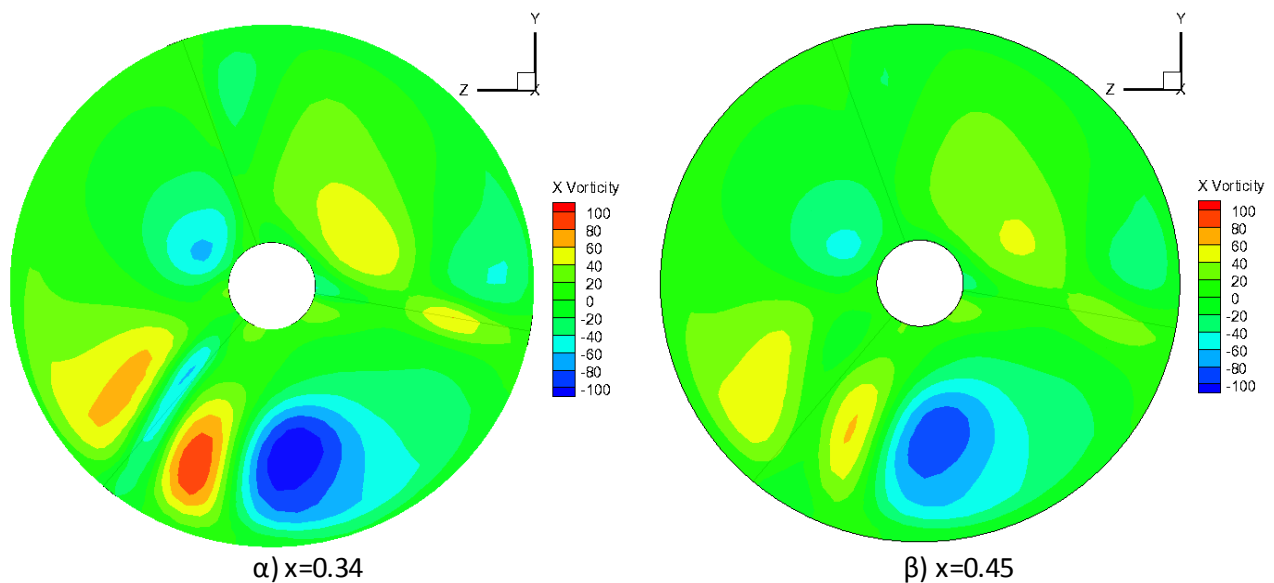


β) $x=0.45$

Σχήμα 5.43 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

μεγαλύτερα αλλά πολύ κοντά στα αποτελέσματα της προηγούμενης ενότητας. Επίσης, όπως και στα κοντά πτερύγια, οι τιμές αυτές είναι οι μικρότερες μεταξύ των περιπτώσεων με τα τρία πτερύγια.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την στροβιλότητα (σχ. 5.44). Η σημαντικότερη διαφορά (βλ. σχ. 5.18), είναι η περιοχή αυξημένης στροβιλότητας στην περιοχή της νέας δίνης που παρατηρήθηκε στη θέση $x=0.34$. Ακόμη, στην έξοδο η περιοχή με την αυξημένη θετική στροβιλότητα ανάμεσα στα κάτω πτερύγια είναι μικρότερη και σε έκταση και σε τιμές από την προηγούμενη διάταξη.



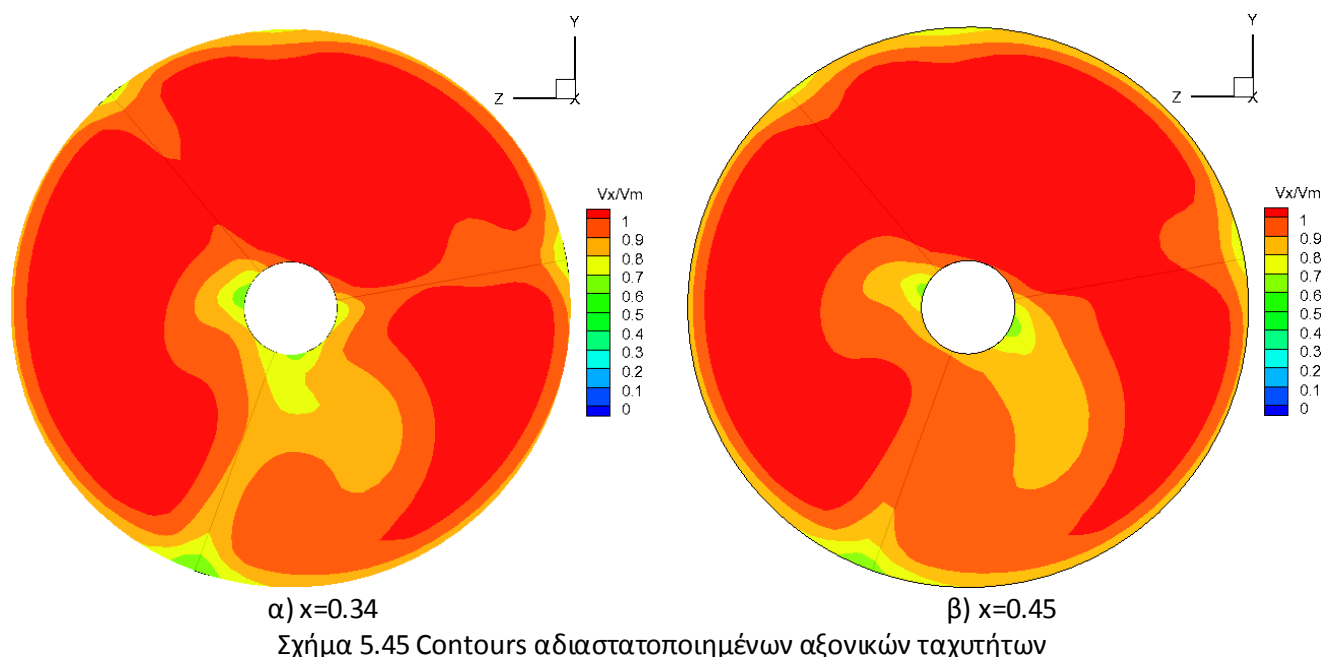
Σχήμα 5.44 Contours στροβιλότητας

Στα αποτελέσματα της ελικότητας δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική διαφοροποίηση από την αντίστοιχη γεωμετρία με τα κοντά πτερύγια (βλ. σχ. 5.19) και δεν παρουσιάζονται εδώ.

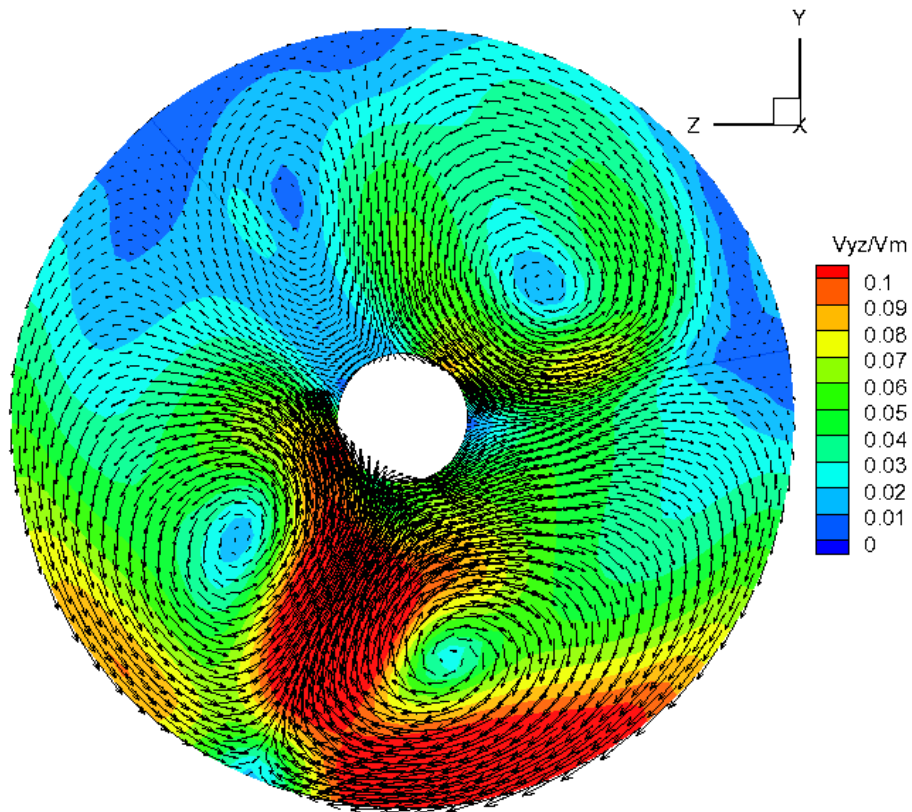
Πτερύγια με γωνία 40°

Σε αυτήν την περίπτωση, η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 5056 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 4189Pa.

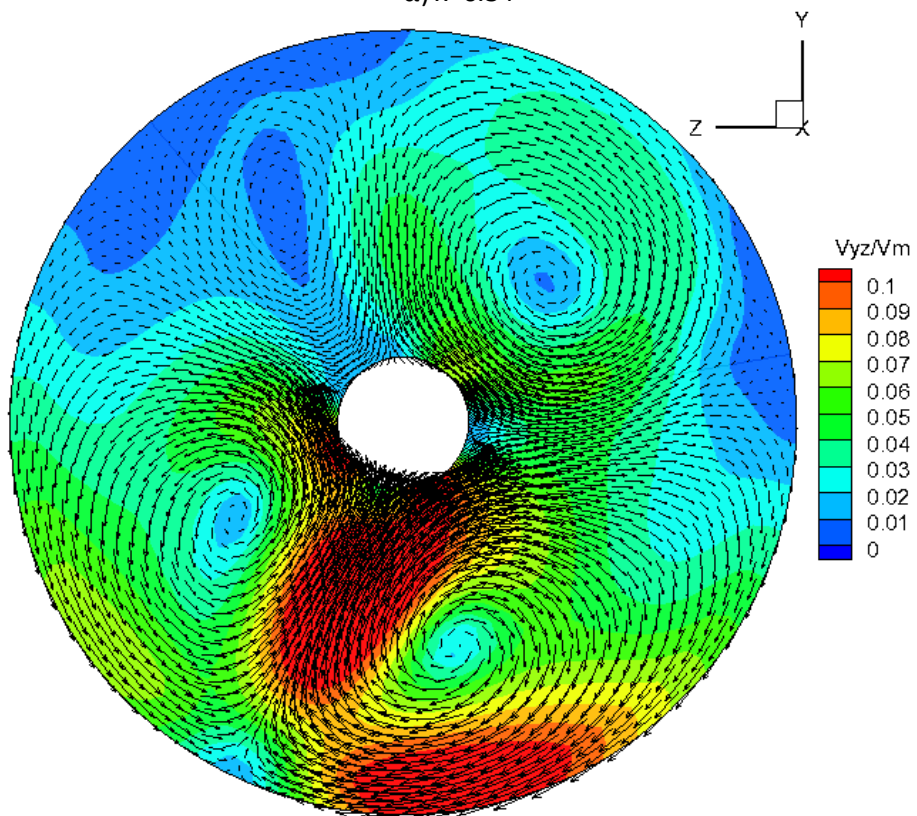
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες. Η τυπική απόκλιση στην διατομή $x=0.34$ υπολογίστηκε 0.5493 m/s και στην έξοδο 0.5000 m/s. Εδώ, οι τιμές προκύπτουν αρκετά μεγαλύτερες από την διάταξη με τα κοντά πτερύγια (βλ. σχ. 5.20).



Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες εφαιπτομενικές ταχύτητες στις δύο θέσεις. Η σημαντικότερη διαφορά που παρατηρείται και στις δύο διατομές είναι ότι η περιοχή υψηλών ταχυτήτων που στην προηγούμενη περίπτωση (βλ. σχ. 5.21) εκτεινόταν στην δεξιά πλευρά του κάτω περυγίου εδώ παρουσιάζεται εκατέρωθεν του περυγίου. Στη θέση $x=0.34$ η μέση εφαιπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.2502 m/s (αδιαστατοποιημένη 0.0487). Στην έξοδο αυτή υπολογίστηκε 0.2231 m/s (αδιαστατοποιημένη 0.0434). Οι τιμές αυτές είναι αρκετά μεγαλύτερες από την αντίστοιχη περίπτωση με τα μακριά πτερύγια. Σε αυτήν την διάταξη παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες διαφορές στη μέση ταχύτητα μεταξύ των αντίστοιχων γεωμετριών. Πιο συγκεκριμένα η μέση εφαιπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 17.4% μεγαλύτερη στη θέση $x=0.34$ και 16.9% στην έξοδο. Σημειώνεται ότι εδώ παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των δύο περιπτώσεων μήκους των πτερυγίων στα περισσότερα από τα μεγέθη που εξετάστηκαν.



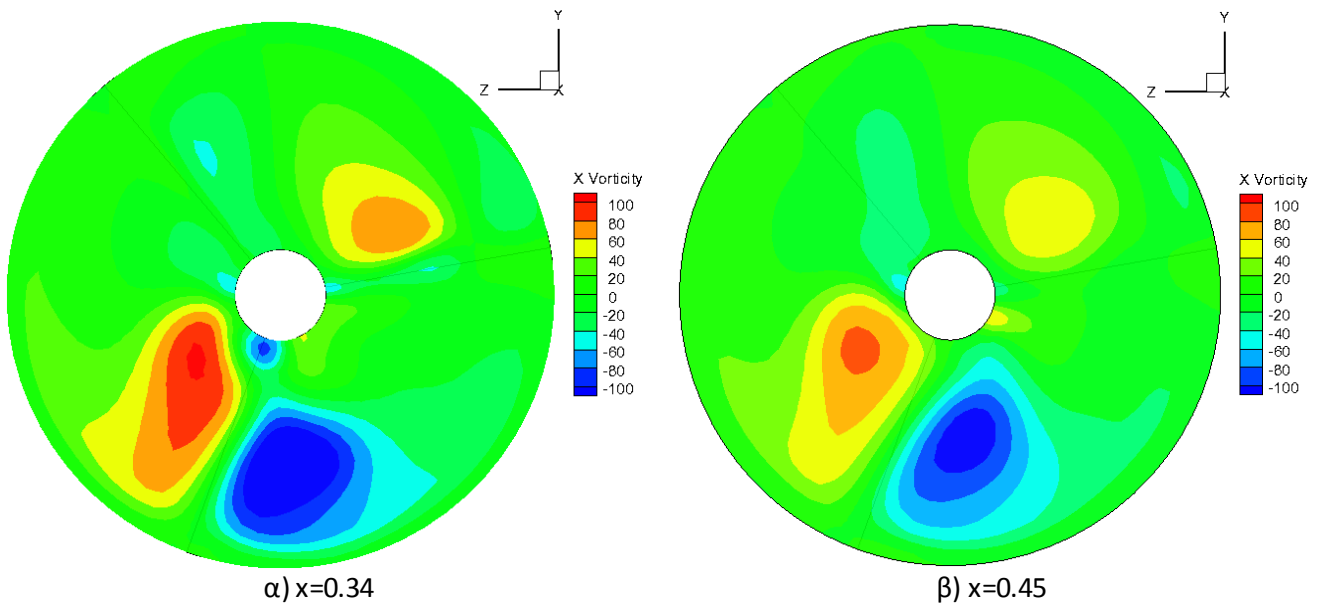
α) $x=0.34$



β) $x=0.45$

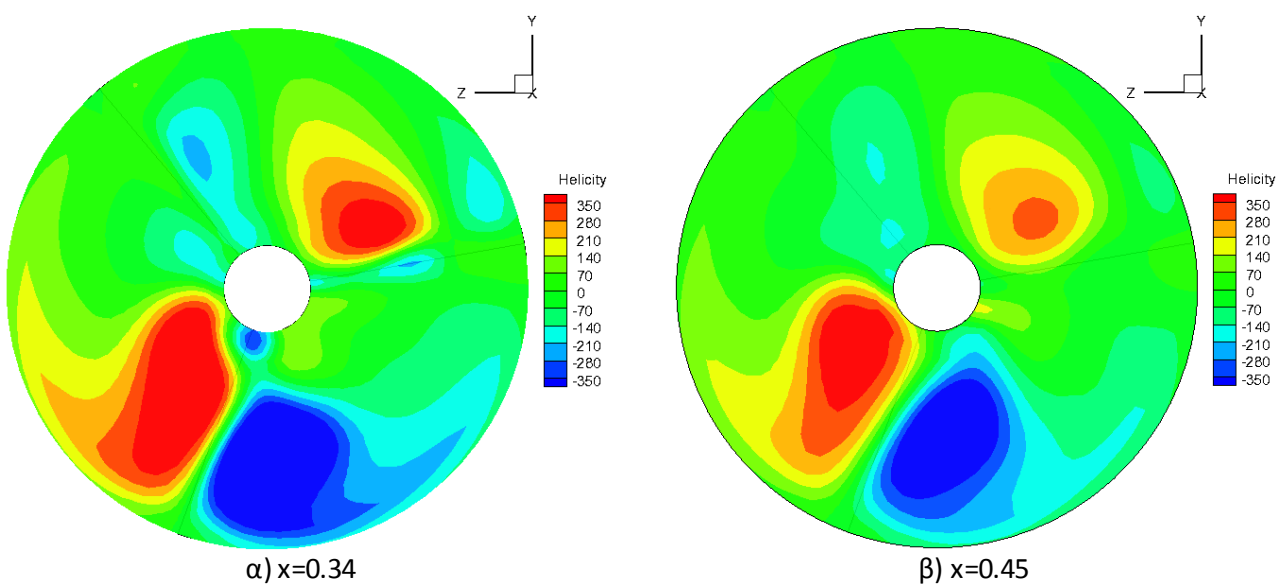
Σχήμα 5.46 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

Τα αποτελέσματα για την στροβιλότητα παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Η διαφορά με την περίπτωση με τα κοντά πτερύγια (βλ. σχ. 5.22) είναι στην περιοχή υψηλής στροβιλότητας αριστερά του κάτω πτερυγίου. Εδώ η περιοχή αυτή είναι μεγαλύτερη και περιλαμβάνει υψηλότερες τιμές στροβιλότητας.



Σχήμα 5.47 Contours στροβιλότητας

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ελικότητας. Οι περιοχές με μεγάλες τιμές ελικότητας είναι μεγαλύτερες από την προηγούμενη περίπτωση (βλ. σχ. 5.23). Η μεγαλύτερη διαφορά εντοπίζεται στην περιοχή αριστερά του κάτω πτερυγίου όπως και στην στροβιλότητα.

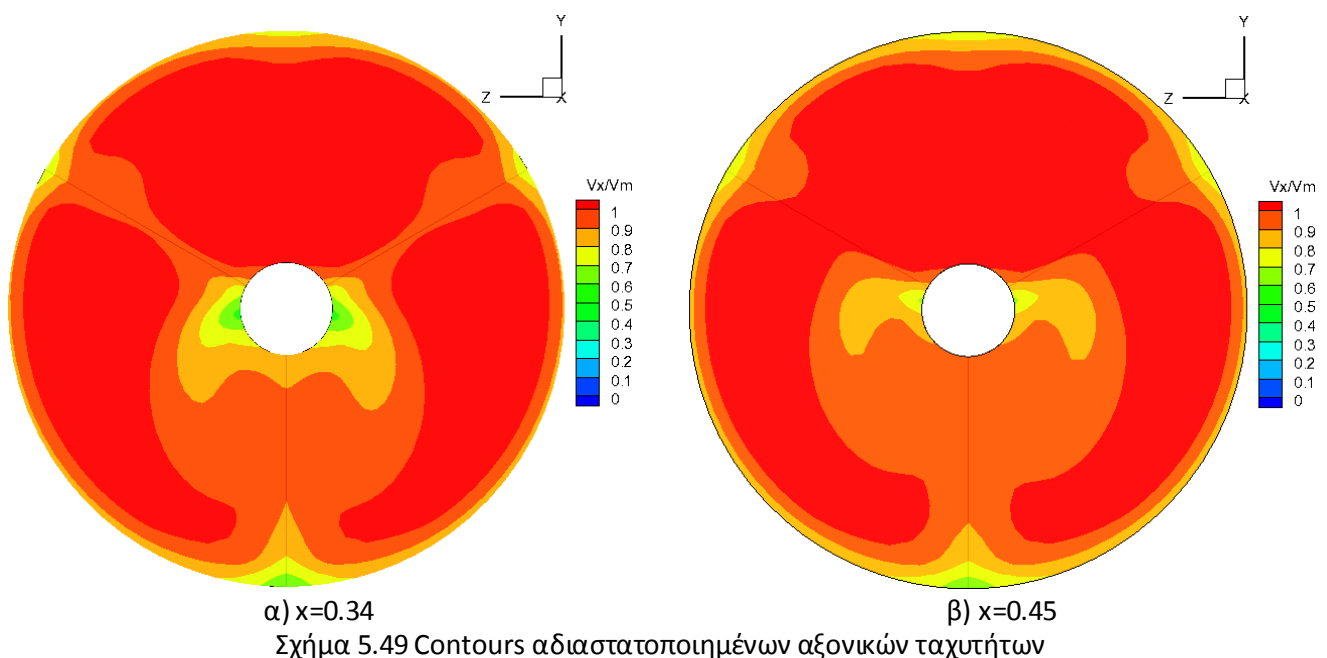


Σχήμα 5.48 Contours ελικότητας

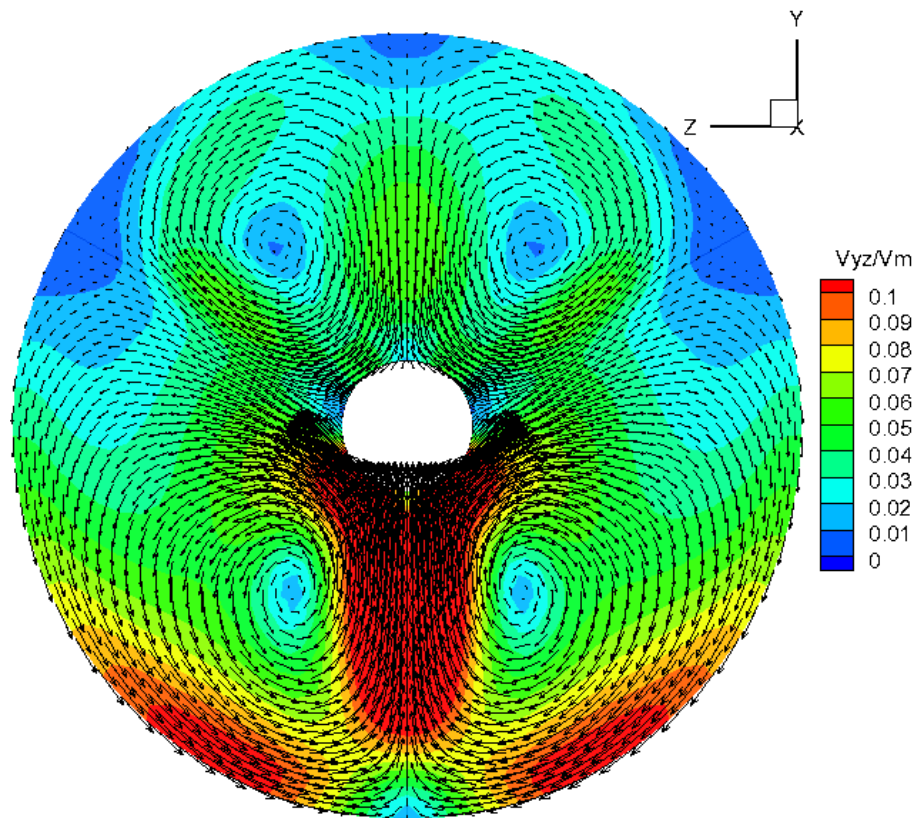
Πτερύγια με γωνία 60°

Σε αυτήν την περίπτωση, η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 5034 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 4171Pa.

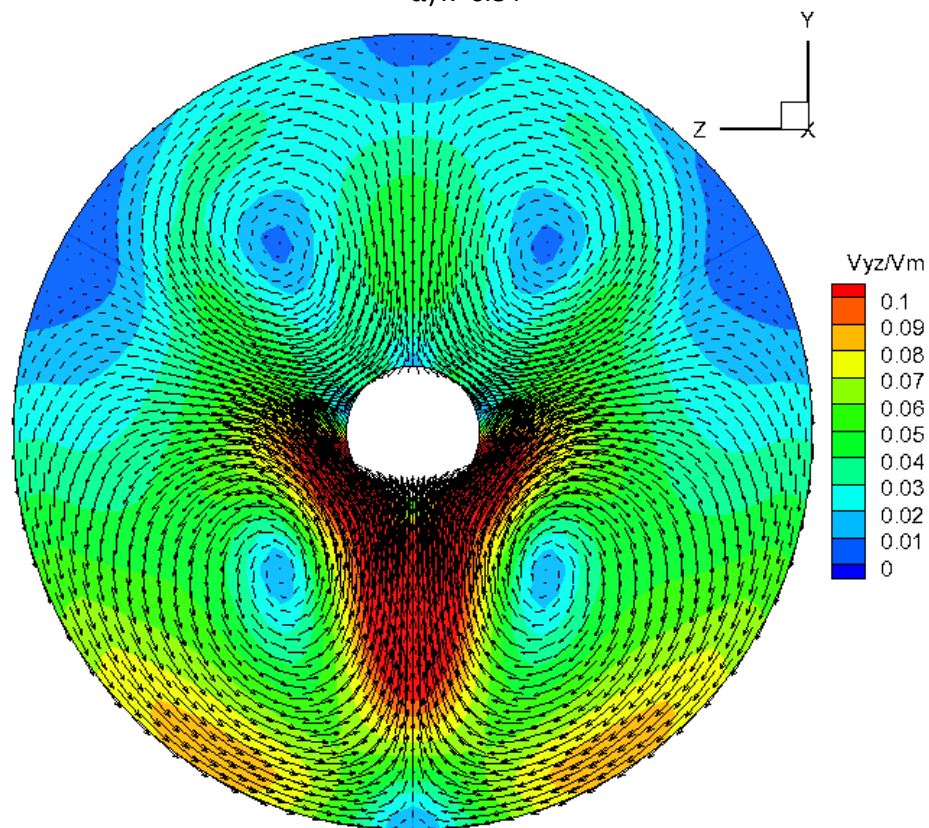
Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες. Τα αποτελέσματα είναι και εδώ αντίστοιχα με αυτά της περίπτωσης με τα κοντά πτερύγια (βλ. σχ. 5.24). Η τυπική απόκλιση στην διατομή $x=0.34$ υπολογίστηκε 0.5501 m/s και στην έξοδο 0.4611 m/s. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.2.2, σε αυτή τη διάταξη παρατηρείται πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο θέσεων που δεν δικαιολογείται και μπορεί να οφείλεται σε κάποιο σφάλμα στον υπολογισμό ή στα δεδομένα.. Στην πρώτη διατομή προκύπτει η συγκριτικά μεγαλύτερη τιμή και στην έξοδο η μικρότερη από τις γεωμετρίες με τρία μακριά πτερύγια. Το αναμενόμενο θα ήταν να είναι και στην έξοδο η συγκριτικά μεγαλύτερη τιμή, όπως συμβαίνει και με τα άλλα μεγέθη που θα παρουσιαστούν παρακάτω.



Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες (σχ. 5.50). Παρατηρείται ότι και εδώ τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά σε αυτά της περίπτωσης χωρίς πτερύγια (βλ. σχ. 5.25). Στη θέση $x=0.34$ η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.2591 m/s και αδιαστατοποιημένη 0.0504. Στην έξοδο τα μεγέθη αυτά υπολογίστηκαν 0.2311 m/s και 0.0445 αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι μεγαλύτερες από όλες τις περιπτώσεις με τα τρία μακριά πτερύγια.



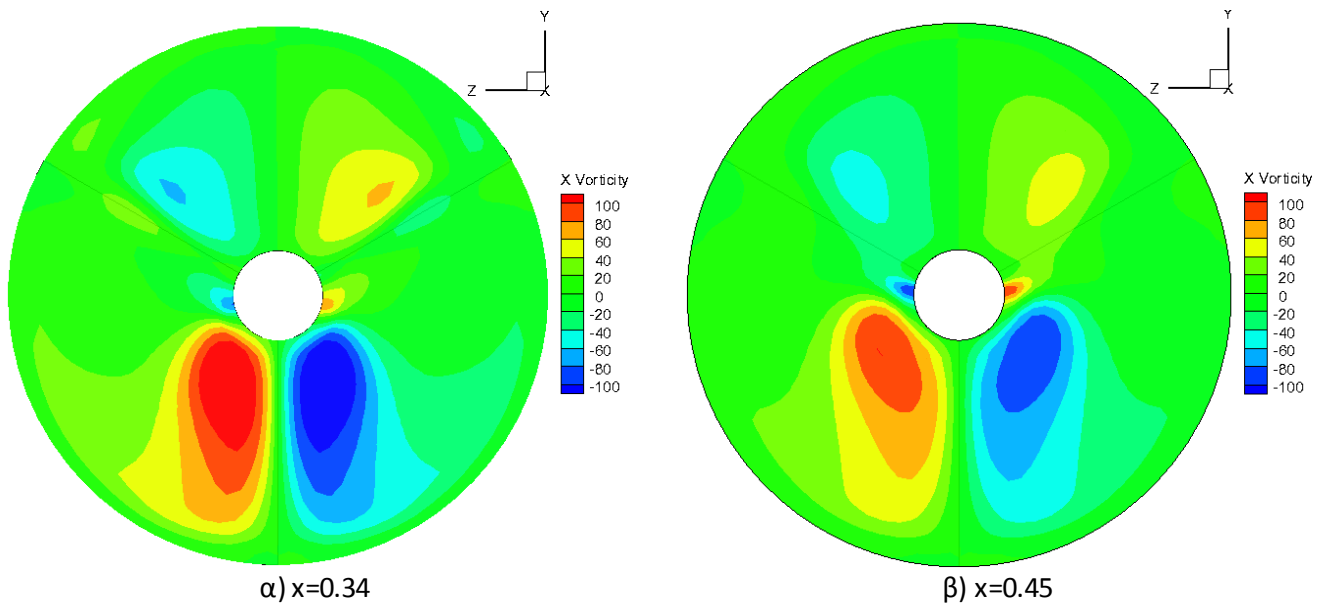
α) $x=0.34$



β) $x=0.45$

Σχήμα 5.50 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

Τα αποτελέσματα για την στροβιλότητα παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι αντίστοιχες με την περίπτωση με τα κοντά πτερύγια (βλ. σχ. 5.26). Το ίδιο ισχύει και για τα αποτελέσματα της ελικότητας τα οποία δεν παρουσιάζονται εδώ.



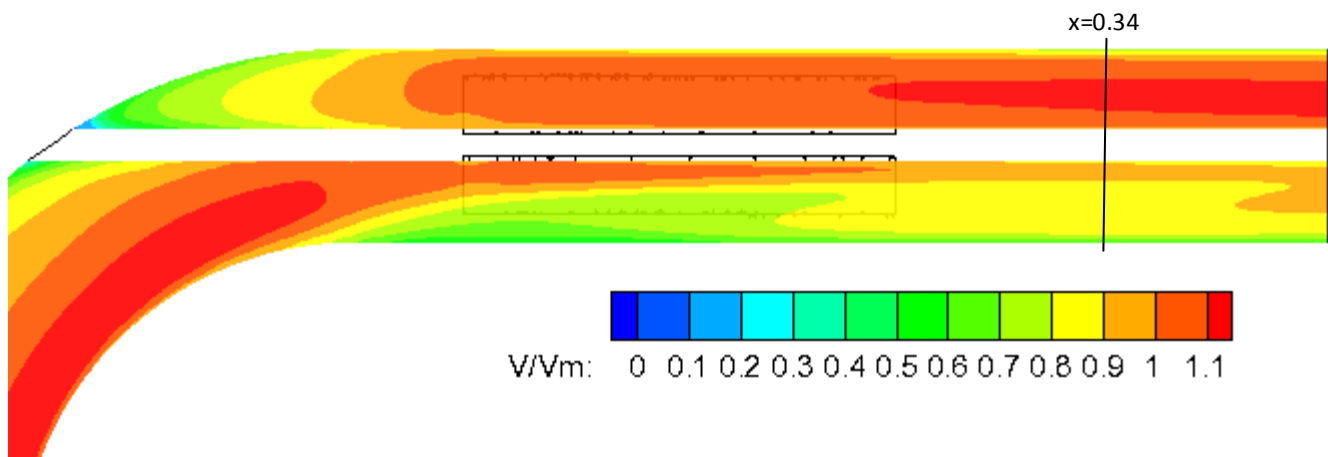
Σχήμα 5.51 Contours στροβιλότητας

5.3.2 Διατάξεις με τέσσερα πτερύγια

Συμμετρικά τοποθετημένα με γωνία 45°

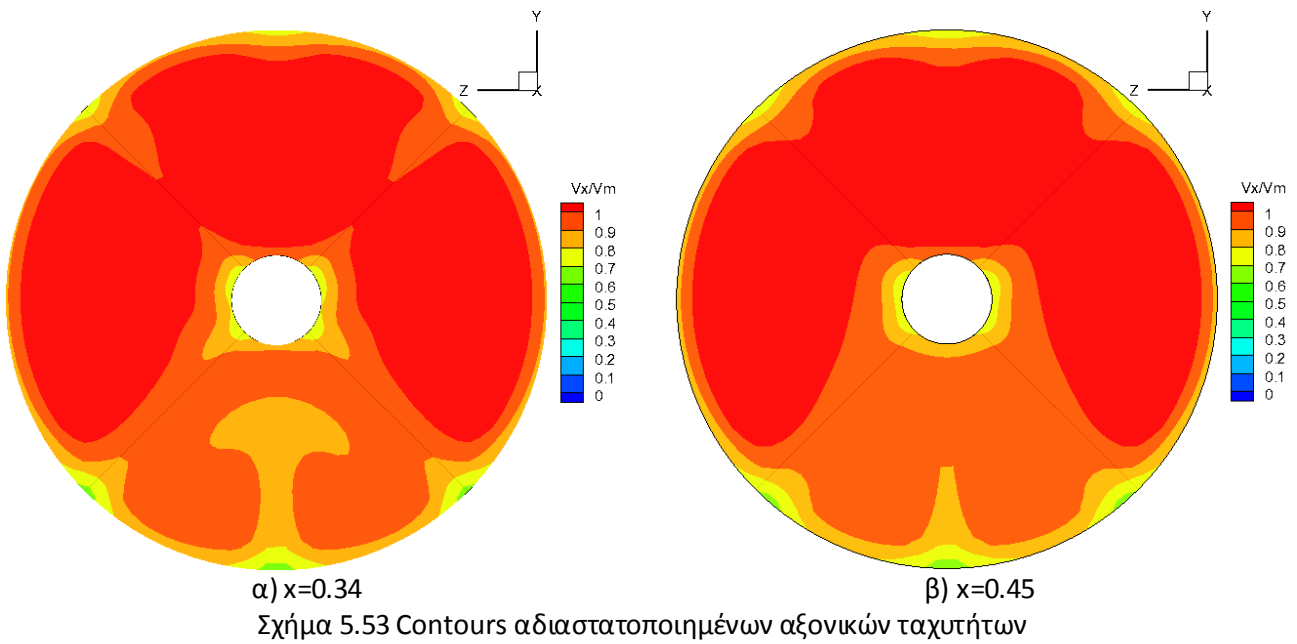
Σε αυτήν την περίπτωση η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 5248 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 4387 Pa. Όπως αναμενόταν οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες από τις προηγούμενες διατάξεις που είχαν λιγότερα πτερύγια. Επίσης, ήταν οι απολύτως μεγαλύτερες τιμές από όλες τις διατάξεις που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι ταχύτητες αδιαστατοποιημένες στο επίπεδο $z=0$ για τα τμήματα της γωνίας και της εξόδου.

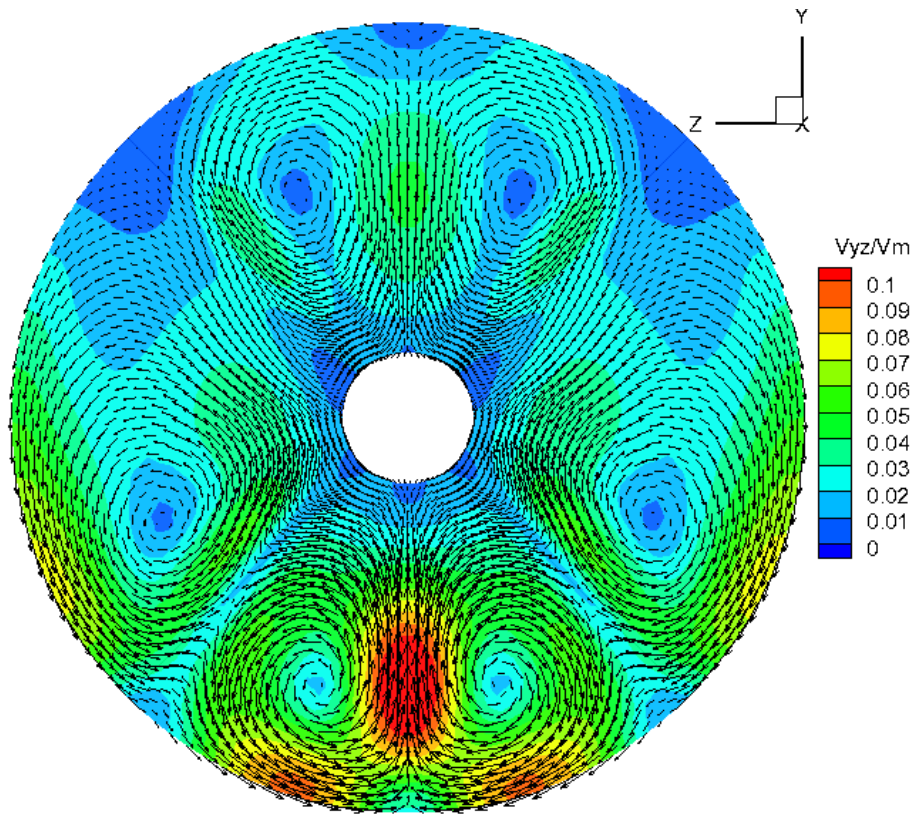


Σχήμα 5.52 Contours αδιαστατοποιημένων ταχυτήτων στο επίπεδο $z=0$

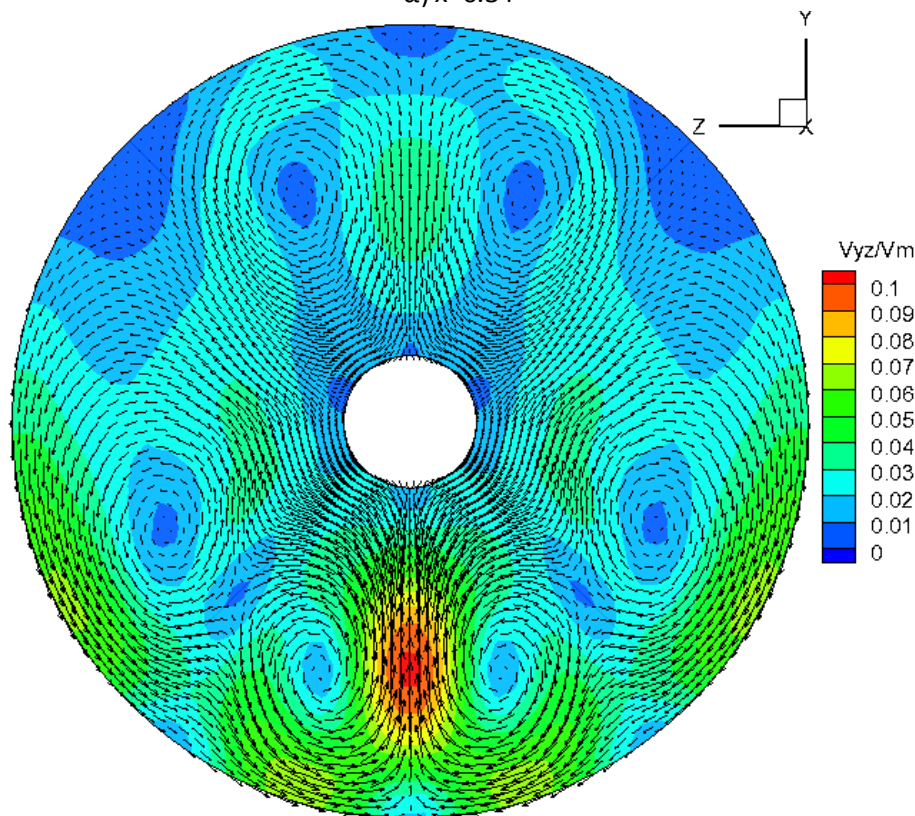
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες. Η σημαντικότερη διαφορά με την αντίστοιχη περίπτωση με τα κοντά πτερύγια (βλ. σχ. 5.29) παρατηρείται στη θέση $x=0.34$. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή με τις χαμηλότερες ταχύτητες μεταξύ των δύο κάτω πτερυγίων παρατηρείται διαφορετική κατανομή ταχυτήτων. Η τυπική απόκλιση στην διατομή $x=0.34$ υπολογίστηκε 0.5021 m/s και στην έξοδο 0.5067 m/s. Αυτές οι τιμές είναι πολύ κοντά σε αυτές της κοντής γεωμετρίας ενώ είναι μικρότερες από τις δύο γεωμετρίες με τα 4 μακριά πτερύγια.



Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες στις δύο διατομές. Τα βασικά στοιχεία της ροής όπως η τοπολογία των δινών είναι αντίστοιχη με την αντίστοιχη κονή γεωμετρία (βλ. σχ. 5.30). Στη θέση $x=0.34$ παρατηρείται ότι εκτός της περιοχής μεταξύ των κάτω πτερυγίων (που είναι και η περιοχή με τις υψηλότερες εφαπτομενικές ταχύτητες) εμφανίζονται υψηλότερες ταχύτητες και σε άλλες θέσεις. Σε σχέση με την αντίστοιχη προηγούμενη διάταξη, εμφανίζονται μεγαλύτερες τέτοιες περιοχές κοντά στις εξωτερικές επιφάνειες των δύο κάτω πτερυγίων καθώς και ανάμεσα στις δύο πάνω δίνες. Η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.1684 m/s και αδιαστατοποιημένη 0.0328 . Στη θέση $x=0.45$ παρατηρούνται μικρότερες τιμές στην περιοχή των υψηλών ταχυτήτων αλλά μεγαλύτερες στις υπόλοιπες. Εδώ σχηματίζονται σαφώς οι δύο πάνω συμμετρικές δίνες καθώς και οι δίνες στις εξωτερικές πλευρές των ταχυτήτων. Η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.1422 m/s και αδιαστατοποιημένη 0.0277 . Οι τιμές αυτές και στις δύο διατομές είναι σημαντικά μικρότερες από τις περιπτώσεις με τα τρία μακριά πτερύγια. Σε σχέση με την αντίστοιχη κονή διάταξη είναι 9% μεγαλύτερες στη θέση $x=0.34$ και 10% στην έξοδο.



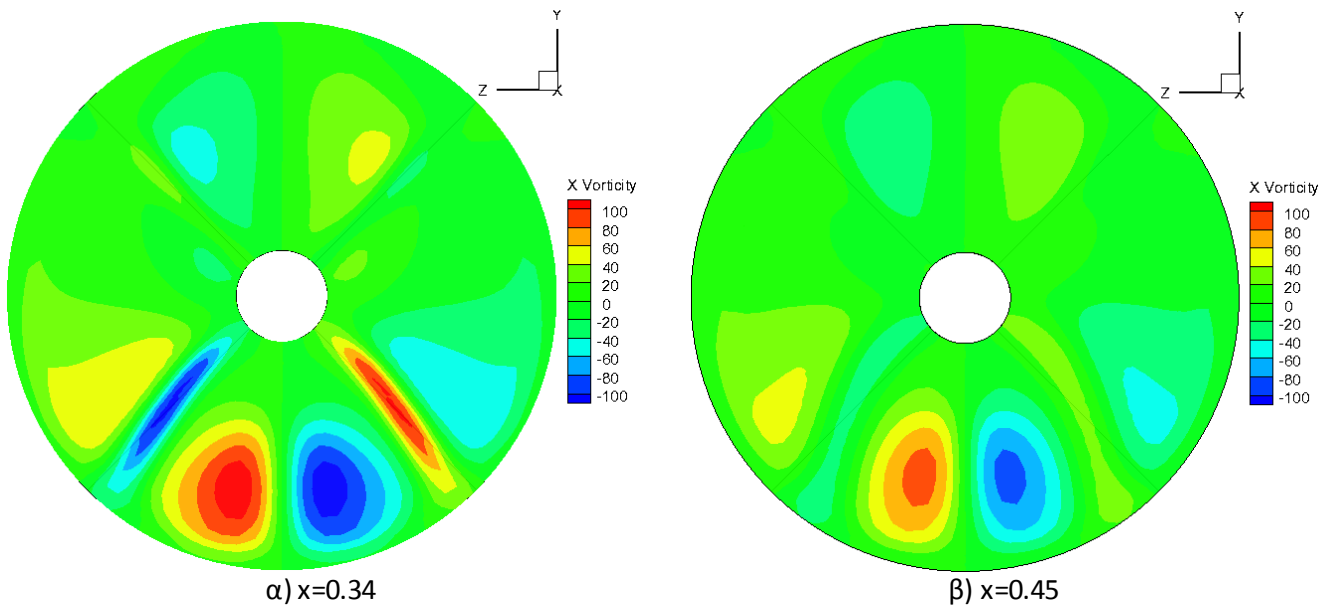
α) $x=0.34$



β) $x=0.45$

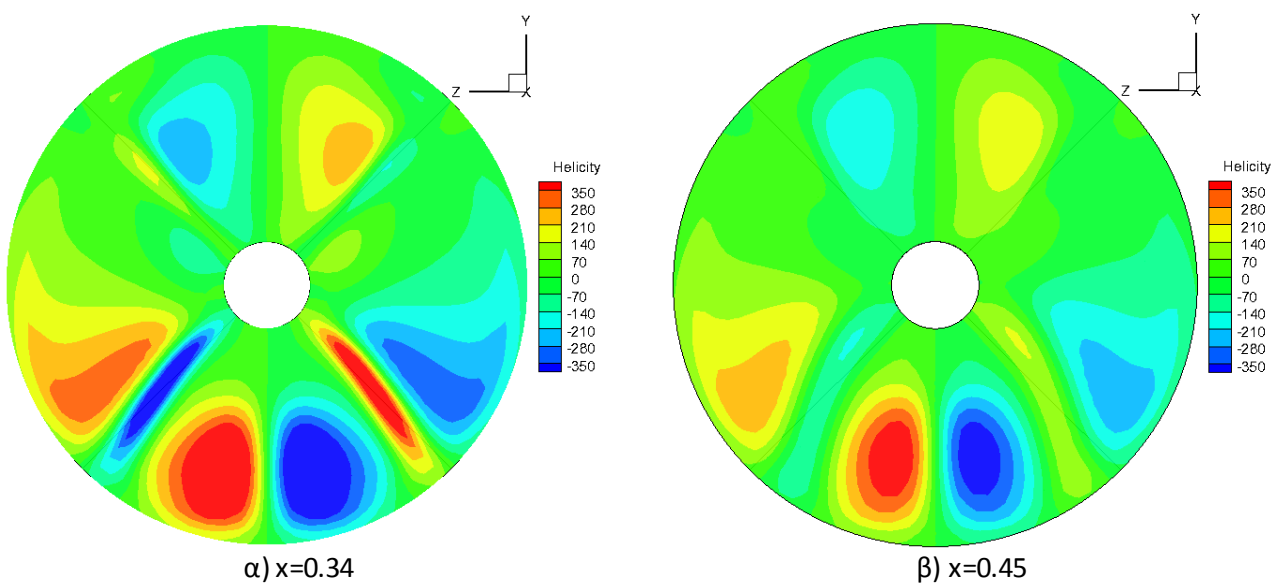
Σχήμα 5.54 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στροβιλότητας. Οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι αντίστοιχες με τις προηγούμενες (βλ. σχ. 5.31). Οι περιοχές υψηλής στροβιλότητας ανάμεσα στα δύο κάτω πτερύγια είναι μικρότερες από την διάταξη με τα κοντά πτερύγια ενώ εμφανίζεται μεγαλύτερη στροβιλότητα στις άλλες.



Σχήμα 5.55 Contours στροβιλότητας

Αντίστοιχες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και για τις κατανομές της ελικότητας στις δύο διατομές που παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.

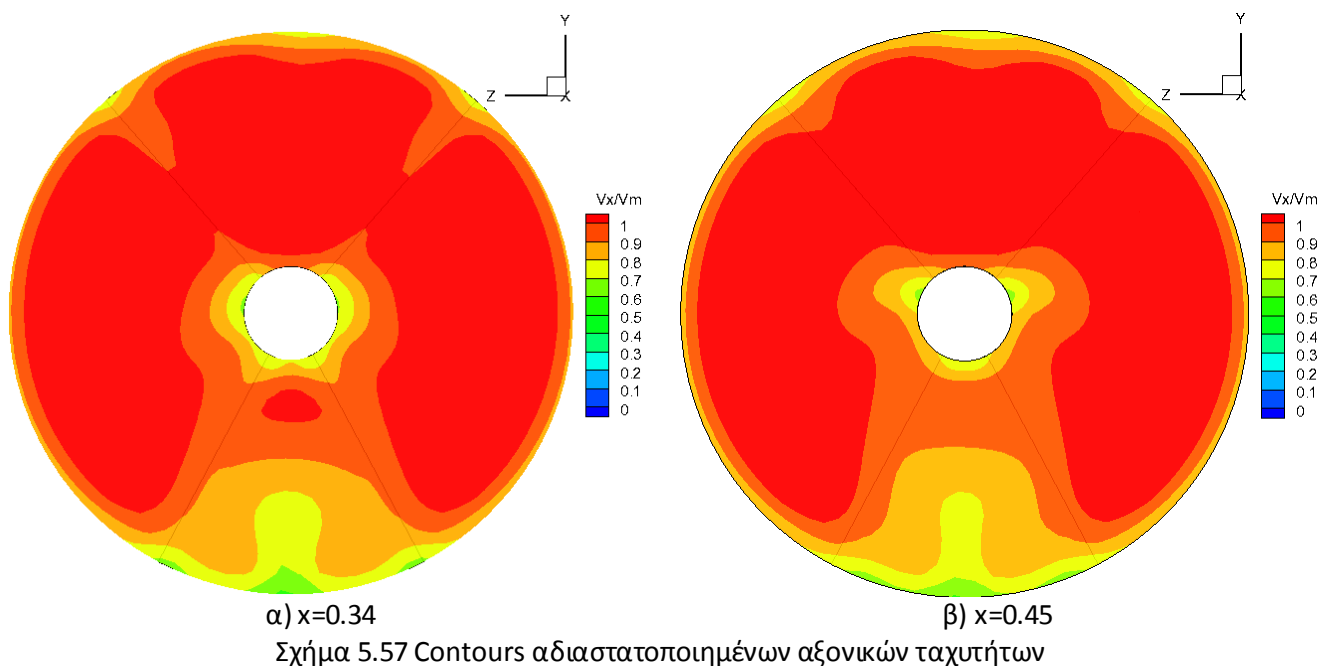


Σχήμα 5.56 Contours ελικότητας

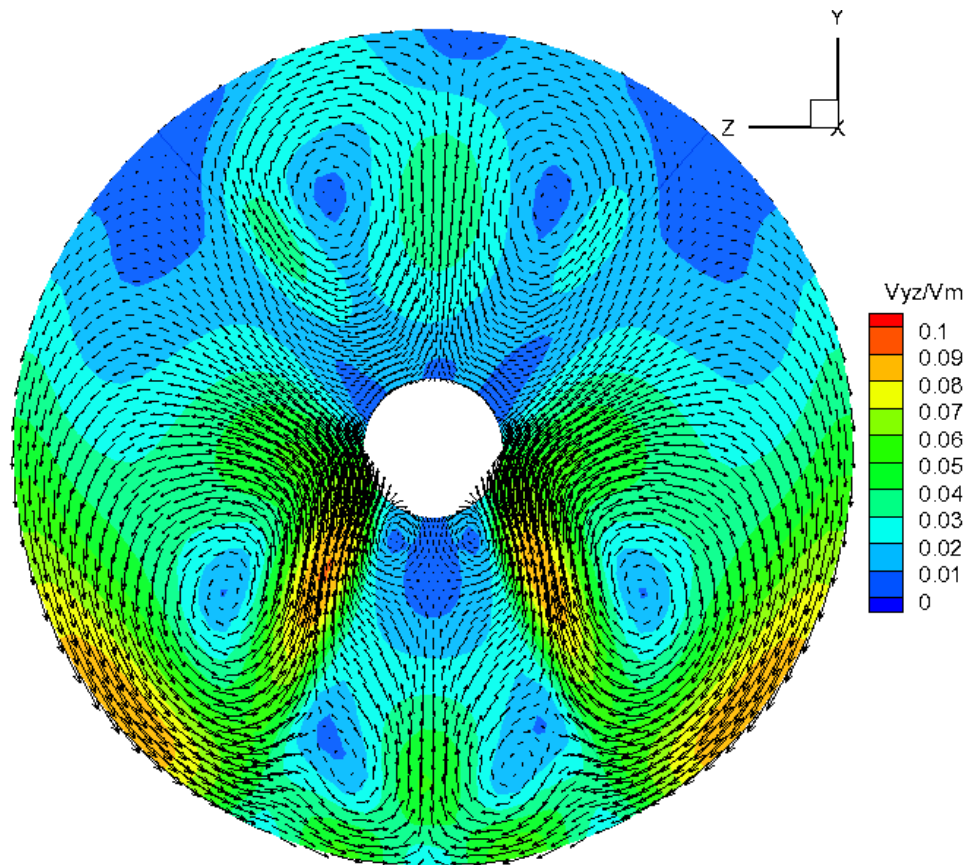
Πτερύγια τοποθετημένα μη συμμετρικά

Όπως φαίνεται και στην παρουσίαση των διατάξεων στην ενότητα 4.5 τα πτερύγια εδώ δεν είναι τοποθετημένα στις ίδιες ακριβώς γωνίες με την κοντύτερη γεωμετρία. Ο λόγος είναι ότι τα κέντρα των δινών μετρήθηκαν σε λίγο διαφορετική θέση στην μέση διατομή των μακρύτερων πτερυγίων ($x=0.15$) από αυτή των κοντύτερων ($x=0.2$). Εδώ, η διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου υπολογίστηκε 5226 Pa ενώ η διαφορά ολικής πίεσης 4339 Pa, σχεδόν ίδιες με την προηγούμενη.

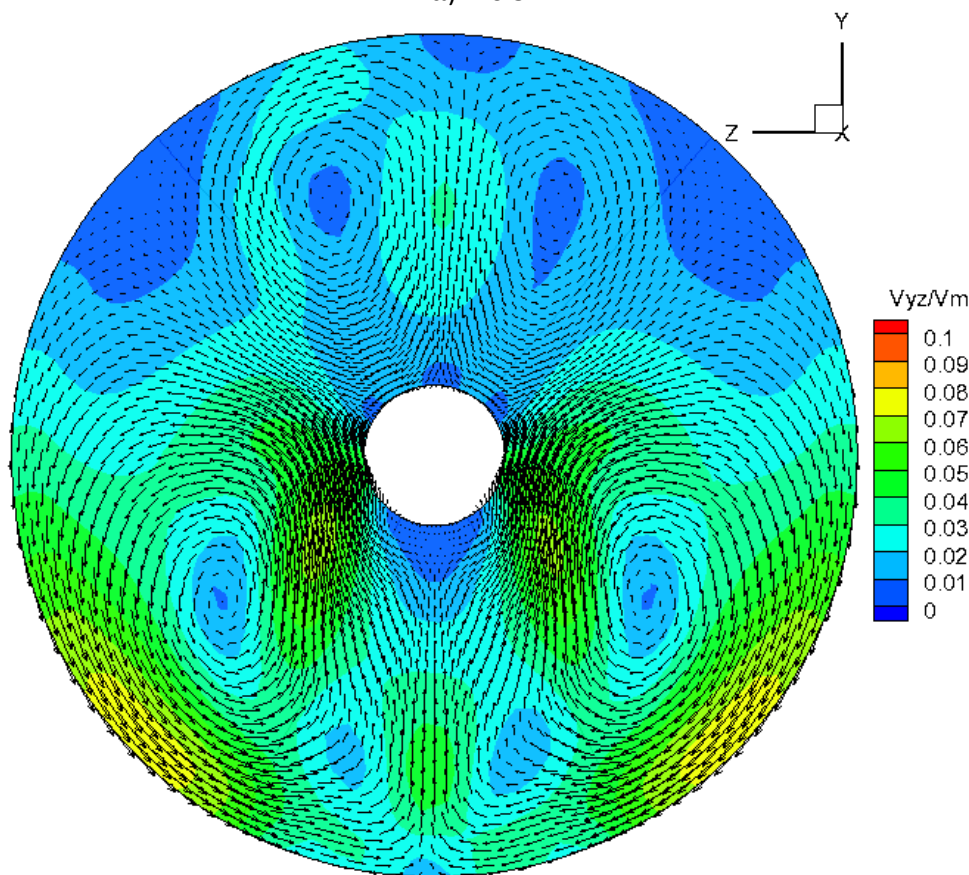
Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αδιαστατοποιημένες αξονικές ταχύτητες. Η περιοχή με τις χαμηλότερες ταχύτητες βρίσκεται και εδώ μεταξύ των δύο κάτω πτερυγίων. Παρατηρείται μέσα στο πάνω τμήμα αυτής μια μικρότερη περιοχή με υψηλότερες ταχύτητες. Ακόμη παρατηρείται μεγαλύτερη διακύμανση των ταχυτήτων σε αυτήν την περιοχή σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Η τυπική απόκλιση στην διατομή $x=0.34$ υπολογίστηκε 0.5691 m/s και στην έξοδο 0.5429 m/s. Οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες τόσο από την προηγούμενη γεωμετρία όσο και από την αντίστοιχη της ενότητας 5.2.3.



Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες (σχ. 5.58). Παρατηρούνται αρκετές διαφορές στις κατανομές των ταχυτήτων σε σχέση με την προηγούμενη και την αντίστοιχη κοντύτερη γεωμετρία (βλ. σχ. 5.34). Στη θέση $x=0.34$ σχηματίζονται 4 δίνες ανά δύο συμμετρικές. Οι δύο στην εξωτερική πλευρά των κάτω πτερυγίων έχουν την μεγαλύτερη ένταση ενώ οι δύο που βρίσκονται στην περιοχή χαμηλών ταχυτήτων



α) $x=0.34$

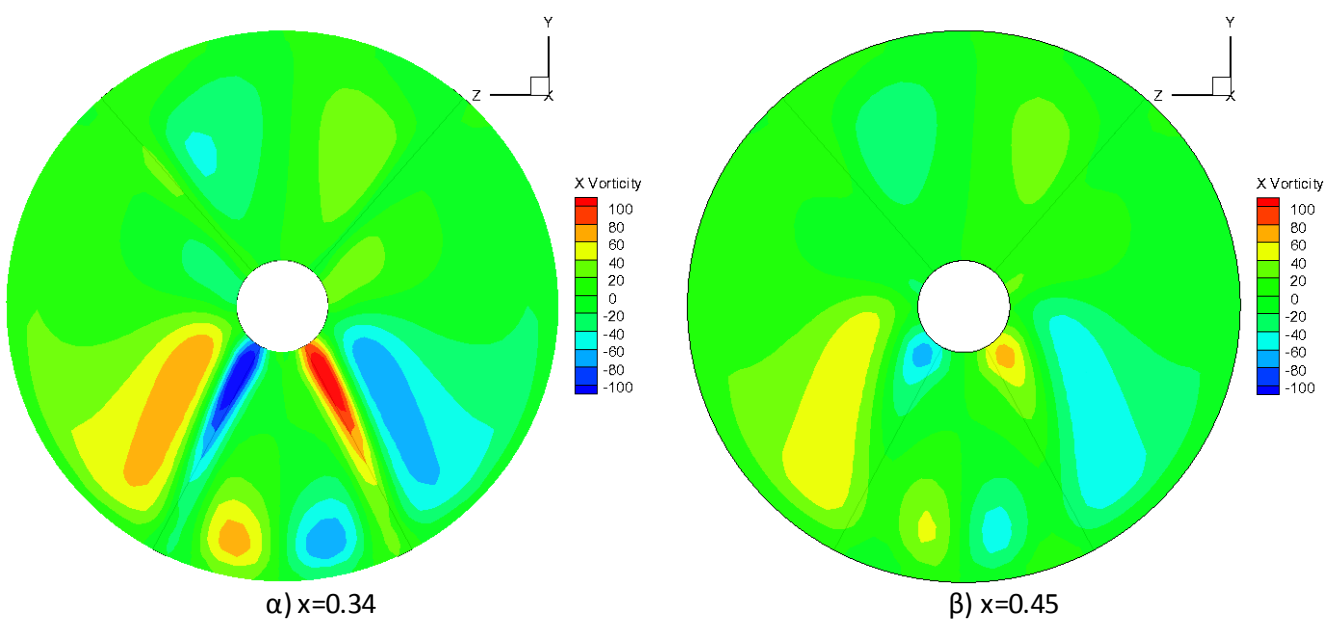


β) $x=0.45$

Σχήμα 5.58 Αδιαστατοποιημένες εφαπτομενικές ταχύτητες- Contours και διανύσματα

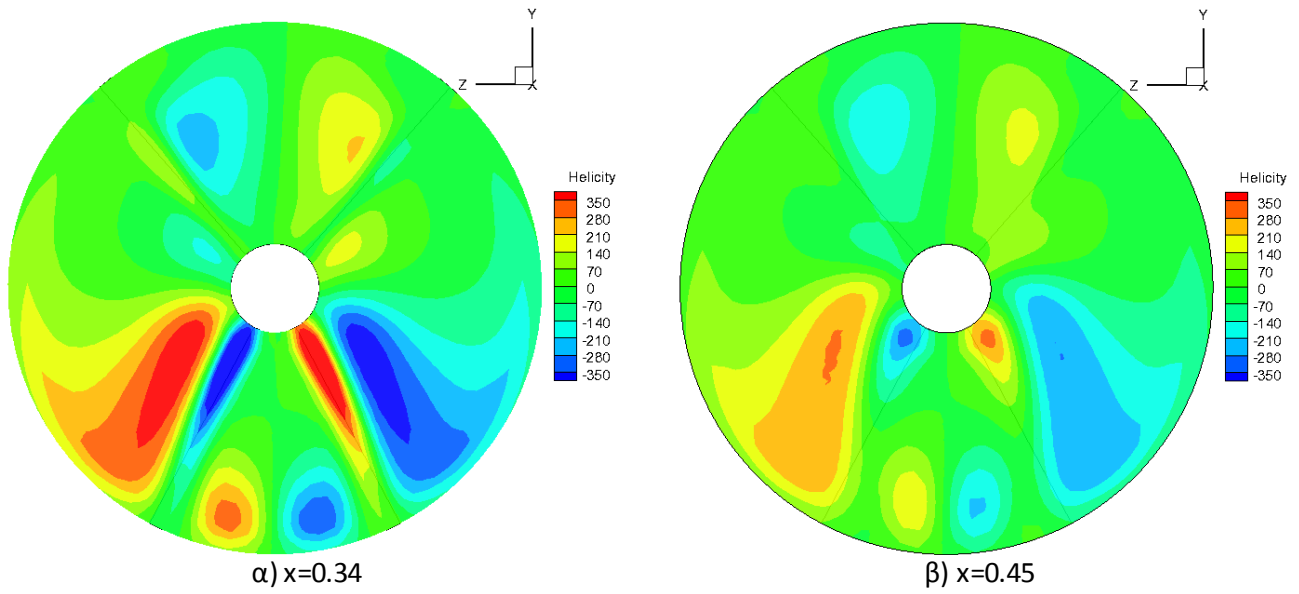
μεταξύ των δύο πάνω πτερυγίων είναι ασθενέστερες. Η περιοχή με τις υψηλότερες ταχύτητες δεν βρίσκεται μεταξύ των δύο κάτω πτερυγίων, όπως είδαμε στις προηγούμενες περιπτώσεις αλλά στην εξωτερική πλευρά των επιφανειών τους. Η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.1618 m/s και αδιαστατοποιημένη 0.0315. Αυτή ήταν η απολύτως μικρότερη τιμή σε αυτή τη διατομή για όλες τις περιπτώσεις των μακριών πτερυγίων αλλά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη κοντή διάταξη. Στη θέση $x=0.45$ οι εφαπτομενικές ταχύτητες έχουν μειωθεί περαιτέρω. Οι δύο κύριες συμμετρικές δίνες σχηματίζονται στην εξωτερική πλευρά των κάτω πτερυγίων, όπου εμφανίζονται και οι περιοχές υψηλών ταχυτήτων, ενώ οι δύο πάνω έχουν εξασθενήσει σημαντικά. Ακόμη, υψηλές ταχύτητες παρατηρούνται και κοντά στα εσωτερικά τοιχώματα εκτός της περιοχής μεταξύ των πτερυγίων. Εδώ, η μέση εφαπτομενική ταχύτητα υπολογίστηκε 0.1433 m/s και αδιαστατοποιημένη 0.0279. Αυτές οι τιμές είναι οριακά μεγαλύτερες από την προηγούμενη περίπτωση και σημαντικά μεγαλύτερες από την αντίστοιχη διάταξη με κοντή πτερυγία.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα contours της στροβιλότητας στις δύο διατομές. Παρατηρείται ότι η στροβιλότητα είναι αρκετά μικρότερη και στις δύο διατομές σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Στη θέση $x=0.34$ οι περιοχές με τις μεγαλύτερες τιμές βρίσκονται στις θέσεις των κάτω πτερυγίων. Επίσης αυξημένη στροβιλότητα παρατηρείται στις περιοχές των κύριων δινών στην εξωτερική πλευρά των πτερυγίων καθώς και δύο μικρότερες στην περιοχή μεταξύ των πτερυγίων. Αυτή η κατανομή είναι η μόνη από όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν όπου η μεγαλύτερη στροβιλότητα δεν εμφανίζεται μεταξύ των δύο κάτω πτερυγίων. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην γωνία τοποθέτησης των πτερυγίων αν και αυτή διαφέρει πολύ λίγο (2°) από την κοντή περίπτωση. Στη θέση $x=0.45$ η στροβιλότητα έχει μειωθεί πολύ με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται σε δύο μικρές περιοχές στην περιοχή των κάτω πτερυγίων κοντά στο βάκτρο.



Σχήμα 5.59 Contours στροβιλότητας

Τα αποτελέσματα για την ελικότητα παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Παρατηρείται και εδώ ότι σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις η μεγαλύτερη ελικότητα εμφανίζεται εκτός της περιοχής μεταξύ των δύο κάτω πτερυγίων.



Σχήμα 5.60 Contours ελικότητας

Κεφάλαιο 6:

Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις συγκριτικά με χρήση πινάκων και διαγραμμάτων. Ο σκοπός αυτής της σύγκρισης είναι να εξεταστεί ποιές από τις γεωμετρίες που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι πιο αποτελεσματικές στην βελτίωση της "ποιότητας" της ροής στο εξεταζόμενο τμήμα. Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα για όλα τα μεγέθη που υπολογίστηκαν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα πιο σημαντικά από αυτά μέσω διαγραμμάτων. Στις δύο τελευταίες ενότητες παρατίθενται συνολικά, τα τελικά συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις που εξήχθησαν στην παρούσα εργασία καθώς και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη στο αντικείμενο.

6.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Στους πίνακες που ακολουθούν στις δύο επόμενες σελίδες παρατίθενται συγκεντρωτικά όλα τα μεγέθη που υπολογίστηκαν. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.1 ο υπολογισμός έγινε απευθείας από το Fluent, με επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο Excel καθώς και με τη χρήση προγράμματος στη Fortran ο κώδικας του οποίου παρατίθεται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

Προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες στον δρομέα του υδροστροβίλου που αποδίδονται στην ποιότητα της δέσμης, πρέπει να μειωθούν οι δευτερεύουσες ροές που οφείλονται στις εφαπτομενικές ταχύτητες. Ακόμη, επιθυμητή είναι η ελαχιστοποίηση των υδραυλικών απωλειών στον αγωγό καθώς και ο σχηματισμός όσο το δυνατόν ομαλότερων προφίλ αξονικών ταχυτήτων. Για να είναι δυνατή η σύγκριση της αποδοτικότητας των εναλλακτικών διατάξεων στην βελτίωση αυτών, υπολογίστηκαν στις δύο εξεταζόμενες διατομές για τις αξονικές ταχύτητες η σταθμισμένη τυπική απόκλιση και η διακύμανση. Όσο οι μικρότερες είναι αυτές τόσο πιο ομαλά θα είναι τα προφίλ των ταχυτήτων στις διατομές. Επίσης, υπολογίστηκε το τετράγωνο της μέσης αξονικής ταχύτητας για τον υπολογισμό της διαφοράς ολικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου. Για τις εφαπτομενικές ταχύτητες υπολογίστηκε η μέση σταθμισμένη εφαπτομενική ταχύτητα, το τετράγωνο αυτής, το ποσοστό μείωσης αυτών σε σχέση με την περίπτωση χωρίς πτερύγια και η σταθμισμένη τυπική απόκλιση. Προφανώς, επιδιώκεται η μέγιστη δυνατή μείωση αυτών των μεγεθών. Τα αποτελέσματα για τις πιέσεις είναι μία ένδειξη των απωλειών λόγω τριβών και δεν έχουν να κάνουν με την βελτίωση της ποιότητας της δέσμης.

	Δp static (pa)	Δp total (pa)	Τυπική Απόκλιση u 0.34 (m/s)	Αδιασατοποιημένη Τυπική Απόκλιση u 0.34 (m/s)	Διακύμανση 0.34 [(m/s) ²]	Σταθμισμένη μέση κύρια ταχυτητα ² (μ^2) 0.34
Πλέγματα	4743	3904	0.5405	0.1052	0.2921	26.7242
ShortFins2 180	4864	4005	0.4890	0.0951	0.2391	26.7087
ShortFins0	4868	4007	0.4923	0.0958	0.2424	26.7137
ShortFins20	4855	3995	0.5270	0.1025	0.2778	26.7221
ShortFins40	4818	3971	0.5361	0.1043	0.2874	26.7137
ShortFins60	4963	4102	0.5014	0.0975	0.2514	26.7048
ShortFins4 90	4949	4076	0.5290	0.1029	0.2798	26.7370
ShortFins4 ODD	5084	4224	0.4869	0.0947	0.2371	26.7158
LongFins0	5094	4230	0.4970	0.0967	0.2470	26.7286
LongFins20	5006	4149	0.5493	0.1069	0.3017	26.7393
LongFins40	5006	4161	0.5501	0.1070	0.3026	26.7277
LongFins60	5248	4387	0.5021	0.0977	0.2522	26.7150
LongFins4 90	5216	4329	0.5691	0.1107	0.3238	26.7876
LongFins4 ODD	4593	3768	0.4717	0.0918	0.2225	26.6545
No Fins						

	Τυπική Απόκλιση u 0.45 (m/s)	Αδιασατοποιημένη Τυπική Απόκλιση u 0.45 (m/s)	Διακύμανση 0.45 [(m/s) ²]	Σταθμισμένη μέση κύρια ταχυτητα ² (μ^2) 0.45	Σταθμισμένη μέση εφαιπτομενική ταχ 0.34	Αδιασατοποιημένη μέση εφ. ταχ. 0.34
Πλέγματα	0.4654	0.0905	0.2166	26.6801	0.2636	0.0513
ShortFins2 180	0.4921	0.0957	0.2422	26.7204	0.2232	0.0434
ShortFins0	0.5018	0.0976	0.2518	26.7255	0.2039	0.0397
ShortFins20	0.5176	0.1007	0.2679	26.7224	0.2131	0.0415
ShortFins40	0.4725	0.0919	0.2232	26.6962	0.2440	0.0475
ShortFins60	0.5177	0.1007	0.2681	26.7243	0.1543	0.0300
ShortFins4 90	0.5460	0.1062	0.2981	26.7480	0.1373	0.0267
ShortFins4 ODD	0.4958	0.0965	0.2459	26.7231	0.2159	0.0420
LongFins0	0.5073	0.0987	0.2574	26.7315	0.1982	0.0386
LongFins20	0.5000	0.0973	0.2500	26.7175	0.2502	0.0487
LongFins40	0.4611	0.0897	0.2126	26.6933	0.2591	0.0504
LongFins60	0.5067	0.0986	0.2567	26.7237	0.1684	0.0328
LongFins4 90	0.5429	0.1056	0.2947	26.7761	0.1618	0.0315
LongFins4 ODD	0.4655	0.0906	0.2167	26.6530	0.2480	0.0483
No Fins						

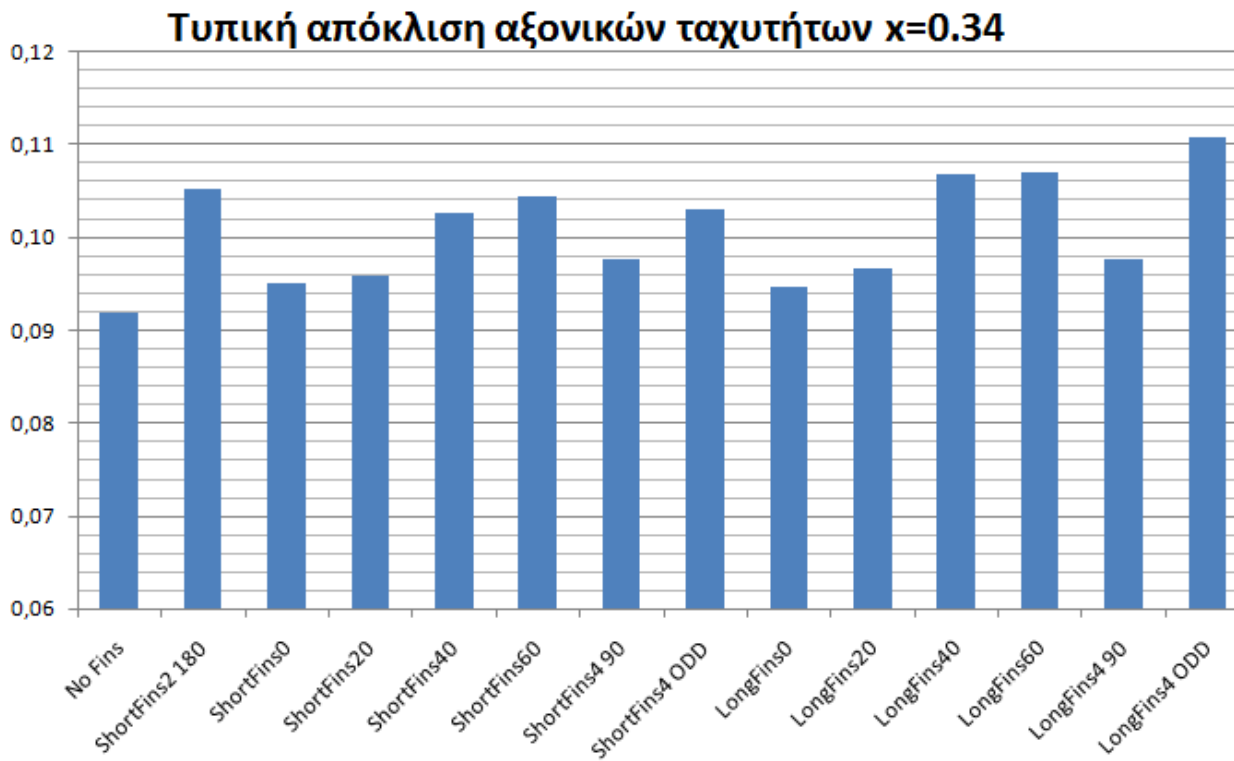
Πλέγματα	Σταθμισμένη μέση εφαπτομενική ταχ 0.45 (m/s)	Αδιαστατοποιημένη μέση εφ. ταχ. 0.45	Σταθμισμένη μέση εφαπτομενική ταχ ^{Λ2} 0.34	Σταθμισμένη μέση εφαπτομενική ταχ ^{Λ2} 0.45	Τυπική απόκλιση εφαπτομενική ταχ 0.34 (m/s)	Τυπική απόκλιση εφαπτομενική ταχ 0.45 (m/s)
ShortFins2 180	0.2348	0.0457	0.0964	0.0747	0.1829	0.1636
ShortFins0	0.1958	0.0381	0.0710	0.0534	0.1359	0.1210
ShortFins20	0.1784	0.0347	0.0627	0.0477	0.1379	0.1236
ShortFins40	0.1908	0.0371	0.0677	0.0545	0.1435	0.1352
ShortFins60	0.2179	0.0424	0.0893	0.0683	0.1939	0.1714
ShortFins4 90	0.1292	0.0251	0.0409	0.0274	0.1171	0.0969
ShortFins4 ODD	0.1165	0.0227	0.0269	0.0190	0.0853	0.0695
LongFins0	0.1862	0.0362	0.0634	0.0464	0.1207	0.1044
LongFins20	0.1743	0.0339	0.0578	0.0445	0.1241	0.1108
LongFins40	0.2231	0.0434	0.0931	0.0732	0.1753	0.1638
LongFins60	0.2311	0.0450	0.0968	0.0736	0.1969	0.1697
LongFins4 90	0.1422	0.0277	0.0396	0.0273	0.0966	0.0751
LongFins4 ODD	0.1433	0.0279	0.0368	0.0275	0.1078	0.0847
No Fins	0.2198	0.0428	0.0834	0.0644	0.1456	0.1304

Πλέγματα	Μείωση εφαπτομενικών ταχυτήτων 0.34	Μείωση εφαπτομενικών ταχυτήτων 0.45	Μείωση εφαπτομενικών ταχυτήτων ^{Λ2} 0.34	Μείωση εφαπτομενικών ταχυτήτων ^{Λ2} 0.45
ShortFins2 180	-6.29%	-6.84%	-15.63%	-16.01%
ShortFins0	9.99%	10.94%	14.86%	17.08%
ShortFins20	17.77%	18.85%	24.76%	25.93%
ShortFins40	14.09%	13.17%	18.78%	15.37%
ShortFins60	1.60%	0.87%	-7.17%	-6.09%
ShortFins4 90	37.80%	41.21%	50.98%	57.46%
ShortFins4 ODD	44.64%	46.98%	67.79%	70.55%
LongFins0	12.94%	15.30%	23.91%	27.90%
LongFins20	20.10%	20.71%	30.66%	30.94%
LongFins40	-0.89%	-1.49%	-11.69%	-13.69%
LongFins60	-4.46%	-5.15%	-16.08%	-14.26%
LongFins4 90	32.10%	35.30%	52.47%	57.60%
LongFins4 ODD	34.76%	34.81%	55.82%	57.36%
No Fins	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

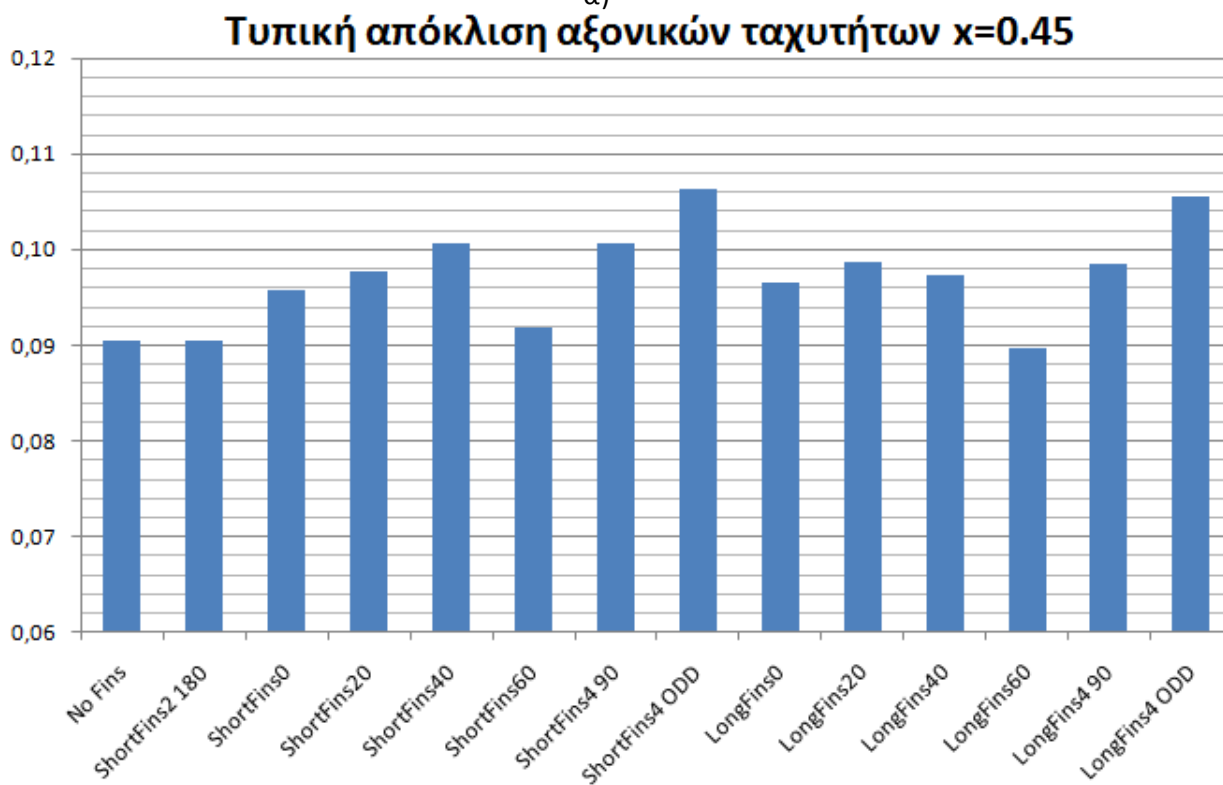
6.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Αρχικά, παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν τα αποτελέσματα για τις αδιαστατοποιημένες τυπικές αποκλίσεις των αξονικών ταχυτήτων. Σε όλες τις εξεταζόμενες γεωμετρίες η τυπική απόκλιση προέκυψε μεγαλύτερη ή ίση από αυτήν χωρίς τα πτερύγια που είναι και η περίπτωση αναφοράς. Αυτό δείχνει ότι με την παρουσία των πτερυγίων στην διάταξη υπάρχει μεγαλύτερη διακύμανση των αξονικών ταχυτήτων στις διάφορες θέσεις. Στην διατομή $x=0.34$ η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στη γεωμετρία με τα 4 μακριά μη συμμετρικά πτερύγια και είναι 20.6%. Η μικρότερη αύξηση παρατηρείται στη γεωμετρία με τα 3 μακριά πτερύγια στις 0° και είναι 3.2%. Από τις περιπτώσεις με τα τρία πτερύγια (κοντά και μακριά) η μικρότερη τιμή υπολογίστηκε στην διάταξη με γωνία 0° . Στην έξοδο παρατηρείται η μεγαλύτερη αύξηση στη γεωμετρία με τα 4 κοντά μη συμμετρικά πτερύγια και είναι 17.3%. Η μικρότερη αύξηση παρατηρείται στη γεωμετρία με τα 3 μακριά πτερύγια στις 0° και είναι 1.5%. Μεταξύ των περιπτώσεων με τα τρία πτερύγια η μικρότερη αύξηση παρατηρήθηκε στη γεωμετρία με γωνία 60° . Γενικά, παρατηρείται ότι οι γεωμετρίες με τα 4 πτερύγια παρουσιάζουν μεγαλύτερη αύξηση της τυπικής απόκλισης από τις αντίστοιχες τους με τα 3.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από την σύγκριση των τιμών της διακύμανσης των αξονικών ταχυτήτων στις δύο διατομές. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι τα πτερύγια δεν βοηθούν στην εξομάλυνση των κατανομών των αξονικών ταχυτήτων αλλά αντίθετα προσδίδουν μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών τους που είναι της τάξης του 5%-15% κατά μέσο όρο στην γεωμετρία που εξετάστηκε. Αυτό αποδίδεται στην ανάπτυξη οριακού στρώματος στις επιφάνειες των τοιχωμάτων των πτερυγίων.



α)



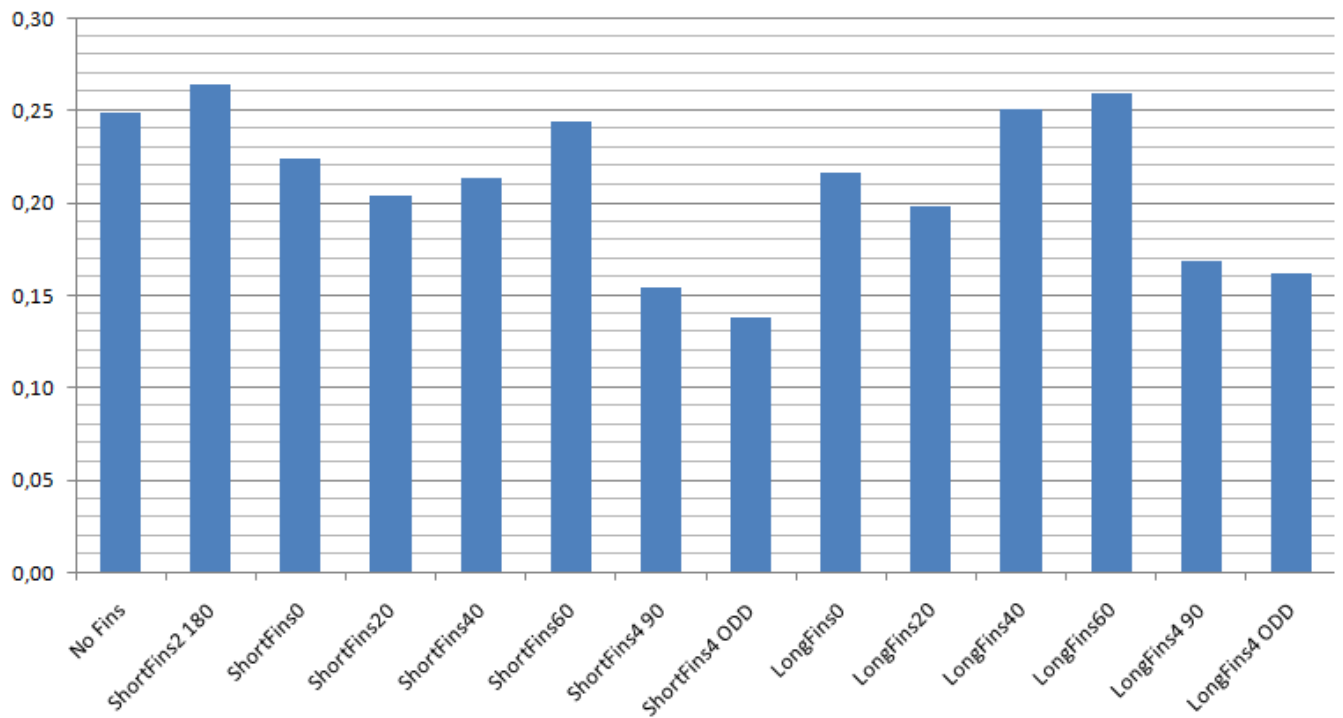
β)

Σχήμα 6.1 Τυπική απόκλιση αξονικών ταχυτήτων

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την αδιαστατοποιημένη μέση εφαπτομενική ταχύτητα στο σχήμα 6.2 και στο σχήμα 6.3 η ποσοστιαία μείωση της μέσης ταχύτητας σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς χωρίς τα πτερύγια. Αρχικά παρατηρείται ότι οι γεωμετρίες με τα δύο πτερύγια, τα 3 κοντά και μακριά πτερύγια στις 60° και τα 3 μακριά στις 40° αντί να μειώνουν αυξάνουν τις εφαπτομενικές ταχύτητες και συνεπώς είναι ακατάλληλες. Επίσης και στις δύο διατομές παρατηρείται ότι οι διατάξεις με τα 4 πτερύγια επιτυγχάνουν μεγαλύτερη μείωση από τις αντίστοιχες με τα 3. Στη θέση $x=0.34$ η μεγαλύτερη μείωση φτάνει το 44.6% στην διάταξη με τα 4 μη συμμετρικά πτερύγια ενώ και στην έξοδο η μέγιστη μείωση παρουσιάζεται 47.0% στην ίδια διάταξη. Από τις γεωμετρίες με τα 3 πτερύγια η μεγαλύτερη μείωση επιτυγχάνεται στην διάταξη με γωνία 20° όπου στην περίπτωση των κοντών πτερυγίων φτάνει το 20% δηλαδή λιγότερο από το μισό της περίπτωσης με τα 4. Τέλος, παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις με τα 4 πτερύγια το μήκος παίζει σημαντικό ρόλο με τα κοντύτερα να επιτυγχάνουν σημαντικά μεγαλύτερη μείωση αντίθετα με τις περιπτώσεις με τα 3 πτερύγια όπου οι διαφορές είναι πολύ μικρές.

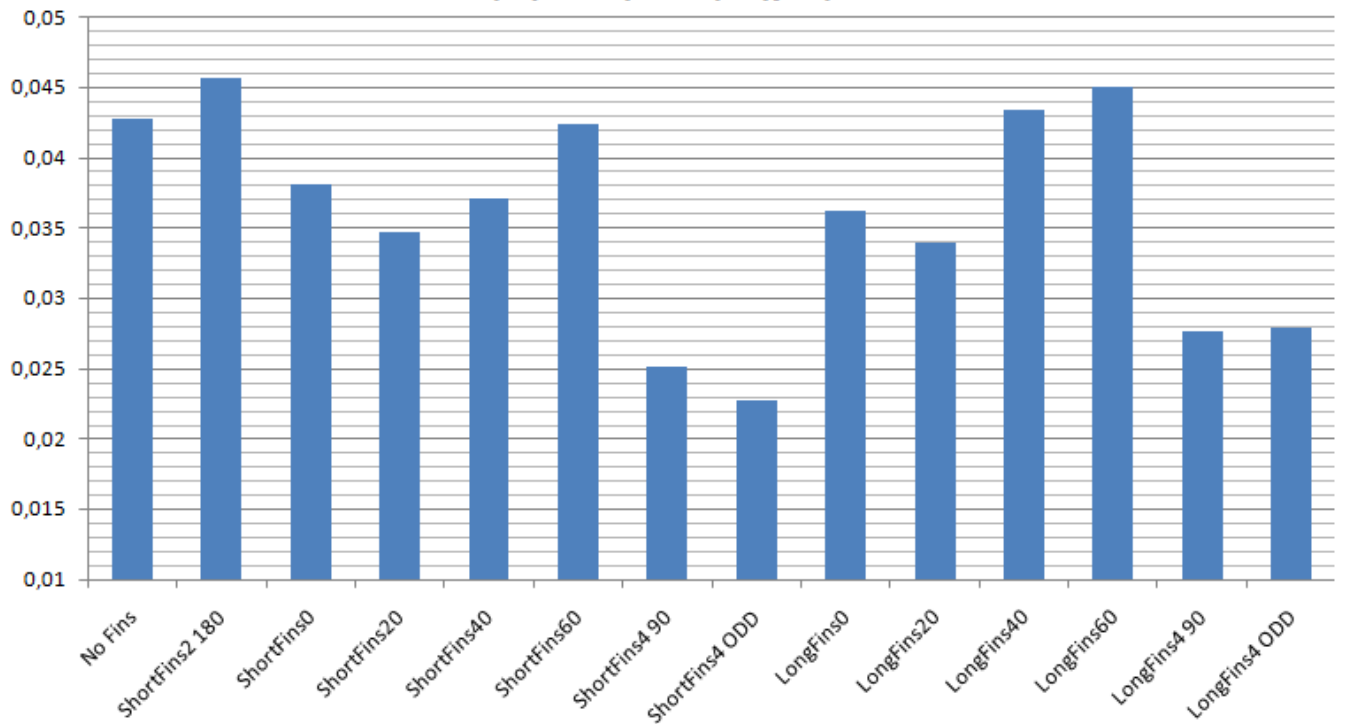
Από τα αποτελέσματα αυτά συμπεραίνουμε ότι τα πτερύγια και η διάταξη τους επηρεάζουν τις δευτερεύουσες ροές σε σημαντικό βαθμό. Στην βέλτιστη από τις εξεταζόμενες διάταξη παρατηρήθηκε μείωση σχεδόν στο μισό, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς ενώ στη χειρότερη αύξηση της τάξης του 6%.

Μέση εφαπτομενική ταχύτητα $\chi=0.34$



α)

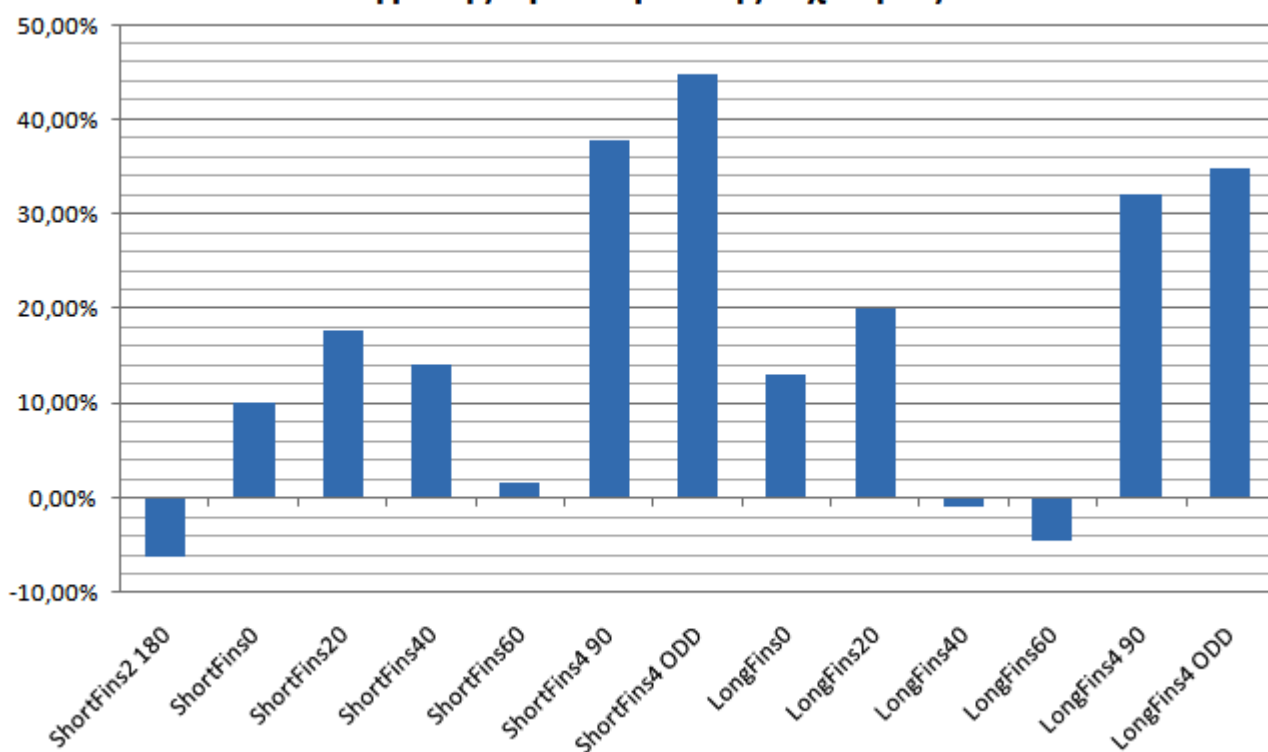
Μέση εφαπτομενική ταχύτητα $\chi=0.45$



β)

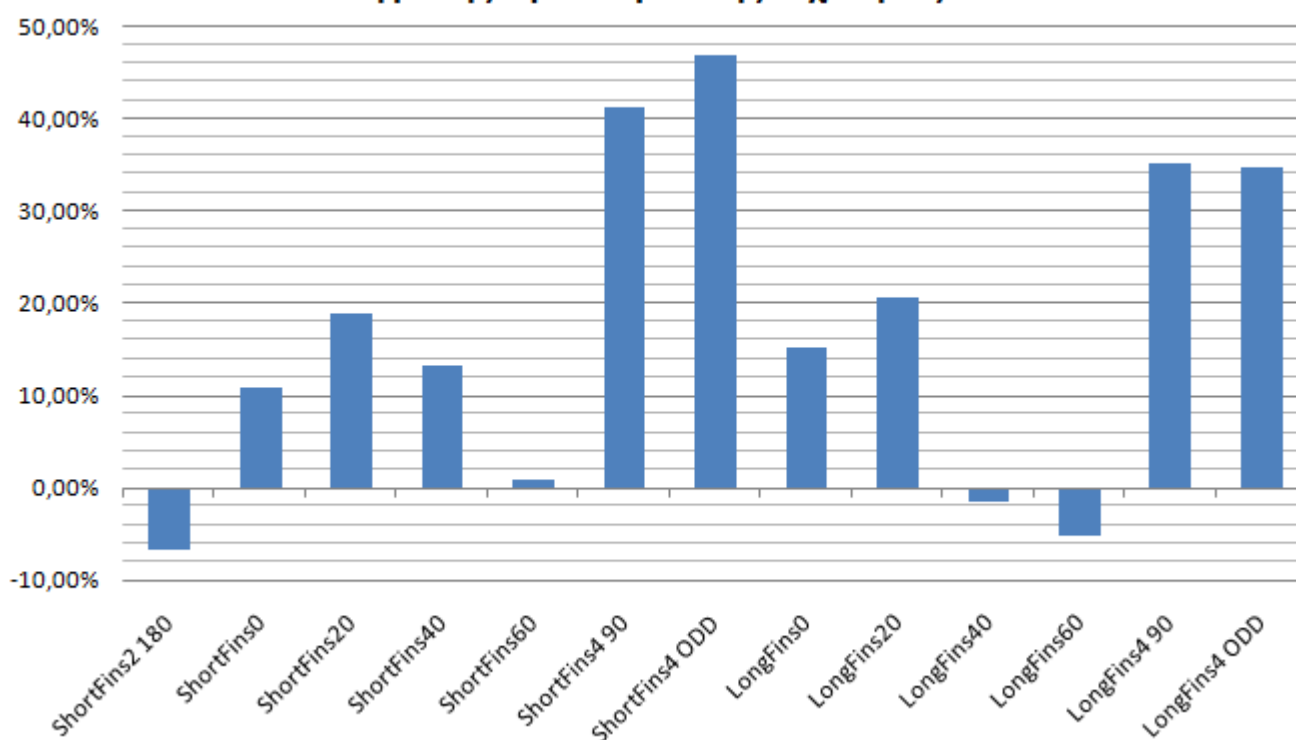
Σχήμα 6.2 Μέση εφαπτομενική ταχύτητα

Μείωση μέσης εφαιτομενικής ταχύτητας $\chi=0.34$



α)

Μείωση μέσης εφαιτομενικής ταχύτητας $\chi=0.45$

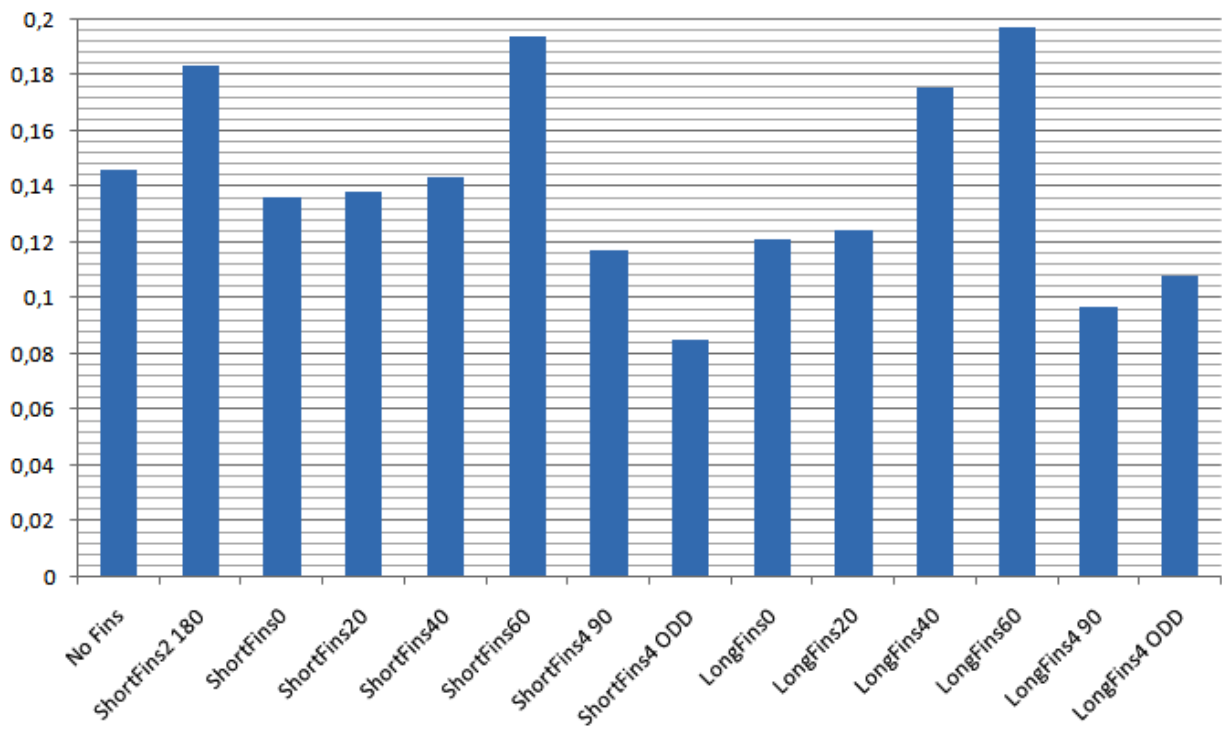


β)

Σχήμα 6.3 Ποσοστιαία μείωση μέσης εφαιτομενικής ταχύτητας

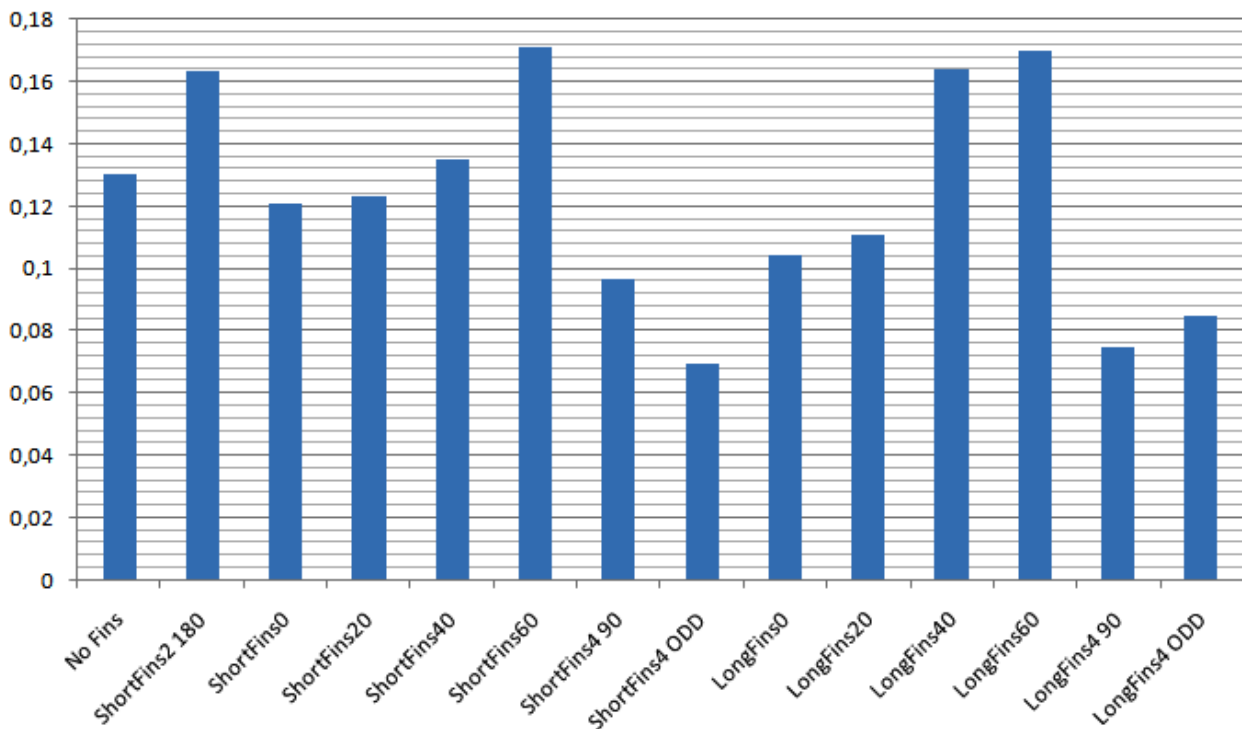
Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την αδιαστατοποιημένη σταθμισμένη τυπική απόκλιση των εφαπτομενικών ταχυτήτων. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αντίστοιχα με τα προηγούμενα με την διάταξη με τα 4 κοντά μη συμμετρικά τοποθετημένα πτερύγια να εμφανίζει την μικρότερη τυπική απόκλιση. Το μέγεθος αυτό δίνει μια αποτύπωση της κατανομής των εφαπτομενικών ταχυτήτων στην διατομή, όμως δεν είναι τόσο σημαντικό όσο το μέτρο της μέσης εφαπτομενικής ταχύτητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο τελικό τμήμα του ακροφυσίου, που βρίσκεται η βελόνη και το συγκλίνον τμήμα του αγωγού και από το οποίο εξέρχεται τελικά η δέσμη, οι κατανομές των ταχυτήτων (εφαπτομενικών και αξονικών) αλλάζουν ραγδαία παρότι η επίδραση τους διατηρείται και στην δέσμη. Συνεπώς στη μελέτη του αμέσως προηγούμενου τμήματος που γίνεται εδώ ενδιαφέρει περισσότερο η μείωση του μέτρου των εφαπτομενικών ταχυτήτων από την κατανομή τους.

Τυπική απόκλιση εφαπτομενικών ταχυτήτων $\chi=0.34$



α)

Τυπική απόκλιση εφαπτομενικών ταχυτήτων $\chi=0.45$



β)

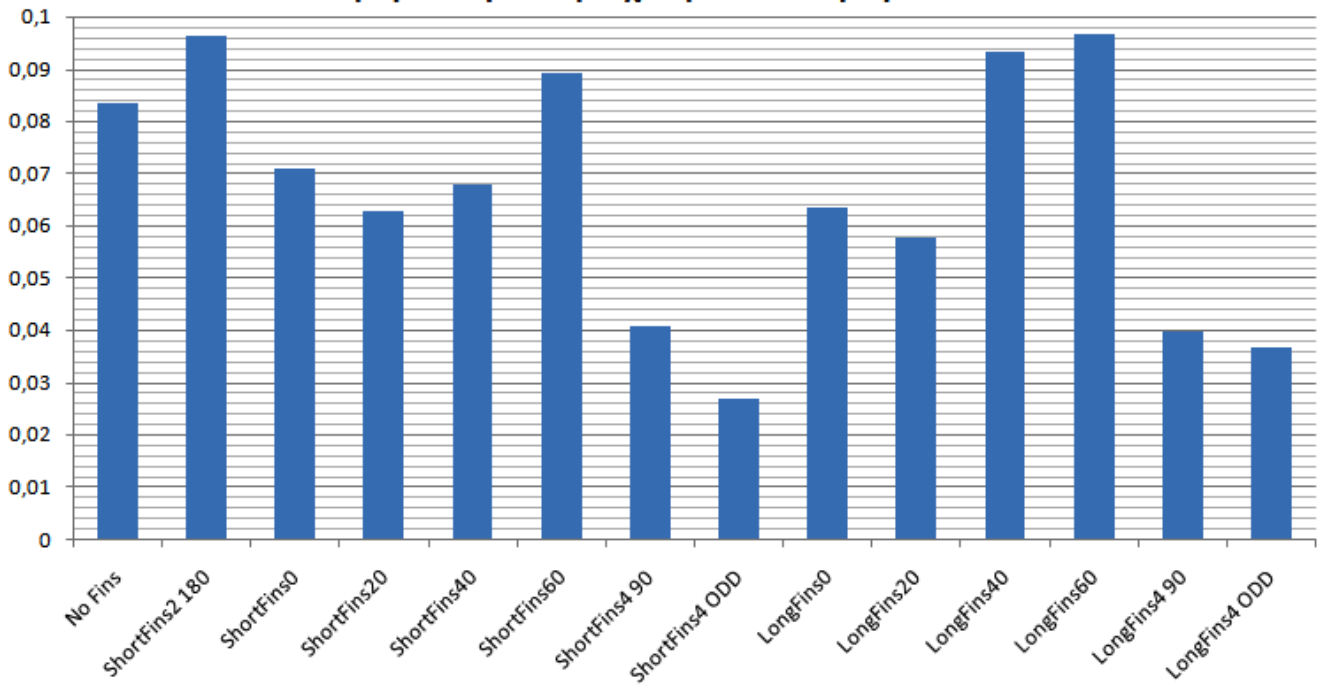
Σχήμα 6.4 Τυπική απόκλιση εφαπτομενικών ταχυτήτων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την σταθμισμένη μέση εφαπτομενική ταχύτητα στο τετράγωνο (σχ 6.5). Το μέτρο αυτής είναι σημαντικό μέγεθος μιας και ο όρος της ταχύτητας στο τετράγωνο εμφανίζεται στον υπολογισμό της κινητικής ενέργειας. Είναι, συνεπώς, ένα μέτρο των υδραυλικών απωλειών ενέργειας στον αγωγό που ξοδεύεται στην περιστροφή του ρευστού και δεν μετατρέπεται σε ροπή από τα σκαφίδια. Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μείωση του μεγέθους αυτού σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς χωρίς τα πτερύγια.

Τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα με τη μέση εφαπτομενική ταχύτητα. Οι γεωμετρίες με τα δύο πτερύγια, τα 3 κοντά και μακριά πτερύγια στις 60° και τα 3 μακριά στις 40° παρουσιάζουν αύξηση σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Ακόμα οι διατάξεις με τα 4 πτερύγια επιτυγχάνουν μεγαλύτερη μείωση σε σχέση με αυτές με τα 3. Στη θέση $x=0.34$ η μέγιστη μείωση φτάνει το 67.8 % στην περίπτωση των 4 μη συμμετρικά τοποθετημένων πτερυγίων. Από τις περιπτώσεις με τα 3 πτερύγια η μέγιστη μείωση παρατηρείται στην περίπτωση με γωνία 20° και κοντά πτερύγια φτάνοντας το 30.7% πολύ μικρότερη από την προηγούμενη τιμή. Στη θέση $x=0.45$ η μέγιστη μείωση φτάνει το 70.6 % στην περίπτωση των 4 μη συμμετρικά τοποθετημένων πτερυγίων. Από τις διατάξεις με 3 πτερύγια η μεγαλύτερη μείωση παρουσιάζεται στην ίδια διάταξη με προηγουμένως και είναι 30.9 %.

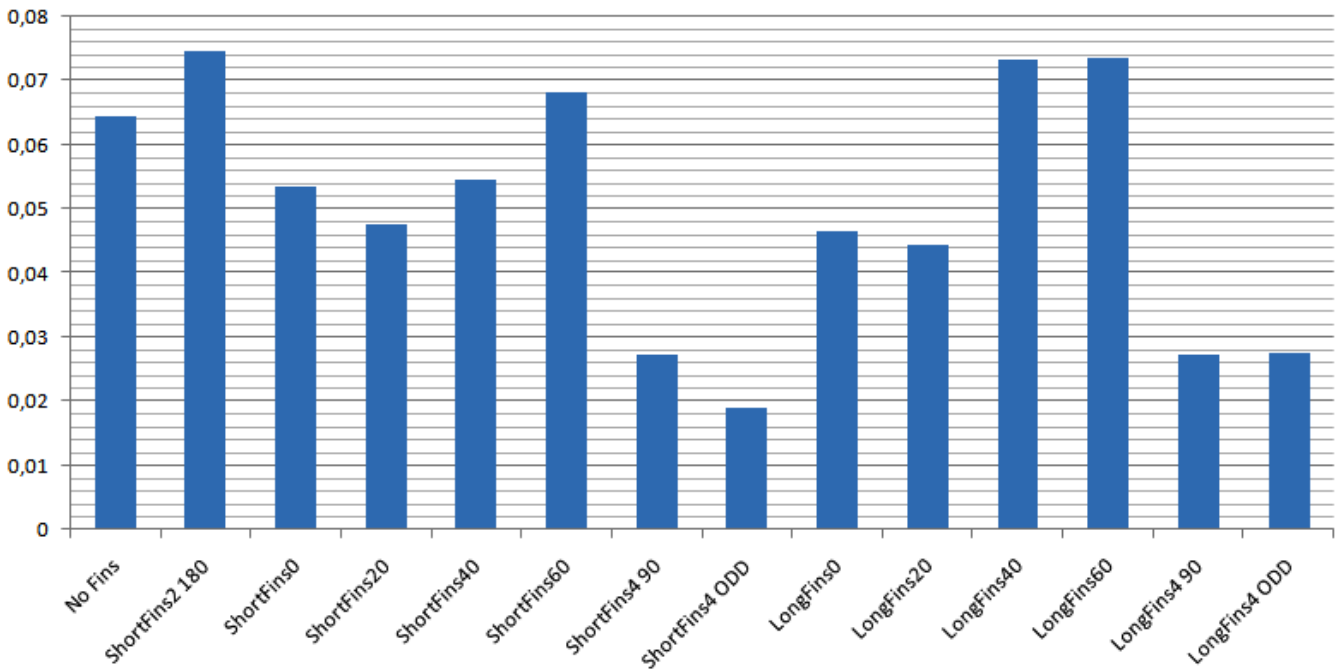
Από τα προηγούμενα επιβεβαιώνεται ότι για τη μείωση των δευτερευουσών ροών η πλέον αποδοτική γεωμετρία είναι αυτή με τα 4 μη συμμετρικά πτερύγια. Ακόμα διαπιστώνεται και εδώ ότι οι διατάξεις με τα 4 πτερύγια είναι πιο αποδοτικές από αυτές με τα τρία ενώ αυτή με τα 2 δεν είναι κατάλληλη.

Μέση εφαπτομενική ταχύτητα στο τετράγωνο $\chi=0.34$



α)

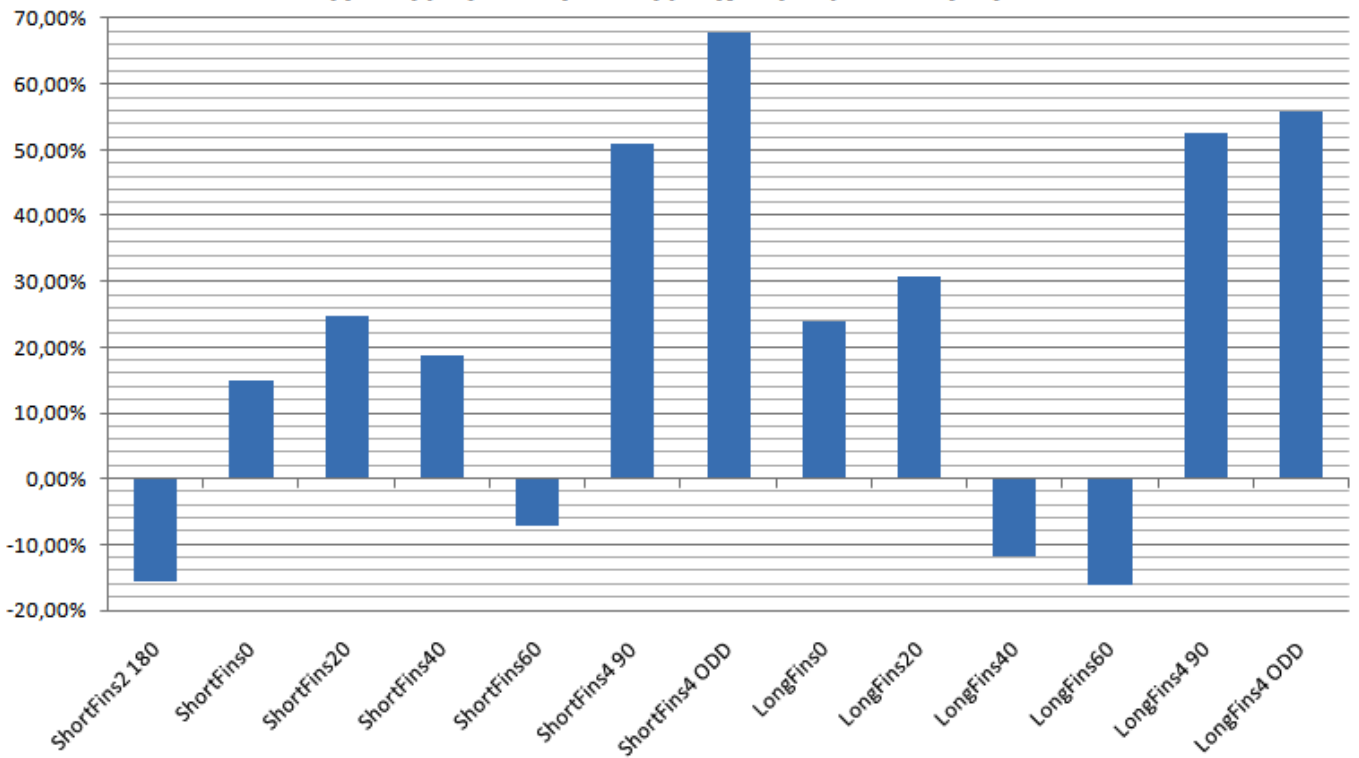
Μέση εφαπτομενική ταχύτητα στο τετράγωνο $\chi=0.45$



β)

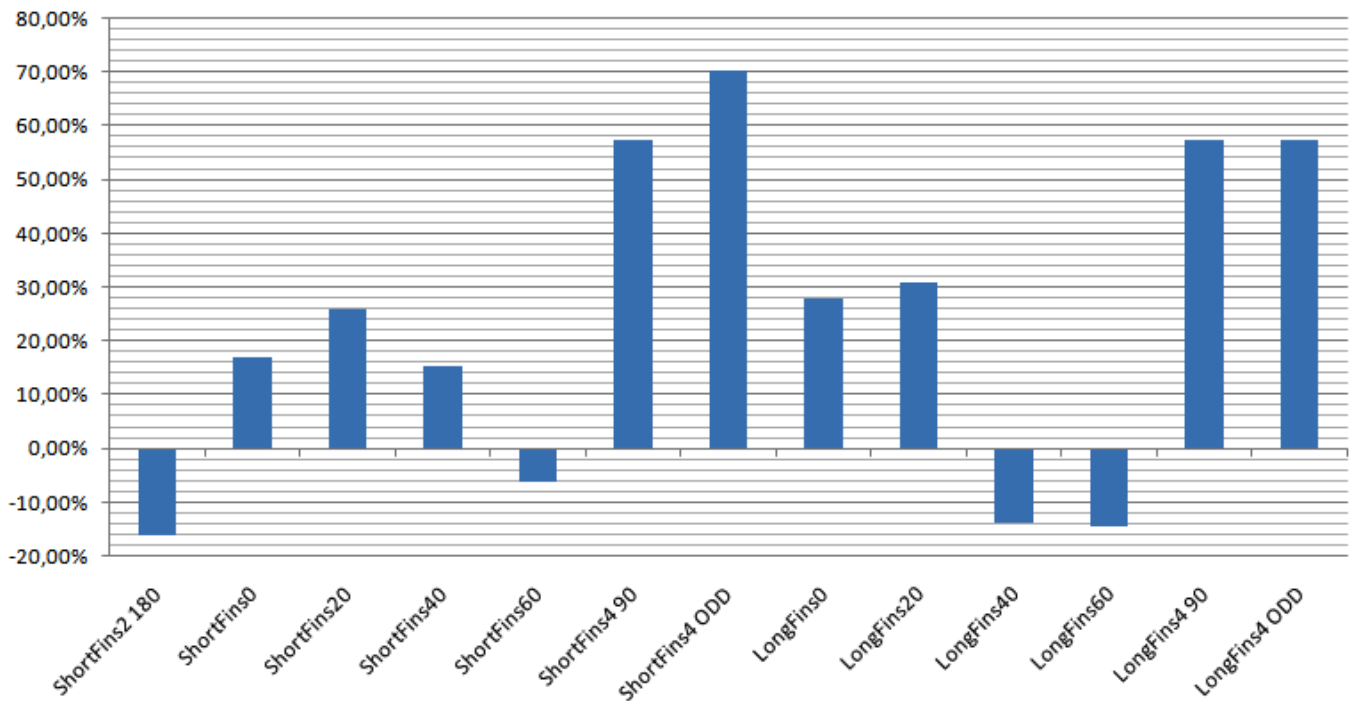
Σχήμα 6.5 Σταθμισμένη μέση εφαπτομενική ταχύτητα στο τετράγωνο

Μείωση μέσης εφαπτομενικής ταχύτητας στο τετράγωνο $\chi=0.34$



α)

Μείωση μέσης εφαπτομενικής ταχύτητας στο τετράγωνο $\chi=0.45$



β)

Σχήμα 6.6 Μείωση σταθμισμένης μέσης εφαπτομενικής ταχύτητας στο τετράγωνο

6.3 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης στη ροή ορισμένων εναλλακτικών διατάξεων τοποθέτησης των πτερυγίων στήριξης, του βάκτρου και της βελόνης, στο τελικό τμήμα διανομέα υδροστροβίλου δράσης. Η γεωμετρία βασίστηκε σε αυτήν του αγωγού του άνω ακροφυσίου του πειραματικού μοντέλου υδροστροβίλου Pelton που βρίσκεται στο εργαστήριο υδροδυναμικών μηχανών. Οι προσομοιώσεις έγιναν για την ονομαστική παροχή του υδροστροβίλου. Σκοπός ήταν η μείωση των ανεπιθύμητων δευτερευουσών ροών που οφείλονται στην κλίση 90° του αγωγού και την ύπαρξη του βάκτρου. Οι γεωμετρίες που εξετάστηκαν είχαν 2,3 και 4 πτερύγια σε διάφορες διατάξεις και δύο επιλογές ως προς το μήκος τους (στην δεύτερη διπλασιάστηκε). Επίσης, δημιουργήθηκαν (για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις μήκους) διατάξεις με 4 πτερύγια τοποθετημένα μη συμμετρικά, με στόχο την επιπλέον μείωση των δευτερευουσών ροών.

Οι διαφορές στις υδραυλικές απώλειες λόγω των εναλλακτικών διατάξεων των πτερυγίων ήταν πολύ κοντά μεταξύ τους. Οι απώλειες πίεσης στον διανομέα εξαρτώνται από το σύνολο της διαδρομής του αγωγού από τον ταμιευτήρα μέχρι τον διανομέα και η διάταξη των πτερυγίων έχει αμελητέα επίδραση όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα για τη διαφορά πίεσης. Συνεπώς, αυτές δεν αποτελούν κριτήριο για την επιλογή της διάταξης.

Ως προς την κατανομή των αξονικών ταχυτήτων παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη των πτερυγίων στον αγωγό αυξάνει την ανομοιομορφία δημιουργώντας μεγαλύτερες διακυμάνσεις, γεγονός που αποδίδεται στην ανάπτυξη οριακού στρώματος στα τοιχώματα των πτερυγίων. Αυτή η αύξηση της τυπικής απόκλισης είναι της τάξης του 5% - 15 % για όλες τις περιπτώσεις. Αυτό, όμως, δεν είναι τόσο σημαντικό αφού όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως με την είσοδο στο συγκλίνον ακροφύσιο μετασχηματίζεται σημαντικά η ροή.

Για τη βέλτιστη διάταξη των πτερυγίων κριτήριο επιλογής πρέπει να είναι η μείωση των δευτερευουσών ροών, που θα οδηγήσει σε μείωση των απωλειών ενέργειας μέσα στον αγωγό και κυρίως στην αύξηση του βαθμού απόδοσης από τη βελτίωση της ποιότητας της δέσμης και συνεπώς σε μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας από τα σκαφίδια. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι τα πτερύγια παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη εφαπτομενικών ταχυτήτων. Η μελέτη των διάφορων διατάξεων έδειξε ότι ανάλογα με τη γωνία τοποθέτησης (και λιγότερο με το μήκος) των πτερυγίων στην ίδια γεωμετρία αγωγού αυτές μπορούν να αυξηθούν ή να μειωθούν σε σημαντικό βαθμό.

Η διάταξη με τα 2 πτερύγια ήταν η δυσμενέστερη από όλες αφού παρατηρήθηκε αύξηση των δευτερευουσών ροών. Από τις διατάξεις με τα 3 η χειρότερη με διαφορά από τις άλλες ήταν αυτή με γωνία 60° τα αποτελέσματα της οποίας ήταν σχεδόν ίδια με της

περίπτωσης χωρίς πτερύγια. Η διάταξη με γωνία 20° ήταν η αποδοτικότερη, με τις υπόλοιπες δύο να είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Ως προς το μήκος παρατηρήθηκαν πολύ μικρές διαφορές μεταξύ των διατάξεων με 3 πτερύγια.

Από τις εξεταζόμενες διατάξεις προέκυψε ότι αυτές με τα 4 πτερύγια είναι πιο αποδοτικές στην ελάττωση των δευτερευουσών ροών. Η μείωση των εφαπτομενικών ταχυτήτων και στις δύο περιπτώσεις ήταν σχεδόν διπλάσια από την καλύτερη με 3 πτερύγια. Ακόμη, εδώ παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των δύο περιπτώσεων μήκους. Η μείωση ήταν μεγαλύτερη στις περιπτώσεις με τα κοντά πτερύγια.

Η σημαντικότερη μείωση παρατηρήθηκε στην γεωμετρία με τα μη συμμετρικά κοντά πτερύγια. Η τοποθέτηση τους σύμφωνα με τα κέντρα των δινών που εμφανίζονταν στο μέσο της διατομής τους, που επιλέχθηκε σαν ένα είδος βελτίωσης της γεωμετρίας, είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέσης εφαπτομενικής ταχύτητας (στην διατομή που βρίσκεται μία διάμετρο μετά τα πτερύγια) κατά 44.6 % και του τετραγώνου της κατά 67.8 %. Αυτό δείχνει ότι ο συσχετισμός της τοποθέτησης των πτερυγίων με την τοπολογία της ροής μπορεί να αποδώσει καλύτερα αποτελέσματα, ανάλογα με τις ιδιομορφίες κάθε περίπτωσης. Είναι σημαντικό, λοιπόν, να αναφερθεί ότι αυτή είναι η βέλτιστη διάταξη (από τις εξεταζόμενες) για τη συγκεκριμένη γεωμετρία αγωγού και δεν μπορεί να γενικευθεί. Επίσης, στην περίπτωση που εξετάστηκε θεωρήθηκε ότι η ροή ήταν πλήρως διαμορφωμένη πριν την τελευταία στροφή 90° του αγωγού. Όμως αυτό μπορεί να μην ισχύει αν υπάρχουν και άλλες γωνίες ή διακλαδώσεις σε μικρή απόσταση ανάντι.

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, τα περισσότερα τμήματα ενός υδροστροβίλου Pelton έχουν βελτιστοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό και η συνολική απόδοση φτάνει, σε καλά σχεδιασμένους, το 92%. Οι απώλειες λόγω της ποιότητας της δέσμης εκτιμάται ότι φτάνουν το 1%. Συνεπώς, με δεδομένο το μικρό κόστος σε χρόνο και χρήμα (αν έχει γίνει αρχικά αριθμητική μοντελοποίηση) η μελέτη και βελτιστοποίηση μέσω CFD της διάταξης των πτερυγίων στήριξης μπορεί να οδηγήσει σε μία μικρή μεν, αλλά σημαντική από τεχνοοικονομικής πλευράς αύξηση της απόδοσης, ιδίως σε στροβίλους μεγάλης ισχύος. Ακόμα και σε παλαιότερους υδροστροβίλους που στο στάδιο κατασκευής τους δεν χρησιμοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις, μπορεί να είναι συμφέρουσα μία τέτοια μελέτη για βελτίωση σχεδιασμού και εν συνεχεία αντικατάσταση των πτερυγίων στήριξης του βάκτρου.

6.4 Προτάσεις για περεταίρω μελέτη

Από την παρούσα εργασία προέκυψε ότι τα πτερύγια παίζουν σημαντικό ρόλο στον περιορισμό των δευτερευουσών ροών στον διανομέα. Προκειμένου να έχουμε πιο ακριβή αποτελέσματα και δυνατότητα ποσοτικοποίησης της μείωσης των απωλειών στον υδροστροβίλο προτείνονται τα εξής:

- Στο υπολογιστικό μοντέλο μπορούν να ληφθούν υπόψη το πάχος των πτερυγίων (το οποίο μπορεί να είναι και εξεταζόμενη παράμετρος) καθώς και οι ακριβείς εσωτερικές διαμορφώσεις (αλλαγή διαμέτρου βάκτρου, έδρανο ολίσθησης κλπ).
- Η ταχύτητα εδώ θεωρήθηκε ότι έχει επίπεδο προφίλ στην είσοδο του αγωγού. Αυτό δεν ισχύει, προφανώς, αφού προηγείται ένα μεγάλο δίκτυο σωληνώσεων που ξεκινάει από τον ταμιευτήρα. Μπορεί να προστεθεί στο μοντέλο ένα τμήμα του δικτύου που προηγείται ή αν είναι γνωστή η πραγματική κατανομή των ταχυτήτων να εισαχθεί ως συνθήκη εισόδου στο πρόγραμμα επίλυσης. Με αυτό τον τρόπο τα αποτελέσματα θα είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα αφού αναμένεται ότι οι προηγούμενες διαμορφώσεις (αλλαγές κλίσης και διαμέτρου, διακλαδώσεις κλπ) θα έχουν επηρεάσει σημαντικά τις ταχύτητες στην είσοδο του τμήματος που εξετάστηκε εδώ.
- Προκειμένου να εξεταστεί τελικά η επίδραση της μείωσης των δευτερευουσών ροών στη δέσμη θα έπρεπε να ενσωματωθεί στο μοντέλο το τελικό τμήμα του ακροφυσίου που περιέχει την βελόνη καθώς και η έξοδος αυτού με την διφασική ροή στη δέσμη. Αυτό είναι πολύ σημαντικό αφού μέσα στο τελικό αυτό τμήμα αλλάζουν πολύ και γρήγορα οι κατανομές των ταχυτήτων ενώ οι αλλαγές στην δέσμη είναι αυτές που θα δείξουν τελικά κατά πόσο βελτιώθηκε.
- Ακόμα, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη διάταξη των πτερυγίων θα πρέπει να εξεταστούν περισσότερες διατάξεις. Η παρούσα μελέτη έδειξε ότι οι γεωμετρίες με 4 πτερύγια είναι πλέον κατάλληλες ενώ το μήκος τους δεν είναι σημαντική παράμετρος. Από αυτές μάλιστα η καλύτερη ήταν αυτή με τα μη συμμετρικά πτερύγια γεγονός που δείχνει ότι πρέπει στις διατάξεις που θα εξεταστούν να προστεθούν και τέτοιες που θα συσχετίζουν την τοπολογία της ροής με την γωνία τοποθέτησης των πτερυγίων.
- Όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία εκτιμάται ότι η αύξηση της απόδοσης του υδροστροβίλου από την βελτίωση της δέσμης μπορεί να φτάσει το 1%. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί αυτή για τις αλλαγές στα πτερύγια θα πρέπει να διεξαχθεί πείραμα ή συνολική μελέτη του υδροστροβίλου μέσω CFD που να περιλαμβάνει τον δρομέα. Αυτό θα πρέπει να γίνει για διάφορες παροχές ώστε

να εξεταστεί η βελτίωση σε όλο το εύρος λειτουργίας. Επίσης προτείνεται η εκπόνηση οικονομοτεχνικής μελέτης για την κατασκευή και αντικατάσταση των πτερυγίων ώστε να προσδιοριστεί το οικονομικό και ενεργειακό όφελος σε βάθος χρόνου από μία τέτοια μετατροπή.

Βιβλιογραφία

- Bhaskaran, R. (2009). *Cornell university*. Ανάκτηση από <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+Learning+Modules>
- Chang, T., & Lee, H. (2003). An Experimental Study on Swirling Flow in a 90 Degree Circular Tube by Using Particle Image Velocimetry. *Journal of Visualization, Vol. 6, No. 4* .
- Douglas, J., Gasiorek, J., Swaffield, J., & Jack, L. (2005). *Fluid Mechanics*. Pearson-Prentice Hall.
- El-Gammal, M., Mazhar, H., & Cotton, J. (2010). The hydrodynamic effects of single-phase flow on flow accelerated corrosion in a 90-degree elbow. *Nuclear Engineering and Design Vol. 240, Issue 6* .
- Ferziger, J., & Peric, M. (2002). *Computational methods for fluid dynamics*. Springer.
- Fluent documentaion*. Ansys, Inc.
- Gambit documentation*. Ansys Inc.
- Jošt, D., Mežnar, P., & Lipej, A. (2010). *Numerical prediction of Pelton turbine efficiency*. IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science, Volume 12, Issue 1.
- Keck, H., & Sick, M. (2008). *Thirty years of numerical flow simulation in hydraulic turbo machines*. Springer-Verlag, Acta Mechanica Vol. 201.
- Mariongiu, J., Leboeuf, F., & Caro, J. (2010). Free surface flows simulations in Pelton turbines using an hybrid SPH-ALE method. *Journal of Hydraulic Research Vol. 48 Extra Issue* .
- Nechleba, M. (1957). *Hydraulic Turbines: Their design and equipment*. Prague: Artia.
- Ono, A., Kimura, N., & Kamide, H. (2010). Influence of elbow curvature on flows tructure at elbow outlet under high Reynolds number condition. *Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, Issue 11* .
- Peron, M., Parkinson, E., Geppert, L., & Staublit, T. (2008). Importance of jet quality on Pelton efficiency and cavitation. *IGHM 2008*. Milano.
- Perrig, A. (2007). *Phd. Thesis Hydrodynamics of the free surface flow in Pelton turbine buckets*. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology.

- Perrig, A., Parkinson, E., & Avellan, F. (2006). Flow in a Pelton Turbine Bucket: Numerical and Experimental Investigations. *Journal of Fluids Engineering* MARCH 2006, Vol. 128 / 351 .
- Santolin, A., Gavazzini, G., & Ardizzon, G. (2009). Numerical investigation of the interaction between jet and bucket in a Pelton turbine. *Proc. IMechE Vol. 223 Part A: J. Power and Energy* .
- Slater, J. (2008). Ανάκτηση από <http://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/tutorial.html>.
- Stamatelatos, Anagnostopoulos, & Papantonis. (2011). *Performance measurements on a Pelton turbine model*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy May 2011 vol. 225.
- Staubli, T., & Hauser, H. (2004). Flow visualization- A diagnosis tool for Pelton turbines. *Proceedings of IGHEM 2004*. Lucerne.
- Staubli, T., Bissel, C., Leduc, J., & Parkinson, E. (2009). *Jet quality and Pelton efficiency*. Andritz Hydro.
- Thake, J. (2000). *The micro-hydro pelton turbine manual*. Exeter: Practical Action.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (1995). *An introduction to Computational Fluid Dynamics*. Loughborough: Longman .
- www.cfdonline.com. (n.d.). Ανάκτηση 2012
- Zhang, Z. (2009). Inlet flow conditions and the jet impact work in a Pelton turbine. *Proc. IMechE Vol. 223 Part A: J. Power and Energy* .
- Zhang, Z., & Casey, M. (2007). Experimental studies of the jet of a Pelton turbine. *Proc. IMechE Vol. 221 Part A: J. Power and Energy* .
- Βαρώνος, Α. (1999). *Διδακτορική διατριβή: Μέθοδοι αριθμητικής προσομοίωσης και εφαρμογή στην καύση στερεών καυσίμων σε βιομηχανικούς ατμοπαραγωγούς*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Μπεργελές, Γ. (2006). *Υπολογιστική Ρευστομηχανική*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.
- Παπαντώνης, Δ. (2002). *Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες-Υδροστρόβιλοι*. Εκδόσεις Συμεών.

Παράρτημα

Παρατίθεται ο κώδικας σε Fortran για τον υπολογισμό των μεγεθών που παρουσιάστηκαν στο έκτο κεφάλαιο. Τα δεδομένα της λύσης (ταχύτητες στους κόμβους και αρίθμηση-συνδεσιμότητα κόμβων) για κάθε εξεταζόμενη διατομή εξάγονταν σε data αρχείο το οποίο ήταν η είσοδος του κώδικα. Η ταχύτητα υπολογίζεται σαν μέσος όρος των κόμβων του κάθε κελιού. Οι κόμβοι κάθε κελιού είναι τέσσερις καθώς τα κελιά είναι τετράπλευρα. Για τα κελιά δίπλα στο τοίχωμα, δεδομένου ότι κοντά στο τοίχωμα δεν ισχύει γραμμική σχέση απόστασης-ταχύτητας αλλά ο λογαριθμικός κανόνας, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος. Εδώ υπολογίζεται η ταχύτητα σαν μέσος όρος των δυο κόμβων εκτός του τοιχώματος (στην άθροιση περιλαμβάνεται και το τοίχωμα, αλλά η ταχύτητά του είναι προφανώς μηδέν, επομένως δεν επηρεάζεται το τελικό αποτέλεσμα). Ο μέσος όρος που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή που προσομοιώνει τον λογαριθμικό κανόνα.

```
program average

implicit double precision (a-h,o-z)

parameter (node_max=60000,ncell_max=60000)

c ----- variables -----

dimension X(node_max),Y(node_max),Z(node_max)

dimension U(node_max),V(node_max),W(node_max)

c -----

c ----- connectivity -----

dimension n1(ncell_max),n2(ncell_max),
1 n3(ncell_max),n4(ncell_max)

c ----

open (1,file='input.dat')

read (1,*) nodes,ncells

if (nodes.gt.node_max.or.ncells.gt.ncell_max) then

write (*,*) 'Too many cells/nodes! Increase maximum values'

stop

endif

do i=1,nodes
```

```

read (1,*) X(i),Y(i),Z(i),U(i),V(i),W(i)

enddo

do i=1,ncells

read (1,*) n1(i),n2(i),n3(i),n4(i)

enddo

close (1)

write (*,*) 'No. cells', ncells

write (*,*) 'No. nodes', nodes

c ----- begin calculations

c --- initialize...

surface=0.d0

sum_U=0.d0

sum_VZ2=0.d0

sum_VZ=0.d0

do i=1,ncells

c -----

c --- cell nodes -

Y1 = Y(n1(i))

Z1 = Z(n1(i))

Y2 = Y(n2(i))

Z2 = Z(n2(i))

Y3 = Y(n3(i))

Z3 = Z(n3(i))

Y4 = Y(n4(i))

Z4 = Z(n4(i))

v12_Y = Y1-Y2

v12_Z = Z1-Z2

v23_Y = Y2-Y3

v23_Z = Z2-Z3

v14_Y = Y1-Y4

```

```

v14_Z = Z1-Z4

v43_Y = Y4- Y3

v43_Z = Z4-Z3

dsurf = 0.5*(dabs(v12_Y*v23_z-v12_Z*v23_y)
1 +dabs(v14_Y*v43_z-v14_Z*v43_y))

surface=surface+dsurf

if (u(n1(i))*u(n2(i))*u(n3(i))*u(n4(i)).eq.0.d0) then !two nodes are on the wall => zero velocity
v_cell = 0.995*(v(n1(i))+v(n2(i))+v(n3(i))+v(n4(i)))/2.
w_cell = 0.995*(w(n1(i))+w(n2(i))+w(n3(i))+w(n4(i)))/2.
u_cell = 0.995*(U(n1(i))+U(n2(i))+U(n3(i))+U(n4(i)))/2.
else ! => calculate normally average
v_cell = (v(n1(i))+v(n2(i))+v(n3(i))+v(n4(i)))/4.
w_cell = (w(n1(i))+w(n2(i))+w(n3(i))+w(n4(i)))/4.
u_cell = (U(n1(i))+U(n2(i))+U(n3(i))+U(n4(i)))/4.
endif

sum_U=sum_U+u_cell*dsurf

sum_VZ2=sum_VZ2 + (v_cell**2+w_cell**2)*dsurf

sum_VZ=sum_VZ+ dsqrt(v_cell**2+w_cell**2)*dsurf

enddo

u_average=sum_U/surface

VZ2_average=sum_VZ2/surface

VZ_average=sum_VZ/surface

write (*,*) 'Section surface: ', surface,' [m^2]'

write (*,*) 'Average velocity: ',u_average,' [m/s]'

write (*,*) 'Average tang. velocity^2: ',VZ2_average,' [(m/s)^2]'

write (*,*) 'Average tang. velocity: ',VZ_average,' [(m/s)']

c -----
sum_diffU=0.d0

do i=1,ncells

c -----

```

c --- cell nodes -

$$Y1 = Y(n1(i))$$

$$Z1 = Z(n1(i))$$

$$Y2 = Y(n2(i))$$

$$Z2 = Z(n2(i))$$

$$Y3 = Y(n3(i))$$

$$Z3 = Z(n3(i))$$

$$Y4 = Y(n4(i))$$

$$Z4 = Z(n4(i))$$

$$v12_Y = Y1 - Y2$$

$$v12_Z = Z1 - Z2$$

$$v23_Y = Y2 - Y3$$

$$v23_Z = Z2 - Z3$$

$$v14_Y = Y1 - Y4$$

$$v14_Z = Z1 - Z4$$

$$v43_Y = Y4 - Y3$$

$$v43_Z = Z4 - Z3$$

$$dsurf = 0.5 * (dabs(v12_Y * v23_z - v12_Z * v23_y)$$

$$+ dabs(v14_Y * v43_z - v14_Z * v43_y))$$

$$surface = surface + dsurf$$

if (u(n1(i))*u(n2(i))*u(n3(i))*u(n4(i)).eq.0.d0) then !two nodes are on the wall => zero velocity

$$v_cell = 0.995 * (v(n1(i)) + v(n2(i)) + v(n3(i)) + v(n4(i))) / 2.$$

$$w_cell = 0.995 * (w(n1(i)) + w(n2(i)) + w(n3(i)) + w(n4(i))) / 2.$$

$$u_cell = 0.995 * (U(n1(i)) + U(n2(i)) + U(n3(i)) + U(n4(i))) / 2.$$

else ! => calculate normally average

$$v_cell = (v(n1(i)) + v(n2(i)) + v(n3(i)) + v(n4(i))) / 4.$$

$$w_cell = (w(n1(i)) + w(n2(i)) + w(n3(i)) + w(n4(i))) / 4.$$

$$u_cell = (U(n1(i)) + U(n2(i)) + U(n3(i)) + U(n4(i))) / 4.$$

endif

$$sum_diffU = sum_diffU + (u_cell - u_average) ** 2 * dsurf$$


```

enddo

deviation2=sum_diffU/surface

stdeviation=dsqrt(deviation2)

write (*,*) 'Deviation^2-U: ', deviation2, ' [(m/s)^2]'

write (*,*) 'Std. Deviation-U: ',stdeviation,' [m/s]'

open (2,file='out.dat')

write (2,*) 'Dev^2(U): ',deviation2

write (2,*) 'Std. dev(U): ',stdeviation

write (2,*) 'Std. dev(U)/U: ',stdeviation/u_average

write (2,*) 'Av. tang. vel.^2: ',VZ2_average

write (2,*) 'Av. tang. vel.: ',VZ_average

write (2,*) 'Av. tang. vel./U: ',VZ_average/u_average

close (2)

pause

stop

end

```

