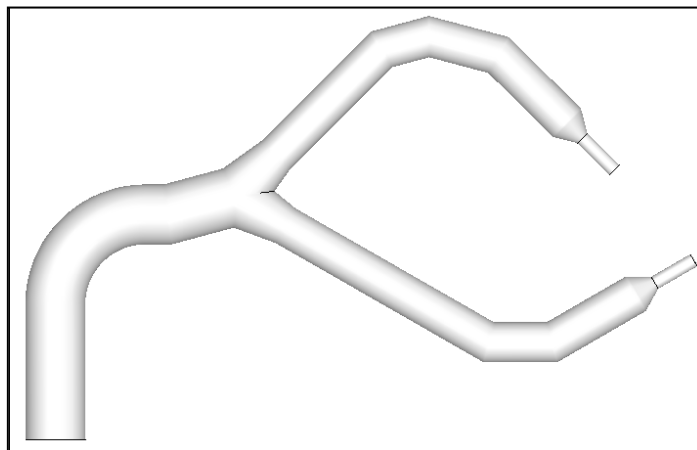




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ
ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΛΜΠΟΥΡΑΣ Γ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ι. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2011

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και ως αντικείμενο έχει την αριθμητική επίλυση της ροής σε σύστημα διανομής εργαστηριακού υδροστροβίλου Pelton με δύο ακροφύσια. Ο υδροστροβίλος αυτός βρίσκεται στο Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και χρησιμοποιείται για τη διενέργεια πειραματικών μετρήσεων.

Πρωταρχικός στόχος της εργασίας ήταν η αριθμητική επίλυση της ροής στη διάταξη του υδροστροβίλου με την χρήση του εμπορικού υπολογιστικού πακέτου Fluent[®]. Ο υπολογισμός της ροής έγινε για όλο το εύρος παροχών που δύναται να αξιοποιήσει ο εν λόγω υδροστροβίλος, καθώς και για την περίπτωση λειτουργίας μόνο με το ένα ακροφύσιο ανοιχτό. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, υπολογίστηκαν οι απώλειες ενέργειας που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του υδροστροβίλου.

Στην συνέχεια, έγινε τροποποίηση της γεωμετρίας του υδροστροβίλου με στόχο την μείωση των απωλειών ενέργειας αλλά και την καλύτερη ποιότητα της ροής κατά μήκος της διάταξης. Η διαδικασία αυτή οδήγησε στην ανεύρεση της καλύτερης – από τις εξεταζόμενες – γεωμετρίας η οποία εμφάνιζε τις μικρότερες απώλειες ενέργειας.

Abstract

The present diploma thesis was developed at the School of Mechanical Engineering of N.T.U.A and has as object of study the numerical solution of the flow through the distribution system of a laboratory Pelton hydro turbine with two nozzles. This hydro turbine is located in the Hydrodynamic Machines Laboratory of the School of Mechanical Engineering of N.T.U.A. and it is used in the conduct of experimental measurements.

The primary objective of this study was the numerical solution of the flow through the distribution system of the hydro turbine using the commercial software package Fluent[®]. The numerical solution of the flow was conducted for the whole range of the mass flow that can be exploited by the hydro turbine, as well as for the case of operation using only one nozzle. Based on these results, the energy losses, that occur during the operation of the hydro turbine, were computed.

What is more, modifications were made to the geometry of the hydro turbine in order to decrease the energy losses as well as to improve the quality of the flow through the system. This process has led to the determination of the best geometry – among those that were examined – that presented the least energy losses.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω των επίκουρο καθηγητή κ. Ιωάννη Αναγνωστόπουλο και τον διδακτορικό σπουδαστή κ. Φοίβο Κουκουβίνη για την συνεργασία και τις πολύτιμες υποδείξεις σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract	1
Πρόλογος.....	6
Ενεργειακές Ανάγκες και Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας.....	6
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	6
Σκοπός της Εργασίας	7
Διάρθρωση της Εργασίας.....	7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	10
1.1 Υδροηλεκτρική Ενέργεια και Υδροστρόβιλοι.....	10
1.2 Κατηγορίες Υδροστροβίλων	10
1.2.1 Υδροστρόβιλοι Ολικής Προσβολής	10
1.2.2 Υδροστρόβιλοι Μερικής Προσβολής	18
Κεφάλαιο 2: Απώλειες Ενέργειας	25
2.1 Ογκομετρικές Απώλειες	25
2.2 Μηχανικές Απώλειες.....	27
2.3 Υδραυλικές Απώλειες.....	27
2.3.1 Υδραυλικές Απώλειες Κρούσεως	27
2.3.2 Υδραυλικές Απώλειες Τριβής.....	28
2.4 Πρακτική Μελέτη Απωλειών.....	36
Κεφάλαιο 3: Αριθμητική Μοντελοποίηση – Υπολογιστική Ρευστομηχανική.....	39
3.1: Εισαγωγή – Γενικά Χαρακτηριστικά.....	39
3.2 Εξισώσεις Navier – Stokes	41
3.3 Μοντέλο $k - \epsilon$	41
3.4 Συναρτήσεις Τοιχώματος	43
3.5 Μέθοδος Simple.....	44
Κεφάλαιο 4: Κατασκευή Γεωμετρίας και Υπολογιστικού Πλέγματος.....	45
4.1 Πραγματικός Υδροστρόβιλος	45
4.2 Κατασκευή Γεωμετρίας	47
4.2.1 Τμήμα Διακλάδωσης	47
4.2.3 Συνένωση Επιφανειών	55
4.2.4 Άναντι Τμήμα.....	58
4.2.5 Έξοδοι	60

4.3 Κατασκευή Υπολογιστικού Πλέγματος	62
4.4 Έλεγχος Ποιότητας Πλέγματος	66
4.5 Χαρακτηρισμός Επιφανειών	67
Κεφάλαιο 5 Εύρεση Βέλτιστου Υπολογιστικού Πλέγματος	68
5.1 Παρουσίαση Πλεγμάτων	68
5.2 Εισαγωγή Υπολογιστικού Πλέγματος στο Fluent και Καθορισμός Παραμέτρων Επίλυσης.....	68
5.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	70
Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα Αριθμητικής Επίλυσης της Ροής στον Διανομέα	75
6.1 Εισαγωγή	75
6.2 Λειτουργία με δύο Ακροφύσια	78
6.2.1 Παροχή 100%	78
6.2.2 Παροχή 75%	96
6.2.3 Παροχή 50%	110
6.2.4 Παροχή 25%	119
6.3 Λειτουργία μόνο με το Άνω Ακροφύσιο	129
6.3.1 Παροχή 100%	129
6.3.2 Παροχή 75%	139
6.3.3 Παροχή 50%	143
6.3.4 Παροχή 25%	148
6.4 Λειτουργία με το Κάτω Ακροφύσιο.....	155
Κεφάλαιο 7 Βελτίωση της Γεωμετρίας.....	160
7.1 Γεωμετρία 4000.....	160
7.2 Γεωμετρία Β.....	166
7.3 Γεωμετρία Γ	172
7.4 Γεωμετρία Δ.....	175
Κεφάλαιο 8: Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα.....	183
Προτάσεις για Περεταίρω Μελέτη.....	184
Βιβλιογραφία	184
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	185
Μέτρο Εφαπτόμενης Ταχύτητας.....	185
Υπολογισμός ΑΣΔΡ	186

Πρόλογος

Ενεργειακές Ανάγκες και Εναλλακτικές Μορφές

Ενέργειας

Είναι γνωστό πως για την διεκπεραίωση των εργασιών στον πλανήτη απαιτούνται τεράστια ποσά ενέργειας. Συγκεκριμένα εκτιμάται πως κάθε χρόνο καταναλώνονται 131 εκατομμύρια GWh ενέργειας. Για να παραχθεί η απαιτούμενη ενέργεια είναι απαραίτητη η χρήση πόρων. Μέχρι στιγμής, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται πετρέλαιο, άνθρακας και φυσικό αέριο δηλαδή μη ανανεώσιμοι πόροι. Ωστόσο, το γεγονός ότι κάποια στιγμή, στο όχι και τόσο απώτερο μέλλον, οι πόροι αυτοί θα εξαντληθούν, έχει στρέψει το ενδιαφέρον των επιστημόνων σε άλλες πηγές ενέργειας οι οποίες είναι ανανεώσιμες και συνεπώς ανεξάντλητες.

Οι πιο διαδεδομένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι ακόλουθες:

- Υδροηλεκτρική Ενέργεια
- Ηλιακή Ενέργεια
- Αιολική Ενέργεια

Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η Υδροηλεκτρική Ενέργεια (δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται αξιοποιώντας την υδραυλική ενέργεια υγρού) είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας (ΑΠΕ). Χρησιμοποιείται σε τουλάχιστον 160 χώρες ενώ μέχρι το τέλος του 2008 είχαν εγκατασταθεί παγκοσμίως περίπου 874 GW υδροηλεκτρικής ισχύος [3]. Σύμφωνα με εκτιμήσεις η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας καλύπτει ετησίως περίπου το 20% των παγκόσμιων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ενώ αποτελεί έως και το 90% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ.

Το γεγονός ότι η μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι πολύ διαδεδομένη δεν είναι τυχαίο. Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι ο ηλεκτρισμός είναι από τις λίγες μορφές ενέργειας που μεταφέρονται εύκολα από το σημείο παραγωγής στο σημείο κατανάλωσης. Επίσης, τα υδροηλεκτρικά έργα, πέρα από τα προφανή πλεονεκτήματα της ανανεωσιμότητας και της απουσίας μόλυνσης του περιβάλλοντος, δύνανται να παραλαμβάνουν και να απορρίπτουν φορτίο με μεγάλη ταχύτητα. Χάρη σε αυτή τους την ιδιότητα παρακολουθείται η μεταβολή της

ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια ώστε να καλύπτονται οι αιχμές ζήτησης του δίκτυο που είναι διασυνδεδεμένο.[1]

Σκοπός της Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της ροής σε σύστημα διανομής πραγματικού υδροστροβίλου Pelton. Ο υδροστρόβιλος που εξετάζεται χρησιμοποιείται για πειραματικές δοκιμές στο Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, γίνεται κατασκευή της γεωμετρίας του συστήματος διανομής στο υπολογιστικό πρόγραμμα Gambit και έπειτα, αριθμητική επίλυση της ροής στο υπολογιστικό πρόγραμμα Fluent. Από τη μελέτη, επιδιώκεται να εξαχθούν ακριβή αποτελέσματα και χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν κυρίως στις απώλειες ενέργειας που εμφανίζονται κατά μήκος του αγωγού και στις δευτερεύουσες ροές που αναπτύσσονται σε αυτόν. Μετά την μελέτη της ροής στον υπάρχοντα αγωγό, επιχειρείται βελτίωση της γεωμετρίας ώστε να εμφανίζονται μικρότερες απώλειες ενέργειας.

Διάρθρωση της Εργασίας

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση για τους διάφορους τύπους υδροστροβίλων και τα μέρη που τους απαρτίζουν.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση για της απώλειες ενέργειας που αναπτύσσονται κατά μήκος των αγωγών και των αλλαγών κλίσεως που αυτοί εμφανίζουν.

Στο κεφάλαιο 3 παρατίθενται πληροφορίες σχετικά με την επιστήμη της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής και της μεθόδους της που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Στο κεφάλαιο 4 παρατίθεται αναλυτικά η μεθοδολογία κατασκευής της γεωμετρίας του συστήματος διανομής και του υπολογιστικού πλέγματος.

Στο κεφάλαιο 5 γίνονται δοκιμές για την επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας του υπολογιστικού πλέγματος.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται η αριθμητική επίλυση της ροής στο υπολογιστικό πακέτο Fluent και παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Παρέχονται αποτελέσματα για όλο το εύρος λειτουργίας του υδροστροβίλου με δύο ακροφύσια ανοιχτά και μόνο με το άνω ακροφύσιο ανοιχτό.

Στο κεφάλαιο 7 γίνεται σταδιακή βελτίωση της γεωμετρίας του συστήματος διανομής με στόχο την μείωση των απωλειών ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

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 υδροστρόβιλου 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 άτρακτου η γεννήτρια παραλαμβάνει το μηχανικό φορτίο του υδροστρόβιλου και το μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. [2]

1.2 Κατηγορίες Υδροστροβίλων

Οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Συγκεκριμένα ο διαχωρισμός γίνεται στους υδροστροβίλους ολικής προσβολής και στους υδροστροβίλους μερικής προσβολής. [2],[4]

1.2.1 Υδροστρόβιλοι Ολικής Προσβολής

Σε αυτή την κατηγορία υδροστροβίλων το εμφανέστερο χαρακτηριστικό είναι η πλήρης βύθιση του δρομέα στο ρέον υγρό. Η λειτουργία του δρομέα είναι αξονοσυμμετρική, συνεπώς είναι απαραίτητο το τμήμα εισόδου να περιβάλλει το δρομέα, ώστε να εξασφαλίζει στην διατομή εισόδου του δρομέα αξονοσυμμετρικές συνθήκες της ροής. Τα πτερύγια του δρομέα είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο, ώστε η διαφορά της στατικής πίεσης μεταξύ τους να επιβάλει σε αυτά δυνάμεις άνωσης, παρόμοιες με αυτές που ασκούνται στα πτερύγια των αεροσκαφών, γεγονός το οποίο προκαλεί την περιστροφή του δρομέα. Δηλαδή, η ροή μέσω του δρομέα γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης του υγρού. Για τον λόγο αυτό οι υδροστρόβιλοι ολικής προσβολής ονομάζονται και υδροστρόβιλοι αντιδράσεως.

Οι υδροστροβίλοι ολικής προσβολής γενικά περιστρέφονται σε μεγάλες ταχύτητες, ακόμα και για μικρό υδραυλικό ύψος και συγκριτικά σε μεγαλύτερες ταχύτητες από τους υδροστροβίλους μερικής προσβολής. Αυτή τους η ιδιότητα καθιστά δυνατή την απευθείας σύζευξη της ατράκτου τους με την άτρακτο της γεννήτριας χωρίς να είναι απαραίτητη η παρεμβολή ειδικού πολλαπλασιαστή στροφών. Προφανώς, αυτό μειώνει το κόστος κατασκευής του έργου ενώ καθιστά και απλούστερη την συντήρηση του.

Οι συνηθέστεροι τύποι υδροστροβίλων ολικής προσβολής είναι οι ακόλουθοι:

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

Οι υδροστροβίλοι Francis χρησιμοποιούνται για εκμετάλλευση μέσων τιμών υδραυλικών πτώσεων της τάξεως των 50 έως 500 mΣΥ. Οι υδροστροβίλοι αξονικής ροής προτιμούνται για χρήση σε μικρές τιμές υδραυλικής πτώσης και συγκεκριμένα μικρότερες των 50 mΣΥ

Τα κύρια μέρη των υδροστροβίλων ολικής προσβολής είναι τα εξής:

- Τμήμα Εισόδου
- Δρομέας
- Τμήμα Εξόδου

Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή της διαμόρφωσης και της λειτουργίας των ανωτέρω τμημάτων

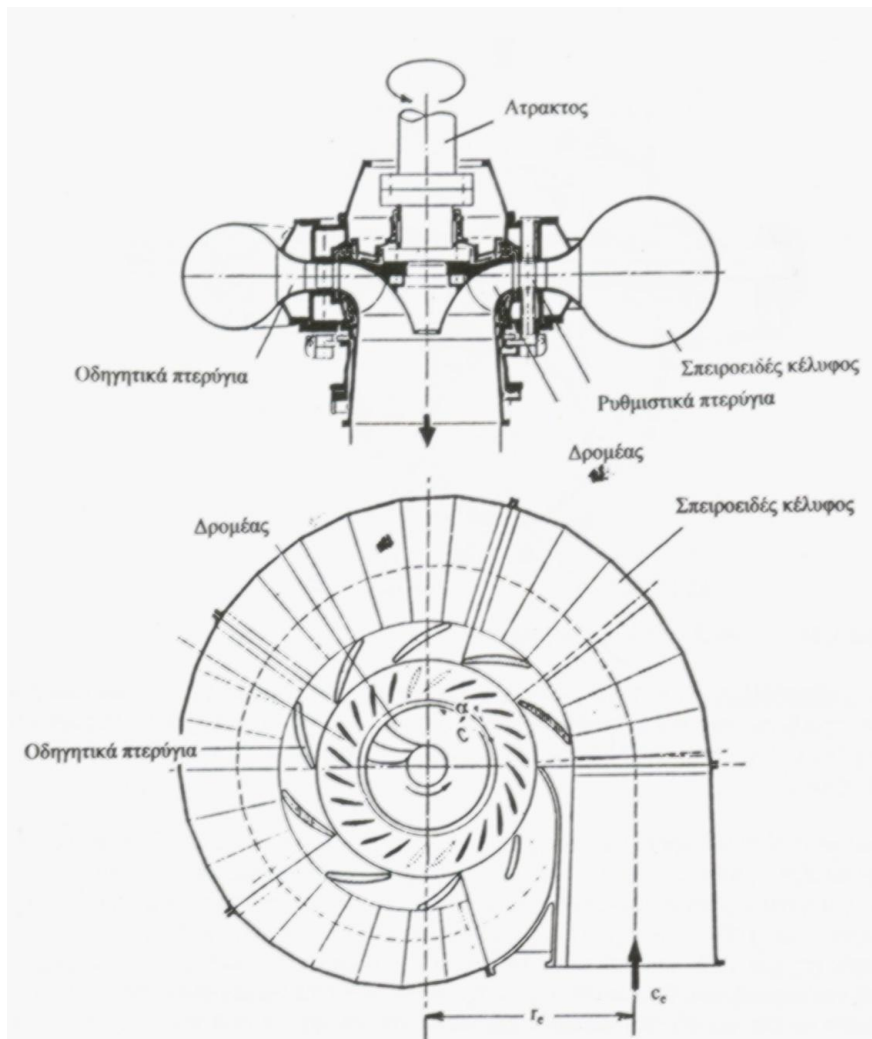
1.2.1.1 Τμήμα Εισόδου

Το τμήμα εισόδου ενός υδροστροβίλου ολικής προσβολής έχει συνηθέστερα τη μορφή σπειροειδούς κελύφους και – όπως αναφέρεται και ανωτέρω – περιβάλλει το δρομέα ώστε να επιτυγχάνεται ομοιομορφία τόσο στην τροφοδοσία όσο και στη λειτουργία του. Το σπειροειδές κέλυφος αποτελεί το τμήμα του υδροστροβίλου που καταλαμβάνει τον μεγαλύτερο όγκο και υπόκειται στη μεγαλύτερη στατική πίεση. Επίσης, είναι συνδεδεμένο στην διατομή εισόδου του με τον κυκλικής διατομής αγωγό προσαγωγής.

Σε κάθε τομή του σπειροειδούς κελύφους μεσημβρινού προσανατολισμού παρατηρείται διατομή, σχεδόν κυκλικού σχήματος, η οποία ελαττώνεται σταδιακά κατά την περιφερειακή διεύθυνση. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η απαιτούμενη ομοιομορφία στην ροή και την τροφοδοσία του δρομέα, ενώ παράλληλα το υγρό διερχόμενο από το σπειροειδές κέλυφος αποκτά μια αρχική τιμή της περιφερειακής συνιστώσας της απόλυτης ταχύτητας που καλείται συστροφή.

Περιμετρικά του τμήματος τροφοδοσίας του δρομέα τοποθετείται στεφάνη με σταθερά οδηγητικά πτερύγια. Πιο συγκεκριμένα, είναι τοποθετημένη σε περιοχή όπου η ροή συγκλίνει ώστε να μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα αποκόλλησης.

Η στεφάνη οδηγητικών πτερυγίων έχει διάφορες ιδιότητες, μία εκ των οποίων είναι η ενίσχυση της μηχανικής αντοχής και της στιβαρότητας του σπειροειδούς κελύφους. Ακόμη, τα οδηγητικά πτερύγια συνεισφέρουν στην μείωση των απαιτούμενων διαστάσεων του σπειροειδούς κελύφους. Αυτό συμβαίνει διότι το κέλυφος σχεδιάζεται με τη μεγαλύτερη γωνία σπείρας ώστε να δύναται να προσδώσει στο υγρό τιμή συστροφής μεγαλύτερη από την απαιτούμενη.



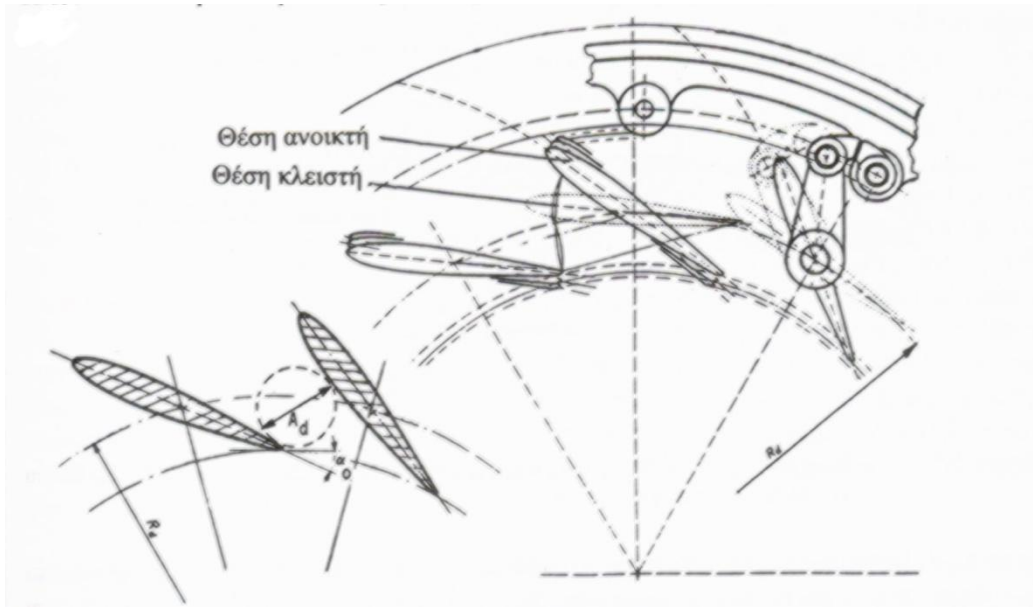
Εικόνα 1.1: Τμήμα Εισόδου Υδροστροβίλου Αντιδράσεως

Ανάμεσα στη στεφάνη οδηγητικών πτερυγίων και στη διατομή εισόδου του δρομέα, παρεμβάλλεται περιμετρικά η στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων. Τα πτερύγια αυτά είναι κυλινδρικές επιφάνειες των οποίων οι γενέτειρες βρίσκονται σε παραλληλία με τον άξονα του δρομέα. Επιπρόσθετα, έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης και ομοιόμορφης περιστροφής - προκαλούμενης από εξωτερικό μηχανισμό – γύρω από άξονα επίσης παράλληλο στον άξονα του δρομέα.

Ο κύριος σκοπός που εξυπηρετούν τα ρυθμιστικά πτερύγια είναι η διαμόρφωση στην είσοδο του δρομέα της τελικής τιμής συστροφής, ομοιόμορφης για όλα τα στοιχεία του υγρού. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η απαιτούμενη ομοιομορφία, η στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων τοποθετείται σε επίπεδο κάθετο στον άξονα περιστροφής του δρομέα γεγονός που καθιστά τη ροή στα ρυθμιστικά πτερύγια καθαρά ακτινική.

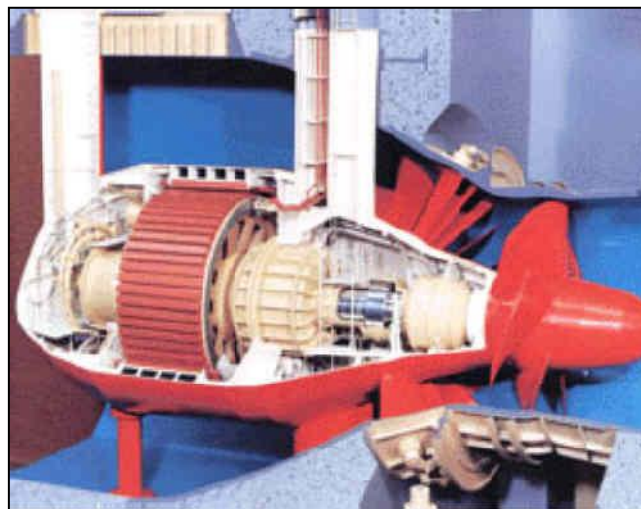
Μία ακόμη ιδιότητα των ρυθμιστικών πτερυγίων είναι η ρύθμιση του σημείου λειτουργίας του υδροστροβίλου. Αυτό συμβαίνει διότι τα ρυθμιστικά πτερύγια δύνανται να προκαλέσουν μεταβολή του διακένου, δηλαδή της διατομής μεταξύ δύο διαδοχικά τοποθετημένων πτερυγίων. Συνεπώς για σταθερή ταχύτητα περιστροφής και διαθέσιμη υδραυλική πτώση μπορούν να μεταβάλλουν την διερχόμενη παροχή και άρα την ισχύ στην έξοδο του στροβίλου.

Τα ρυθμιστικά πτερύγια συναντώνται πάντα σε ζυγό πλήθος ώστε η στεφάνη και ο μηχανισμός περιστροφής να έχουν άξονα συμμετρίας κατά ένα μεσημβρινό επίπεδο. Καθώς αυξάνει το πλήθος τους, μειώνεται το μήκος της χορδής τους με αποτέλεσμα την μείωση του μεγέθους των δυνάμεων και των ροπών που ασκούνται πάνω σε αυτά. Τα ρυθμιστικά πτερύγια σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε – όταν επιθυμείται – να εφάπτεται το ένα πτερύγιο με το επόμενο κατά μία γενέτειρα (θέση κλειστή) και έτσι να προκαλείται – κατά το δυνατόν – μηδενισμός της διατομής από την οποία διέρχεται το υγρό, ώστε να επιτυγχάνεται η κράτηση της μονάδας.



Εικόνα 1.2: Στεφάνη Ρυθμιστικών Πτερυγίων Ακτινικής Ροής

Στην περίπτωση που η διαθέσιμη υδραυλική πτώση είναι μικρότερη της τάξης των 10mΣΥ χρησιμοποιούνται ο βολβοειδής και ο σωληνωτός υδροστρόβιλος. Σε αυτούς, η ροή στο τμήμα εισόδου δεν γίνεται κατά την ακτινική, ως συνηθίζεται, διεύθυνση αλλά κατά την αξονική. Αυτή η αλλαγή βοήθα στην μείωση του όγκου, των υδραυλικών απωλειών και του συνολικού κόστους του έργου. Μία ακόμη ιδιαιτερότητα αυτών των δύο υδροστροβίλων, που αποτελούν παραλλαγή του Kaplan, είναι η απουσία του σπειροειδούς κελύφους. Επίσης η στεφάνη με τα οδηγητικά πτερύγια τοποθετείται είτε αξονικά είτε κωνικά με αποτέλεσμα τα πτερύγια να μην αποτελούν κυλινδρικές επιφάνειες.



Εικόνα 1.3 Βολβοειδής Υδροστρόβιλος

2.2.1.2 Δρομέας

Ο δρομέας – όπως έχει περιγραφεί και ανωτέρω – είναι το τμήμα της μηχανής το οποίο περιστρέφεται μετατρέποντας την υδραυλική ενέργεια του υγρού σε μηχανική.

Δρομέας Francis

Στον δρομέα των υδροστροβίλων Francis τα περύγια είναι πακτωμένα στην στεφάνη και εκτείνονται μέχρι την πλήμνη. Η στεφάνη αναλαμβάνει το ρόλο της ενίσχυσης της μηχανικής στιβαρότητας του δρομέα γενικότερα και κυρίως των περυγίων, στα οποία αναπτύσσονται δυνάμεις όχι μόνο λόγω της ροής που διέρχεται από αυτά αλλά και φυγόκεντρες δυνάμεις τις οποίες προκαλεί η περιστροφή.

Προς αποφυγή συντονισμού και ταλαντώσεων, το πλήθος των περυγίων δρομέα Francis συνήθως εκλέγεται περιττό δεδομένου ότι τα ρυθμιστικά περύγια είναι άρτια στον αριθμό. Συνήθεις αριθμοί περυγίων είναι 11, 13 και 15 με ελαφρά συνηθέστερο το 13.

Όταν το πλήθος των περυγίων είναι σταθερό, ο δρομέας γίνεται σταδιακά περισσότερο μεικτής ροής καθώς μειώνεται η διαθέσιμη υδραυλική πτώση. Επίσης, μειώνεται το μεσημβρινό μήκος των περυγίων αφού οι φέρουσες επιφάνειες που είναι απαραίτητες για την ενεργειακή μετατροπή είναι μικρότερες σε μέγεθος.



Εικόνα 1.4 Δρομέας Francis

Δρομέας Αξονικής Ροής

Στους υδροστροβίλους αντίδρασης αξονικής ροής (Kaplan, Bulb, Tube κλπ.) ο δρομέας έχει τη μορφή έλικας. Τα πτερύγια έχουν τη μορφή προβόλου και είναι στερεωμένα αποκλειστικά στην πλήμνη μαζί με την οποία περιστρέφονται. Η διαμόρφωση αυτή δεν είναι τυχαία. Λόγω του ότι οι υδροστροβίλοι αξονικής ροής χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση μικρών υδραυλικών πτώσεων, οι δυνάμεις που ασκούνται στους δρομείς τους είναι σαφώς μικρότερες από αυτές που ασκούνται σε δρομέα υδροστροβίλου Francis. Συνεπώς οι επιφάνειες των πτερυγίων κατασκευάζονται με κατά το δυνατόν μικρότερες διαστάσεις ώστε να υπάρχει μείωση των απωλειών λόγω τριβής αλλά και παράλληλη μείωση του κόστους κατασκευής.

Είναι σύνηθες τα πτερύγια δρομέα αξονικής ροής να περιστρέφονται ως προς την πλήμνη ώστε να είναι δυνατή η μεταβολή της κλίσης τους ως προς τη σχετική ροή. Η περιστροφή τους γίνεται μέσω ενός μηχανισμού τοποθετημένου εντός της πλήμνης και ο οποίος αποτελείται από μοχλούς που ενεργοποιούνται είτε μηχανικά είτε με υδραυλικό σύστημα εμβόλων. Προφανώς, για να είναι δυνατή η περιστροφή των πτερυγίων απαιτείται μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην κατασκευή η οποία βεβαίως αυξάνει σημαντικά το κόστος της κατασκευής. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτού του αυξημένου κόστους αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι, χάρη σε αυτόν τον μηχανισμό περιστροφής των πτερυγίων, ο υδροστροβίλος δύναται να λειτουργεί σε μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας και μάλιστα με αρκετά ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης.

Βεβαίως, όταν πρόκειται για υδροστροβίλους αξονικής ροής οι οποίοι έχουν πολύ μικρό μέγεθος, τα πτερύγια του δρομέα συνηθίζεται να κατασκευάζονται σταθερά. Αυτή η επιλογή, όπως προαναφέρθηκε, μειώνει μεν το κόστος αλλά ταυτόχρονα μειώνει και το εύρος λειτουργίας του στροβίλου.



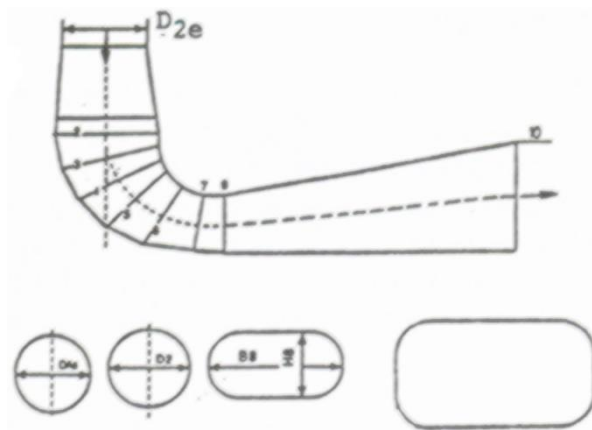
Εικόνα 1.5 Δρομέας Αξονικής Ροής

1.2.1.3 Τμήμα Εξόδου

Το τμήμα εξόδου ενός υδροστροβίλου αντιδράσεως ονομάζεται και αγωγός απαγωγής ή φυγής και σαν στόχο έχει την επιβράδυνση της απόλυτης ταχύτητας του υγρού καθώς το οδηγεί προς την διάφυγα απαγωγής ή τον κάτω ταμιευτήρα. Αυτό συμβαίνει διότι το υγρό κατά την έξοδό του από τον δρομέα έχει υψηλή ταχύτητα της τάξης των 6 έως 10 m/sec και η επιθυμητή ταχύτητα για την έξοδο στην διάφυγα απαγωγής ή τον κάτω ταμιευτήρα είναι της τάξεως του 1 έως 2,5 m/sec ώστε η απορριπτόμενη ενέργεια να είναι η μικρότερη δυνατή.

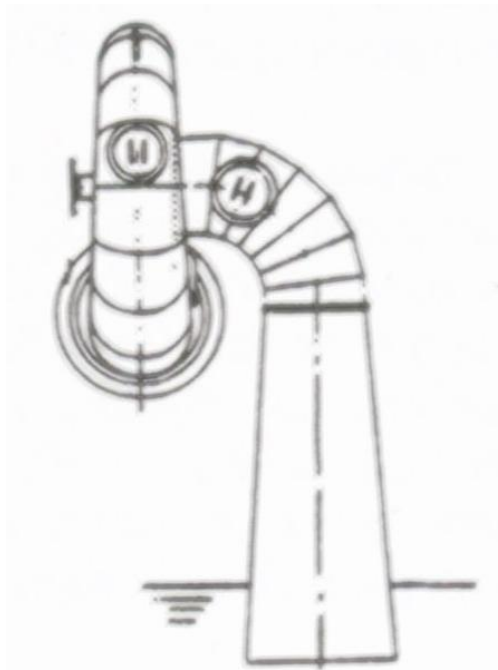
Στους περισσότερους υδροστροβίλους ολικής προσβολής υπάρχει διαμόρφωση ευθύγραμμου κωνικού αποκλίνοντος τμήματος η οποία τοποθετείται κάταντι της διατομής εξόδου του δρομέα και αποτελεί την αφετηρία του αγωγού απαγωγής. Η γωνία κώνου του τμήματος αυτού του αγωγού φυγής δεν ξεπερνά τις 7 μοίρες καθώς είναι επιθυμητό να αποφευχθεί αποκόλληση της ροής.

Το τμήμα του αγωγού απαγωγής που βρίσκεται στη συνέχεια του προαναφερθέντος τμήματος ποικίλει από υδροστρόβιλο σε υδροστρόβιλο. Συγκεκριμένα, στους υδροστρόβιλους κατακόρυφου άξονα το τμήμα που ακολουθεί καμπυλώνεται κατά 90 μοίρες ώστε να οριζοντιώνεται η διατομή εξόδου. Στη συνέχεια η διατομή πλαταίνει σταδιακά και γίνεται σχεδόν ορθογωνική διατηρώντας την μεγάλη διάσταση οριζόντια. Αυτή η διαμόρφωση λαμβάνει χώρα ώστε να μειώνεται τόσο το κατακόρυφο μήκος του αγωγού απαγωγής όσο και το μέγεθος των απαιτούμενων εκσκαφών.



Εικόνα 1.6 Σχηματική Απεικόνιση Αγωγού Απαγωγής Υδροστροβίλου Αντιδράσεως Οριζοντίου Άξονα

Εν αντιθέσει, στους οριζοντίου άξονα υδροστροβίλους Francis ο κωνικός αγωγός απαγωγής καμπυλώνεται κατά 90 μοίρες και διατηρεί την κυκλική διατομή του, η οποία αυξάνεται σταδιακά λόγω της κωνικότητας, μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια της διάφυγας απαγωγής ή του κάτω ταμιευτήρα.



Εικόνα 1.7: Σχηματική Απεικόνιση Αγωγού Απαγωγής Υδροστροβίλου Αντιδράσεως Οριζοντίου Άξονα

Όταν πρόκειται για υδροστροβίλους αξονικής ροής, οριζόντιου ή κεκλιμένου άξονα, (π.χ. Tube, Bulb) ο αγωγός απαγωγής είναι εξολοκλήρου ευθύγραμμος, κωνικός και κυκλικής διατομής από την αρχή μέχρι το σημείο εξόδου του.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι ο αγωγός απαγωγής επιδρά στην λειτουργία και στον βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου και για αυτό το λόγο ως διατομή εξόδου του συστήματος λαμβάνεται η διατομή εξόδου του αγωγού αυτού.

1.2.2 Υδροστρόβιλοι Μερικής Προσβολής

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 υπόκειντο 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 έναντι και κάτω από 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.

Οι κυριότεροι τύποι υδροστροβίλων μερικής προσβολής είναι οι ακόλουθοι:

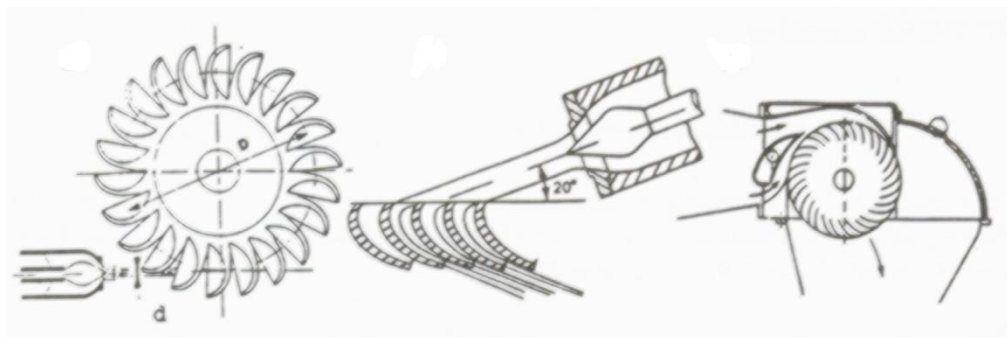
-Pelton

-Turgo

-Cross-Flow

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.

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



Εικόνα 1.8: Σχηματική Απεικόνιση Υδροστροβίλων Pelton, Turgo και Cross – Flow αντίστοιχα

Τα κύρια μέρη των υδροστροβίλων μερικής προσβολής είναι – όπως και στους υδροστροβίλους μερικής προσβολής – τα εξής:

- Τμήμα Εισόδου
- Δρομέας
- Τμήμα Εξόδου

Όπως προαναφέρθηκε, ο τύπος υδροστροβίλου μερικής προσβολής που χρησιμοποιείται στην συντριπτική πλειοψηφία των υδροηλεκτρικών έργων παγκοσμίως είναι ο Pelton. Επίσης, η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει το σύστημα διανομής του υδροστροβίλου Pelton που βρίσκεται στο εργαστήριο Υδροδυναμικών Δοκιμών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμο η περιγραφή των ανωτέρω τμημάτων να αναφέρεται αποκλειστικά στους υδροστροβίλους Pelton.

1.2.2.1 Τμήμα Εισόδου

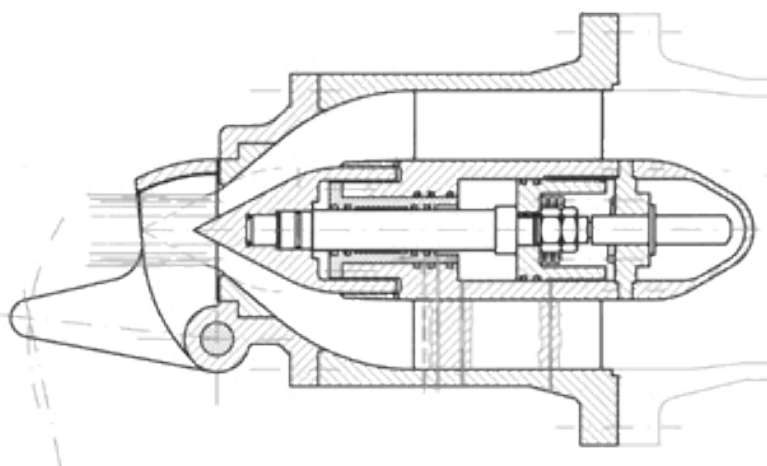
Ως αφετηρία του τμήματος εισόδου λαμβάνεται η σφαιρική βάνα που εδράζεται στο άκρο του αγωγού προσαγωγής. Το τμήμα εισόδου εκτείνεται ως τα ακροφύσια τροφοδοσίας.

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 στο έδαφος επίπεδο

όταν είναι ένα ή δύο σε αριθμό ενώ προτιμάται οριζόντια τοποθέτηση τους σε περίπτωση που τα ακροφύσια είναι τρία και άνω. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με σκοπό την ελαχιστοποίηση της επίδρασης που έχει η δέσμη του κάθε ακροφυσίου στις δέσμες των υπολοίπων.

Το κάθε ακροφύσιο περικλείει μία βελόνη η οποία με τη βοήθεια υδραυλικού – συνήθως – συστήματος δύναται να μετακινείται κατά μήκος του άξονα του ακροφυσίου. 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 Bernoulli.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των υδροηλεκτρικών έργων είναι η ταχύτατη παραλαβή και απόρριψη φορτίου όταν αυτό απαιτείται από την υφιστάμενη ζήτηση του διασυνδεδεμένου δικτύου σε ηλεκτρική ενέργεια. Όταν γίνεται χρήση υδροστροβίλου Pelton και για να είναι δυνατή η γρήγορη απόρριψη φορτίου κατασκευάζεται όνυχας εκτροπής της δέσμης αμέσως μετά τη διατομή εξόδου του ακροφυσίου. Όταν είναι επιθυμητό, ο όνυχας ενεργοποιείται εκτρέποντας την δέσμη του νερού από την αρχική της διεύθυνση. Συνεπώς διακόπτεται η πρόσπτωση της δέσμης στο δρομέα με αποτέλεσμα το μηδενισμό της ροπής που αναπτύσσεται σε αυτόν. Την ενεργοποίηση του όνυχα ακολουθεί κλείσιμο της βελόνης ώστε να μειωθεί η παροχή της δέσμης. Το κλείσιμο της βελόνης γίνεται με υπολογισμένο ρυθμό ώστε να αποφευχθεί η αύξηση της υπερπίεσης πέρα από τα επιτρεπόμενα όρια λόγω του φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος.



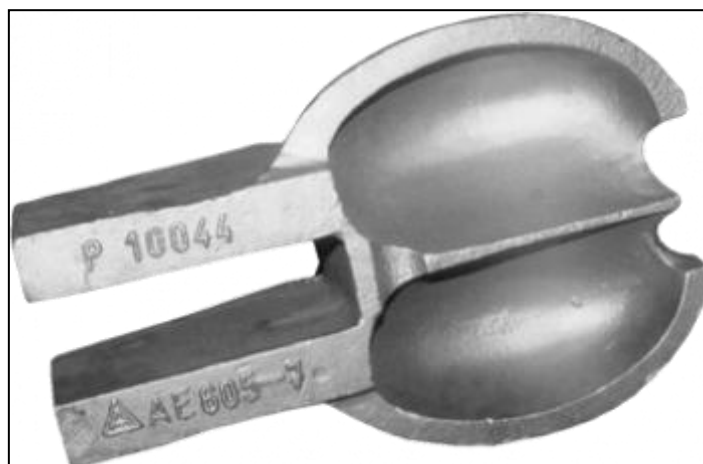
Εικόνα 1.9: Σχηματική Απεικόνιση Ακροφυσίου Pelton και Όνυχα Εκτροπής

Όπως έχει αναφερθεί και ανωτέρω, 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.

1.2.2.2 Δρομέας

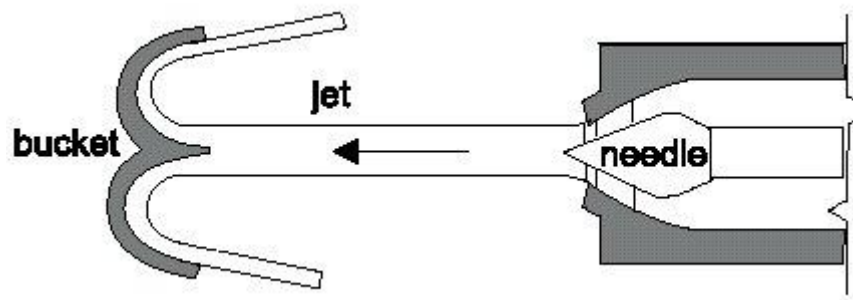
Ο δρομέας Pelton έχει σχήμα κυκλικού δίσκου πάνω στην περιφέρεια του οποίου εδράζονται ειδικά σχεδιασμένα σκαφίδια. Το κάθε σκαφίδιο μοιάζει σαν να είναι χωρισμένο στη μέση και να αποτελείται από δύο υπό-σκαφίδια τα οποία είναι συμμετρικά ως προς το κάθετο στο μέσο του σκαφιδίου επίπεδο. Η διαμόρφωση αυτή είναι απαραίτητη ώστε το μέσο του σκαφιδίου – στο οποίο προσκρούει και η δέσμη του υγρού – να μην αποτελεί νεκρό σημείο. Δηλαδή είναι επιθυμητό το υγρό που ήδη έχει προσπέσει στο σκαφίδιο να απωθείται άμεσα ώστε να μην επηρεάζει τη δέσμη που πρόκειται να προσπέσει στο σκαφίδιο. Στο κάτω μέρος του κάθε σκαφιδίου υπάρχει ειδική εγκοπή η οποία εξυπηρετεί στην επιπλέον μετακίνηση του σκαφιδίου από τη δέσμη πριν παρεμβληθεί το επόμενο σκαφίδιο ανάμεσα στη δέσμη και το προηγούμενο σκαφίδιο. Επίσης, η εγκοπή αυτή βοηθά στην ομαλότερη είσοδο του σκαφιδίου στην πορεία της δέσμης και συνεπώς στην ομαλότερη περιστροφή του δρομέα.



Εικόνα 1.10: Σχηματική Απεικόνιση Σκαφιδίου Υδροστροβίλου Pelton

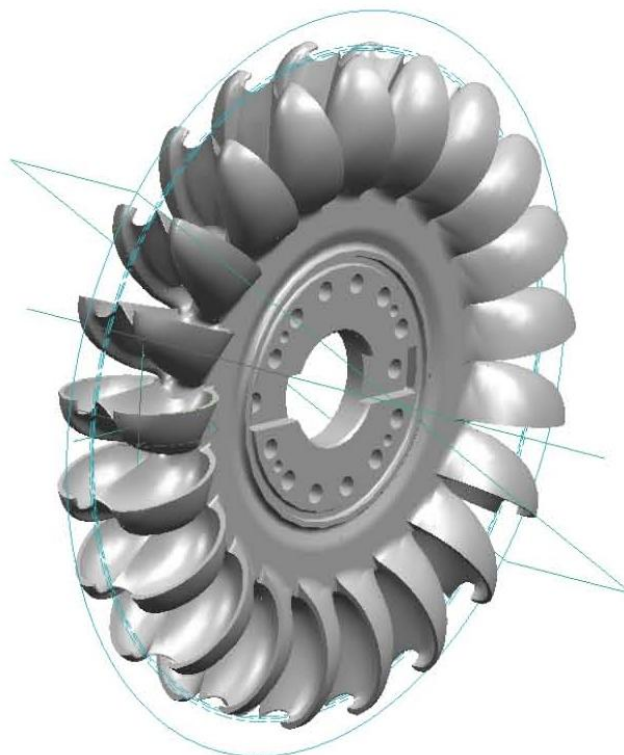
Μετά την πρόσπτωση της δέσμης στα σκαφίδια του περιστρεφόμενου δρομέα, έπεται αλλαγή της διεύθυνσης της δέσμης η οποία πλέον ακολουθεί την διπλή κοιλότητα των σκαφιδίων και εξέρχεται από αυτά με σχεδόν μηδενική συστροφή. Τα σκαφίδια είναι σχεδιασμένα ώστε να προκαλούν εκτροπή της διεύθυνσης της ροής

κατά 165 μοίρες που είναι και η μέγιστη γωνία εκτροπής ώστε να μην έρχεται σε επαφή η εκτρεπόμενη δέσμη με το σκαφίδιο που έπεται.



Εικόνα 1.11: Σχηματική Απεικόνιση Εκτροπής της Ροής κατά την Πρόσπτωση στο Σκαφίδιο του Δρομέα

Όσον αφορά της διαστάσεις του δρομέα, η διάμετρος συνήθως σχεδιάζεται δωδεκαπλάσια έως δεκαοκταπλάσια της διαμέτρου της δέσμης του υγρού όπως αυτή μετράται για μέγιστη παροχή. Στην επιλογή της διαμέτρου σημαντικό ρόλο παίζουν τόσο το μέγεθος όσο και το πλήθος των σκαφιδίων του οποίου συνήθεις τιμές είναι 20 έως 22.

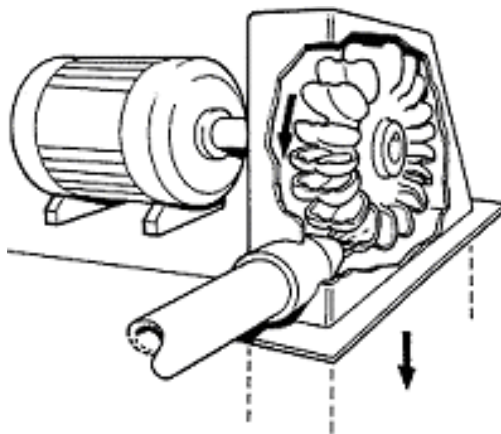


Εικόνα 1.12: Τριδιάστατη Απεικόνιση Δρομέα Υδροστροβίλου Petlon

Σημειώνεται εδώ ότι η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο σημείο προσβολής της δέσμης και την ελεύθερη στάθμη της διώρυγας απαγωγής δείχνει το ποσό της ενέργειας που υποχρεωτικά παραμένει αναξιοποίητο. Η διαφορά αυτή καθορίζεται με βάση τη φυσική διακύμανση της στάθμης της διώρυγας απαγωγής. Σκοπός είναι η ανεμπόδιστη λειτουργία του δρομέα υπό οποιοσδήποτε συνθήκες.

1.2.2.3 Τμήμα Εξόδου

Στους υδροστροβίλους Pelton το τμήμα εξόδου είναι σαφώς απλούστερο από αυτό των υδροστροβίλων αντιδράσεως. Εκμεταλλευόμενο την βαρυντική 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.



Εικόνα 1.13: Σχηματική Απεικόνιση Τμήματος Εξόδου Υδροστροβίλου Pelton

Κεφάλαιο 2: Απώλειες Ενέργειας

Η λειτουργία των υδροστροβίλων, όπως και κάθε μηχανής, παρουσιάζει απώλειες. Οι απώλειες αυτές έχουν ως απόρροια να μην αξιοποιείται πλήρως η διαθέσιμη υδραυλική ενέργεια.

Οι κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται οι απώλειες που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία ενός υδροστροβίλου είναι οι εξής:

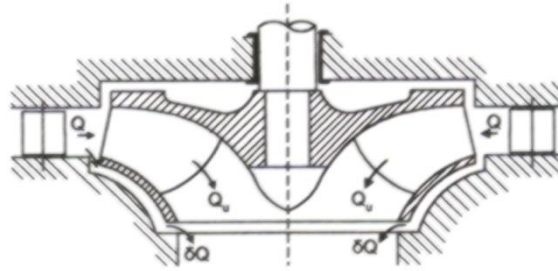
- Ογκομετρικές Απώλειες
- Μηχανικές Απώλειες
- Υδραυλικές Απώλειες

Σημειώνεται εκ των προτέρων ότι, επειδή η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει το σύστημα διανομής υδροστροβίλου Pelton, θα δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στις υδραυλικές απώλειες και συγκεκριμένα στην υποκατηγορία των υδραυλικών απωλειών τριβής. Στις υπόλοιπες κατηγορίες γίνεται συνοπτική αναφορά για λόγους πληρότητας.

2.1 Ογκομετρικές Απώλειες

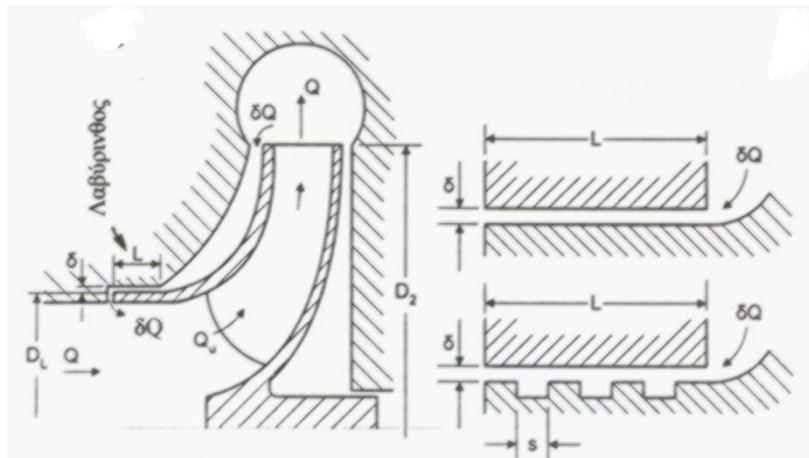
Ως ογκομετρικές απώλειες χαρακτηρίζεται η παροχή δQ η οποία ρέει μέσω διακένου και δεν διέρχεται από τον δρομέα. Το αποτέλεσμα είναι η παροχή δQ να μην συντελεί στην παραγωγή ενέργειας από τον στρόβιλο αφού δεν είναι δυνατό να γίνει μετατροπή της υδραυλικής της ενέργειας σε μηχανική.

Στους υδροστροβίλους αντιδράσεως τύπου Francis η παροχή δQ , λόγω της θετικής διαφοράς στατικής πίεσης, ρέει μέσω του διακένου το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια της στεφάνης και την εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού κελύφους.



Εικόνα 2.1: Σχηματική Απεικόνιση Ανάπτυξης Ογκομετρικών Απωλειών σε Δρομέα Υδροστροβίλου Αντιδράσεως

Σε αυτή την περίπτωση, για την αποφυγή ογκομετρικών απωλειών ή τουλάχιστον διατήρησής τους σε ανεκτά όρια, προβλέπεται η διαμόρφωση λαβυρίνθου. Ο λαβύρινθος είναι δακτυλιοειδής σχισμή που διαμορφώνεται ανάμεσα στο σταθερό κέλυφος και την στρεφόμενη πτερωτή.



Εικόνα 2.2: Σχηματική Απεικόνιση Λαβύρινθου

Στους υδροστροβίλους αντιδράσεως αξονικής ροής οι ογκομετρικές απώλειες παρατηρούνται μεταξύ του εξωτερικού κελύφους και των ακροπτερυγίων του δρομέα. Προς αποφυγήν των ογκομετρικών απωλειών το ακτινικό διάκενο σχεδιάζεται κατά το δυνατόν μικρότερο και συγκεκριμένα είναι της τάξεως του 0,1% της εξωτερικής διαμέτρου του δρομέα. Η λύση αυτή είναι και η μοναδική στην περίπτωση αυτή.

Στην περίπτωση των υδροστροβίλων δράσεως οι ογκομετρικές απώλειες είναι μηδενικές καθώς η ροή στον δρομέα είναι ισόθλιπη. [2]

2.2 Μηχανικές Απώλειες

Ως μηχανικές απώλειες χαρακτηρίζονται οι απώλειες μηχανικής ισχύος που αποδίδεται στην άτρακτο του δρομέα. Διαχωρίζονται σε απώλειες εδράνων και σε απώλειες στρεφόμενου δίσκου.

Στους υδροστροβίλους αντιδράσεως οι απώλειες στρεφόμενου δίσκου προκαλούνται από την τριβή του υγρού με τις εξωτερικές επιφάνειες της πλήμνης και της στεφάνης – αν υπάρχει – του δρομέα.

Στους υδροστροβίλους δράσεως οι απώλειες στρεφόμενου δίσκου είναι μηδενικές. Ωστόσο, αντί αυτών, αναπτύσσονται απώλειες αερισμού. Οι απώλειες αυτές οφείλονται στην κίνηση του περιβάλλοντα αέρα η οποία προκαλείται λόγω της περιστροφής του δρομέα. [2]

2.3 Υδραυλικές Απώλειες

Ως υδραυλικές απώλειες χαρακτηρίζεται το ποσό διαθέσιμης υδραυλικής ισχύος το οποίο χάνεται στο εσωτερικό της μηχανής. Οι υδραυλικές απώλειες σε έναν υδροστρόβιλο συμβολίζονται dh_{fea} και εξαρτώνται από το σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου. Διακρίνονται σε υδραυλικές απώλειες κρούσεως και υδραυλικές απώλειες τριβής.

2.3.1 Υδραυλικές Απώλειες Κρούσεως

Ως υδραυλικές απώλειες κρούσεως χαρακτηρίζονται οι απώλειες αποκόλλησης της ροής λόγω της διαφοράς που υπάρχει ανάμεσα στην γωνία των πτερυγίων και στη γωνία με την οποία προσπίπτει η ροή σε αυτά. Στα ρυθμιστικά πτερύγια οι απώλειες κρούσεως δεν είναι σημαντικές εξ' αιτίας της έντονης επιτάχυνσης που παρουσιάζει η ροή στην περιοχή αυτή. Οι υδραυλικές απώλειες κρούσης συμβολίζονται με dh_a και μηδενίζονται για τις παροχές τις οποίες η γωνία πρόσπτωσης της ροής στα πτερύγια είναι μηδενική.[2]

2.3.2 Υδραυλικές Απώλειες Τριβής

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

$$\delta h_\tau = \zeta_\tau \cdot Q^2$$

Ο συντελεστής ζ_τ 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.

2.3.2.1 Γραμμικές Υδραυλικές Απώλειες

Οι γραμμικές υδραυλικές απώλειες αναπτύσσονται στο εσωτερικό του σωλήνα και ονομάζονται έτσι λόγω του ότι είναι ανάλογες του μήκους στο οποίο αναπτύσσονται και ισοκατανεμημένες σε αυτό.

Ο συντελεστής γραμμικών απωλειών τόσο στη στρωτή όσο και στην τυρβώδη ροή δίνεται από την σχέση:

$$\zeta = \lambda \cdot \frac{L}{d_H} \quad \text{όπου:}$$

L: το μήκος του αγωγού στον οποίο κινείται το ρευστό

d_H : η υδραυλική διάμετρος του αγωγού. Δίνεται από τον τύπο $d_H = \frac{4A}{U}$ όπου A η διάμετρος του αγωγού και U η βρεχόμενη περίμετρος. Στην περίπτωση των υδροστροβίλων, οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται είναι κυκλικής διατομής οπότε προφανώς η υδραυλική διάμετρος ισούται με την εσωτερική διάμετρο του αγωγού.

λ : ο αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών. Η τιμή του εξαρτάται από την σχετική τραχύτητα ε_s των διαβρεχόμενων επιφανειών του αγωγού και τον αριθμό Reynolds.

Η σχετική τραχύτητα είναι ο λόγος της απόλυτης τραχύτητας ε των τοιχωμάτων του αγωγού προς την εσωτερική του διάμετρο. Η απόλυτη τραχύτητα εξαρτάται τόσο από το υλικό κατασκευής του αγωγού όσο και από τον τρόπο κατασκευής του αλλά και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Ενδεικτικά παρατίθεται ο ακόλουθος πίνακας με συνιστώμενες μέσες τιμές τραχύτητας για διάφορες περιπτώσεις.

Πίνακας 2.1: Απόλυτη Τραχύτητα Σωληνώσεων

Υλικό	Κατάσταση	Απόλυτη τραχύτητα ε (τατα)
Σωλήνες εξελάσεως (χωρίς ραφή) από γυαλί, χαλκό, ορείχαλκο, αλουμίνιο, ελαφρό κράματα, πλαστικό	νέος, τεχνητή λείανση	0 (λείος) έως 0.0015 περίπου
Χαλύβδινος εξελάσεως (άνευ ραφής)	νέος	0.01... 0.05
Συγκολλητός χαλύβδινος (με ραφή)	-νέος -ελαφρά φθορά -έντονη φθορά	0.05 0.10 0.15 ... 0.2 έως 3.0
Χαλύβδινος ηλωτός (με καρφιά)	εξαρτάται από το είδος και την διάταξη των καρφιών	από 1 έως 5 ή και περισσότερο (μέγιστο 10.0)
Γαλβανισμένος χυτοσίδηρος	νέος	0,12 ... 0,15
Χυτοσίδηρος (ακατέργαστος)	νέος	0,05
Χυτοσίδηρος συμπεριλαμβανομένων των εξαρτημάτων σύνδεσης (φλάντζες, σύνδεσμοι κλπ)	-νέος με εσωτερική επένδυση από ασφαλικό υλικό -νέος χωρίς επένδυση -ελαφρά φθορά -έντονη φθορά	0 έως 0.12 0.25 έως 0.15 έως 3.0
Ξύλο	νέος (η τραχύτητα αυξάνει με την ηλικία λόγω των εναποθέσεων)	0.2... 1.0
Αμιαντοτσιμέντο	νέος	0 έως 0.1
Σκυρόδεμα	-νέος, οπλισμένο σκυρόδεμα με προσεκτική επεξεργασία - νέος χωρίς επεξεργασία - οπλισμένο σκυρόδεμα με προσεκτική επεξεργασία μετά από λειτουργία μερικών ετών	0 έως 0.15 0.2... 0.8 0.2 ... 0.3 (ή περισσότερο)

Ο αριθμός Reynolds χαρακτηρίζει το δυναμικό χαρακτήρα της ροής και δίνεται από τον τύπο $Re = c \cdot d_H / \nu$ όπου c η ταχύτητα της ροής και ν η κινηματική

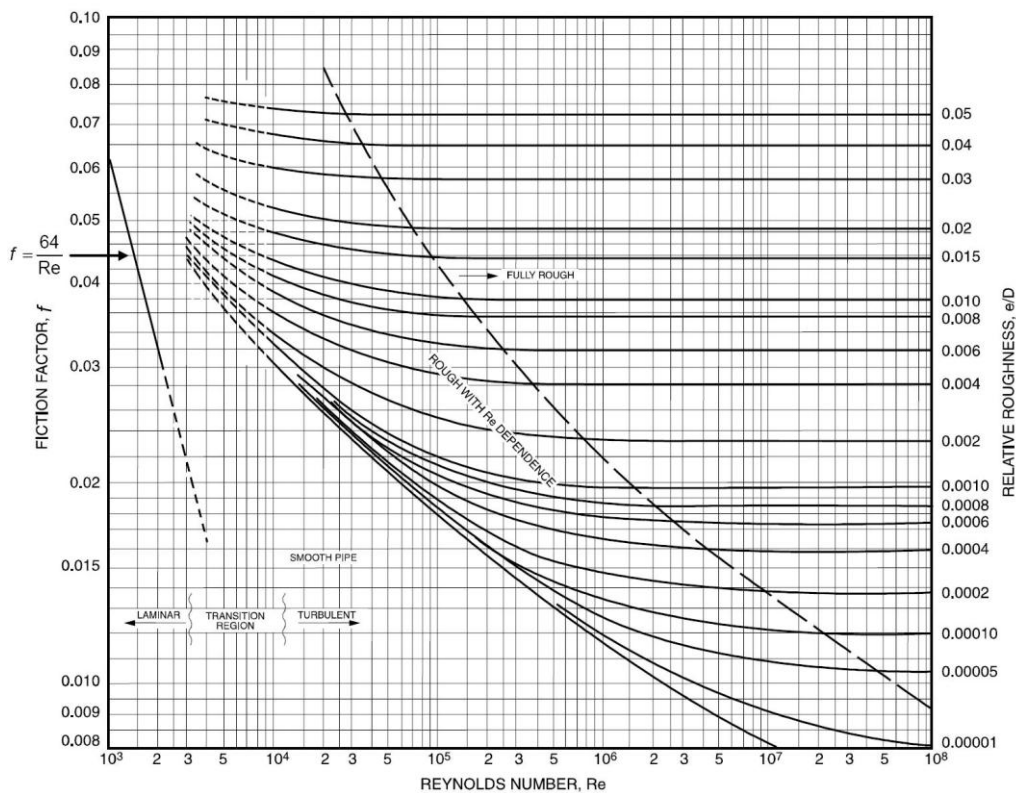
συνεκτικότητα του ρευστού. Η μεταβολή του αριθμού Reynolds δείχνει και τη μεταβολή από στρωτή σε τυρβώδη ροή. Συγκεκριμένα για αγωγό κυκλικής διατομής με είσοδο απότομα διαμορφωμένη ο κρίσιμος αριθμός Reynolds μετάβασης της ροής από στρωτή σε τυρβώδη είναι ο 2300. Η τιμή αυτή του αριθμού Reynolds αποτελεί την ελάχιστη τιμή κάτω από την οποία η ροή δεν μεταβαίνει από στρωτή σε τυρβώδη κατάσταση ακόμα και αν υφίσταται σημαντικές τοπικές διαταραχές. Συνεπώς ροές οι οποίες έχουν αριθμό Reynolds μικρότερο του 2300 χαρακτηρίζονται στρωτές ενώ αυτές με μεγαλύτερο χαρακτηρίζονται τυρβώδεις.

Ενδεικτικό του πως μεταβάλλεται ο αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών λ συναρτήσει του αριθμού Reynolds και της σχετικής τραχύτητας αποτελεί το διάγραμμα Moody.

MOODY (STANTON) DIAGRAM

Reprinted by permission of ASHRAE.

	e , (ft)	e , (mm)
Riveted steel	0.003-0.03	0.9-9.0
Concrete	0.001-0.01	0.3-3.0
Cast iron	0.00085	0.25
Galvanized iron	0.0005	0.15
Commercial steel or wrought iron	0.00015	0.046
Drawn tubing	0.000005	0.0015



Εικόνα 2.3: Διάγραμμα Moody

Ωστόσο, το διάγραμμα Moody δεν είναι ιδιαίτερος χρηστικό ούτε και απόλυτα ακριβές αφού τα αποτελέσματα που εξάγονται από αυτό έχουν μεγάλη εξάρτηση από το χρήστη και αναγνώστη του διαγράμματος.

Για τους ανωτέρω λόγους έχουν διατυπωθεί μαθηματικές συσχετίσεις των μεγεθών οι οποίες προέκυψαν έπειτα από λεπτομερή επεξεργασία μεγάλου πλήθους πειραματικών μετρήσεων.

Συγκεκριμένα υπάρχουν οι εξής διατυπώσεις:

- Hagen-Poiseuille: Για $Re < 2300$ προκύπτει: $\lambda = 64/Re$
δηλαδή ο συντελεστής είναι ανεξάρτητος της σχετικής τραχύτητας.
- Prandtl: Για $Re > 4000$ σε λείο (όταν $Re \cdot \varepsilon_s < 65$) κυκλικό σωλήνα προκύπτει: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,8$
δηλαδή πάλι ο συντελεστής δίνεται ανεξάρτητος της σχετικής τραχύτητας.
- Nikuradse: Για $Re > 4000$ σε υδραυλικά τραχύ (όταν $Re \cdot \varepsilon_s > 1300$) σωλήνα προκύπτει: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log\left(\frac{1}{\varepsilon_s}\right) + 1,14$
- Colebrook – White: Για $Re > 4000$ προκύπτει: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log\left[\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon_s}{3,71}\right]$
η σχέση αυτή αποτελεί μία σύνθεση των δύο ανωτέρω και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση τυρβώδους ροής. Η μορφή της είναι πεπλεγμένη και απαιτείται επαναληπτική διαδικασία για να επιλυθεί. [2],[5]

2.3.2.2 Εντοπισμένες Υδραυλικές Απώλειες

Οι εντοπισμένες υδραυλικές απώλειες αναπτύσσονται είτε λόγω ειδικών διαμορφώσεων σε έναν αγωγό όπως π.χ. διακλαδώσεις, είτε λόγω των εξαρτημάτων που μπορεί να παρεμβάλλονται της ροής όπως π.χ. βάννες.

Ο συντελεστής εντοπισμένων απωλειών είναι δύσκολο να υπολογιστεί θεωρητικά και συνήθως μετράται πειραματικά. Για το λόγο αυτό παρατίθενται στοιχεία όπως αυτά έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις. [5],[6]

Σε υδροηλεκτρικά έργα συνήθεις διαμορφώσεις που εντοπίζονται είναι οι ακόλουθες:

- Διακλαδώσεις
- Αλλαγές Κλίσεων
- Μεταβολές Διαμέτρου

2.3.2.2.1 Διακλαδώσεις

Δεδομένου ότι στα συστήματα διανομής υδροστροβίλων χρησιμοποιούνται αγωγοί κυκλικής διατομής παρατίθεται πίνακας με ενδεικτικές τιμές του συντελεστή εντοπισμένων απωλειών για διάφορες περιπτώσεις διακλαδώσεων κυκλικής διατομής. Σημειώνεται ότι ο δείκτης z δηλώνει τα στοιχεία της διακλάδωσης.

Πίνακας 2.2: Συντελεστής Απωλειών σε Διακλάδωση Κυκλικής Διατομής

Διαμόρφωση	Q_z/Q	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
	ζ_w	0,96	0,88	0,89	0,96	1,10	1,29
	ζ	0,05	-0,08	-0,04	0,07	0,21	0,35
	ζ_w	-1,04	-0,40	0,10	0,47	0,73	0,92
	ζ	0,06	0,18	0,30	0,40	0,50	0,60
	ζ_w	0,98	0,79	0,64	0,57	0,60	0,75
	ζ	0,05	-0,05	-0,02	0,07	0,20	0,34
	ζ_w	-0,92	-0,30	0,13	0,40	0,57	0,66
	ζ	0,04	0,24	0,30	0,25	0,10	-0,19
	ζ_w	0,90	0,68	0,50	0,38	0,35	0,48
	ζ	0,04	-0,06	-0,04	0,07	0,20	0,33
	ζ_w	-0,90	-0,73	0,00	0,22	0,37	0,38
	ζ	0,05	0,18	0,19	0,06	-0,18	-0,54

Οι αρνητικές τιμές του συντελεστή εντοπισμένων απωλειών δηλώνουν αύξηση της πίεσης. Σημειώνεται ότι στρογγύλευση των ακμών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή εντοπισμένων απωλειών κατά 10 έως 30% (για τις θετικές τιμές του).

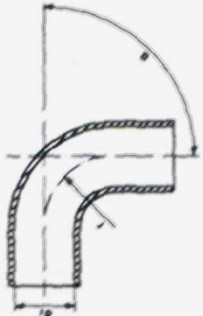
2.3.2.2.2 Αλλαγές Κλίσεων

Μια αλλαγή στην κλίση ενός αγωγού μπορεί να γίνει είτε με καμπύλη κάποιας γωνίας και ακτίνας καμπυλότητας είτε χωρίς καμπύλη με φάλτσο κόψιμο και συγκόλληση. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος υδροστρόβιλος Pelton που αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής διαθέτει και τις δύο διαμορφώσεις.

Καμπύλη Γωνίας α

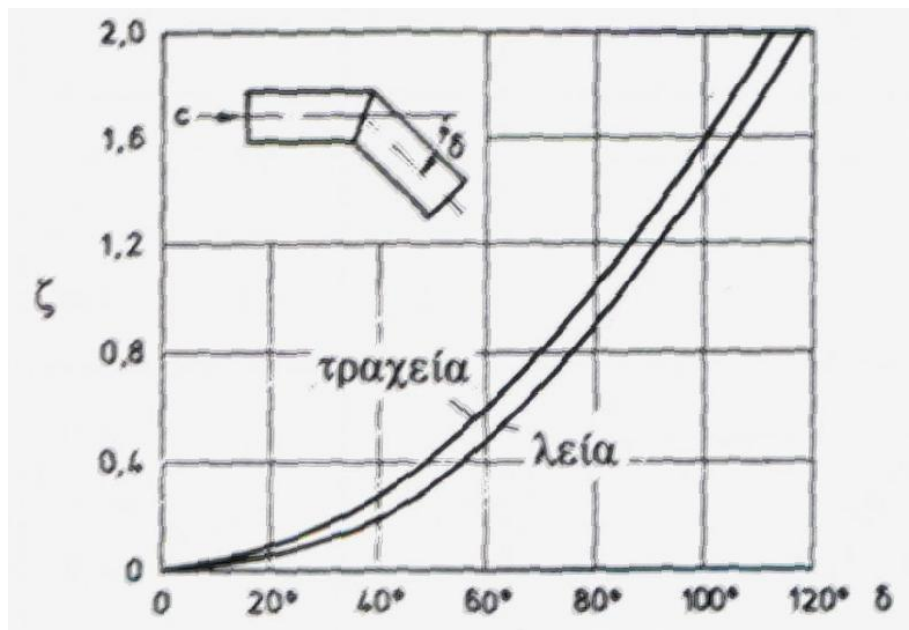
Παρατίθεται πίνακας που δείχνει τη συσχέτιση του συντελεστή εντοπισμένων απωλειών με την γωνία καμπυλότητας α , τον λόγο της ακτίνας καμπυλότητας προς την εσωτερική διάμετρο του αγωγού r/d και την τραχύτητα των τοιχωμάτων του αγωγού.

Πίνακας 2.3: Συντελεστής Αντίστασης ζ σε Καμπύλη

α r/d	1	1,5	2	4	6		
15	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	λεία εσωτ. επιφάνεια	
30	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07		
45	0,14	0,11	0,09	0,08	0,075		
60	0,19	0,16	0,12	0,10	0,09		
90	0,21	0,18	0,14	0,11	0,09		
15	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	τραχεία εσωτ. επιφάνεια	
30	0,23	0,19	0,14	0,11	0,08		
45	0,34	0,27	0,20	0,15	0,12		
60	0,41	0,33	0,24	0,19	0,15		
90	0,51	0,41	0,30	0,23	0,18		

Απότομη Αλλαγή Γωνίας Χωρίς Καμπυλότητα με Λοξό Κόψιμο

Παρατίθεται διάγραμμα που δείχνει την συσχέτιση της γωνίας μίας τέτοιας διαμόρφωσης και της τραχύτητας του αγωγού με τον συντελεστή εντοπισμένων απωλειών. Για λόγους συντομίας, η διαμόρφωση αυτή θα αναφέρεται ως απότομη γωνία.



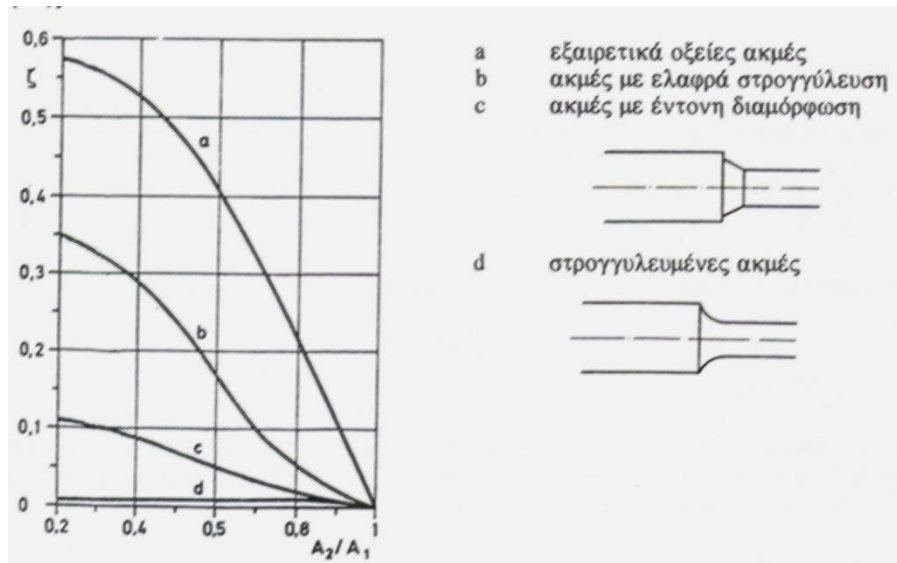
Εικόνα 2.4: Διάγραμμα Συσχέτισης Συντελεστή Αντίστασης ζ με Αλλαγή Κλίσης Χωρίς Καμπύλη

2.3.2.2.3 Μεταβολή Διαμέτρου

Η μεταβολή διαμέτρου περιλαμβάνει την συστολή της διαμέτρου δηλαδή το στένεμα του αγωγού είτε τη διαστολή δηλαδή την διεύρυνση της σωλήνωσης.

Συστολή

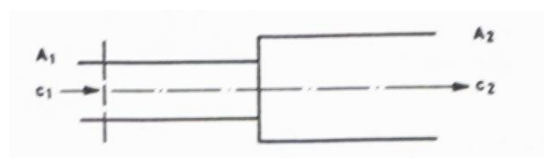
Παρατίθεται διάγραμμα που δείχνει την συσχέτιση του συντελεστή εντοπισμένων απωλειών με τον λόγο της τελικής προς την αρχική διάμετρο του αγωγού A_2/A_1 για διάφορες περιπτώσεις.



Εικόνα 2.5: Διαμορφώσεις και Απώλειες σε Συστολές

Διαστολή

Παρατίθεται πίνακας για απότομη διεύρυνση που δείχνει το συσχετισμό του συντελεστή εντοπισμένων απωλειών με τον λόγο της αρχικής προς την τελική διάμετρο του αγωγού D_1/D_2 .

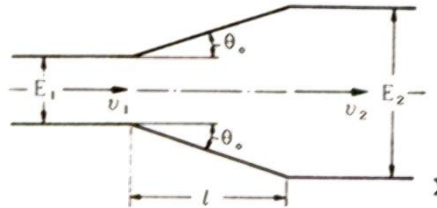


Εικόνα 2.6: Σχηματική Απεικόνιση Απότομης Διεύρυνσης Αγωγού

Πίνακας 2.4: Συντελεστής Απωλειών ζ' για Απότομη Διεύρυνση Σωλήνωσης

D_1/D_2	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
ζ'	0.50	0.48	0.42	0.32	0.18

Παρατίθεται πίνακας για κωνική διεύρυνση που δείχνει το συσχετισμό του συντελεστή εντοπισμένων απωλειών με τον λόγο της αρχικής προς την τελική διάμετρο του αγωγού D_1/D_2 και την γωνία κωνικότητας θ .



Εικόνα 2.7: Σχηματική Απεικόνιση Κωνικής Διεύρυνσης Αγωγού

Πίνακας 2.5: Συντελεστής Απωλειών ζ' για Κωνική Διεύρυνση Σωλήνωσης

	D_1/D_2	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
ζ'	$\theta=8^\circ$	0.83	0.79	0.70	0.52	0.28
	$\theta=12^\circ$	0.74	0.72	0.65	0.48	0.26
	$\theta=20^\circ$	0.67	0.67	0.61	0.45	0.25

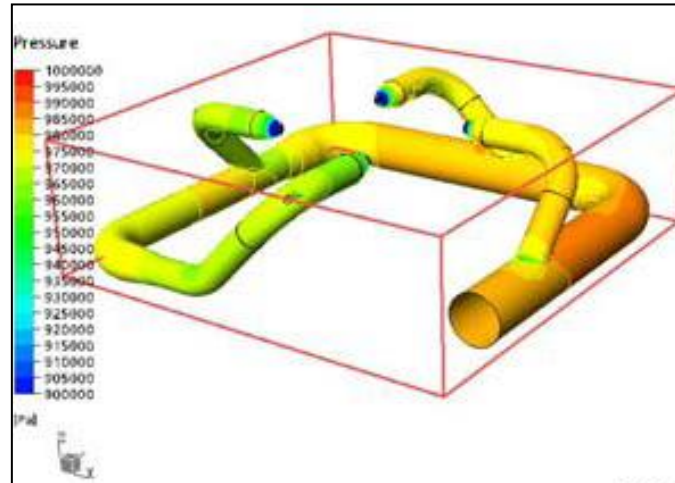
2.4 Πρακτική Μελέτη Απωλειών

Στο κεφάλαιο 2.3 παρατέθηκαν θεωρητικές πληροφορίες πάνω στις απώλειες ενέργειας που εμφανίζονται κατά τη ροή σε αγωγό. Η θεωρία αυτή αποτελεί βάση πάνω στην οποία στηρίζονται οι μελέτες που έχουν σαν αντικείμενο μελέτης τη συμπεριφορά της ροής. Ωστόσο, η ακρίβεια που η θεωρία αυτή κάθε αυτή παρέχει, δεν μπορεί πλέον να αποτελέσει εργαλείο για έναν σύγχρονο επιστήμονα. Με την εξέλιξη της επιστήμης των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι πλέον δυνατή η ανάλυση της ροής όχι με τη χρήση πειράματος σε πραγματικές συνθήκες αλλά με προσομοίωση της ροής με υπολογιστικό πακέτο.

Η επιστήμη η οποία ασχολείται με την πρόβλεψη των ιδιοτήτων της ροής, απουσία πειράματος, ονομάζεται Υπολογιστική Ρευστομηχανική (CFD). Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική, όπως παρατίθεται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο, δίνει την δυνατότητα ανάλυσης της ροής με πολύ μεγάλη ακρίβεια κάνοντας δυνατή την βελτίωση του σχεδιασμού. Στόχος είναι όχι μόνο η μείωση των απωλειών ενέργειας αλλά και η καλύτερη ποιότητα της ροής στην έξοδο του ακροφυσίου, όταν γίνεται αντίστοιχη μελέτη με της παρούσας εργασίας.

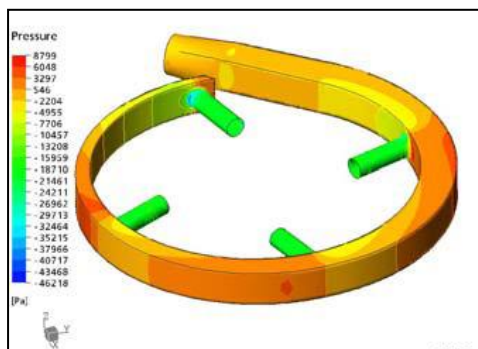
Αντίστοιχη μελέτη με την παρούσα διπλωματική εργασία έχει διενεργηθεί και για συστήματα διανομής άλλων πραγματικών υδροστροβίλων από επιστήμονες παγκοσμίως.

Η εταιρεία Gilbert Gilkes & Gordon Ltd. χρησιμοποιώντας προγράμματα μοντελοποίησης της ροής εξέτασε την αντικατάσταση του χρησιμοποιούμενου συστήματος διανομής υδροστροβίλου της εικόνας 2.4.1.

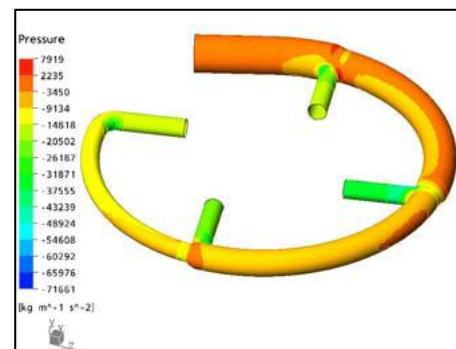


Εικόνα 2.4.1 Σύστημα Διανομής Υδροστροβίλου που εξετάστηκε από την Gilbert Gilkes & Gordon Ltd. για αντικατάσταση

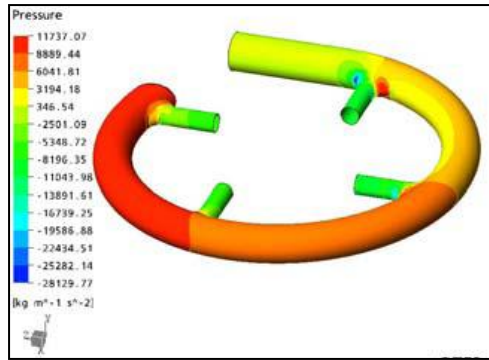
Μετά την μοντελοποίηση του υπάρχοντος αγωγού, ανέπτυξαν ακόμη τέσσερις γεωμετρίες (εικόνες 2.4.2 έως 2.4.5) και τις συνέκριναν με την αρχική και μεταξύ τους.



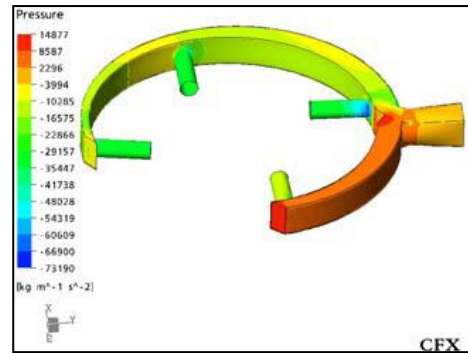
Εικόνα 2.4.2 Γεωμετρία 1



Εικόνα 2.4.3 Γεωμετρία 2



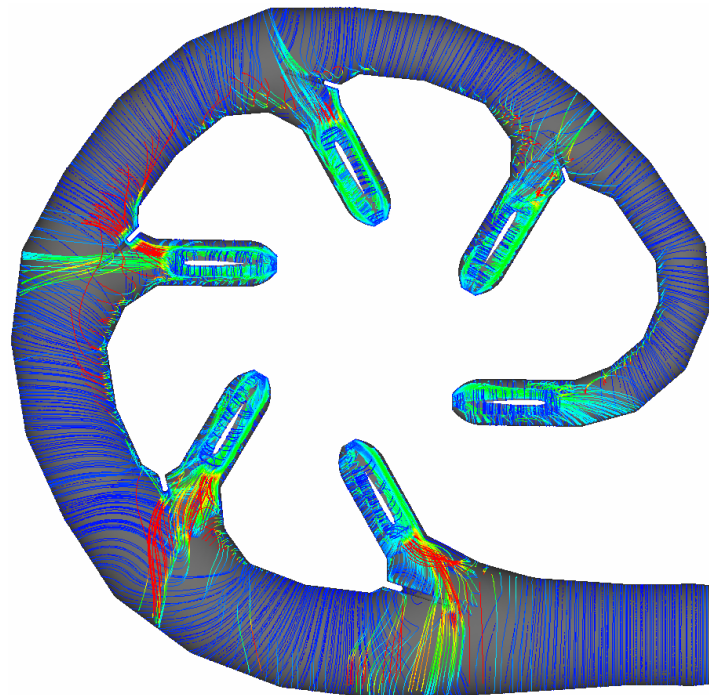
Εικόνα 2.4.4 Γεωμετρία 3



Εικόνα 2.4.5 Γεωμετρία 4

Από τις γεωμετρίες αυτές και την αρχική, αυτή που παρουσίασε τις μικρότερες απώλειες ήταν η Γεωμετρία 1. Επίσης, η Γεωμετρία 1 είχε μικρότερο κόστος κατασκευής σε σχέση με την αρχική περίπου κατά 15%. [10]

Μία άλλη ομάδα που αποτελείται από τους Filip Sadlo, Ronald Peikert, Etienne Parkinson και Markus Gross, μοντελοποίησε έναν υδροστροβίλο Pelton με έξι ακροφύσια. Στόχος τους ήταν να παρουσιάσουν μια μέθοδο λεπτομερούς εξέτασης των δινών και της στροβιλότητας (vorticity) στο σύστημα διανομής. Ένα από τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν είναι ότι οι δίνες που δημιουργούνται διαφέρουν σημαντικά για κάθε ακροφύσιο (εικόνα 2.4.6) παρόλο που τα ακροφύσια είναι πανομοιότυπα μεταξύ τους. Απώτερος στόχος τους είναι η βελτίωση του συστήματος διανομής ώστε να μην σχηματίζονται δίνες οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα της δέσμης (jet) που εξέρχεται από το ακροφύσιο.[11]



Εικόνα 2.4.6 Πεδίο Στροβιλότητας (το μπλε χρώμα υποδεικνύει απόσταση κοντινή στο τοίχωμα)

Κεφάλαιο 3: Αριθμητική Μοντελοποίηση –

Υπολογιστική Ρευστομηχανική

3.1: Εισαγωγή – Γενικά Χαρακτηριστικά

Για την ανάπτυξη οποιουδήποτε υδραυλικού στοιχείου, όπως είναι προφανές, απαιτούνται να γίνουν αμέτρητες επιλογές σε όλα τα στάδια της ανάπτυξης. Στόχος είναι ο τελικός σχεδιασμός να αποτελεί και την βέλτιστη λύση, δηλαδή να έχει συνολικά την μέγιστη δυνατή απόδοση λαμβάνοντας πάντα υπ' όψιν και το κόστος το οποίο θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν μικρότερο. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό είναι πάρα πολύ δύσκολο να εξετάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί ώστε να προκύπτει η μέγιστη απόδοση με το ελάχιστο κόστος. Ειδικά αν όλες οι δυνατές επιλογές εξετάζονταν και πειραματικά για κάθε σχεδιασμό, ο χρόνος και το κόστος που θα απαιτούνταν θα λάμβαναν τιμές πλήρως ασύμφορες. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών οι επιστήμονες έχουν πλέον στα χέρια τους ένα μέσο που καθιστά την παραπάνω διαδικασία πολύ οικονομικότερη και σαφώς λιγότερο χρονοβόρα.

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική ή CFD (Computational Fluid Dynamics) είναι η επιστήμη που σαν αντικείμενο μελέτης έχει την πρόβλεψη πλήθους 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 κάνοντας χρήση αριθμητικής μεθόδου με τη βοήθεια ηλεκτρονικού 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.

Για να είναι δυνατή η εφαρμογή μιας μεθόδου υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι απαραίτητο ένα μαθηματικό μοντέλο με βάση το οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί. Το μαθηματικό μοντέλο είναι υπεύθυνο για την αριθμητική μοντελοποίηση των φυσικών φαινομένων και αρχών που αφορούν το εκάστοτε αντικείμενο της μελέτης. Στην περίπτωση της ροής σε αγωγούς – που αποτελεί και

αντικείμενο της μελέτης της παρούσας διπλωματικής – είναι οπωσδήποτε επιτακτικό να ικανοποιούνται οι αρχές διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας στην περιοχή ενδιαφέροντος και ανάλυσης της ροής.

Από τη χρήση της μεθόδου καθορίζονται οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες ανάλογα με το πρόβλημα. Αυτό το στάδιο είναι πολύ σημαντικό καθώς επηρεάζει άμεσα την ποιότητα της λύσης. Κάνοντας χρήση των μεθόδων διακριτοποίησης οι οποίες εξετάζουν τμηματικά τον συνολικό χώρο – λαμβάνοντας πάντα υπ' όψιν και τα τμήματα που περιβάλλουν το εκάστοτε εξεταζόμενο τμήμα – γίνεται μια προσέγγιση των φυσικών εξισώσεων της ρευστοδυναμικής με αποτέλεσμα οι πολύπλοκες διαφορικές εξισώσεις να μετατρέπονται σε αλγεβρικές. Ο χώρος ο οποίος εξετάζεται χωρίζεται σε στοιχειώδη κελιά ή στοιχεία τα οποία έχουν διατομές διαφόρων σχημάτων όπως π.χ. ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου ή εξαγώνου.

Όπως γίνεται αντιληπτό, με τη χρήση μιας τέτοιας μεθόδου, σε συνδυασμό με κάποια πειράματα, είναι συνήθως δυνατή η πλήρης περιγραφή του εξεταζόμενου φαινομένου. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραλειφθεί 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. Αυτό που ουσιαστικά επιδιώκεται είναι η κατά το δυνατόν μικρότερη τάξη του αριθμητικού σφάλματος. [7]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής που χρησιμοποιείται είναι το FLUENT[®] της εταιρίας ANSYS[12]. Το FLUENT είναι ένα δημοφιλές λογισμικό που χρησιμοποιείται συχνά στη βιομηχανία για την εξυπηρέτηση των σκοπών που περιγράφηκαν ανωτέρω. Η προς εξέταση γεωμετρία και το υπολογιστικό πλέγμα κατασκευάζονται σε συνοδευτικό λογισμικό. Στην προκειμένη εργασία το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το GAMBIT επίσης της εταιρίας ANSYS.

3.2 Εξισώσεις Navier – Stokes

Οι εξισώσεις Navier – Stokes περιγράφουν την αρχή διατήρησης της ορμής και το νόμο του Νεύτωνα για κάθε στοιχείο της εξεταζόμενης ροής στον τρισδιάστατο χώρο δηλαδή σε καρτεσιανό σύστημα (x,y,z). Έχουν τη μορφή:

$$\text{εξίσωση συνέχειας: } \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right]$$

Όπου: ρ η πυκνότητα του ρευστού

u οι συνιστώσες της ταχύτητας

P η στατική πίεση

μ η δυναμική συνεκτικότητα

δ το δέλτα του Kronecker

Οι εξισώσεις αυτές συσχετίζουν τις στιγμιαίες τιμές των εξαρτημένων μεγεθών συνεπώς είναι δυνατόν να εφαρμοστούν για όλες τις περιπτώσεις στρωτών και τυρβωδών ροών. [13]

3.3 Μοντέλο k – ε

Εξίσου σημαντική είναι και η μοντελοποίηση της τύρβης που παρουσιάζει η ροή. Η τύρβη είναι η ιδιότητα των ρευστών λόγω της οποίας μεταβάλλονται χασοτικά τα χαρακτηριστικά της ροής σε κάθε χρονική στιγμή. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα που εξετάζουν την τύρβη σε μια ροή. Στην παρούσα διπλωματική γίνεται χρήση του μοντέλου k – ε. Στο μοντέλο k – ε γίνεται η παραδοχή ότι η τύρβη είναι ισότροπη. Επιπρόσθετα, υιοθετείται η υπόθεση Boussinesq σύμφωνα με την οποία οι τυρβώδεις τάσεις συνδέονται με τις μέσες τιμές των ταχυτήτων μέσω της τυρβώδους συνεκτικότητας μ_t (3.3.3), αντιστοίχως προς την τυχαία μοριακή κίνηση, η οποία εκφράζεται με την δυναμική συνεκτικότητα μ .

Η κινητική ενέργεια της τύρβης δίνεται από τη σχέση:

$$\tilde{k} = \frac{1}{2} \frac{\overline{\rho u'_i u'_j}}{\rho} \quad (3.3.1)$$

Ο ρυθμός καταστροφής της κινητικής ενέργειας της τύρβης δίνεται από την σχέση:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\mu}{\rho} \overline{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \frac{\partial u'_i}{\partial x'_j}} \quad (3.3.2)$$

Η τυρβώδης συνεκτικότητα δίνεται από την σχέση:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\tilde{k}^2}{\tilde{\varepsilon}} \quad (3.3.3)$$

όπου $C_\mu = 0,09$ σταθερά

Ωστόσο, τα \tilde{k} και $\tilde{\varepsilon}$ υπολογίζονται από το ακόλουθο σύστημα που αποτελείται από διαφορικές εξισώσεις για την μεταφορά των δύο μεγεθών. Γίνεται παρουσίαση της τελικής μορφής των διαφορικών εξισώσεων:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \tilde{k}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_j} \right] - \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\mu_t}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \rho \tilde{\varepsilon} \quad (3.3.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \tilde{\varepsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_j} \right] - C_1 \left(\frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} \right) - C_2 \rho \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{\tilde{k}} \quad (3.3.5)$$

Όπου $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$

και $-\overline{\rho u'_i u'_j}$: οι τάσεις Reynolds που αντικαθίστανται από τη σχέση:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \tilde{k} \quad (3.3.6)$$

Το μοντέλο $k - \varepsilon$ παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά, ωστόσο έχει και αδυναμίες κυρίως λόγω των υποθέσεων στις οποίες βασίζεται η ανάπτυξή του. Οι Meroney και Bradshaw (1975) διαπίστωσαν ότι σε περιοχές ανακυκλοφορίας της ροής, η ανομοιογένεια μπορεί να γίνει σημαντική. Ακόμη, όπως σημειώνουν οι Murakami et al. (1990), 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. [13]

3.4 Συναρτήσεις Τοιχώματος

Το τυρβώδες οριακό στρώμα εμφανίζεται στο στερεό τοίχωμα του αγωγού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το υγρό να δέχεται μακροσκοπικά μεγαλύτερη διατμητική τάση λόγω των τυρβωδών διαταραχών. Πειραματικά έχει αποδειχθεί 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 ή wall functions. Για την χρήση αυτών των συναρτήσεων γίνεται αφ' ενός η παραδοχή ότι η ροή 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.

$$V_{//}^+ = \begin{cases} y^+ & \text{για } y^+ \leq 11.63 \\ \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) & \text{για } y^+ > 11.63 \end{cases} \quad (3.4.1)$$

$$\text{όπου: } V_{//}^+ = \frac{V_{//}}{\sqrt{\tau_w/\rho}} \quad \text{και } y^+ = \frac{\rho y}{\mu} \sqrt{\tau_w/\rho} \quad (3.4.2)$$

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. [13]

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιούνται οι Standard Wall Functions που περιλαμβάνονται στο υπολογιστικό πακέτο FLUENT[®]. Το y^+ έχει ως επιτρεπόμενες τιμές $30 < y^+ < 300$ των οποίων η απαίτηση για ικανοποίηση έπαιξε σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση του τελικού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση της παρούσας διπλωματικής.

3.5 Μέθοδος Simple

Για την επίλυση της ροής στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SIMPLE ο οποίος περιλαμβάνεται μαζί με άλλους σχετικούς αλγόριθμους στο υπολογιστικό πακέτο FLUENT[®]. Με τον αλγόριθμο αυτόν επιτυγχάνεται αποσύζευξη των εξισώσεων ορμής από την πίεση ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η επίλυση των εξισώσεων ορμής γίνεται με την υπόθεση ενός αρχικού πεδίου πίεσης το οποίο συμβολίζεται με P^* . Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένα προσωρινό πεδίο ταχυτήτων (u_j^*) που ικανοποιεί μεν τις εξισώσεις ορμής αλλά όχι την εξίσωση συνέχειας. Συνακολούθως, η εξίσωση της συνέχειας χρησιμοποιείται για την διόρθωση του αρχικού υποθετικού πεδίου πίεσης P^* . Η διόρθωση των αρχικών εκτιμήσεων γίνεται σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$P = P^* + P' \quad (3.5.1)$$

$$u_j = u_j^* - Du_j \cdot \left. \frac{\partial P'}{\partial x_j} \right|_P \quad (3.5.2)$$

Όπου $Du_j = \frac{\Delta x_{ew} \Delta y_{ns} \Delta z_{ud}}{A_P^{u_j} - S_P^{u_j}}$ και $\left. \frac{\partial P'}{\partial x_j} \right|_P$ εκφράζεται στις

τρεις διευθύνσεις ως

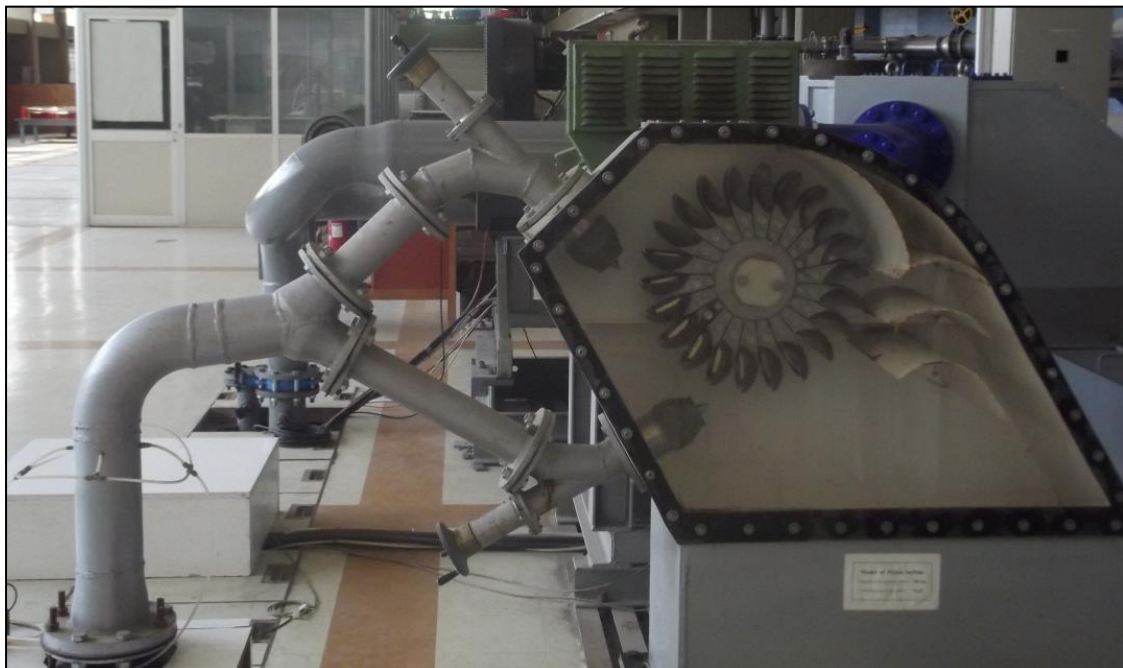
$$\left. \frac{\partial P'}{\partial x} \right|_P = \frac{P'_E - P'_W}{\Delta x_{EW}}, \quad \left. \frac{\partial P'}{\partial y} \right|_P = \frac{P'_N - P'_S}{\Delta y_{NS}}, \quad \left. \frac{\partial P'}{\partial z} \right|_P = \frac{P'_U - P'_D}{\Delta z_{UD}}$$

Κεφάλαιο 4: Κατασκευή Γεωμετρίας και

Υπολογιστικού Πλέγματος

4.1 Πραγματικός Υδροστρόβιλος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μοντελοποίηση και βελτίωση του συστήματος διανομής ενός, χρησιμοποιούμενου στην πράξη, υδροστρόβιλου Pelton. Συγκεκριμένα, πρόκειται για τον υδροστρόβιλο Pelton ο οποίος βρίσκεται στο εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Προφανώς, ο υδροστρόβιλος αυτός χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων και όχι για την παραγωγή εκμεταλλεύσιμης ενέργειας. Ωστόσο, με εξαίρεση το γεγονός ότι η παροχή δεν προέρχεται από φυσικό υδατορεύμα ή κάποια αντλιοταμίευση, η αρχή λειτουργίας του δεν διαφέρει σημαντικά από τους υδροστρόβιλους που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας.

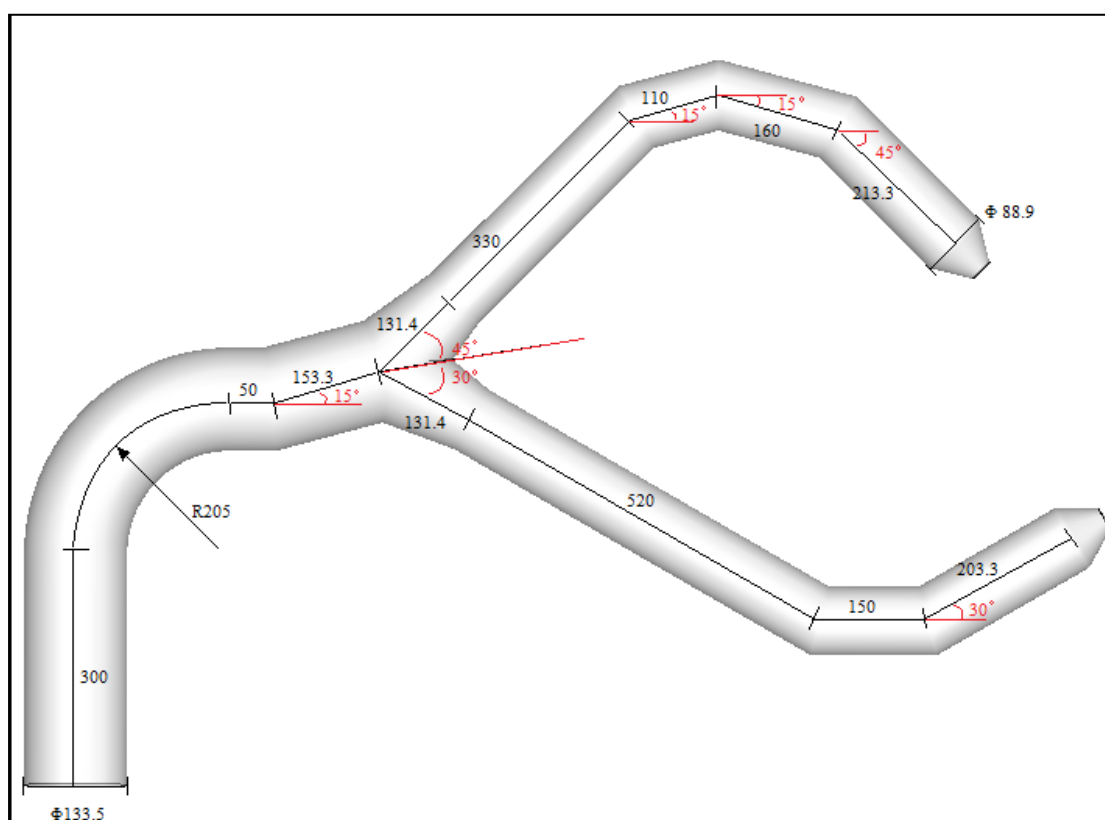


Εικόνα 4.1.1 Εργαστηριακός Υδροστρόβιλος Pelton

Για να είναι δυνατή η μοντελοποίηση, πραγματοποιήθηκε μέτρηση των διαστάσεων του συστήματος διανομής από την αφετηρία του ορατού τμήματος μέχρι πριν τα ακροφύσια. Για μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά και επαλήθευση της πιστότητας των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε μηχανολογικό σχέδιο σύμφωνα με το οποίο κατασκευάστηκαν κάποια τμήματα του συστήματος διανομής του υδροστροβίλου.

Προς αποφυγή συγχύσεων ξεκαθαρίζεται ότι η μελέτη που διεξήχθη αφορά τη ροή μέχρι τα ακροφύσια. Τα ακροφύσια αποτελούν ένα πολύ σύνθετο τμήμα του υδροστροβίλου. Για το λόγο αυτό, συνήθως εξετάζονται ξεχωριστά από τα υπόλοιπα τμήματα, καθώς απαιτείται μεγάλη ακρίβεια ώστε να προκύψουν από την μοντελοποίηση αποτελέσματα που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Οι διαστάσεις του υδροστροβίλου παρατίθενται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 4.1.2 Διαστάσεις Συστήματος Διανομής Υδροστροβίλου

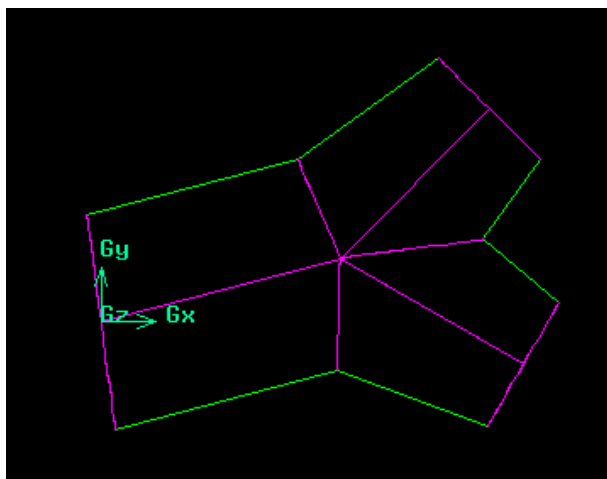
4.2 Κατασκευή Γεωμετρίας

Το κεφάλαιο αυτό έχει δύο στόχους. Αφ' ενός, την περιγραφή του τρόπου κατασκευής της μελετώμενης γεωμετρίας. Αφ' εταίρου, να αποτελέσει εγχειρίδιο προς όσους ενδιαφέρονται να κατασκευάσουν υπολογιστικό πλέγμα σε αντίστοιχες γεωμετρίες χρησιμοποιώντας το Gambit. Αυτό που ουσιαστικά θα πρέπει να προσκομίσει ο αναγνώστης από το παρών κεφάλαιο είναι ο τρόπος σκέψης που απαιτείται από τον χειριστή του Gambit. Κάποιες λεπτομέρειες που ενδεχομένως να παραληφθούν, πιθανότατα θα αφορούν ενέργειες για τις οποίες απαιτείται μια υποτυπώδης εξάσκηση πριν την αρχή της κατασκευής της εκάστοτε ζητούμενης γεωμετρίας.

4.2.1 Τμήμα Διακλάδωσης

Η γεωμετρία, κατασκευάστηκε τμηματικά. Ουσιαστικά, έγινε μία αποδόμηση της γεωμετρίας σε επιμέρους τμήματα τα οποία σταδιακά κατασκευάζονταν και συνδέονταν μεταξύ τους. Η κατασκευή μπορεί να ξεκινήσει από οποιοδήποτε τμήμα και να επεκταθεί έχοντας αυτό ως αφετηρία.

Στην προκειμένη περίπτωση, σαν αφετηρία επιλέχτηκε το μεσαίο περίπου τμήμα της γεωμετρίας (εικόνα 4.2.1).

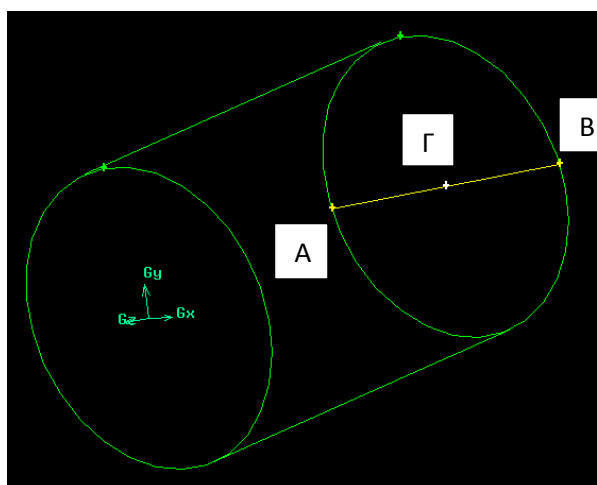


Εικόνα 4.2.1 Διακλάδωση από ένα κυλινδρικό και δύο κωνικά τμήματα

Αρχικά κατασκευάστηκε ο αγωγός κυλινδρικής διατομής, χρησιμοποιώντας τις έτοιμες γεωμετρίες του Gambit, με axis location positive x. Ο κύλινδρος αυτός περιστράφηκε κατά τα θετικά του άξονα z [rotate – positive z] κατά 15° όπως

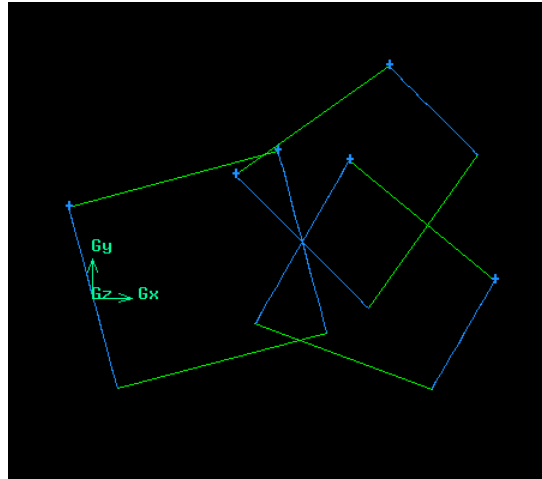
φαίνεται και στην εικόνα 4.2.1. Αναφέρεται εδώ ότι η περιστροφή κατ' οποιονδήποτε άξονα ακολουθεί τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Έπειτα, για να είναι δυνατή η σωστή τοποθέτηση των κωνικών τμημάτων έπρεπε να τοποθετηθεί ένα σημείο [vertex] σαν οδηγός. Η τοποθέτηση ενός vertex μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Στην προκειμένη, για να τοποθετηθεί vertex στο τέλος του κυλινδρικού τμήματος, τοποθετήθηκαν δύο vertices A, B (εικόνα 4.2.1α) στην ακμή [on edge] του τέλους του κυλίνδρου [U value 0.25 και 0.75 αντίστοιχα για A,B]. Έπειτα, δημιουργήθηκε ευθεία γραμμή [straight edge] ενώνοντας αυτά τα δύο vertices και στη συνέχεια τοποθετήθηκε άλλο ένα vertex, το Γ πάνω σε αυτή την ευθεία [U value 0.5], δηλαδή στο μισό της. Το vertex Γ που δημιουργήθηκε βρίσκεται στο κέντρο της τελικής επιφάνειας του κυλίνδρου. Εναλλακτικά, η τοποθέτηση ενός vertex στο κέντρο της επιφάνειας μπορεί να γίνει με την εντολή [create real vertex at centroid]. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ πιο γρήγορη, ωστόσο, επειδή στην προκειμένη γεωμετρία οι όγκοι χωρίζονταν σε δύο τμήματα για λόγους που θα αναλυθούν παρακάτω, η διαδικασία που ακολουθήθηκε αποτελούσε και τμήμα της διαδικασίας διαμερισμού των όγκων και συνεπώς κρίθηκε προτιμότερη.



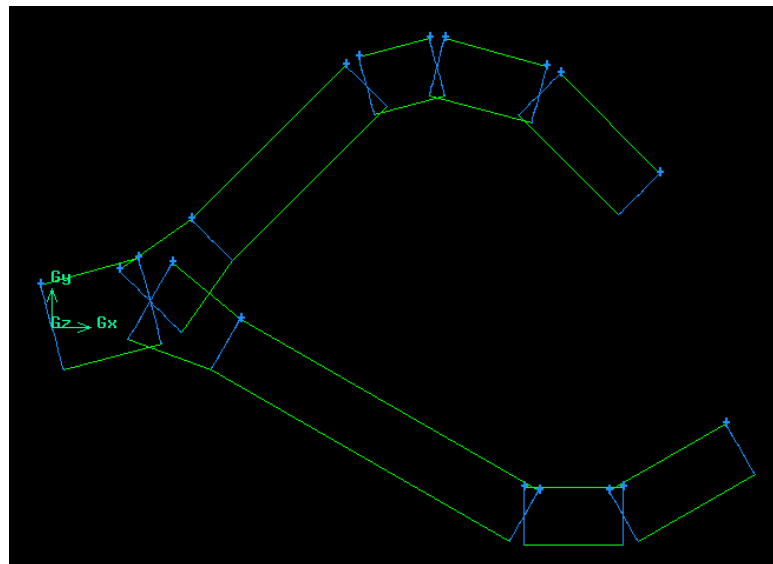
Εικόνα 4.2.1α Παράδειγμα Τοποθέτησης Σημείων στην Ακμή Επιφάνειας Κυλίνδρου

Στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις έτοιμες γεωμετρίες δημιουργήθηκαν τα δύο κωνικά τμήματα [frustum με axis location positive x]. Αφού στράφηκαν κατά 45° και -30° κατά τον άξονα positive z, μετακινήθηκαν στο vertex που περιγράφηκε προηγουμένως [translate με συντεταγμένες αυτές του vertex όπως προκύπτουν από την εντολή summarize vertices] όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.2. Αξίζει να αναφερθεί, ότι οι μεταφορές με την εντολή [translate] χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες από την εντολή [summarize vertices] αφορούν μεταφορές οι οποίες έχουν σαν αφετηρία το αρχικό κέντρο των αξόνων. Προφανώς και σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν εναλλακτικοί τρόποι.



Εικόνα 4.2.2 Μορφή της Διακλάδωσης μετά την κατάλληλη τοποθέτηση των Κωνικών Τμημάτων

Ακολούθως, κατασκευάστηκαν τα υπόλοιπα τμήματα που βρίσκονται μετά τα κωνικά τμήματα. Ομοίως με προηγούμενως δημιουργήθηκαν κυλινδρικοί αγωγοί οι οποίοι, αφού περιστράφηκαν, τοποθετήθηκαν στο κατάλληλο σημείο όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.3. Αναφέρεται εδώ ότι η περιστροφή γίνεται σε σχέση με τον άξονα positive z. Συνεπώς ενώ τα τμήματα έχουν μεταξύ τους σχετική γωνία 150° , η γωνία με την οποία περιστρέφονται είναι αυτή που πρέπει να έχουν σε σχέση με τον άξονα positive z.



Εικόνα 4.2.3 Επιμέρους Τμήματα μετά την Διακλάδωση

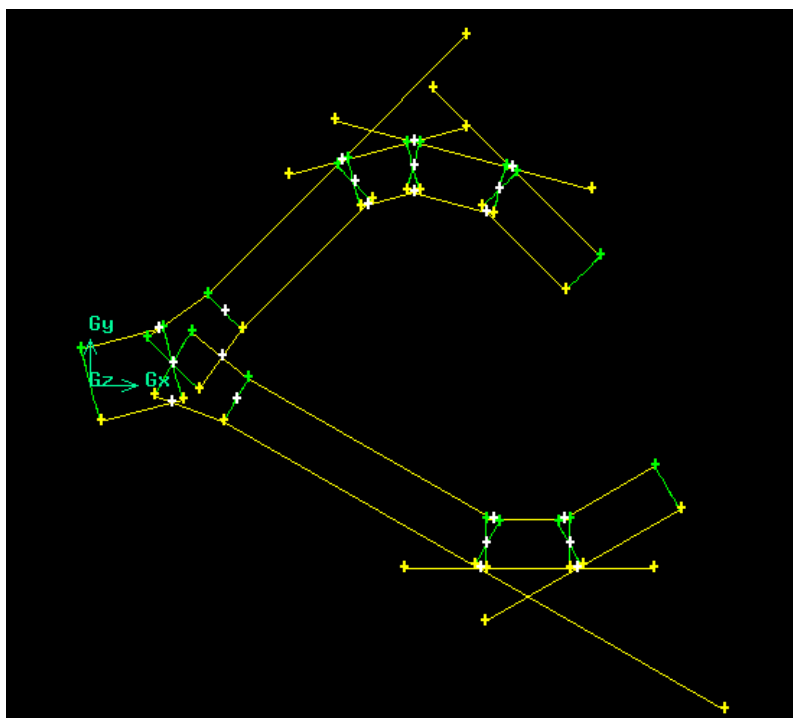
Αυτά τα επιμέρους τμήματα πρέπει να ενωθούν μεταξύ τους ώστε να δημιουργηθεί μια ενιαία γεωμετρία όπως είναι ο πραγματικός αγωγός. Το Gambit διαθέτει την εντολή [Unite Volumes] η οποία θεωρητικά θα έπρεπε να ενοποιήσει τα

επιμέρους τμήματα σε έναν όγκο. Ωστόσο, επειδή χρησιμοποιώντας την εντολή αυτή γίνεται μία αυτοματοποιημένη διαδικασία, σε περιπτώσεις ιδιαίτερων διατομών, όπως η εξεταζόμενη, προκύπτουν μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, είναι πολύ πιθανό να δημιουργηθούν τέτοιου είδους καμπύλες στα σημεία ενοποίησης των όγκων, οι οποίες είναι ασύμφορα πολύπλοκες για να κατασκευαστούν στην βιομηχανία, αλλά και δημιουργούν πρόβλημα στην κατασκευή του πλέγματος. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε μια άλλη διαδικασία όχι τόσο πολύπλοκη όσο χρονοβόρα.

Αρχικά, αναβρέθηκαν τα σημεία τομής μεταξύ των όγκων. Όπως είναι ξεκάθαρο και από την εικόνα 4.2.3 κάποιος όγκος φαίνεται πως τέμνεται μόνο στο ένα τους μισό λόγω μήκους. Γενικά, δύο κυλινδρικοί όγκοι τέμνονται σε μία περιφέρεια. Κατά την κατασκευή της γεωμετρίας στο Gambit, ο χρήστης δεν είναι απαραίτητο να εντοπίσει όλα τα σημεία της περιφέρειας τομής των κυλίνδρων. Αντίθετα, αρκεί να αντιμετωπιστεί το σχήμα σαν να ήταν διδιάστατο οπότε να γίνει η υπόθεση ότι κάθε δύο όγκοι έχουν δύο σημεία τομής. Προσοχή, δεν γίνεται καμία μετατροπή του σχήματος από τριδιάστατο σε διδιάστατο. Απλά παρατηρείται η γεωμετρία από τα θετικά του άξονα z όπως στην εικόνα 4.2.4.

Σε αυτό το στάδιο βρίσκονται και τα σημεία τομής που θα είχαν οι όγκοι αν είχαν το κατάλληλο μήκος ώστε να τέμνονται σε δύο σημεία. Το πρόβλημα που εμφανίζεται με το μειωμένο μήκος θα επιλυθεί σε επόμενο βήμα.

Για να γίνει η ανεύρεση των σημείων τομής των όγκων, έπρεπε να δημιουργηθούν οι κατάλληλες ευθείες και να βρεθούν τα σημεία τομής εκείνων.



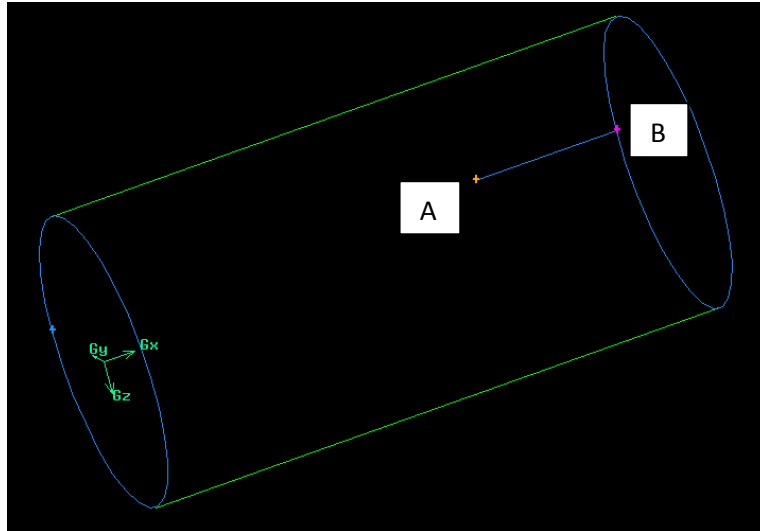
Εικόνα 4.2.4 Δημιουργία Ακμών για την Ανεύρεση των σημείων τομής των Επιμέρους Τμημάτων

Για την δημιουργία των ευθειών αυτών, τοποθετήθηκαν vertices στην αρχή και το τέλος κάθε όγκου τόσο στην πάνω όσο και στην κάτω ακμή [U value 0.0 και 0.5]. Έπειτα, σε κάθε όγκο, τα δύο vertices της κάθε πλευράς ενώθηκαν με [straight edge] και κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν οι κίτρινες ακμές της εικόνας 4.2.4. Στις πλευρές των όγκων που δεν τέμνονταν έπρεπε να γίνει προέκταση των ευθειών που δημιουργήθηκαν.

Η προέκταση αυτή έγινε με την χρήση της εντολής [sweep vertices]. Αφού γινόταν επιλογή του σημείου που θα επεκτεινόταν οριζόταν ένα διάνυσμα [vector] με την μέθοδο [2 vertices] κατά την οποία επιλέγονται δύο σημεία για την αρχή και το τέλος του διανύσματος. Προφανώς τα σημεία αυτά αποτελούν η αρχή και το τέλος της προς επέκταση ακμής. Σε κάθε εντολή [sweep] με τη χρήση [vector] υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού του μήκους επέκτασης [magnitude]. Σε περίπτωση μη καθορισμού, το Gambit επιλέγει αυτόματα τιμές οι οποίες δεν είναι μεν αυθαίρετες αλλά δεν είναι σημαντικό να αναφερθεί ο τρόπος επιλογής τους.

Αφ' ότου έγινε η προέκταση όσων ακμών χρειαζόταν, βρέθηκαν τα σημεία τομής των ακμών αυτών, τα οποία ήταν και τα σημεία τομής των όγκων που ήταν απαραίτητο να είναι γνωστά. Η διαδικασία αυτή έγινε με την εντολή [create vertices at edge intersections].

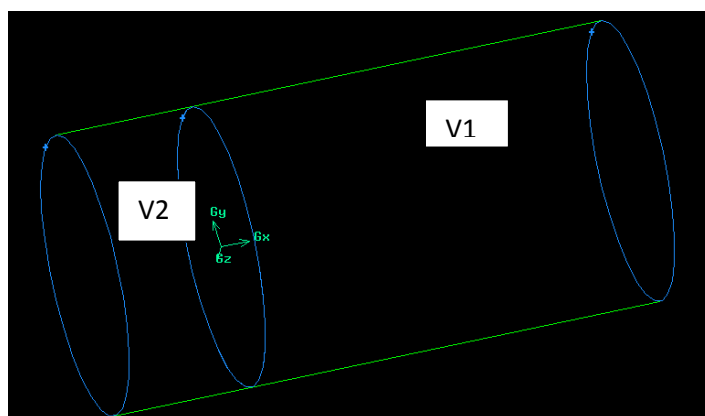
Το επόμενο βήμα ήταν να επιλυθεί το πρόβλημα μήκους των όγκων. Τα σημεία τομής των όγκων μπορεί να βρέθηκαν αλλά, όπως θα γίνει αντιληπτό στη συνέχεια, οι όγκοι πρέπει να τέμνονται και στην πραγματικότητα ώστε να γίνει δυνατή η δημιουργία της τελικής γεωμετρίας. Αρχικά, έγινε δοκιμή με την εντολή [sweep faces] ρυθμίζοντας το [magnitude] ώστε να μην γίνει πολύ μεγάλη επέκταση του όγκου. Ωστόσο, όταν ένας όγκος προεκταθεί χρησιμοποιώντας κάποια επιφάνεια του, ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί η εντολή [unite volumes] για την ενοποίηση του αρχικού όγκου και τον καινούριο που δημιουργήθηκε από το [sweep faces], υπάρχει σημαντικό ενδεχόμενο να παραμείνουν κάποιες γεωμετρίες οι οποίες δεν είναι δυνατό να σβηστούν όπως στο παράδειγμα που ακολουθεί. Αυτές οι γεωμετρίες, αν και δεν αλλοιώνουν την μορφή της τελικής γεωμετρίας, πιθανώς θα προκαλέσουν πρόβλημα κατά τη δημιουργία του πλέγματος.



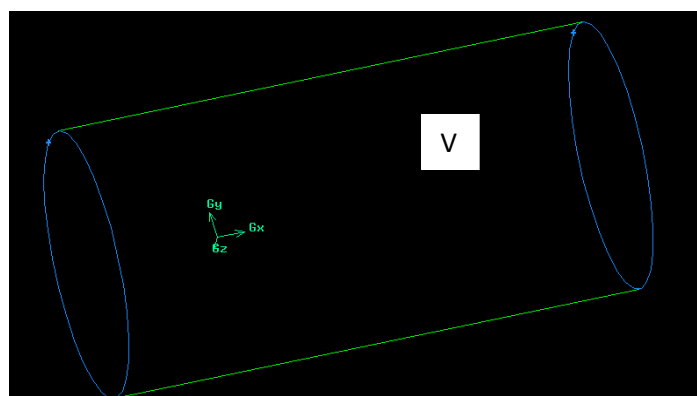
Εικόνα 4.2.5 Παράδειγμα Κυλίνδρου που έχει επεκταθεί με την εντολή [sweep faces] και έχει ενοποιηθεί με την εντολή [unite volumes]

Ο κύλινδρος της εικόνας 4.2.5 έχει επεκταθεί από την δεξιά του πλευρά και έπειτα έχει ενοποιηθεί με τον καινούριο όγκο. Όπως φαίνεται, λόγω της επέκτασης δημιουργήθηκε και η ακμή AB η οποία δεν μπορεί να σβηστεί και ενδεχομένως να χειροτερέψει την ποιότητα του πλέγματος.

Για τους ανωτέρω λόγους προτιμήθηκε μία άλλη εναλλακτική. Για τους όγκους που χρειάζονταν προέκταση δημιουργήθηκαν όγκοι ίδιας διαμέτρου αλλά μικρότερου μήκους. Οι όγκοι αυτοί, αφού περιστράφηκαν και τοποθετήθηκαν καταλλήλως, ενοποιήθηκαν με αυτούς που έχρηζαν προέκτασης όπως στο παράδειγμα που ακολουθεί. Ο όγκος V1 (εικόνα 4.2.6α) έπρεπε να προεκταθεί στα αριστερά του. Για τον λόγο αυτόν δημιουργήθηκε και τοποθετήθηκε καταλλήλως ο όγκος V2. Έπειτα, οι δύο όγκοι ενοποιήθηκαν με την εντολή [unite volumes] δημιουργώντας τον όγκο V της εικόνας. Καλό είναι να αναφερθεί ότι οι όγκοι που δημιουργήθηκαν για προέκταση προς τα δεξιά είχαν [axis location positive x], ενώ για προέκταση προς τα αριστερά [axis location negative x].



Εικόνα 4.2.6α Κυλινδρικοί Όγκοι πριν την ενοποίηση



Εικόνα 4.2.6β Κυλινδρικοί Όγκοι μετά την ενοποίηση

Ενδεχομένως κάποιος αναγνώστης να αναρωτηθεί για ποιο λόγο να μην κατασκευαστούν οι όγκοι εξ' αρχής με μεγαλύτερο μήκος. Η απάντηση είναι ότι σε μια τέτοια περίπτωση θα ήταν πάρα πολύ δύσκολο και χρονοβόρο να τοποθετηθούν οι όγκοι στα κατάλληλα σημεία καθώς θα έπρεπε να γίνει υπολογισμός των σημείων τοποθέτησης χωρίς να είναι δυνατή η χρήση της εντολής [create vertex at centroid].

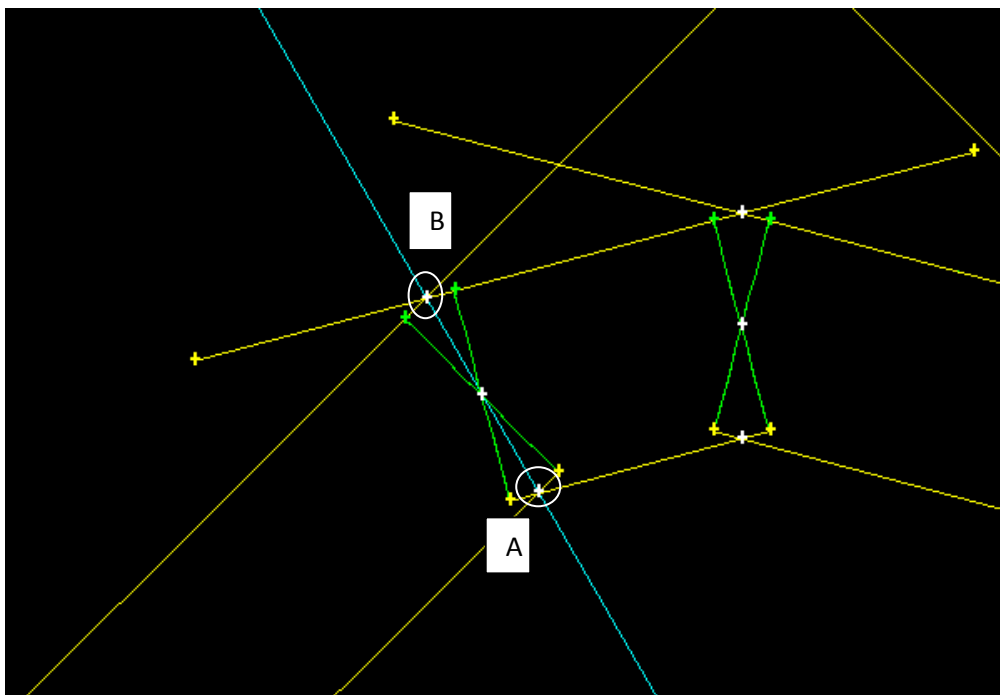
Στην συνέχεια, δημιουργήθηκαν τα φάλτσα κοψίματα και ουσιαστικά η τελική μορφή αυτών των τμημάτων της γεωμετρίας. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Αρχικά, έγινε [summarize vertices] για κάθε σημείο τομής (όπως π.χ. τα σημεία A,B της εικόνας 4.2.7) και σημειώθηκαν οι συντεταγμένες τους με ολόκληρη την ακρίβεια που παρέχει το Gambit. Για κάθε ζευγάρι σημείων τομής, κάνοντας χρήση των ακριβών συντεταγμένων, αναβρέθηκαν οι γωνίες που σχηματίζουν οι νοητές ευθείες, που διέρχονται από κάθε ζεύγος σημείων, σε σχέση με τον άξονα x (όπως π.χ. η νοητή ευθεία που διέρχεται από τα σημεία A,B της εικόνας 4.2.7) .

Στην συνέχεια, δημιουργήθηκε μια επιφάνεια [face] τετραγωνική, με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες από αυτές της συνολικής γεωμετρίας. Με την επιφάνεια αυτή, κάνοντας χρήση της εντολής [split volume with faces (real)], διατμήθηκαν οι

όγκοι ακριβώς στις επιφάνειες τομής τους. Πριν όμως την εκτέλεση της εντολής έπρεπε να γίνει κατάλληλη τοποθέτηση της επιφάνειας.

Η τοποθέτηση περιλαμβάνει την μετακίνηση [move, translate] στο κατάλληλο σημείο και την σωστή περιστροφή ώστε η επιφάνεια να έχει την κλίση που απαιτείται για το λοξό κόψιμο. Η μετακίνηση έγινε με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε ανωτέρω. Η περιστροφή αφορά την κλίση της επιφάνειας ως προς τον άξονα z ώστε η ακμή της επιφάνειας με τα σημεία τομής των όγκων να φαίνονται συνευθειακά σε διδιάστατο σχήμα (εικόνα 4.2.7).



Εικόνα 4.2.7 Τοποθέτηση της επιφάνειας [face] για την διάτμηση των όγκων στην περιφέρεια τομής

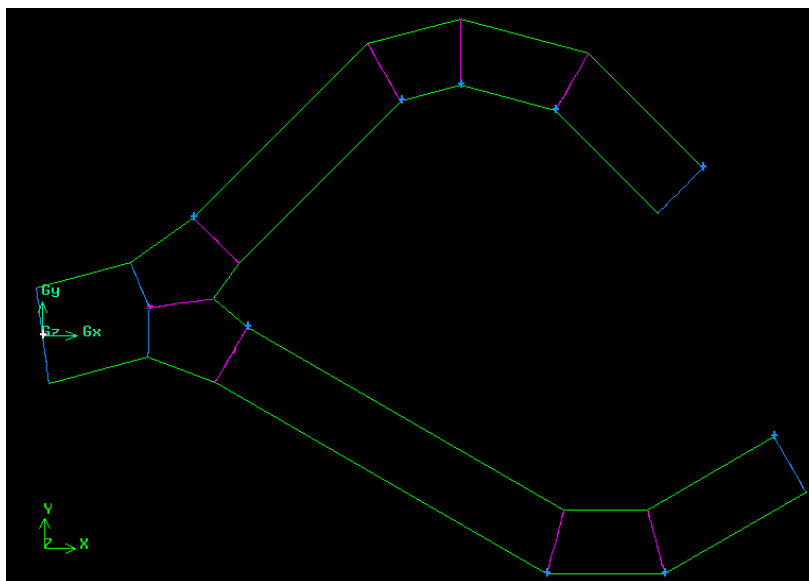
Η περιστροφή μπορεί γίνει με δύο τρόπους. Αυτός που ακολουθήθηκε ήταν περιστροφή κατά τον άξονα z όταν η επιφάνεια (δηλαδή το κέντρο της) βρισκόταν στο σημείο (0,0,0) και έπειτα μετακίνηση κατά τις συντεταγμένες του κεντρικού σημείου της επιφάνειας τομής των δύο όγκων. Ο άλλος τρόπος είναι η μετακίνηση της επιφάνειας στο κατάλληλο σημείο και έπειτα η περιστροφή της κατά άξονα ο οποίος καθορίζεται εκείνη τη στιγμή από το χρήστη. Για τον καθορισμό του άξονα περιστροφής αρχικά πρέπει να γίνει [split edge with point με U value 0.5] στην ακμή της επιφάνειας που βρίσκεται στα θετικά του z. Έπειτα από την μετακίνηση, καθορίζεται ο άξονας περιστροφής με 2 vertices όπου σαν αρχή επιλέγεται το σημείο που βρίσκεται στο κέντρο της επιφάνειας τομής των όγκων και σαν τέλος το σημείο που δημιουργήθηκε στην ακμή της επιφάνειας.

Όπως προαναφέρθηκε, μετά την τοποθέτηση της επιφάνειας ακολουθεί η χρήση της εντολής [split volume with faces (real)]. Αξίζει να αναφερθεί ότι αν δεν

γίνει η επιλογή [retain] η επιφάνεια που χρησιμοποιείται για την διάτμηση διαγράφεται αυτόματα και θα πρέπει να δημιουργηθεί εκ νέου σε περίπτωση που απαιτείται επανάληψη της διαδικασίας.

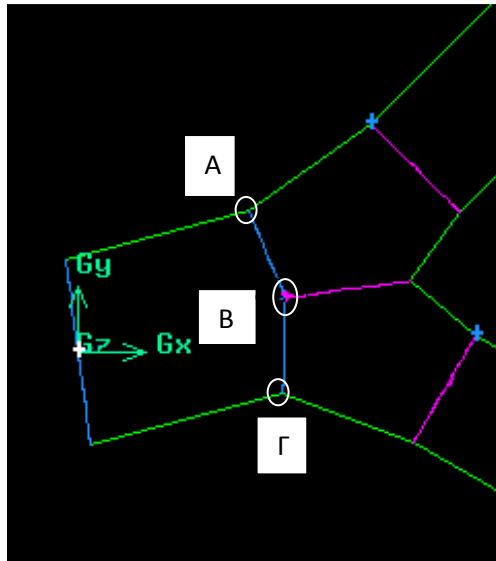
4.2.3 Συνένωση Επιφανειών

Μετά την ολοκλήρωση της ανωτέρω διαδικασίας, τα τμήματα των όγκων που περίσσευαν διαγράφηκαν. Στις τομές, υπήρχαν δύο επιφάνειες, μία για κάθε όγκο. Οι επιφάνειες αυτές μπορεί φαινομενικά να ταυτίζονταν, ωστόσο το Gambit για να 'αντιληφθεί' ενιαίο το σύνολο της γεωμετρίας πρέπει οι δύο επιφάνειες τομής να είναι μία. Αυτό έγινε χρησιμοποιώντας την εντολή connect faces για κάθε δύο επιφάνειες που βρίσκονταν στις τομές.



Εικόνα 4.2.8 Παράδειγμα Γεωμετρίας στο Gambit

Σε εκείνο το σημείο, εμφανίστηκε πρόβλημα στην διατομή ΑΒΓ πριν τα κωνικά τμήματα της διακλάδωσης και η εντολή connect δεν μπορούσε να λειτουργήσει (εικόνα 5.2.9).

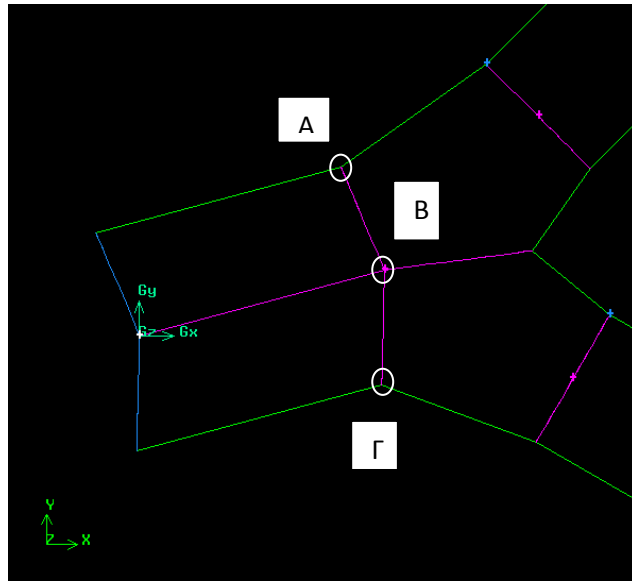


Εικόνα 4.2.9 Παράδειγμα Γεωμετρίας στο Gambit

Αυτό συνέβη γιατί οι επιφάνειες που έπρεπε να ενωθούν ήταν τελείως ανομοιογενείς, λόγω της ιδιαιτερότητας της γεωμετρίας των κωνικών τμημάτων. Εν αντιθέσει, οι υπόλοιπες επιφάνειες ήταν κυκλικές και είχαν και την ίδια ακριβώς διάμετρο.

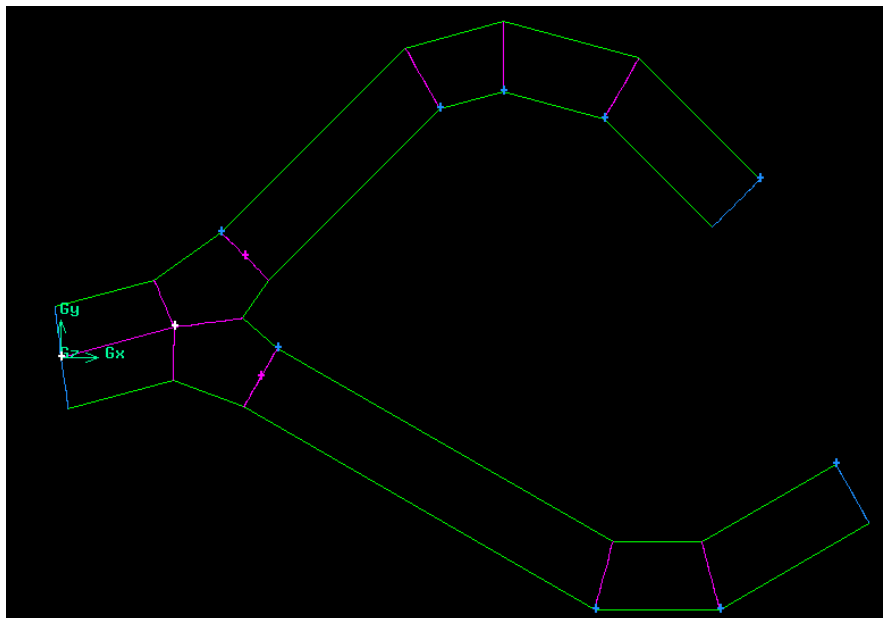
Γενικά το Gambit όπως και τα περισσότερα προγράμματα έχουν κάποιες ανοχές [tolerance] οι οποίες ορίζουν κάποια όρια και τελικά επιτρέπουν ή όχι την εκτέλεση μιας εντολής. Το Gambit συγκεκριμένα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να μεταβάλει αυτές τις ανοχές. Θεωρητικά, λοιπόν θα μπορούσε το πρόβλημα να λυθεί με μια αύξηση του μεγέθους της ανοχής. Ωστόσο, μία τέτοια ενέργεια ενδεχομένως να δημιουργούσε άλλα προβλήματα σαν αλυσιδωτές αντιδράσεις κυρίως στη δημιουργία κακής ποιότητας πλέγματος. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε άλλος τρόπος επίλυσης του προβλήματος που είχε ανακύψει.

Η λύση τελικά δόθηκε με την εντολή [sweep faces]. Πρώτα διαγράφηκε ο όγκος αριστερά των κωνικών τμημάτων. Στη συνέχεια οι δύο επιφάνειες AB και BΓ των κωνικών τμημάτων επιλέχθηκαν και έγινε [sweep faces] με [vector] που καθορίστηκε από [2 vertices], ένα το σημείο που βρισκόταν στη μέση της κοινής ακμής των δύο επιφανειών και ένα το σημείο (0,0,0).



Εικόνα 4.2.10 Επέκταση των διατομών AB και BΓ

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.2.10 οι δύο όγκοι που δημιουργήθηκαν είχαν τμήματα που προεξείχαν και έπρεπε να κοπούν. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία που έχει προηγηθεί για [split volume] τα τμήματα απομονώθηκαν και διαγράφηκαν.

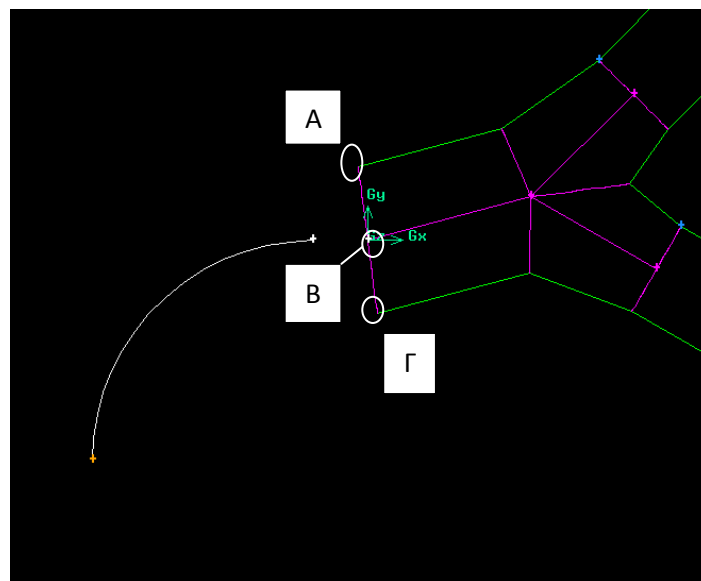


Εικόνα 4.2.11 Παράδειγμα Γεωμετρίας στο Gambit

4.2.4 Άναντι Τμήμα

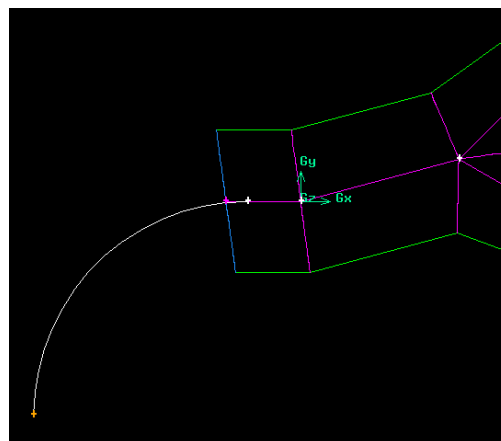
Με παρόμοιο τρόπο, κάνοντας χρήση της εντολής [sweep faces] δημιουργήθηκε και η υπόλοιπη γεωμετρία. Για λόγους που θα αναλυθούν αργότερα και που αφορούν τη δημιουργία του πλέγματος, βεβαιώθηκε ότι οι δύο επιφάνειες που θα σαρώνονταν είχαν vertices μόνο στις θέσεις με [U value] 0.25 και 0.75. Τα υπόλοιπα vertices εξαφανίστηκαν κάνοντας χρήση της εντολής merge edges.

Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα τόξο κύκλου [arc] με τη μέθοδο των γωνιών. [radius: 0.2, start angle: 90°, end angle: 180°, plane: y z] Το τόξο αυτό μετακινήθηκε στη θέση του κεντρικής ακμής του επιθυμητού καμπύλου τμήματος της γεωμετρίας.



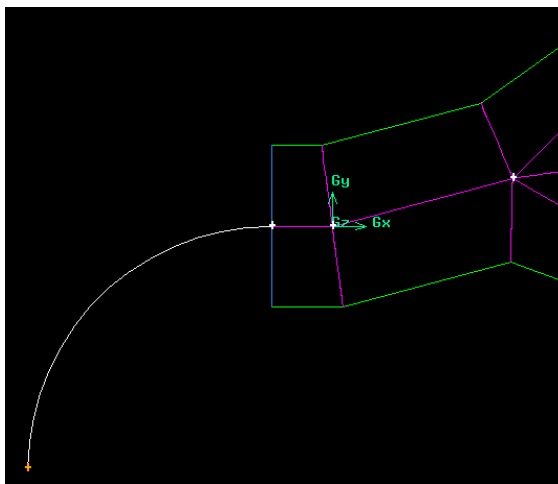
Εικόνα 4.2.12 Τόξο Κύκλου τοποθετημένο στο επιθυμητό σημείο

Έπειτα, επιλέχθηκαν οι δύο επιφάνειες AB και BΓ όπως φαίνονται στην εικόνα 4.2.12 και εκτελέστηκε η εντολή [sweep faces] κατά τον [x negative] με [magnitude 0.07] δηλαδή λίγο μεγαλύτερο από το 0.05 που ήταν το επιθυμητό.



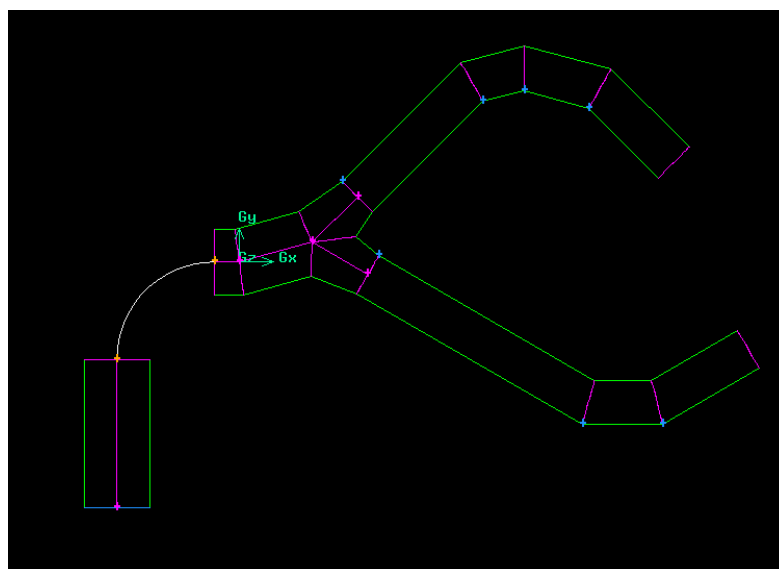
Εικόνα 4.2.13 Παράδειγμα Γεωμετρίας στο Gambit

Στην συνέχεια κάνοντας χρήση της εντολής [split volumes with faces (real)] δημιουργήθηκε το επιθυμητό μήκος όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.13.



Εικόνα 4.2.13 Τμήμα που παρεμβάλλεται ανάμεσα στην καμπυλότητα και την διακλάδωση

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε και το υπόλοιπο τμήμα με την εντολή [sweep faces] με [edge] το κυκλικό τόξο και έπειτα κατά τον άξονα [y negative] ρυθμίζοντας το [magnitude]. Στην εικόνα 4.2.14 παρουσιάζεται το τμήμα του συστήματος διανομής το οποίο θα εξεταστεί. Η καμπυλότητα δεν φαίνεται ξεκάθαρα όπως οι άλλες γεωμετρίες, ωστόσο έχει δημιουργηθεί.

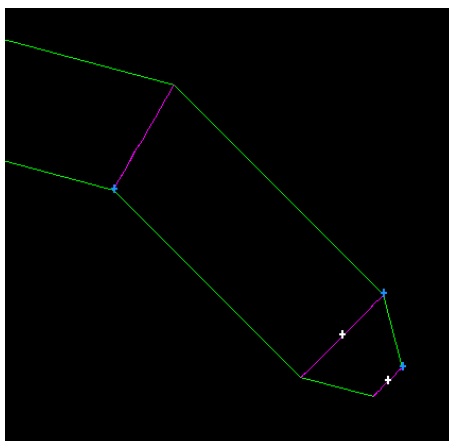


Εικόνα 4.2.14 Το εξεταζόμενο τμήμα του συστήματος διανομής

4.2.5 Έξοδοι

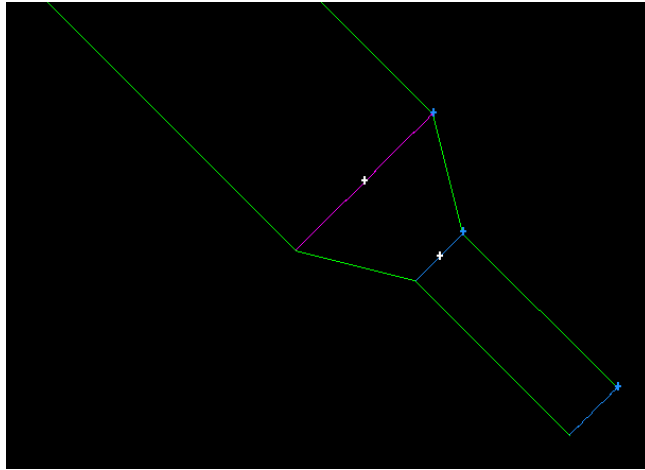
Το σύστημα διανομής της εικόνας 4.2.14, όπως προαναφέρθηκε, είναι ουσιαστικά και το κομμάτι το οποίο εξετάζεται. Ωστόσο, χρειάζονταν ακόμη κάποιες προσθήκες στη γεωμετρία για να εξάγει το Fluent ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Στις εξόδους του συστήματος διανομής έπρεπε να τοποθετηθούν συγκλίνοντα κωνικά τμήματα που να προσομοιάζουν τη μορφή του ακροφυσίου (εικόνα 4.2.15). Βεβαίως, δεν απαιτούνταν ακρίβεια ώστε να κατασκευαστεί γεωμετρία ακριβώς όμοια με αυτή του ακροφυσίου. Ο λόγος για τον οποίο ήταν απαραίτητη αυτή η προσθήκη ήταν για να προσεγγιστεί καλύτερα η μορφή της ροής στο σημείο εκείνο, όπως στην πραγματική λειτουργία με τα ακροφύσια (π.χ. αποφυγή ανακυκλοφοριών στις εξόδους των αγωγών). Άλλη τακτική που εφαρμόζεται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι η επέκταση του τελικού τμήματος κατά μήκος της τάξεως των δύο με τριών διαμέτρων. Η τακτική αυτή προτιμάται όταν η πραγματική γεωμετρία που εξετάζεται δεν έχει ακροφύσιο στο τέλος της.



Εικόνα 4.2.15 Γεωμετρία που προσομοιώνει το ακροφύσιο στην έξοδο

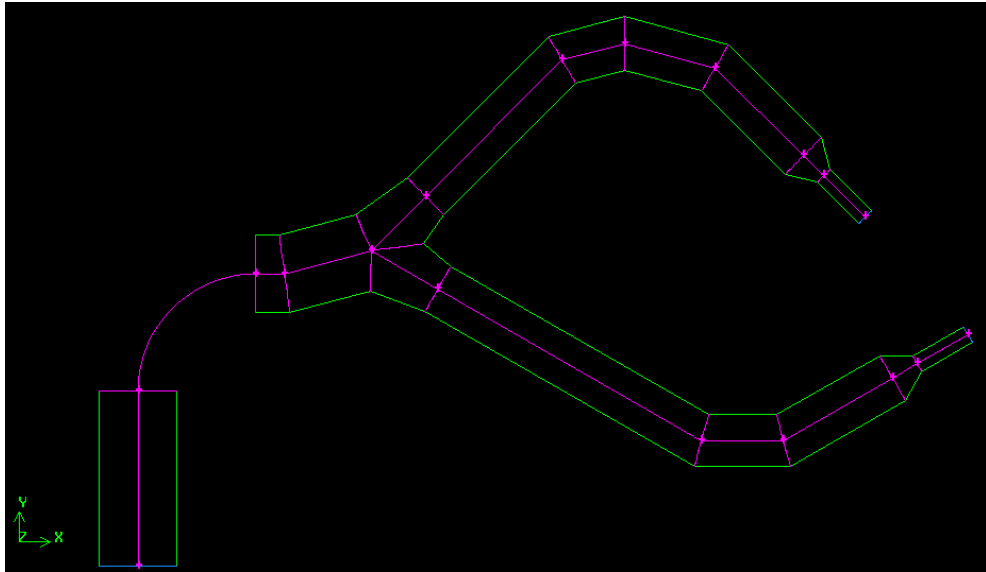
Ωστόσο, με αυτή την προσθήκη στην γεωμετρία, προέκυψε αύξηση της ολικής πίεσης από την επιφάνεια εισόδου στην επιφάνεια εξόδου κάτι το οποίο προφανώς αντιβαίνει στους κανόνες της φυσικής. Αυτές οι ανακυκλοφορίες και οι αυξήσεις στην ολική πίεση εμφανίζονται γιατί το Fluent[®] επιβάλλει ακριβώς στην διατομή εξόδου οριακή συνθήκη ομοιόμορφης μηδενικής στατικής πίεσης κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Νεώτερες εκδόσεις του Fluent[®], έχουν διορθώσει τις ατέλειες αυτές. Για το λόγο αυτό, επεκτάθηκε η τελική διάμετρος κατά τρεις διαμέτρους (εικόνα 4.2.16).



Εικόνα 4.2.16 Παράδειγμα Γεωμετρίας στο Gambit

Η τελευταία επεξεργασία που έγινε στην γεωμετρία αφορούσε την δημιουργία του πλέγματος. Γενικά, για να δημιουργηθεί καλής ποιότητας πλέγμα, καλό είναι η γεωμετρία να διαιρείται σε απλούστερα τμήματα και κυρίως να υπάρχει ομοιομορφία στους όγκους. Η ομοιομορφία στους όγκους δεν απαιτεί παρόμοιες διαστάσεις αλλά τα [vertices] που είναι συνδεδεμένα σε αυτούς να έχουν την ίδια [U value]. Στην προκειμένη, αποφασίστηκε όλοι οι όγκοι να έχουν σημεία συνδεδεμένα στις ακμές τους αποκλειστικά [vertices] με [U value 0.25 και 0.75]. Η επιλογή δεν ήταν τυχαία καθώς λόγω της οξείας γωνίας στην διακλάδωση ήταν επιτακτικό να χωριστούν στη μέση τα δύο κωνικά τμήματα ώστε να έχουν καλή ποιότητα πλέγματος. Αυτός ήταν και ο λόγος που στην αρχή τα κεντρικά [vertices] κάθε επιφάνειας δεν ορίζονταν απευθείας με την εντολή [create real vertex at centroid] αλλά με τον τρόπο που περιγράφηκε. Τα [vertices] με διαφορετική [U value] διαγράφηκαν κάνοντας χρήση της εντολής [merge edges]. Σημειώνεται εδώ ότι για τους όγκους που δημιουργούνται με την εντολή [sweep faces] η [U value] των [vertices] πρέπει να έχει διαμορφωθεί πριν την εκτέλεση της εντολής αλλιώς είναι πολύ πιθανό η εντολή [merge edges] να μην μπορεί να λειτουργήσει κατά το επιθυμητό.

Αφού ολοκληρώθηκε η ανωτέρω διαδικασία, τα [vertices] κάθε όγκου ενώθηκαν με [straight edges] και δημιουργήθηκαν επιφάνειες με αυτές τις ακμές χρησιμοποιώντας την εντολή [create face from wireframe]. Στη συνέχεια, ο κάθε όγκος χωρίστηκε σε δύο όγκους χρησιμοποιώντας αυτές τις επιφάνειες και την εντολή [split volumes with faces (real)].



Εικόνα 4.2.17 Τελική Γεωμετρία

4.3 Κατασκευή Υπολογιστικού Πλέγματος

Μετά την κατασκευή της γεωμετρίας δημιουργήθηκε το υπολογιστικό πλέγμα. Το υπολογιστικό πλέγμα δημιουργείται χωρίζοντας την γεωμετρία σε πεπερασμένο πλήθος τριδιάστατων κελιών.

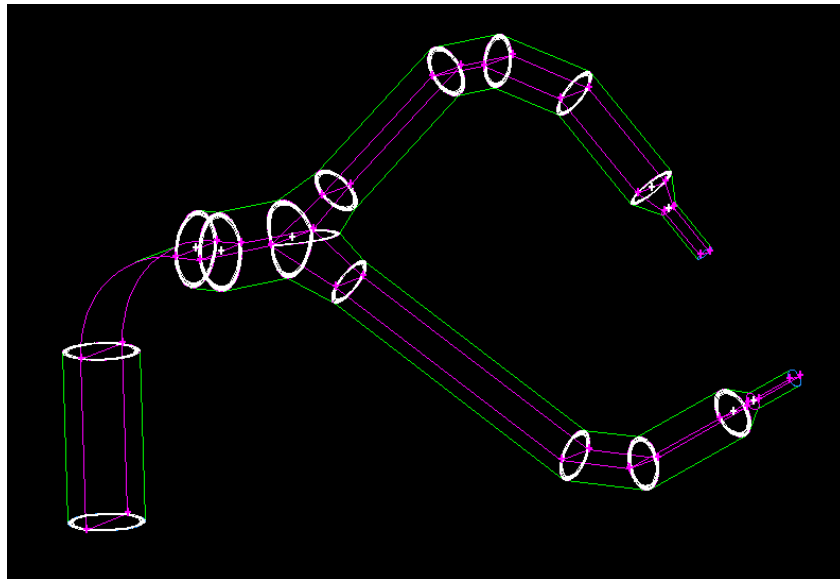
Αρχικά, δημιουργήθηκε το οριακό στρώμα [boundary layer]. Το οριακό στρώμα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο καθώς είναι αυτό που καθορίζει το πόσο πυκνό θα είναι το πλέγμα κοντά στα τοιχώματα. Για τη δημιουργία του οριακού στρώματος έγιναν διάφορες δοκιμές. Στόχος ήταν να προκύψει καλής ποιότητας πλέγμα το οποίο να είναι μεν αρκετά πυκνό ώστε να δίνει τιμές για το y^+ εντός των επιτρεπτών ορίων ($30 < y^+ < 300$) αλλά όχι υπερβολικά πυκνό ώστε να απαιτείται πολύ μεγάλος υπολογιστικός χρόνος. Σημειώνεται ότι για το y^+ αυτό που έχει ουσιαστική σημασία είναι το ύψος του κελιού που εφάπτεται στο τοίχωμα.

Έπειτα από διάφορες δοκιμές αποφασίστηκε πως για την προκειμένη περίπτωση θα χρησιμοποιούταν πλέγμα με:

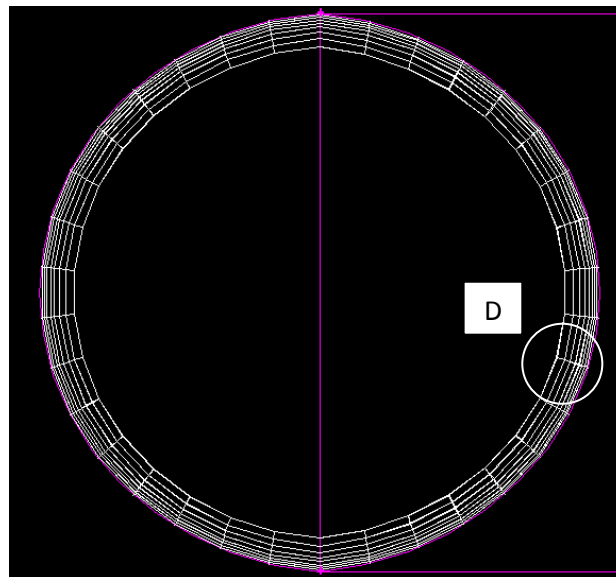
- Αλγόριθμος [Algorithm]: Uniform
- Ύψος Πρώτης Σειράς Κελιών [First Row]: 0.0004
- Λόγος Ύψους Διαδοχικών Κελιών [Growth Factor]: 1.25
- Αριθμός Σειρών [Rows]: 8

Το πλέγμα αυτό προσκολλήθηκε στις ακμές [attachment: edges] της αρχικής και τελικής επιφάνειας κάθε όγκου (εικόνα 4.3.1) εκτός του ακροφυσίου το οποίο

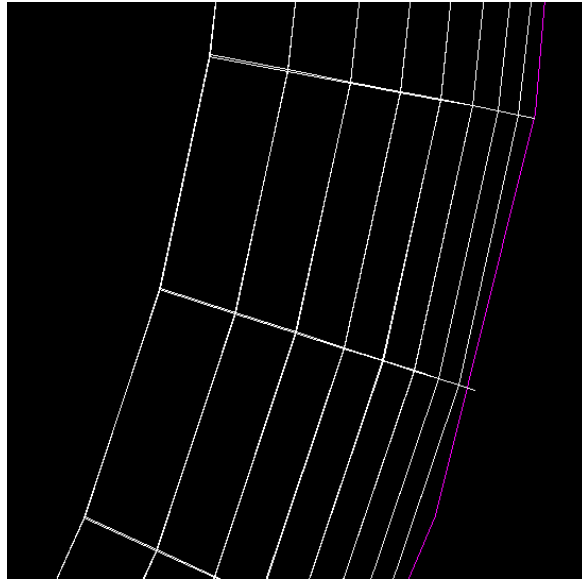
λόγο της ιδιαιτερότητας της γεωμετρίας του απαιτούσε διαφορετικό χειρισμό για την πλεγματοποίησή του.



Εικόνα 4.3.1 Οριακό Στρώμα προσκολλημένο στις ακμές



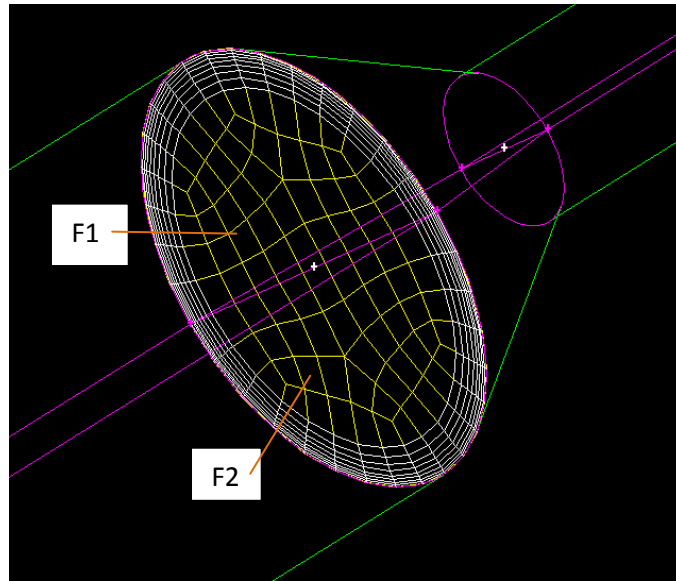
Εικόνα 4.3.2 Το οριακό στρώμα όπως φαίνεται στην είσοδο



Εικόνα 4.3.2α Λεπτομέρεια D εικόνας 5.3.2

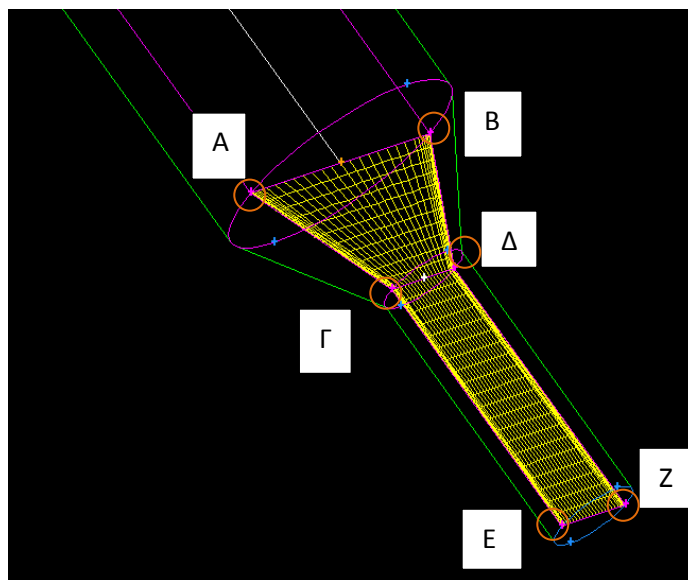
Έπειτα, έγινε επιλογή των επιφανειών που θα είχαν διδιάστατο πλέγμα το οποίο θα χρησιμοποιούσε ο αλγόριθμος Cooper (που περιλαμβάνεται στο Gambit) που χρησιμοποιήθηκε για την τριδιάστατη πλεγματοποίηση. Ο αλγόριθμος Cooper, προβάλλει το διδιάστατο πλέγμα της επιφάνειας – αν υπάρχει – στην απέναντι επιφάνεια και χρησιμοποιώντας αυτές ως πηγές (source faces) δημιουργεί τριδιάστατα στοιχεία σε όλο τον όγκο. Σε γεωμετρίες σαν την εξεταζόμενη, συνηθίζεται να επιλέγονται για δισδιάστατη πλεγματοποίηση οι επιφάνειες που βρίσκονται στην διακλάδωση καθώς εκείνη η περιοχή είναι πιθανότατα η πιο πολύπλοκη. Στην προκειμένη περίπτωση ωστόσο και έπειτα από πληθώρα δοκιμών, διαπιστώθηκε ότι δημιουργείται καλύτερης ποιότητας και μεγαλύτερης ομοιομορφίας πλέγμα αν επιλέγονταν οι δύο επιμέρους επιφάνειες της κυκλικής διατομής εξόδου του συστήματος διανομής (δηλαδή η διατομή εισόδου του ακροφυσίου)

Με την εντολή [mesh faces] με τετραγωνικά στοιχεία [elements: quad] και [type: pave] δημιουργήθηκε διδιάστατο πλέγμα με επιλεγμένη πυκνότητα [spacing] στις δύο επιφάνειες F1 και F2 (εικόνα 4.3.3) της διατομής εισόδου του ακροφυσίου. Το πλέγμα αυτό εξομαλύνθηκε χρησιμοποιώντας την εντολή [smooth face meshes] με [scheme: centroid area].



Εικόνα 4.3.3 Παράδειγμα Κατασκευής Πλέγματος στο Gambit

Για το ακροφύσιο χρησιμοποιήθηκε η εντολή [link mesh edges] για τις τρεις ευθείες ακμές AB, ΓΔ και EZ (εικόνα 4.3.4). Έπειτα έγινε δισδιάστατη πλεγματοποίηση με την εντολή [mesh faces] στις επιφάνειες ABΔΓ και ΓΔZE στις οποίες ανήκουν αυτές οι ακμές (εικόνα 4.3.4).

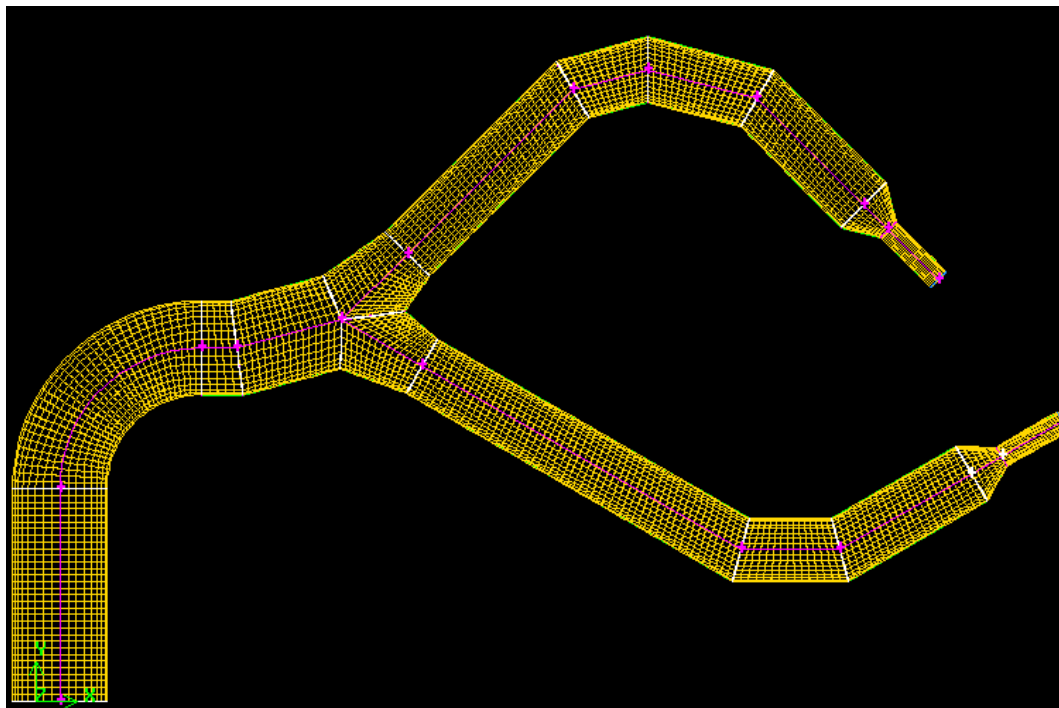


Εικόνα 4.3.4 Πλεγματοποίηση Ακροφυσίου

Εν συνεχεία, γίνεται η τριδιάστατη πλεγματοποίηση με την εντολή [mesh volumes] και καθορισμό του [spacing]. Αν και δημιουργείται πλέγμα και με διαφορετικό [spacing], είναι προτιμότερο το [spacing] στην εντολή [mesh faces] και

στην εντολή [mesh volumes] να είναι το ίδιο, ώστε να διασφαλιστεί η καλή ποιότητα του πλέγματος.

Το τελικό πλέγμα παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3.5. Παρατηρείται καλή ομοιομορφία ακόμα και στις περιοχές που έχουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα όπως π.χ. απότομη αλλαγή κλίσης.



Εικόνα 4.3.5 Τελικό Πλέγμα

4.4 Έλεγχος Ποιότητας Πλέγματος

Η ποιότητα του πλέγματος ελέγχεται με την εντολή [examine mesh]. Από την ποιότητα του πλέγματος εξαρτάται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ροής που εξάγει το Fluent[®] αλλά και ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για να συγκλίνει η μέθοδος. Για πολύ χαμηλές τιμές ποιότητας, το Fluent[®] δεν ξεκινά καν να επιλύει τη ροή.

Η ποιότητα των κελιών μπορεί να ελεγχθεί με διάφορες παραμέτρους που διαθέτει το Gambit. Για εξαεδρικά κελιά συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ο δείκτης [equiangle skew]. Ο δείκτης αυτός μετρά την παραμόρφωση του κάθε κελιού μέσω των γωνιών 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

$\theta_e = 90^\circ$ για εξαεδρικά κελιά

Η ποιότητα λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 1 με 0 την καλύτερη δυνατή και 1 την χειρότερη δυνατή. Στην περίπτωση των εξαεδρικών κελιών ανώτατη επιτρεπτή τιμή είναι η 0.85.

4.5 Χαρακτηρισμός Επιφανειών

Η γεωμετρία αυτή καθ' εαυτή δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή από το Fluent και να εξαχθούν ρεαλιστικά αποτελέσματα αν δεν έχει προηγηθεί ο κατάλληλος χαρακτηρισμός όλων των επιφανειών της γεωμετρίας.

Αρχικά, ρυθμίστηκε με την εντολή [specify continuum type] ώστε όλοι οι όγκοι να είναι [type: fluid]. Στην συνέχεια με την εντολή [specify boundary types] χαρακτηρίστηκε η επιφάνεια εισόδου σαν [mass flow inlet] και η κάθε έξοδος των ακροφυσίων σαν [pressure outlet]. Μετά έγινε χαρακτηρισμός των εσωτερικών επιφανειών της γεωμετρίας. Όλες οι βοηθητικές επιφάνειες που διαιρούν τους όγκους σε δύο τμήματα, χαρακτηρίστηκαν ως ένα [interior] ενώ κάθε εσωτερική επιφάνεια κυκλικής διατομής χαρακτηρίστηκε σαν ξεχωριστό [interior]. Η επιλογή αυτή έγινε για να είναι δυνατή η σωστή και ακριβής παρουσίαση των αποτελεσμάτων καθώς το Tecplot (το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων) δεν δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει με ακρίβεια επιφάνειες για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων αν αυτές δεν προϋπάρχουν από το Fluent. Τέλος, έγινε ο χαρακτηρισμός των τοιχωμάτων [wall]. Ως ένα [wall] χαρακτηρίστηκαν όλες οι εξωτερικές επιφάνειες πλην των δύο προεκτάσεων της τελικής διατομής των ακροφυσίων. Αυτές οι δύο επιφάνειες χαρακτηρίστηκαν σαν διαφορετικό [wall] για να ρυθμιστεί στο Fluent να έχουν μηδενικές διατμητικές τάσεις. Σημειώνεται εδώ ότι το Gambit κατά την εντολή [export mesh], που εξάγει το πλέγμα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το Fluent, χαρακτηρίζει αυτόματα σαν τοίχωμα οποιαδήποτε επιφάνεια έχει πλέγμα αλλά δεν έχει χαρακτηριστεί από το χρήστη.

Κεφάλαιο 5 Εύρεση Βέλτιστου

Υπολογιστικού Πλέγματος

5.1 Παρουσίαση Πλεγμάτων

Το πλέγμα μιας γεωμετρίας εκτός από την κατάλληλη ποιότητα στα κελιά του, οφείλει να έχει και την κατάλληλη πυκνότητα. Ένα πλέγμα που δεν είναι αρκετά πυκνό, μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα ή ακόμα και στην αδυναμία σύγκλισης της μεθόδου. Εν αντιθέσει, ένα πλέγμα υπερβολικά πυκνό, θα οδηγήσει στην απαίτηση ασύμφορα μεγάλου υπολογιστικού χρόνου. Για τον λόγο αυτό, έγινε ο λεγόμενος έλεγχος ανεξαρτησίας των υπολογιστικών πλεγμάτων.

Κατά τον έλεγχο αυτό, έγιναν διαδοχικές πυκνώσεις στο πλέγμα, μεταβάλλοντας μόνο το spacing, και έπειτα συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του πεδίου ροής που εξάγει το Fluent σε διάφορες ενδεικτικές θέσεις. Στόχος είναι να βρεθεί το πλέγμα εκείνο που παράγει ικανοποιητική ακρίβεια αποτελεσμάτων, η οποία δεν βελτιώνεται σημαντικά με περαιτέρω πύκνωση.

Για όλες τις πυκνώσεις χρησιμοποιήθηκε το οριακό στρώμα που έχει περιγραφεί ανωτέρω. Υπενθυμίζεται, ότι χρησιμοποιείται ίδια πύκνωση τόσο στην εντολή mesh faces όσο και στην εντολή mesh volumes.

Όνομα	Spacing	Αριθμός Κελιών	Ποιότητα Χειρότερου Στοιχείου
0.005	0.005	495092	0.602
0.0045	0.0045	632214	0.608
0.004	0.004	820722	0.630

5.2 Εισαγωγή Υπολογιστικού Πλέγματος στο Fluent

και Καθορισμός Παραμέτρων Επίλυσης

Με την εντολή [read case] εισήχθηκε στο Fluent το αρχείο .msh που δημιουργήθηκε στο Gambit. Έπειτα επιλέχθηκε ως μοντέλο τύρβης [define model viscous] το μοντέλο [k – ε standard] με [standard wall functions]. Στη συνέχεια επιλέχθηκε ως υλικό [define materials] το νερό [water – liquid (h2o < 1 >)] από τη βάση δεδομένων του Fluent (fluent database).

Ακολούθως, καθορίστηκαν οι συνοριακές συνθήκες [define boundary conditions]. Πρώτο βήμα ήταν ο καθορισμός του [fluid] ως [water-liquid]. Δεύτερο

βήμα, ήταν ο καθορισμός της διατομής εισόδου [mass flow inlet]. Εκεί, τέθηκε η παροχή μάζας [mass flow rate] 37,5 kg/s (δηλαδή στο μισό της ονομαστικής παροχής του υδροστροβίλου) για το τρέξιμο του ελέγχου ανεξαρτησίας του πλέγματος. Σαν [direction specification method] ορίστηκε [normal to boundary] με [turbulence specification method: intensity and hydraulic diameter]. Η τιμή [turbulent intensity] ανευρέθηκε από τον εμπειρικό τύπο $TI=0.16Re^{-0.125}$. Η ένταση της τύρβης ταυτίζεται με το λόγο της ρίζας του μέσου τετραγώνου των διακυμάνσεων της ταχύτητας προς την μέση ταχύτητα της ροής ($TI \equiv u'/u_{avg} = 0.16Re^{-0.125}$). Το k συνδέεται με την TI μέσω της σχέσης $k = \frac{3}{2}(u_{avg} \cdot TI)^2$ και το ε συνδέεται με το k μέσω της σχέσης $\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}$ όπου $C_{\mu}=0.09$ εμπειρική σταθερά και το $l = 0.07 \cdot L$ με το L να ταυτίζεται με την υδραυλική διάμετρο. Για την διατομή εισόδου και την συγκεκριμένη παροχή $TI=3.237\%$ ενώ η υδραυλική διάμετρος [hydraulic diameter] είναι ίση με 0.1335m. Με όμοιο τρόπο καθορίστηκαν τα [pressure outlets] με [backflow $TI=2.697\%$] και [backflow hydraulic diameter] 0.031m. Το [backflow TI] είναι η ένταση της τύρβης σε περίπτωση ανακυκλοφοριών στην έξοδο. Στην εξεταζόμενη γεωμετρία έχει προβλεφθεί από το στάδιο της κατασκευής της, να μην εμφανίζονται ανακυκλοφορίες στην έξοδο. Συνεπώς, το [backflow TI] καθορίζεται για λόγους πληρότητας. Τρίτο βήμα ήταν ο καθορισμός των διατμητικών τάσεων [shear condition] για το τοίχωμα που αποτελεί προέκταση της εξόδου του ακροφυσίου. Συγκεκριμένα καθορίστηκε [specified shear] με μηδενικές συνιστώσες στο [shear stress]. Η ανωτέρω επιλογή έγινε διότι αν δεν υπήρχε αυτό το τοίχωμα η δέσμη μετά το ακροφύσιο θα περιβαλλόταν από αέρα και συνεπώς θα είχε αμελητέες τιμές τριβής.

Αφού καθορίστηκαν οι [boundary conditions], εκτελέστηκε η εντολή [solution initialization] με καθορισμό [compute from mass flow inlet] και μηδενικές τιμές για τις συνιστώσες ταχύτητας και την πίεση σαν αρχικές τιμές [initial values].

Στην συνέχεια, δόθηκε εντολή για [fmg initialization]. Με την εντολή αυτή, το πρόγραμμα Fluent διενεργεί ένα γρήγορο αρχικό τρέξιμο και υπολογίζει μια καλής ποιότητας αρχική λύση. Η λύση αυτή λαμβάνεται ως αφετηρία για την διενέργεια των κανονικών υπολογισμών. Έπειτα, καθορίστηκε η τάξη του σφάλματος [absolute criteria] για το αρχικό τρέξιμο ως 10^{-4} μέσω της εντολής [solve monitors residuals].

Με την εντολή [solve iterate] έγινε το αρχικό τρέξιμο μέχρι τη σύγκλιση της μεθόδου δηλαδή μέχρι όλα τα υπόλοιπα [residuals] να λάβουν τιμή χαμηλότερη του 10^{-4} . Ως υπόλοιπο [residual] λαμβάνεται η διαφορά των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από δύο διαδοχικές επαναλήψεις.

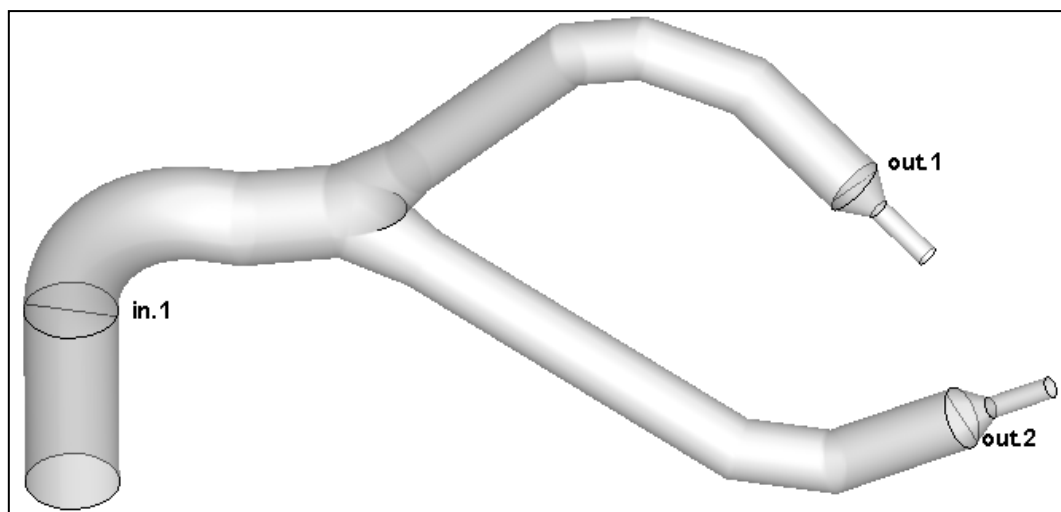
Έπειτα, ρυθμίστηκε στην εντολή solution controls η διακριτοποίηση [discretization] ως δεύτερης τάξης [second order upwind] για την εξίσωση διατήρησης της ορμής [momentum], την εξίσωση τυρβώδους κινητικής ενέργειας [turbulent kinetic energy] και την εξίσωση τυρβώδους διάχυσης [turbulent dissipation]

rate]. Αναφέρεται ότι το πρώτο τρέξιμο έγινε με διακριτοποίηση πρώτης τάξης ενώ για τη σύζευξη πίεσης ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε και για τα δύο τρεξίματα ο αλγόριθμος Simple. Η διακριτοποίηση δεύτερης τάξης δεν επιλέχθηκε από την αρχή καθώς, όντας ασταθής η ροή, υπήρχε περίπτωση η μέθοδος να αποκλίνει ή να χρειαστεί πολύ περισσότερος υπολογιστικός χρόνος για να συγκλίνει.

Στη συνέχεια το όριο υπολοίπων των εξισώσεων [absolute criteria] για τα [residuals] ρυθμίστηκε στο 10^{-6} και ξαναέγινε επίλυση της ροής μέχρι τη σύγκλιση της μεθόδου.

5.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

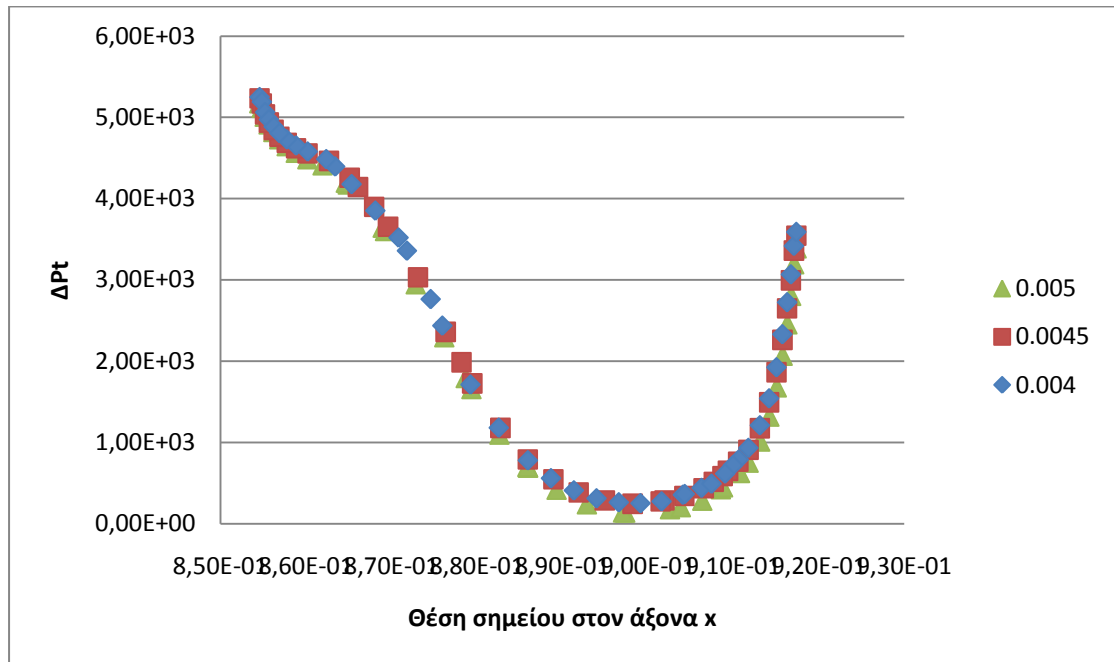
Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η πρώτη προκαθορισμένη εσωτερική επιφάνεια μετά το διατομή εισόδου (mass flow inlet) και οι τελευταίες προκαθορισμένες εσωτερικές επιφάνειες δηλαδή οι δύο επιφάνειες εισόδου του πάνω και του κάτω ακροφυσίου (εικόνα 5.3.1). Μέσω του tecplot έγινε εξαγωγή των δεδομένων από τις επιφάνειες αυτές σε μία συγκεκριμένη ευθεία για κάθε επιφάνεια. Συγκεκριμένα η ευθεία αυτή αποτελεί την τομή του επιπέδου $Z=0$ με την κάθε επιφάνεια. Για λόγους συντομίας η αναφορά σε αυτές τις ζώνες δεδομένων θα γίνεται με τα ονόματα in.1, out.1, out.2 κατ' αντιστοιχία με τη σειρά που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



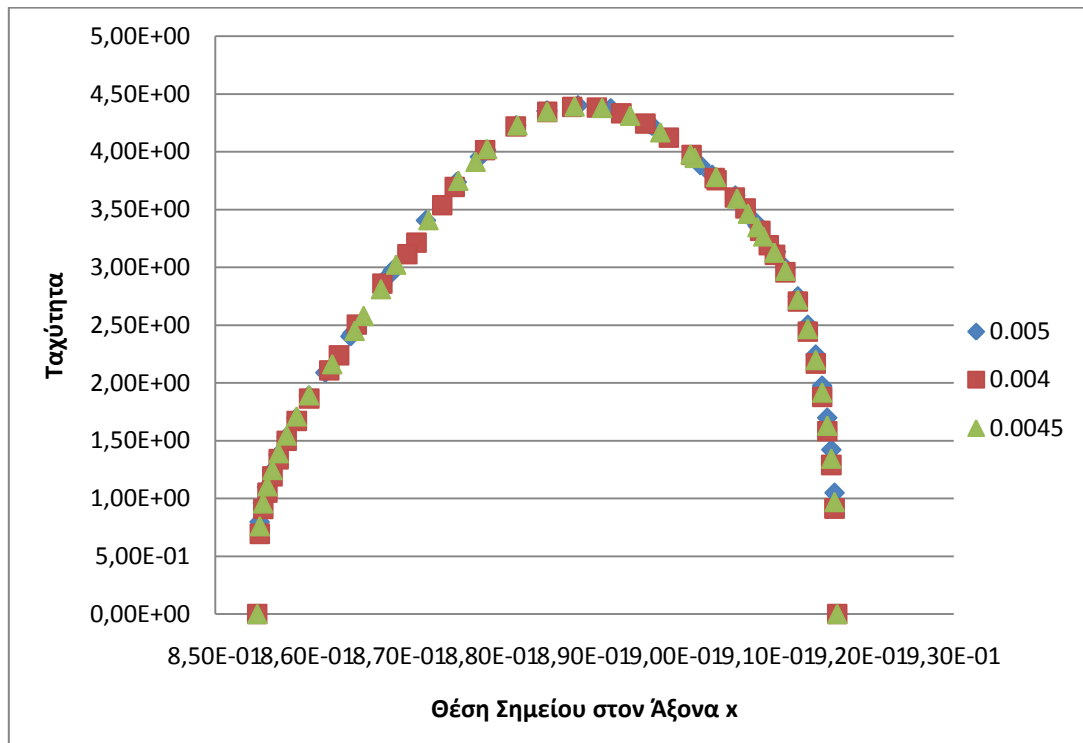
Εικόνα 5.3.1 Ζώνες Παρουσίασης Αποτελεσμάτων Ανεξαρτησίας Πλέγματος

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι η διαφορά της ολικής πίεσης ΔP_t ανάμεσα στην ζώνη in.1 και τις ζώνες out.1 και out.2 και η ταχύτητα στις ζώνες out.1 και out.2.

Στην ζώνη out.1 προέκυψαν τα ακόλουθα διαγράμματα για την διαφορά ολικής πίεσης και την ταχύτητα σε σχέση με τον άξονα x.

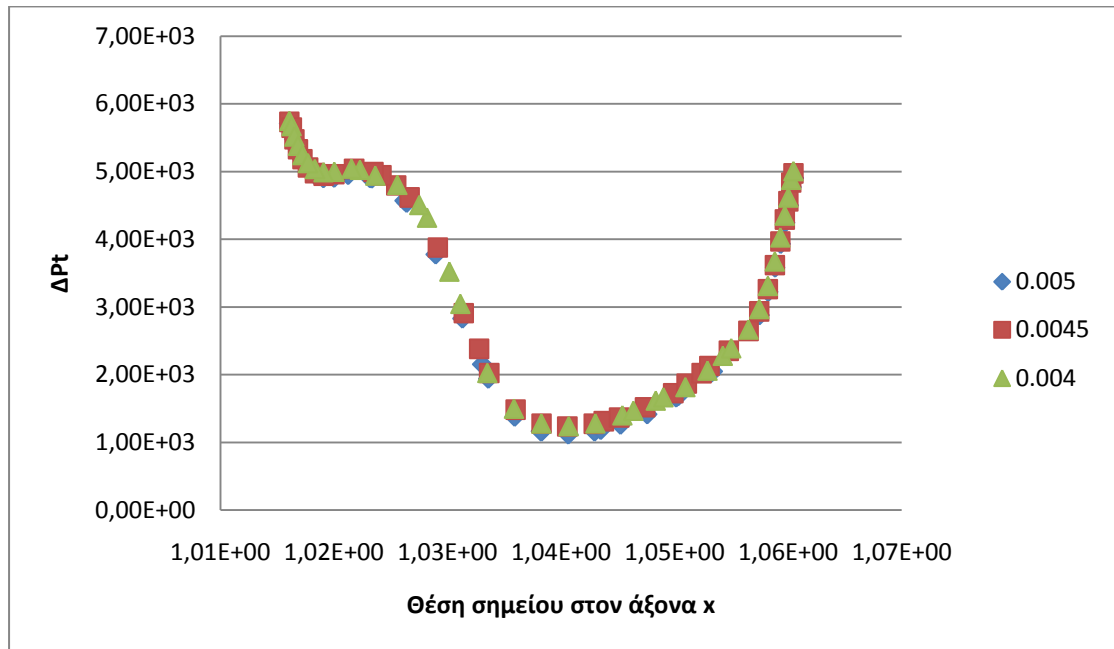


Διάγραμμα 5.3.1 Διαφορά Ολικής Πίεσης στην Ζώνη out.1

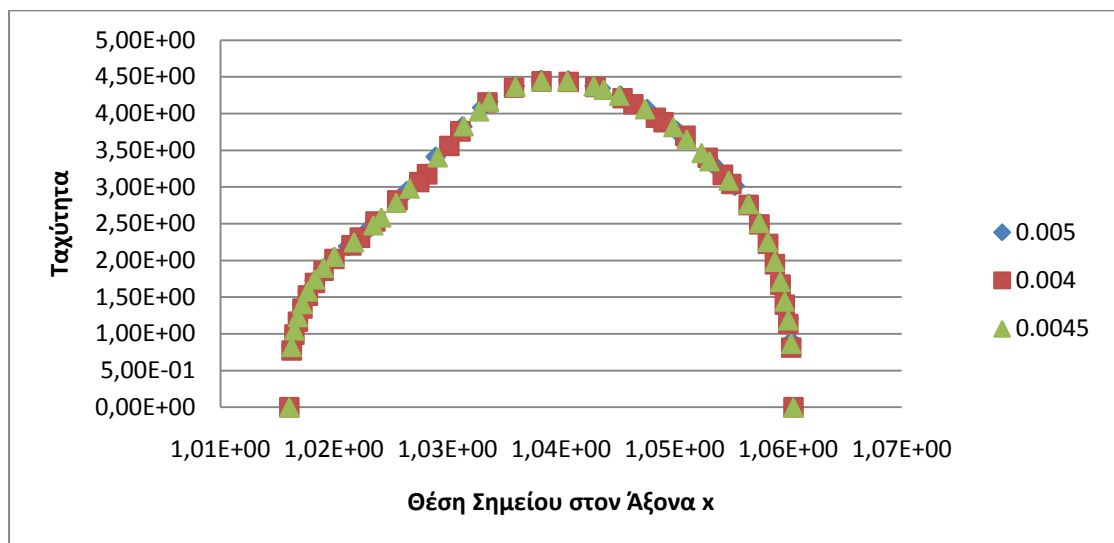


Διάγραμμα 5.3.2 Ταχύτητα στην Ζώνη out.1

Στην ζώνη out.2 προέκυψαν τα ακόλουθα διαγράμματα για την πίεση και την ταχύτητα σε σχέση με τον άξονα x.



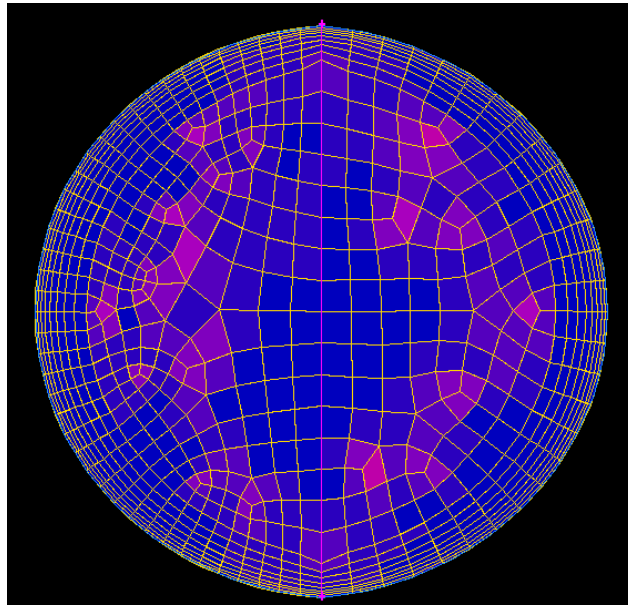
Διάγραμμα 5.3.3 Διαφορά Ολικής Πίεσης στην Ζώνη out.2



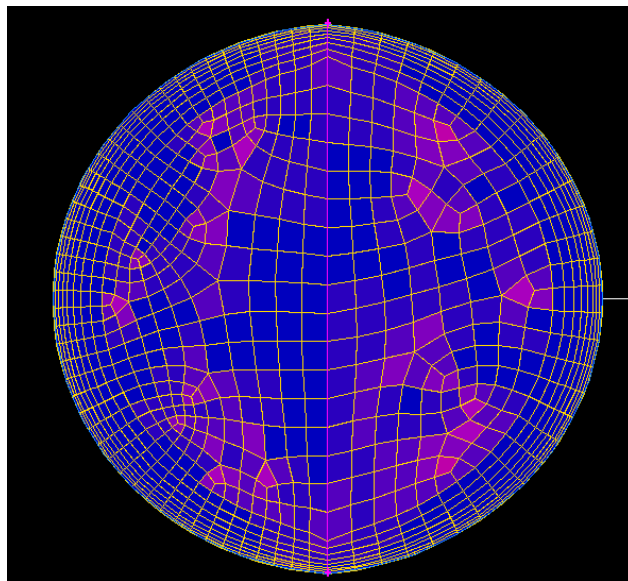
Διάγραμμα 5.3.4 Ταχύτητα στην Ζώνη out.2

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από τα ανωτέρω διαγράμματα τα αποτελέσματα των τριών πλεγμάτων παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές. Στα πλέγματα 0.0045 και 0.004 τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ακόμη κοντινότερες τιμές. Συνεπώς επιλέγεται σαν πλέγμα το 0.0045 καθώς περαιτέρω πύκνωση του

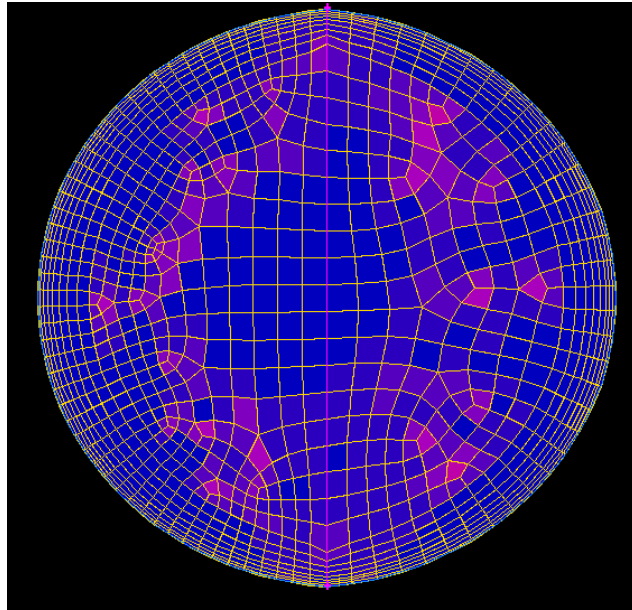
υπολογιστικού πλέγματος δεν δίνει αποτελέσματα με ουσιαστική διαφορά στις τιμές τους.



Εικόνα 5.3.2 Απεικόνιση Πλέγματος 0.005 στην διατομή Εισόδου



Εικόνα 5.3.3 Απεικόνιση Πλέγματος 0.0045 στην διατομή Εισόδου



Εικόνα 5.3.4 Απεικόνιση Πλέγματος 0.004 στην διατομή Εισόδου

Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα Αριθμητικής

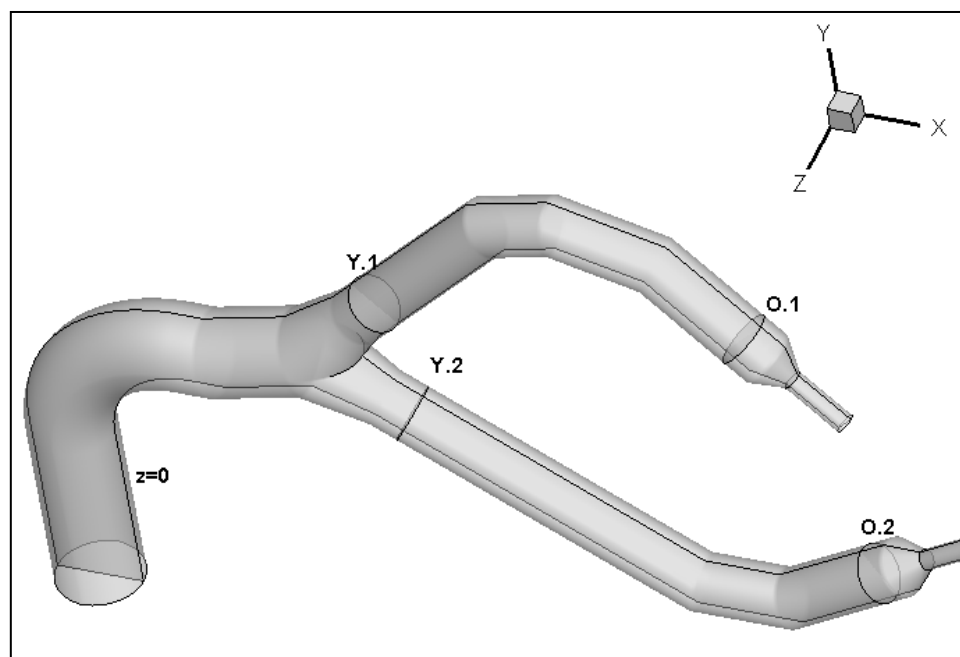
Επίλυσης της Ροής στον Διανομέα

6.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να αναλυθεί η ροή στο σύστημα διανομής του υδροστροβίλου για όλο το εύρος ανοίγματος της βελόνης έγιναν υπολογισμοί στο Fluent για παροχές 25%, 50%, 75%, 100% της μέγιστης δηλαδή των 75kg/s.

Είναι σύνηθες ο υδροστρόβιλος να λειτουργεί με ανοιχτό ένα από τα δύο ακροφύσια όταν η παροχή του υδατορεύματος δεν λαμβάνει αρκετά υψηλές τιμές. Στις περιπτώσεις αυτές, κλείνει το ένα ακροφύσιο και όλη η παροχή διέρχεται από το ανοιχτό. Για τον λόγο αυτό, αντίστοιχοι υπολογισμοί έγιναν και για την περίπτωση που είναι ανοιχτό είτε το ένα είτε το άλλο ακροφύσιο.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται στο επίπεδο $z=0$ και στις διατομές O.1 και O.2 που βρίσκονται σε απόσταση μισής διαμέτρου πριν τα ακροφύσια καθώς και στις διατομές Y.1 και Y.2 οι οποίες βρίσκονται μισή διάμετρο μετά την διακλάδωση. Η απόσταση της μισής διαμέτρου εξασφαλίζει αποτελέσματα πολύ κοντινά στις διατομές ακροφυσίων και διακλάδωσης χωρίς όμως τα διάφορα μεγέθη και κυρίως η ταχύτητα να είναι επηρεασμένα από τις συγκλίνουσες γεωμετρίες.



Εικόνα 7.1.1 Επιφάνειες Παρουσίασης Αποτελεσμάτων Αριθμητικής Επίλυσης της Ροής

Θα γίνει παρουσίαση των κατανομών για τα ακόλουθα μεγέθη:

- Ταχύτητα σε m/s (velocity magnitude)
- Αδιαστατοποιημένη Ταχύτητα
- Αδιαστατοποιημένη Στατική Πίεση
- Ελικότητα (helicity)
- Διάχυση της ενέργειας Φ σε Pascal (energy dissipation)
- Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας (tangential velocity vectors)
- Αδιαστατοποιημένη Εφαπτόμενη Ταχύτητα

Η αδιαστατοποίηση της ταχύτητας γίνεται με την μέση ταχύτητα (παροχή όγκου / εμβαδόν διατομής) στην διατομή μετά την διακλάδωση έως και πριν το ακροφύσιο.

Η αδιαστατοποίηση της στατικής πίεσης γίνεται με παρόμοιο τρόπο μόνο που στην προκειμένη χρησιμοποιείται η μέση κινητική ενέργεια της ροής στην διατομή μετά τη διακλάδωση έως και πριν το ακροφύσιο.

Η ελικότητα (helicity) είναι το μέγεθος που δείχνει την περιστροφή της ροής γύρω από τον άξονα κίνησης της (δηλαδή την δευτερεύουσα ροή). Όταν η περιστροφή είναι ωρολογιακή τότε η ελικότητα έχει θετικές τιμές ενώ έχει αρνητικές τιμές για αντίθετη φορά περιστροφής. Δίνεται από τον τύπο: $H = \vec{u} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{u})$

Η διάχυση της ενέργειας Φ δείχνει τις απώλειες ενέργειας και δίνεται από τον τύπο:

$$\Phi = \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]$$
 Για τον υπολογισμό του Φ γίνεται χρήση της εντολής του Tecplot specify equations.

Η εφαπτόμενη ταχύτητα είναι ένα μέγεθος στο οποίο θα δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα καθώς δείχνει τις δευτερεύουσες ροές που σχηματίζονται. Το επιθυμητό είναι οι δευτερεύουσες ροές να είναι κατά το δυνατόν μικρότερες. Αναλύοντας σε βάθος το μέτρο και τη φορά τους είναι δυνατό να βρεθεί τρόπος ώστε να μειωθούν σημαντικά.

Η αδιαστατοποίηση της εφαπτόμενης ταχύτητας γίνεται ακριβώς όπως και της ταχύτητας, διαιρώντας το μέτρο της που υπολογίστηκε με την μέση ταχύτητα της ροής στην διατομή.

Ένα καινούριο μέγεθος που εισήχθηκε στην παρούσα διπλωματική είναι ο Αδιαστατος Συντελεστής Δευτερευουσών Ροών (ΑΣΔΡ). Ο συντελεστής αυτός δημιουργήθηκε ώστε να δείχνει ποσοτικά το μέγεθος των δευτερευουσών ροών χωρίς να είναι απαραίτητη η ποιοτική επισκόπηση τους μέσω των ισοϋψών καμπυλών και

των διανυσμάτων του μέτρου της ταχύτητας τους. Ο ΑΣΔΡ υποδεικνύει το μέγεθος των δευτερευουσών ροών σε σχέση με το μέγεθος της μέσης ταχύτητας της ροής.

Πριν την αδιαστατοποίηση του συντελεστή, το μέγεθος που έχει προκύψει είναι ο Συντελεστής Δευτερευουσών Ροών (ΣΔΡ). Ο ΣΔΡ προέκυψε υπολογίζοντας τον σταθμισμένο μέσο όρο των μέτρων της εφαπτόμενης ταχύτητας κάθε κόμβου του πλέγματος προς την συνολική επιφάνεια των στοιχείων του πλέγματος. Η συνολική επιφάνεια προφανώς ταυτίζεται με την επιφάνεια της διατομής. Με τον σταθμισμένο μέσο όρο δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στο μέτρο της εφαπτόμενης ταχύτητας των δισδιάστατων στοιχείων (αφού πρόκειται για διατομές και όχι όγκους) που καταλαμβάνουν μεγαλύτερη επιφάνεια. Για αυτό το λόγο δεν επιλέχθηκε να γίνει απλή διαίρεση του αθροίσματος του μέτρου προς τον αριθμό των κόμβων.

Ο τύπος του ΣΔΡ είναι ο εξής:

$$\Sigma \Delta P = \frac{\sum (V_{t,i} \cdot A_i)}{\sum A_i}$$

όπου: $V_{t,i}$ η εφαπτόμενη ταχύτητα (tangential velocity) του κάθε στοιχείου

A_i η επιφάνεια του κάθε στοιχείου

Ο ΑΣΔΡ προκύπτει έπειτα από αδιαστατοποίηση του ΣΔΡ με την μέση ταχύτητα της διατομής. Το γεγονός ότι είναι αδιάστατος με την μέση ταχύτητα δίνει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύγκριση διάφορων διατομών για διάφορες παροχές μάζας.

Προφανώς ο ΑΣΔΡ παίρνει μόνο θετικές τιμές. Όσο πιο κοντινή είναι η τιμή του συντελεστή στο 0 τόσο καλύτερη κρίνεται η διατομή (και η συνολική γεωμετρία αν γίνει υπολογισμός για πλήθος διατομών) ως προς τις δευτερεύουσες ροές που αναπτύσσονται σε αυτήν.

Οι απώλειες ενέργειας υπολογίζονται μέσω του ενεργειακού ισολογισμού σύμφωνα με τον οποίο η ενέργεια στην είσοδο ισούται με την ενέργεια στην έξοδο συν τις απώλειες ενέργειας.

$$E_{in} = E_{out} + E_{loss}$$

Η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου ισούται με το άθροισμα του έργου της πίεσης και της κινητικής ενέργειας ανά μονάδα χρόνου.

$$E = P \cdot Q + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot Q = P_t \cdot Q$$

Όπου P η στατική πίεση, Q η παροχή όγκου και P_t η ολική πίεση.

Συνεπώς για το εξεταζόμενο σύστημα θα ισχύει:

$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2}$$

Με δείκτη 1 συμβολίζεται η είσοδος του άνω ακροφυσίου ενώ με δείκτη 2 η είσοδος του κάτω.

Οι απώλειες ενέργειας θα παρουσιαστούν και σε mΣΥ όπου:

$$E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}}$$

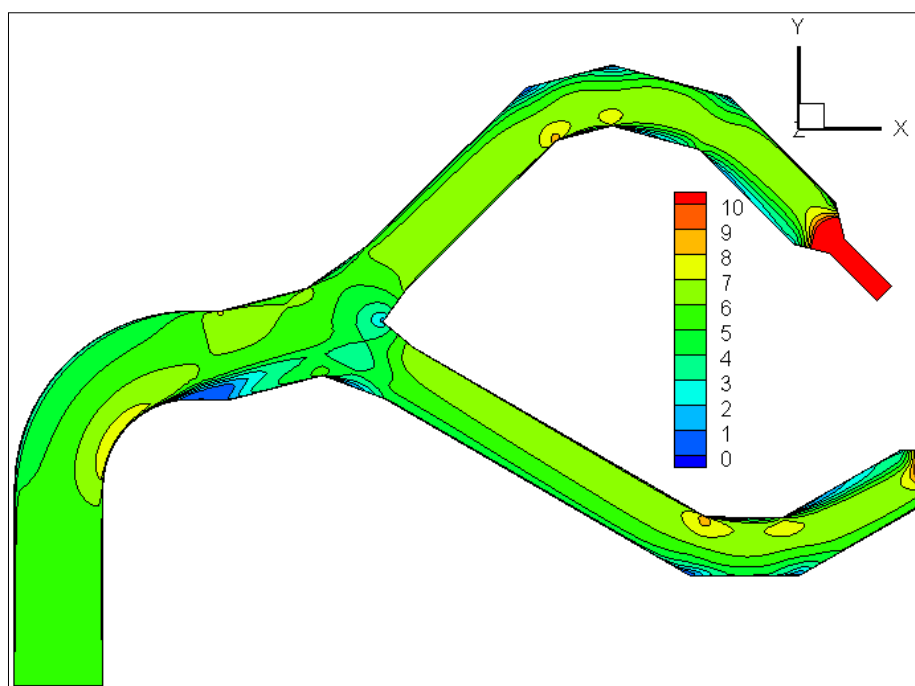
Οι ολικές πιέσεις υπολογίζονται μέσω του Fluent με την εντολή report surface integrals με τύπο (report type) mass weighted average.

6.2 Λειτουργία με δύο Ακροφύσια

6.2.1 Παροχή 100%

Το 100% της διερχόμενης παροχής είναι τα 75 kg/s. Ο αριθμός Reynolds λαμβάνει την τιμή 713141.3 στην είσοδο και την τιμή 3070259.4 στην έξοδο.

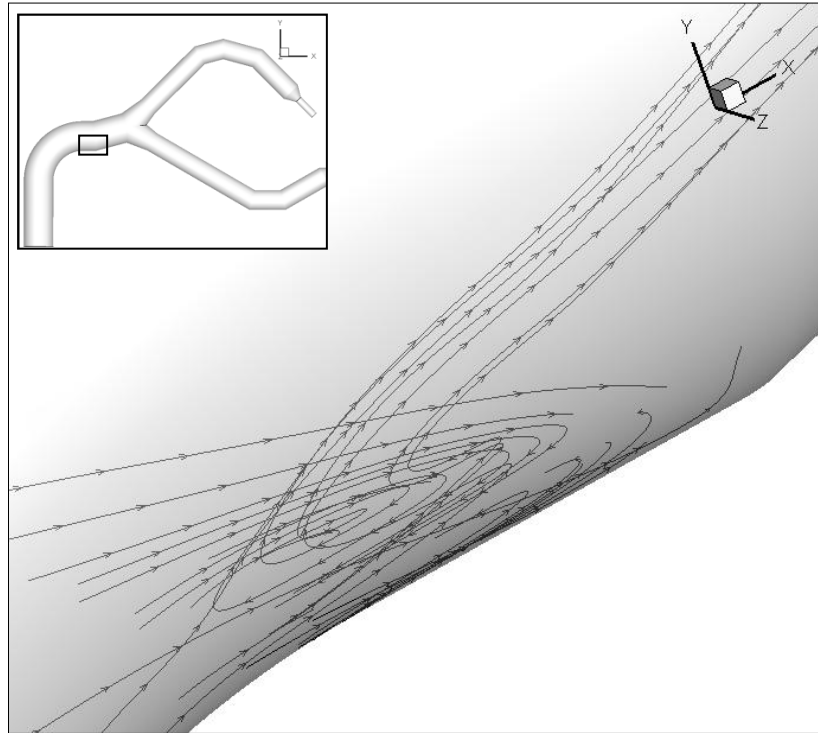
Αρχικά, παρουσιάζεται το γενικό προφίλ της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$.



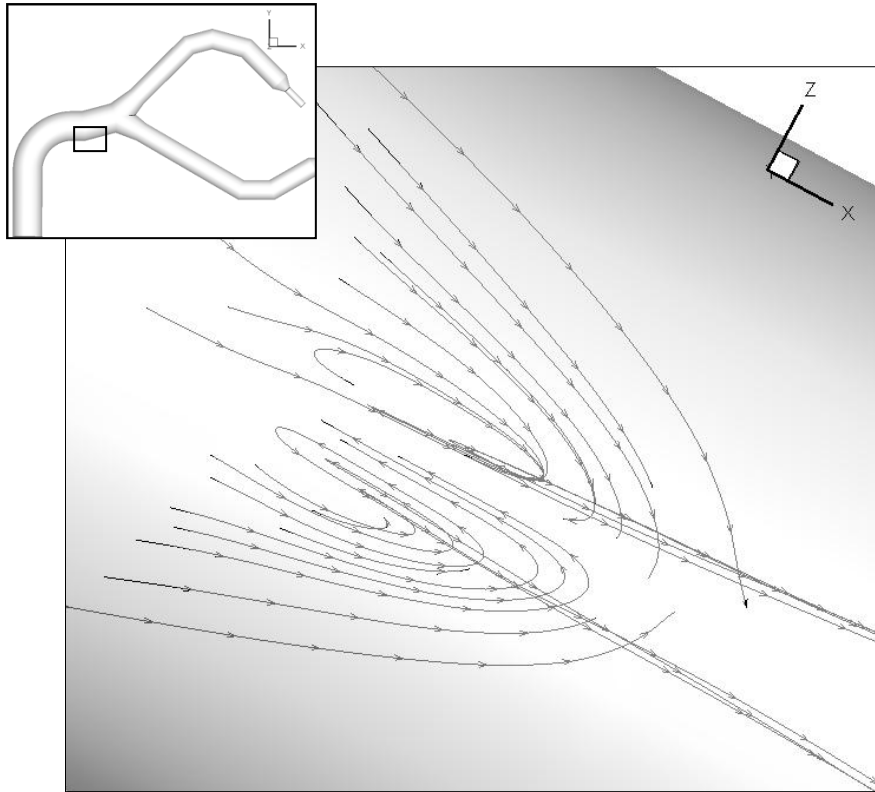
Εικόνα 6.2.1.1 Ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.2.1.1 ακραίες τιμές τις ταχύτητας παρατηρούνται στα σημεία που η ροή αλλάζει διεύθυνση και φυσικά κοντά στα ακροφύσια. Σε κάποιες απότομες γωνίες η ταχύτητα λαμβάνει τιμές πολύ κοντά στο 0

γεγονός που υποδεικνύει ότι η ροή εκεί αποκολλάται και δημιουργούνται τοπικά ζώνες ανακυκλοφορίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή αμέσως μετά την αρχική καμπυλότητα στην οποία δημιουργούνται ισχυρές δίνες και ανακυκλοφορίες, οι οποίες προκαλούν απώλειες ενέργειας, όπως δείχνει η εικόνα 6.2.1.2.

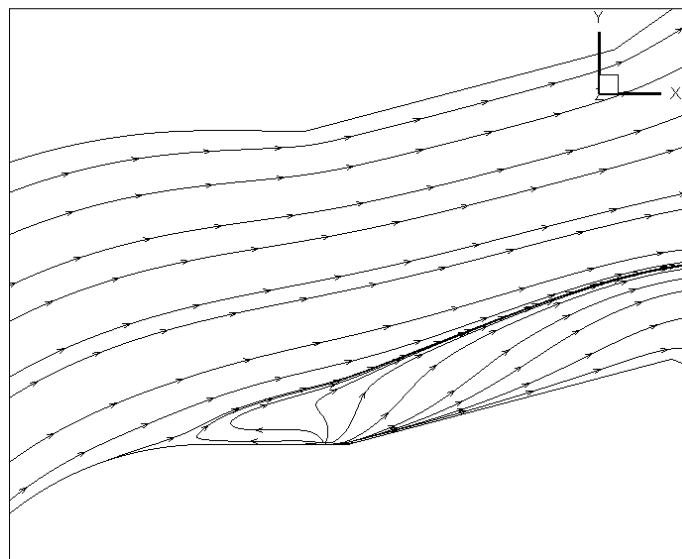


Εικόνα 6.2.1.2 Τριδιάστατη Απεικόνιση Δινών μετά την Καμπυλότητα



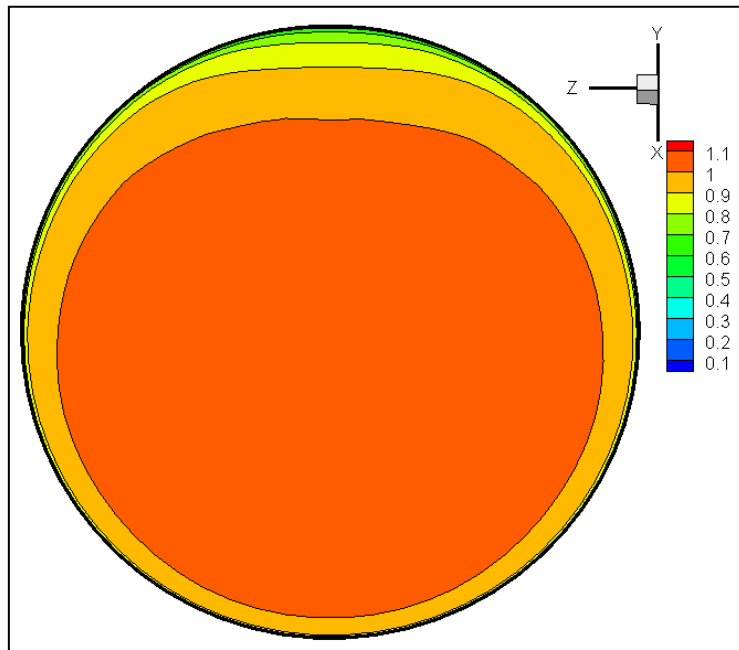
Εικόνα 6.2.1.3 Τρισδιάστατη Απεικόνιση Δινών μετά την Καμπυλότητα

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.2.1.3 δημιουργούνται δύο σχεδόν συμμετρικές δίνες εξαιτίας των οποίων το προφίλ της ροής στο επίπεδο $z=0$ λαμβάνει την μορφή της εικόνας 6.2.1.4. Όπως είναι εμφανές οι δίνες αυτές επηρεάζουν κατά κύριο λόγο τη ροή στο κάτω μέρος του αγωγού και όχι τόσο στο άνω όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.2.1.4. Αυτό συμβαίνει γιατί η ροή περνά πάνω από την περιοχή ανακυκλοφορίας και επανακολλάται στο στερεό παγιδεύοντας αυτή τη φουσαλίδα ανακυκλοφορίας κοντά στο κάτω μέρος του αγωγού.

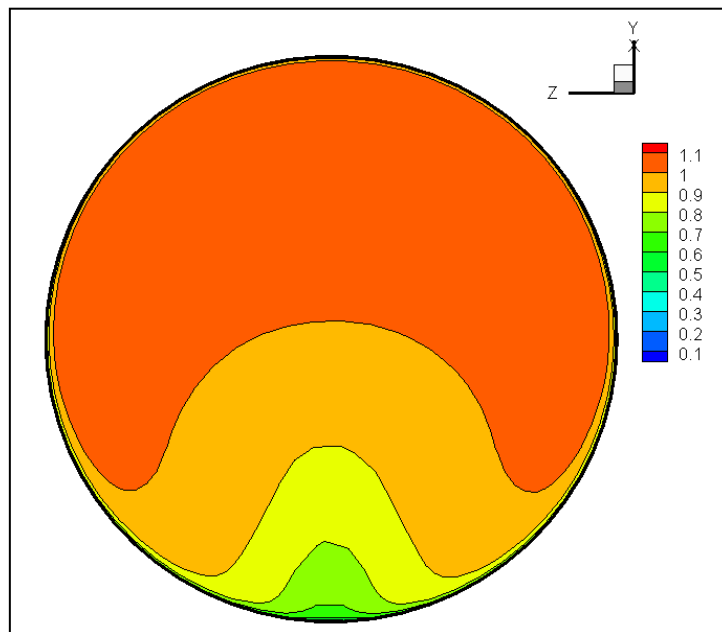


Εικόνα 6.2.1.4 Γραμμές Ροής μετά την Καμπυλότητα στο επίπεδο $z=0$

Όσον αφορά το προφίλ της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας παρατηρείται πολύ καλή ομοιομορφία στην επιφάνεια Y.1 (εικόνα 6.2.1.5). Εν αντιθέσει, στην επιφάνεια Y.2 παρατηρείται σαφώς μικρότερη ομοιομορφία κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό είναι ωστόσο αναμενόμενο καθώς όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.2.16 λόγω της απότομης γωνίας που εμφανίζει η διακλάδωση στο κάτω μέρος του αγωγού παρουσιάζεται αποκόλληση της ροής λίγο πριν τη διατομή Y.2.

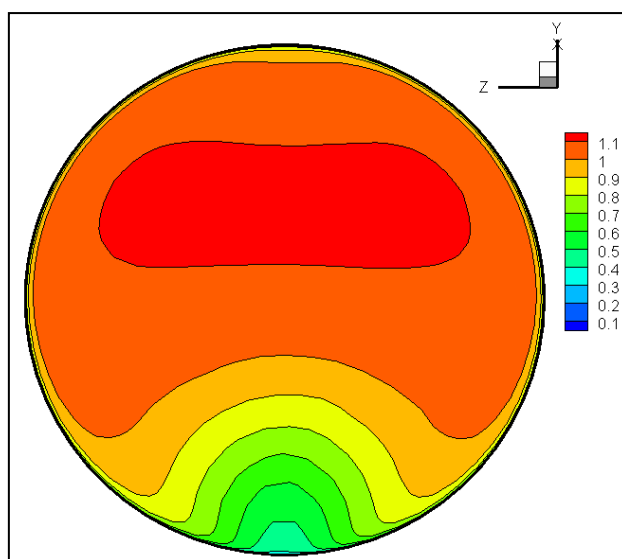


Εικόνα 6.2.1.5 Αδιαστατοποιημένη Ταχύτητα στην επιφάνεια Y.1

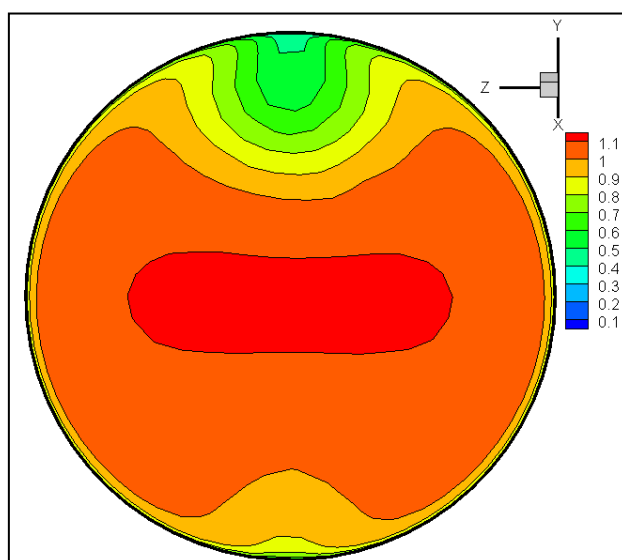


Εικόνα 6.2.1.6 Αδιαστατοποιημένη Ταχύτητα στην επιφάνεια Y.2

Ακόμα μεγαλύτερη ανομοιομορφία παρατηρείται στις διατομές O.1 και O.2 όπως φαίνεται και στις εικόνες 6.2.1.7 και 6.2.1.8. Από την εικόνα 6.2.1.1 είναι εμφανές ότι υπεύθυνα για αυτή την ανομοιομορφία είναι οι απότομες γωνίες πριν τις διατομές O.1 και O.2 εξαιτίας των οποίων η ροή αποκολλάται. Η ανομοιομορφία αυτή κάθε άλλο παρά επιθυμητή είναι, ειδικά τόσο κοντά στο ακροφύσιο καθώς επηρεάζει την ποιότητα της δέσμης (jet). Τα προφίλ των ταχυτήτων για τις O.1 και O.2 παρουσιάζουν συμμετρία μεταξύ τους στο κάτω και άνω μέρος αντίστοιχα. Αντίστοιχη συμμετρία δεν εμφανίζεται και στο κέντρο των επιφανειών όπου υπάρχει η υψηλότερη ταχύτητα. Συνεπώς οι δύο δέσμες που εξέρχονται από τα ακροφύσια θα εμφανίζουν διαφορές.

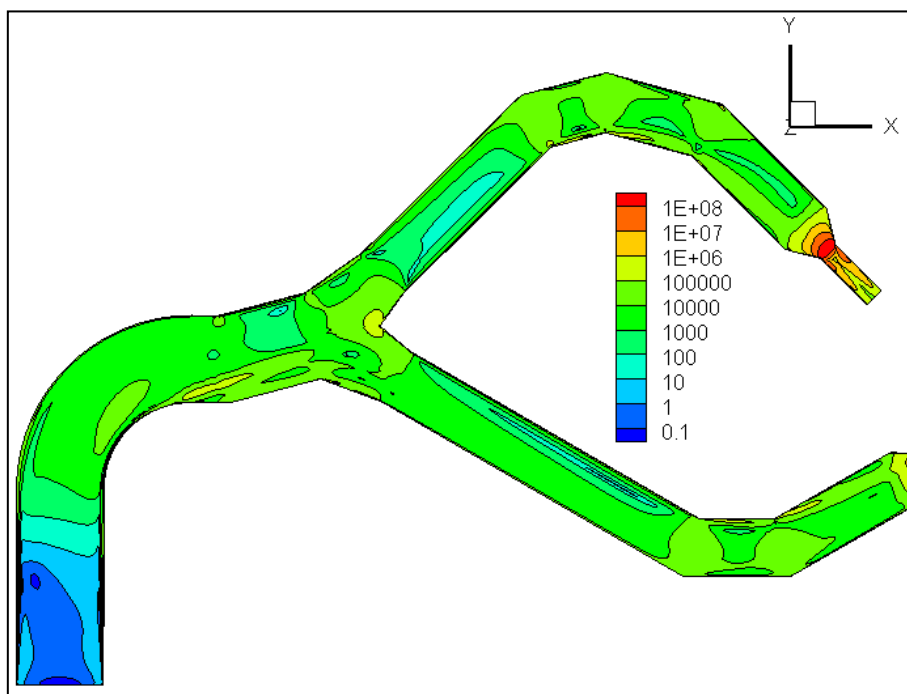


Εικόνα 6.2.1.7 Αδιαστατοποιημένη Ταχύτητα στην επιφάνεια O.1



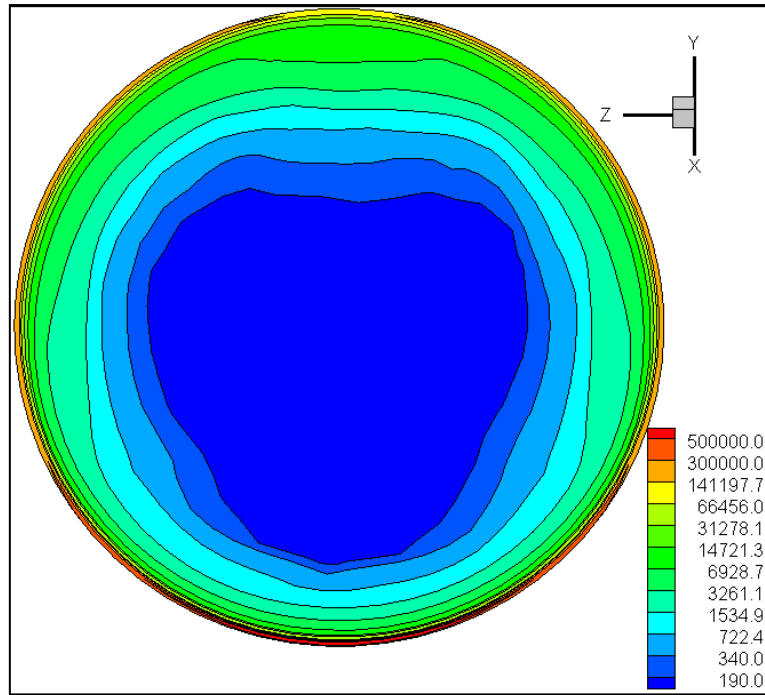
Εικόνα 6.2.1.8 Αδιαστατοποιημένη Ταχύτητα στην επιφάνεια O.2

Στην εικόνα 6.2.1.9 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες του Φ στο επίπεδο $z=0$. Παρατηρείται ότι στην είσοδο οι τιμές είναι πολύ κοντά στο 0 ενώ οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται κοντά στα τοιχώματα του αγωγού. Εξίσου υψηλές τιμές Φ παρουσιάζονται και στα σημεία όπου η ροή αποκολλάται, επιβεβαιώνοντας ότι σε εκείνες τις περιοχές οι απώλειες ενέργειας είναι σημαντικές.

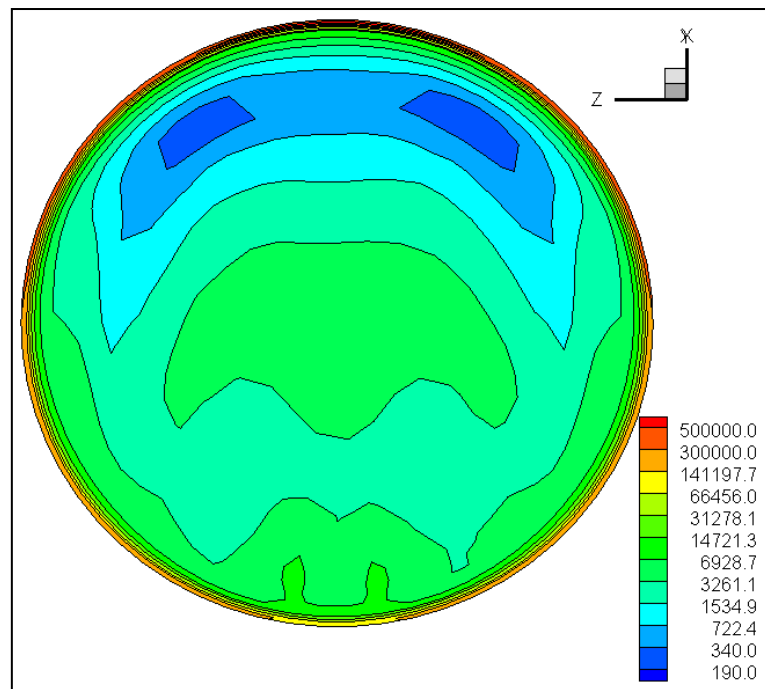


Εικόνα 6.2.1.9 Ισοϋψείς καμπύλες Φ στο επίπεδο $z=0$

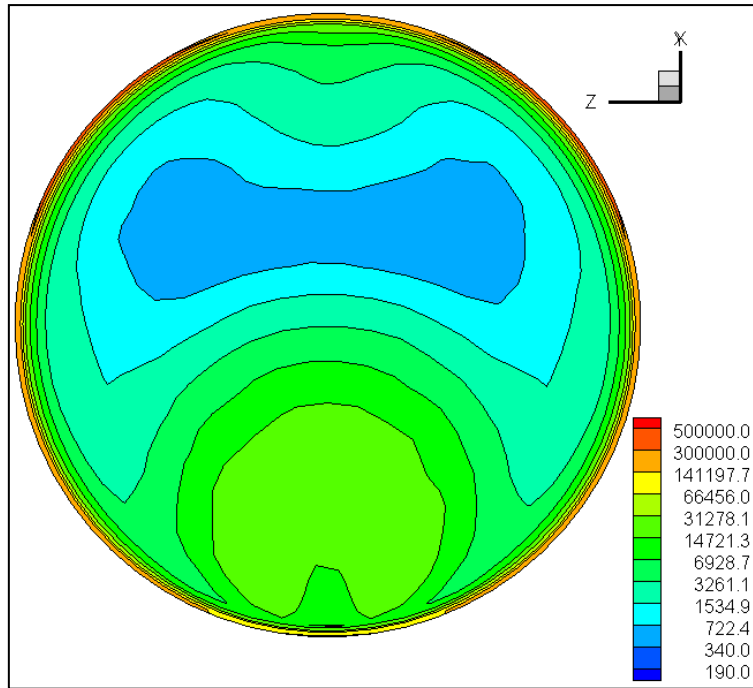
Η διατομή Y.1 όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.2.1.10 παρουσιάζει χαμηλές τιμές Φ στο μεγαλύτερο μέρος της. Σε αντίθεση, η επιφάνεια Y.2 (εικόνα 6.2.1.11) παρουσιάζει αρκετά υψηλότερες τιμές στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας της. Οι διατομές O.1 (εικόνα 6.2.1.12) και O.2 (εικόνα 6.2.1.13) παρουσιάζουν παρεμφερή προφίλ Φ με τη διαφορά ότι στην διατομή O.2 παρατηρούνται κάποιες υψηλότερες τιμές πάνω από το κέντρο (κίτρινη ζώνη) αλλά δεν εμφανίζονται πολύ υψηλές τιμές κοντά στα τοιχώματα (κόκκινη ζώνη) όπως συμβαίνει με την διατομή O.1.



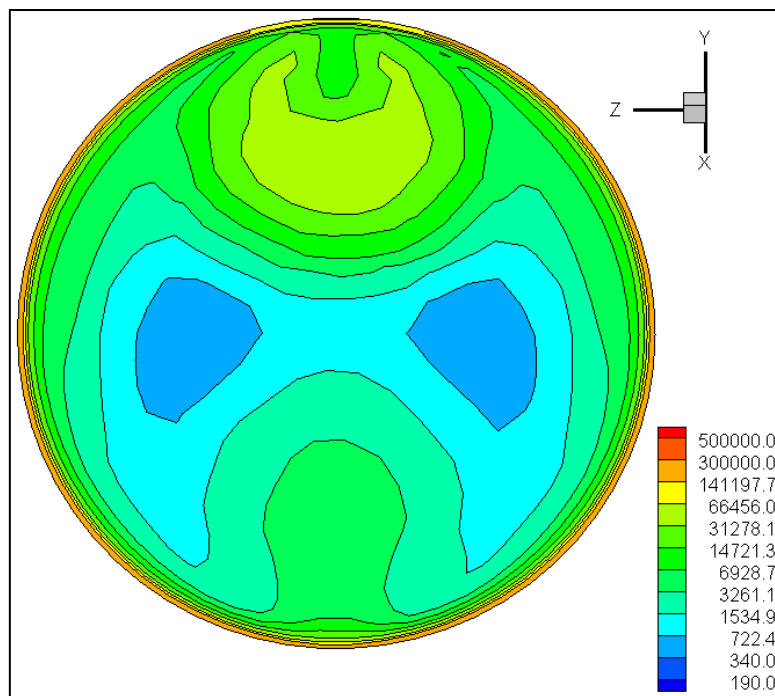
Εικόνα 6.2.1.10 Ισοϋψείς Καμπύλες Φ στην επιφάνεια $Y.1$



Εικόνα 6.2.1.11 Ισοϋψείς Καμπύλες Φ στην επιφάνεια $Y.2$

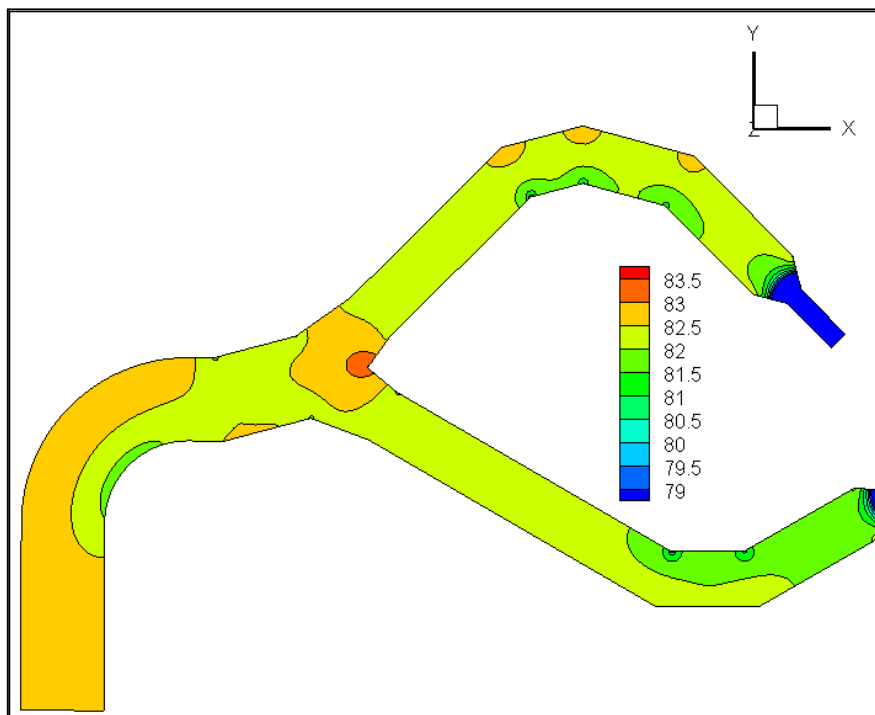


Εικόνα 6.2.1.12 Ισοϋψείς Καμπύλες Φ στην επιφάνεια Ο.1



Εικόνα 6.2.1.13 Ισοϋψείς Καμπύλες Φ στην επιφάνεια Ο.1

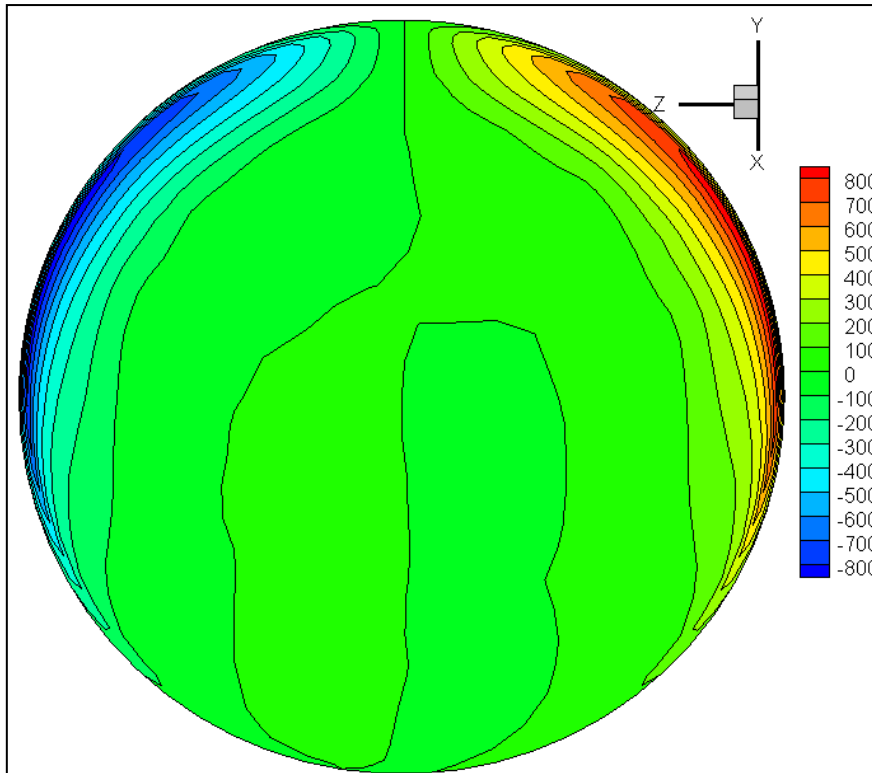
Στην εικόνα 6.2.1.14 παρουσιάζεται η κατανομή της αδιαστατοποιημένης στατικής πίεσης στο επίπεδο $z=0$. Η μεγαλύτερη στατική πίεση εμφανίζεται στο σημείο ανακοπής, στη διακλάδωση ενώ ακραίες τιμές εμφανίζονται στις απότομες γωνίες και στην απότομη αλλαγή καμπυλότητας μετά την είσοδο, η οποία για χάρη συντομίας θα αναφέρεται ως καμπυλότητα.



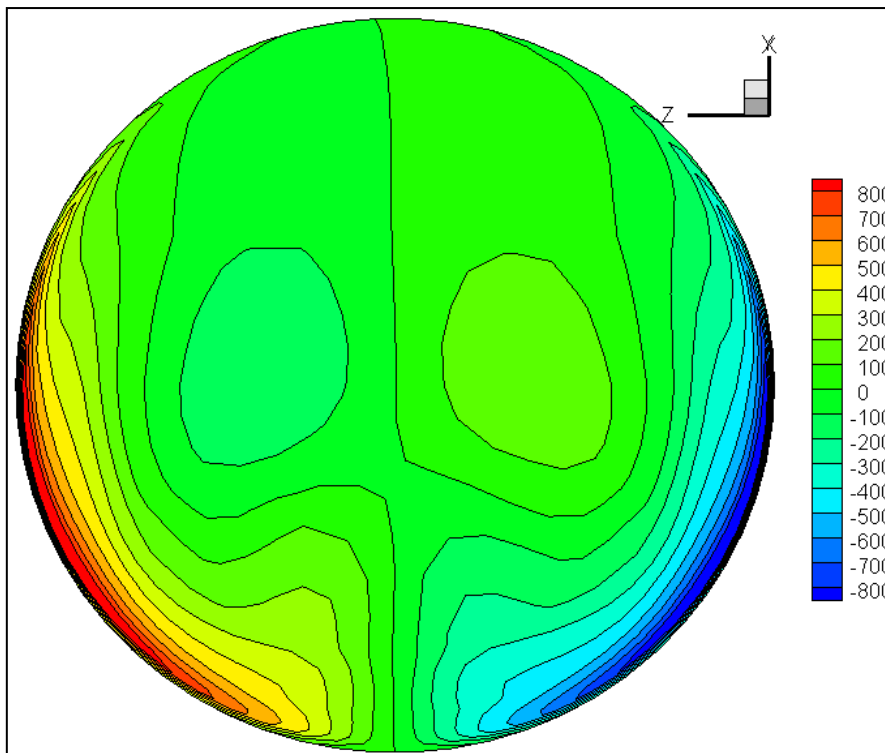
Εικόνα 6.2.1.14 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ολικής Πίεσης στο επίπεδο $z=0$

Η ελικότητα, δεν παρουσιάζεται στο επίπεδο $z=0$ καθώς εμφανίζει στο επίπεδο αυτό τιμές πολύ κοντινές στο 0 καθ' όλο το μήκος του συστήματος διανομής. Ωστόσο, αυτό δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα καθώς η ελικότητα αυξάνει σε μέτρο όσο πλησιάζει στα τοιχώματα του αγωγού.

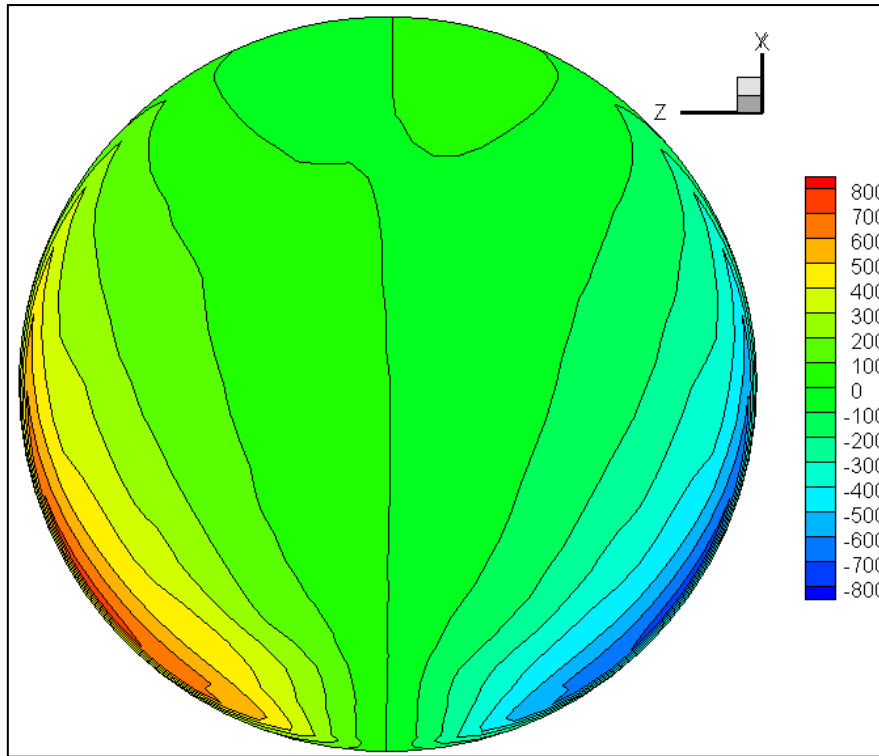
Στις εικόνες 6.2.1.15 έως 6.2.1.18 είναι εμφανές ότι η ελικότητα της ροής στις επιφάνειες Y αλλάζει εντελώς φορά και αποκτά ελαφρώς μεγαλύτερη ομοιομορφία καθώς αυτή διέρχεται από τις επιφάνειες O . Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικότερα παρακάτω όπου παρουσιάζονται οι δευτερεύουσες ροές. Γενικότερα οι ακραίες τιμές της ελικότητας παρατηρούνται κοντά στα τοιχώματα του αγωγού και η επιφάνεια $O.1$ παρουσιάζει ελαφρώς μικρότερες τιμές ελικότητας από τις υπόλοιπες επιφάνειες.



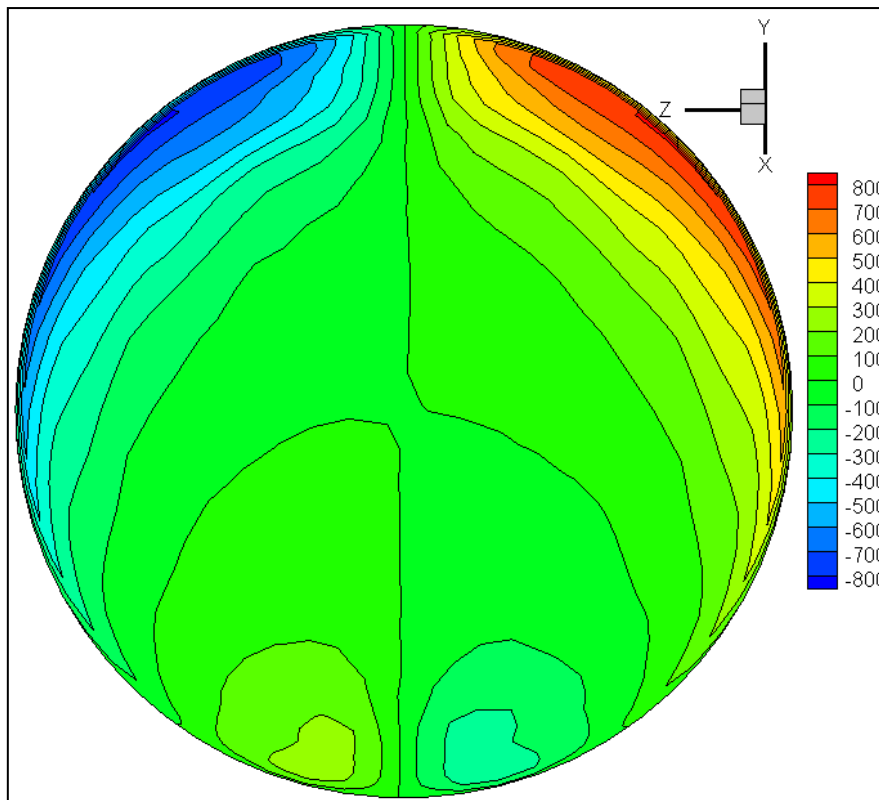
Εικόνα 6.2.1.15 Ισοϋψείς Καμπύλες Ελικότητας στην επιφάνεια Y.1



Εικόνα 6.2.1.16 Ισοϋψείς Καμπύλες Ελικότητας στην επιφάνεια Y.2

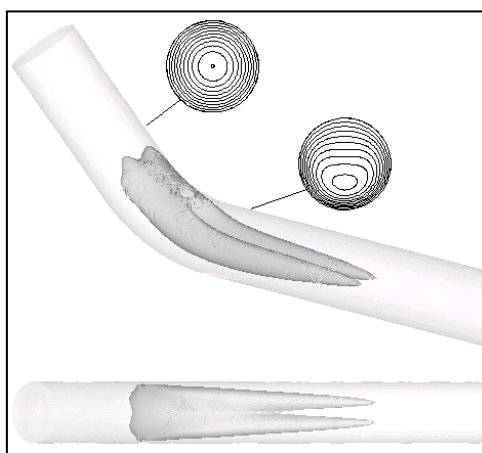


Εικόνα 6.2.1.17 Ισοϋνείς Καμπύλες Ελικότητας στην επιφάνεια O.1



Εικόνα 6.2.1.18 Ισοϋνείς Καμπύλες Ελικότητας στην επιφάνεια O.2

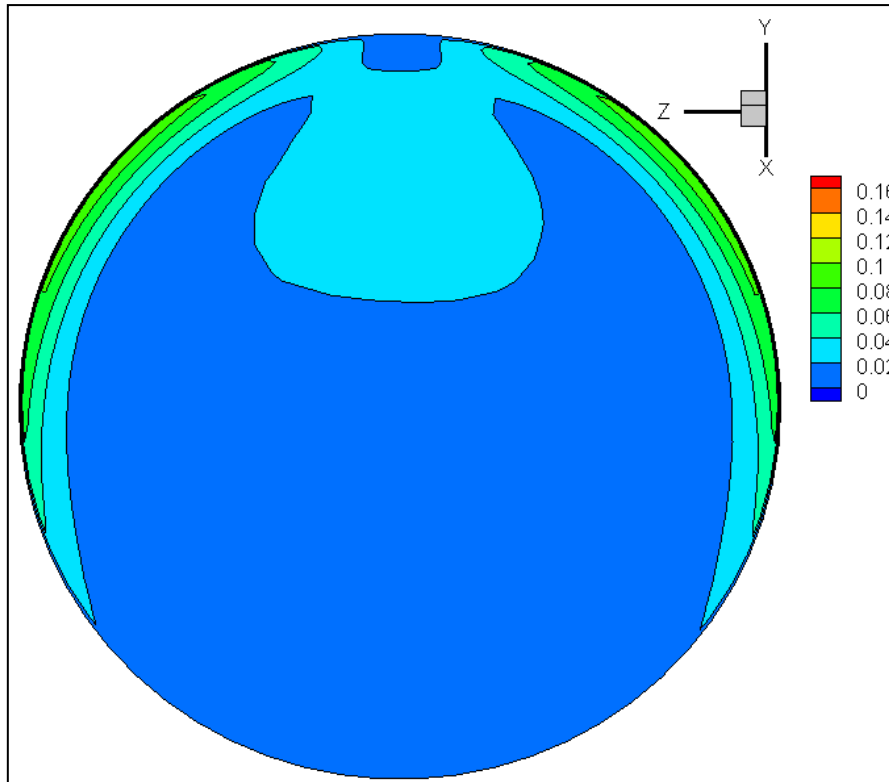
Η εμφάνιση των δευτερευουσών ροών εξηγείται με τη θεωρία των δινών Dean. Για υψηλούς αριθμούς Reynolds δηλαδή για τυρβώδεις ροές – όπως συμβαίνει στην εξεταζόμενη περίπτωση – η ροή εμφανίζει αστάθεια σε μεταβολές της φυγοκέντρου δύναμης. Η φυγόκεντρος μεταβάλλεται στις αλλαγές της κατεύθυνσης του αγωγού – άρα και της ροής – και έχει ως αποτέλεσμα στις περιοχές αυτές να εμφανίζονται δευτερεύουσες ροές. Αυτό συμβαίνει διότι το τμήμα του ρευστού κοντά στο τοίχωμα έχει σαφώς μικρότερη ταχύτητα από αυτό στο κέντρο του αγωγού. Το ταχύτερο τμήμα του ρευστού δέχεται και μεγαλύτερες φυγοκεντρικές δυνάμεις - στις αλλαγές διεύθυνσης όπου εμφανίζονται – από το ρευστό κοντά στο τοίχωμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ταχύτερο τμήμα σε εκείνο το σημείο να κινείται προς το κοίλο – όταν πρόκειται για καμπύλη αλλαγή διεύθυνσης – τοίχωμα εκτοπίζοντας το πιο αργό ρευστό. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται οι δευτερεύουσες ροές πάντα σε ζεύγη αντίθετα στρεφόμενων δινών. Όσο εντονότερη είναι η αλλαγή της διεύθυνσης τόσο εντονότερες είναι και οι δευτερεύουσες ροές που εμφανίζονται. [9]



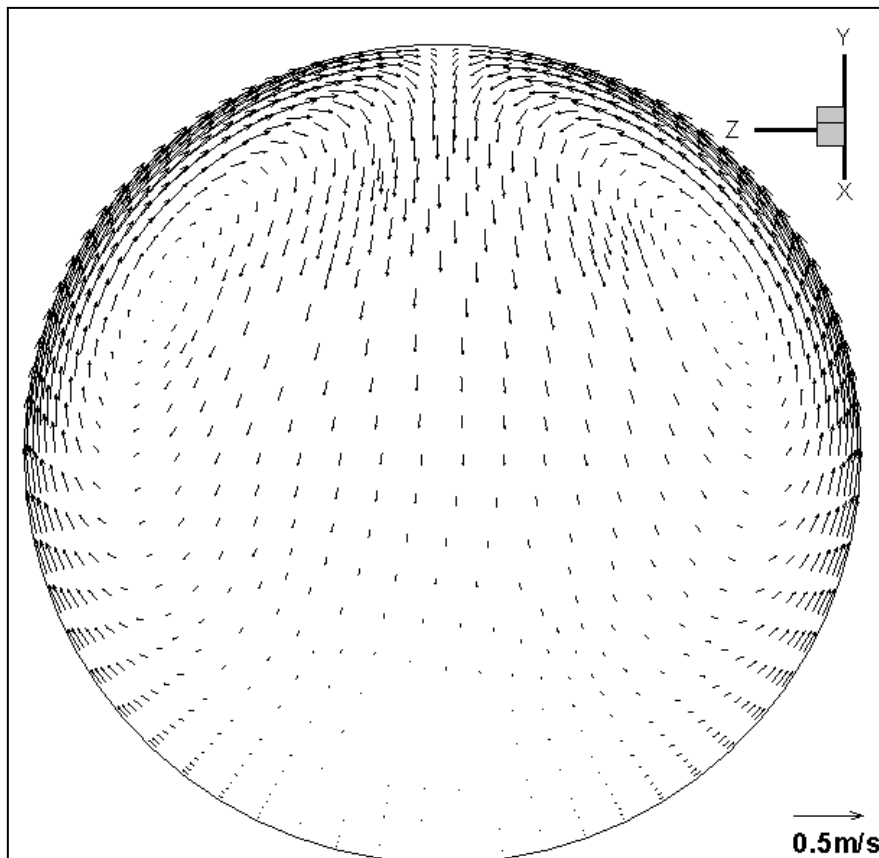
Εικόνα 6.2.1 Α Παράδειγμα Εμφάνισης δινών Dean κατά την αλλαγή διεύθυνσης της ροής

Στην εικόνα 6.2.1.20 παρουσιάζονται τα διανύσματα της εφαιπτόμενης ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1. Όπως είναι εμφανές και από την εικόνα 6.2.1.19 οι δευτερεύουσες ροές στην Y.1 είναι πολύ μικρής τάξης. Το προφίλ των δευτερευουσών ροών στο άνω τμήμα αλλάζει δραστικά στην επιφάνεια O.1 καθώς το μέγεθος των δευτερευουσών ροών αυξάνει σημαντικά ιδιαίτερα κοντά στα τοιχώματα του αγωγού. Στην διατομή Y.2 (εικόνες 6.2.1.21 και 6.2.1.22) οι δευτερεύουσες ροές είναι σαφώς εντονότερες από την Y.1 ενώ παρατηρείται ότι δημιουργούνται όχι δύο – όπως στην Y.1 και την O.1 – αλλά τέσσερις περιοχές δευτερευουσών ροών. Αυτό συμβαίνει διότι η αλλαγή κατεύθυνσης στη διακλάδωση είναι πολύ εντονότερη για το κάτω τμήμα απ’ ό,τι για το άνω τμήμα του συστήματος διανομής. Το προφίλ των δευτερευουσών ροών της Y.2 εξομαλύνεται καθώς η ροή διέρχεται από την επιφάνεια O.2 (εικόνες 6.2.1.25 και 6.2.1.26) και το μέγεθος των δευτερευουσών ροών στο κέντρο της επιφάνειας μειώνεται και εντείνεται προς τα τοιχώματα. Αν και είναι προφανές, σημειώνεται ότι υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση ανάμεσα στις δευτερεύουσες ροές που εμφανίζονται λίγο πριν το κάθε ακροφύσιο.

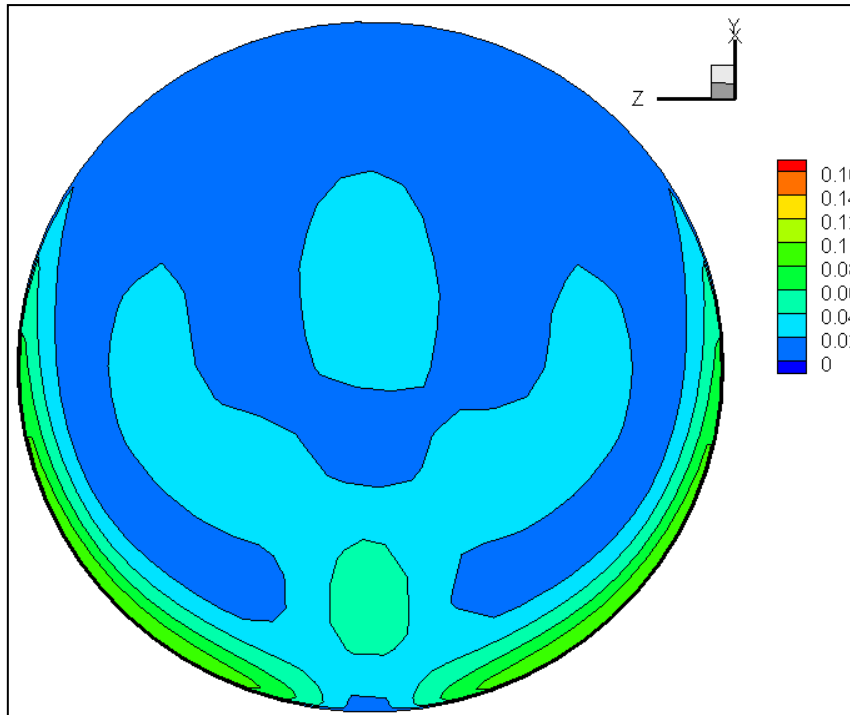
Το γεγονός ότι τόσο στα άνω όσο και στο κάτω τμήμα οι δίνες που δημιουργούνται έχουν αντίθετες περιοχές από τις επιφάνειες Y στις επιφάνειες O είναι απολύτως φυσιολογικό. Το σύστημα διανομής προκαλεί μια μεταβολή στην διεύθυνση της ροής στη διακλάδωση και έπειτα προκαλεί την αντίθετη μεταβολή πριν τις επιφάνειες O . Κατ' αυτόν τον τρόπο επιβάλλονται στη ροή φυγόκεντρες δυνάμεις με αντίθετες φορές και συνεπώς δημιουργούνται για τα ζεύγη επιφανειών $Y-O$ δίνες περίπου αντιδιαμετρικά.



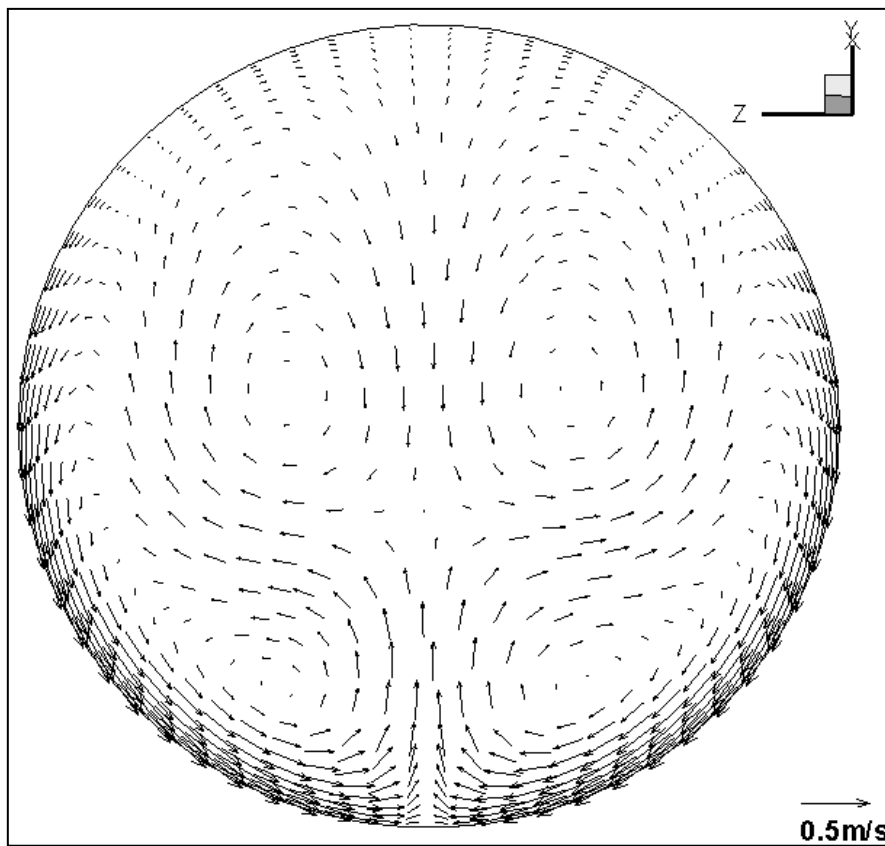
Εικόνα 6.2.1.19 Ισοϋψείς Καμπύλες της Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1



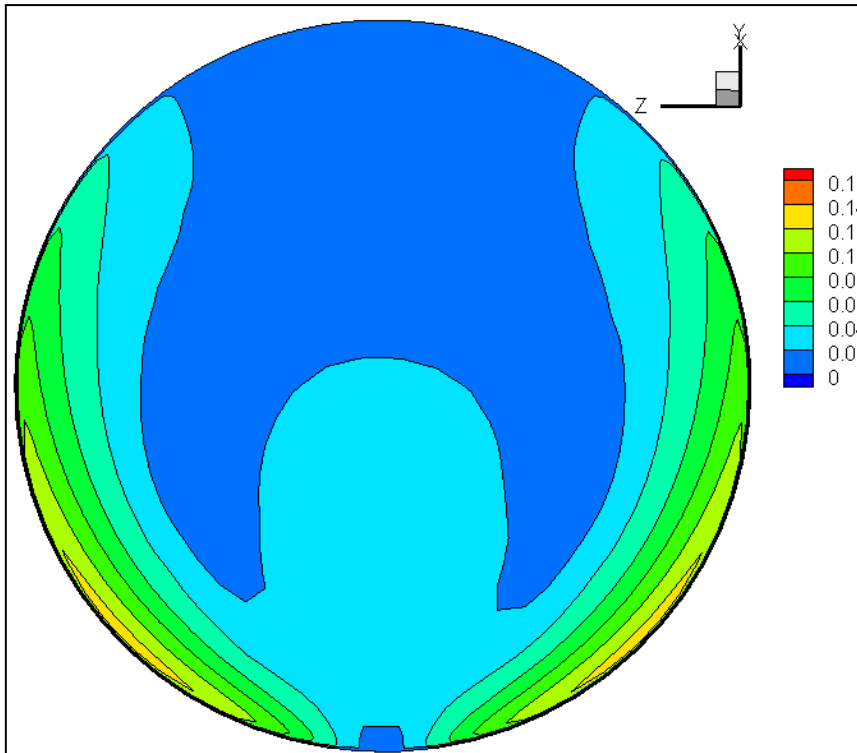
Εικόνα 6.2.1.20 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1



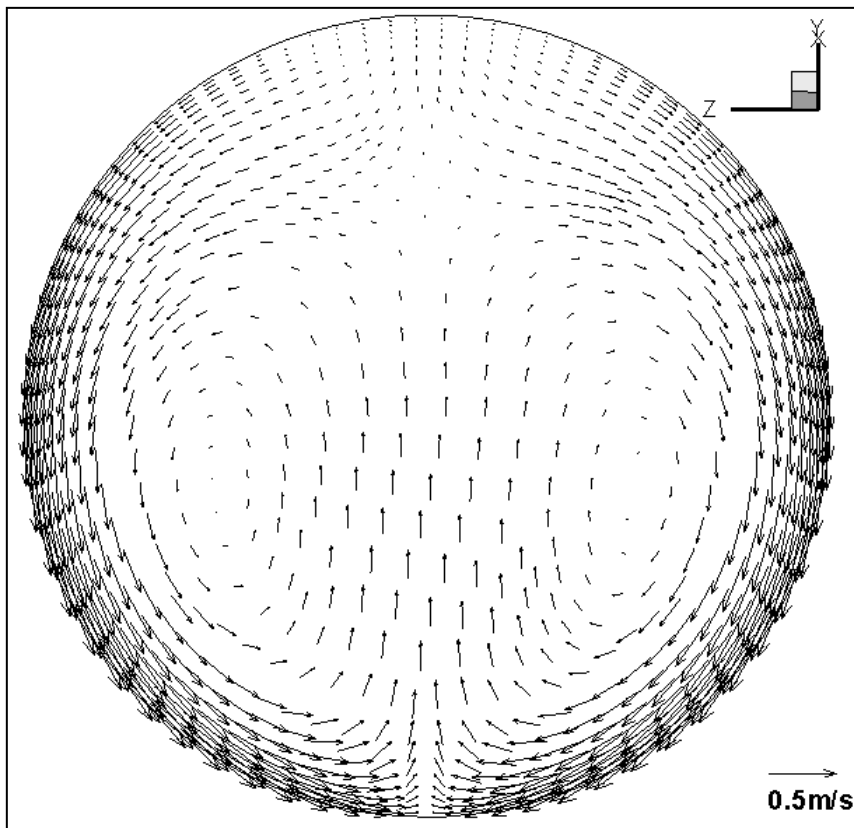
Εικόνα 6.2.1.21 Ισοϋψείς Καμπύλες της Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.Z



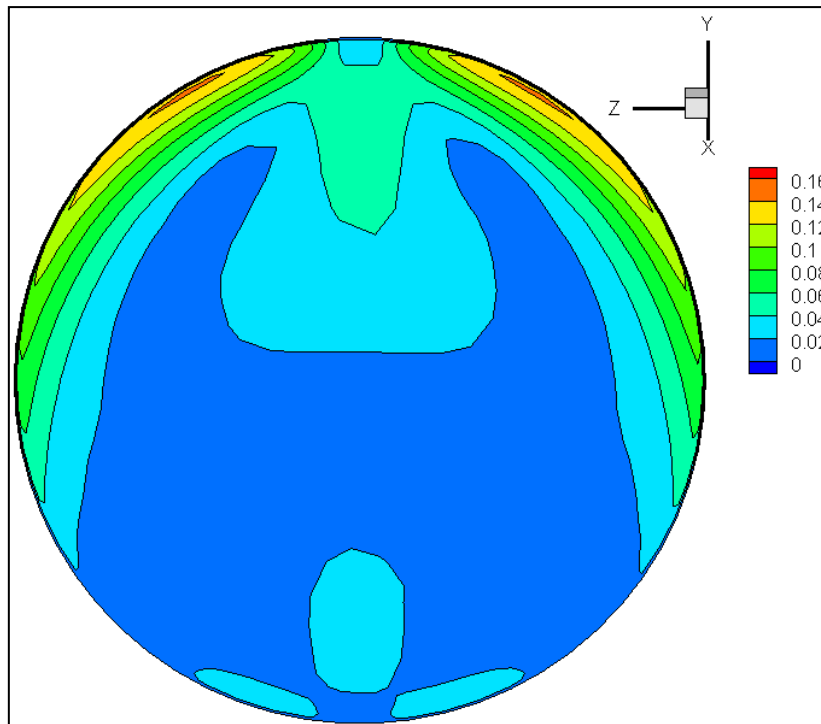
Εικόνα 6.2.1.22 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.Z



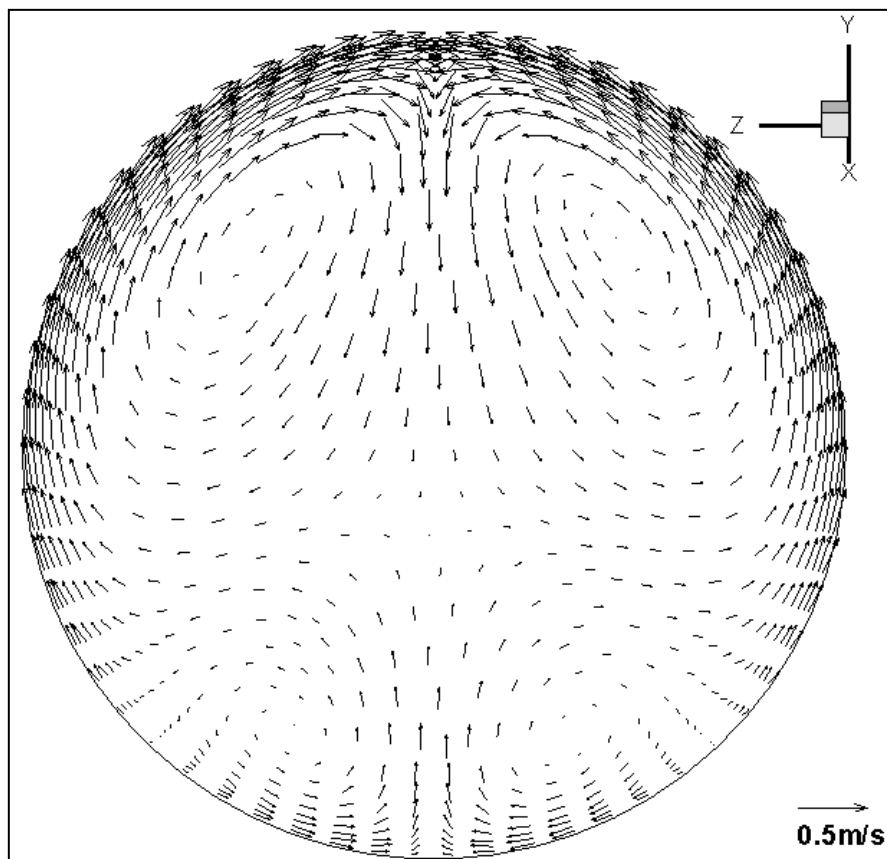
Εικόνα 6.2.1.23 Ισοϋψείς Καμπύλες της Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια 0.1



Εικόνα 6.2.1.24 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια 0.1



Εικόνα 6.2.1.25 Ισοϋψείς Καμπύλες της Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.2



Εικόνα 6.2.1.26 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.2

Οι ΑΣΔΡ των επιφανειών είναι οι ακόλουθοι:

- $Y.1 = 1.6139 \cdot 10^{-2}$
- $O.1 = 3.0345 \cdot 10^{-2}$
- $Y.2 = 2.2353 \cdot 10^{-2}$
- $O.2 = 2.8576 \cdot 10^{-2}$

Από τους ΑΣΔΡ γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι παρόλο που η $Y.1$ είναι σαφώς καλύτερη (ως προς το ποσοστό επίδρασης των δευτερευουσών ροών) από την $Y.2$ τελικά η $O.1$ είναι χειρότερη από την $O.2$. Αυτό συμβαίνει διότι η αλλαγή της διεύθυνσης της ροής πριν την $O.1$ είναι εντονότερη (συγκεκριμένα ο άνω κλάδος αλλάζει διεύθυνση κατά 90° ενώ ο κάτω 60°) από αυτήν πριν την $O.2$ με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ισχυρότερες δίνες στην $O.1$.

Η ολική πίεση στην είσοδο είναι 1524977.3 Pa στην έξοδο 1 είναι 1519648.3 Pa και στην έξοδο 2 είναι 1516444 Pa. Η παροχή όγκου είναι 0.07514 m³/s στην είσοδο και 0.03757 m³/s στην έξοδο 1 και στην έξοδο 2 . Συνεπώς οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με:

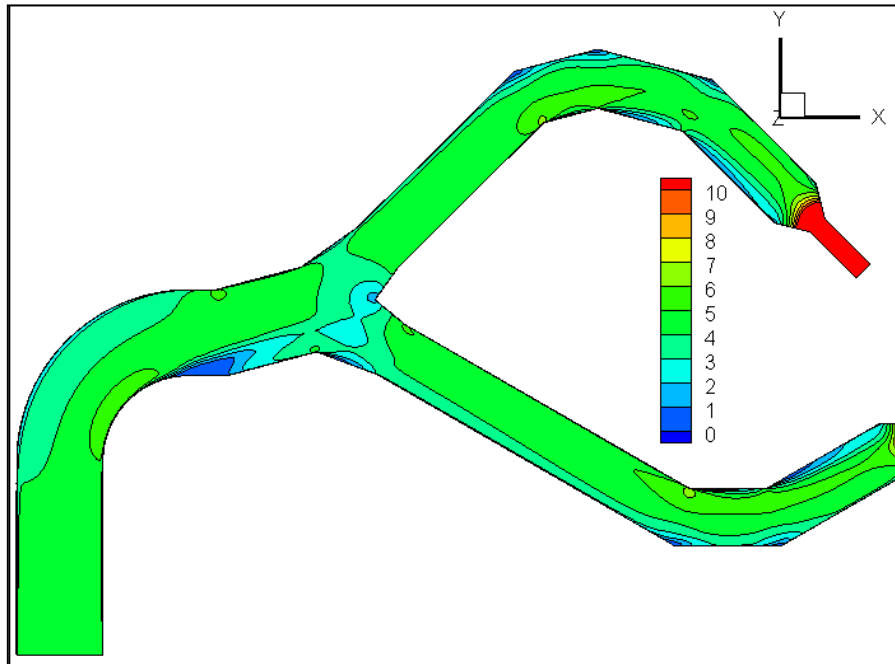
$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2} = 520,784 \text{ J/s}$$

Ενώ σε mΣΥ είναι: $E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}} = 0,7078 \text{ mΣΥ}$

6.2.2 Παροχή 75%

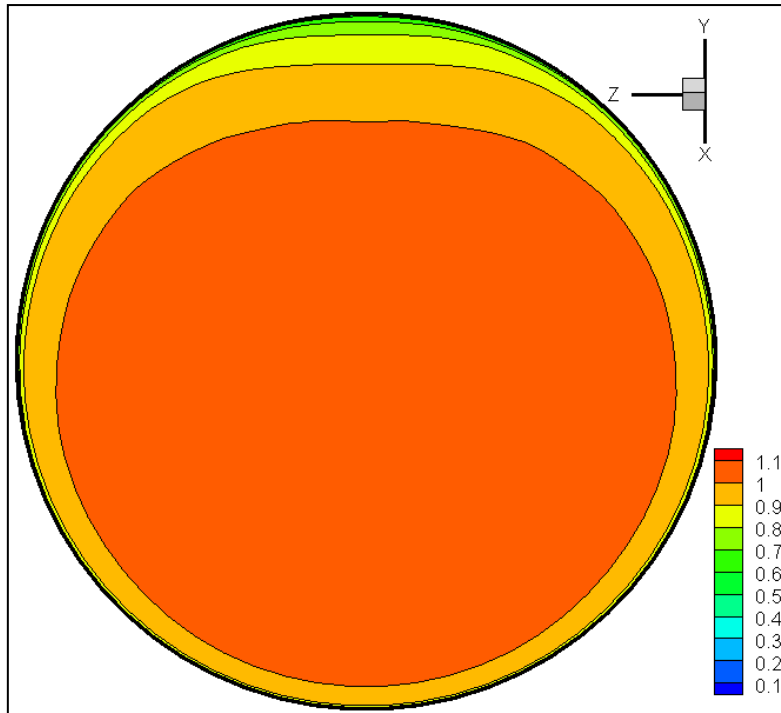
Το 75% της διερχόμενης παροχής είναι τα 56.25 kg/s. Ο αριθμός Reynolds λαμβάνει την τιμή 534856 στην είσοδο και την τιμή 2302694.7 στην έξοδο.

Στην εικόνα 6.2.2.1 παρουσιάζονται οι ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$. Η ταχύτητα όπως είναι φυσιολογικό λαμβάνει μικρότερες υψηλές τιμές ωστόσο τα σημεία ανακοπής είναι τα ίδια με αυτά της μέγιστης παροχής. Συνεπώς, όπως είναι φυσικό, εμφανίζονται οι δίνες που παρατηρήθηκαν για την μέγιστη παροχή μετά την καμπυλότητα, αλλά με μικρότερη ένταση.

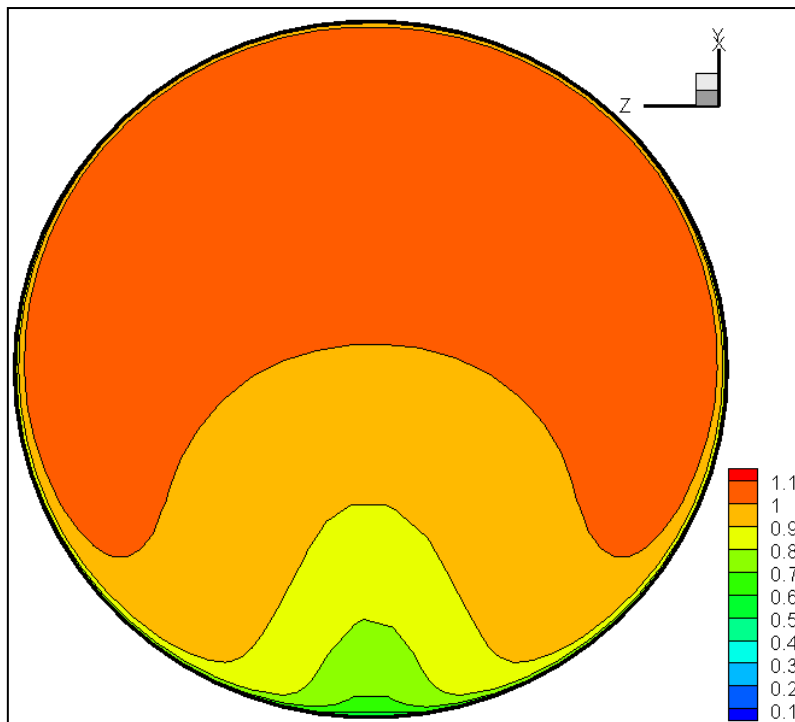


Εικόνα 6.2.2.1 Ισοταχείς Καμπύλες στο επίπεδο $z=0$

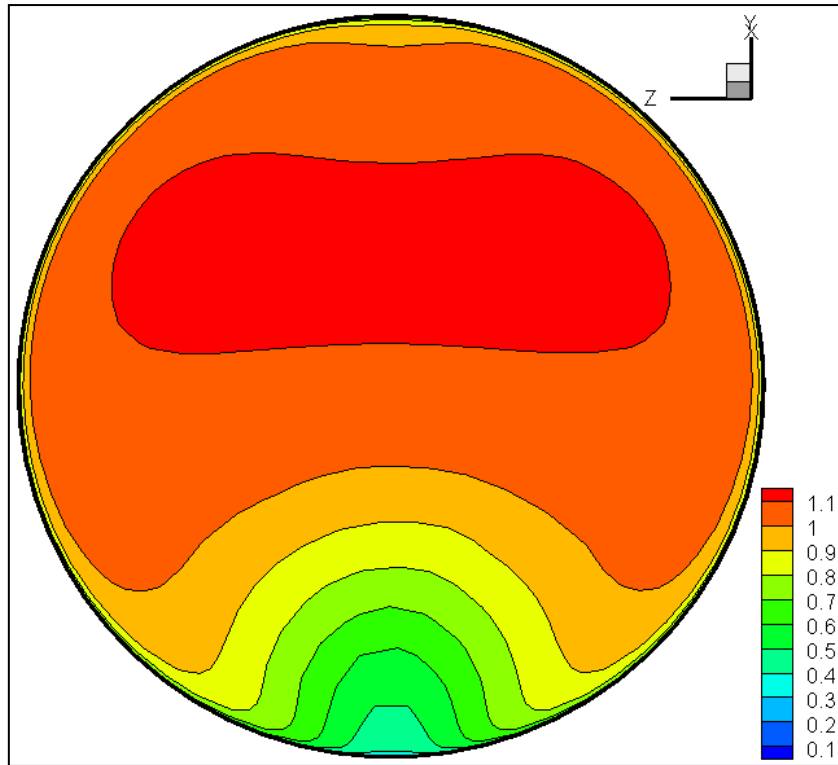
Από τις εικόνες 6.2.2.2 έως 6.2.2.5 είναι εμφανές ότι το προφίλ της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας είναι σχεδόν πανομοιότυπο με αυτό της μέγιστης παροχής. Συνεπώς οι παρατηρήσεις που έγιναν στο κεφάλαιο 6.2.1 για την αδιαστατοποιημένη ταχύτητα ισχύουν και για την παροχή των 56.25 kg/s.



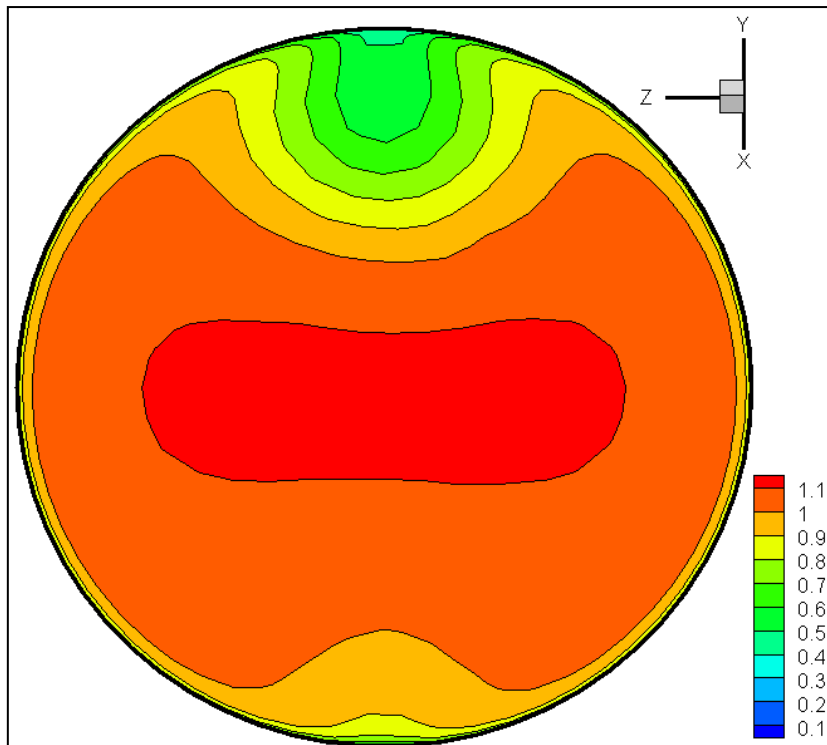
Εικόνα 6.2.2.2 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητα στην επιφάνεια Y.1



Εικόνα 6.2.2.3 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητα στην επιφάνεια Y.2

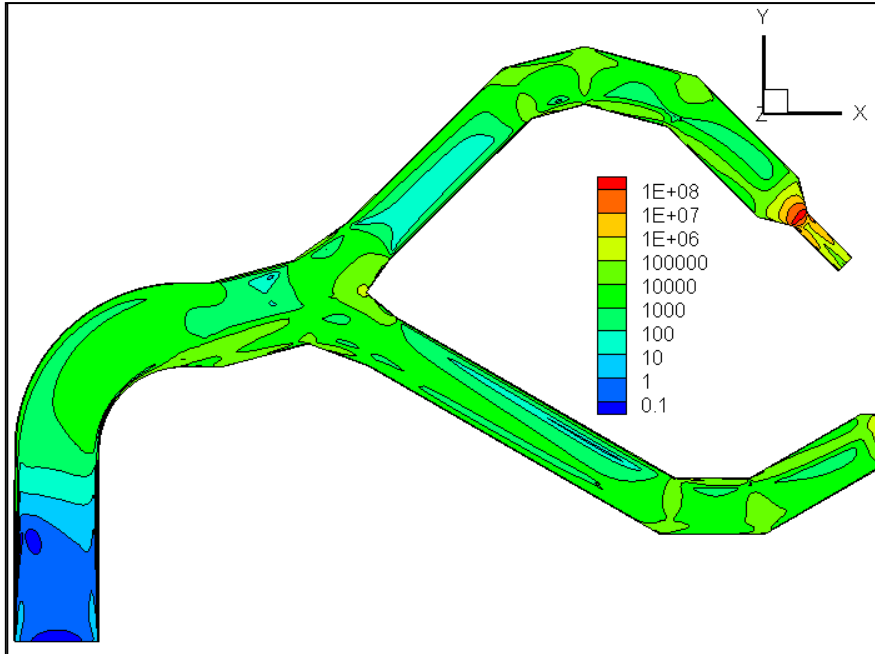


Εικόνα 6.2.2.4 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητα στην επιφάνεια O.1



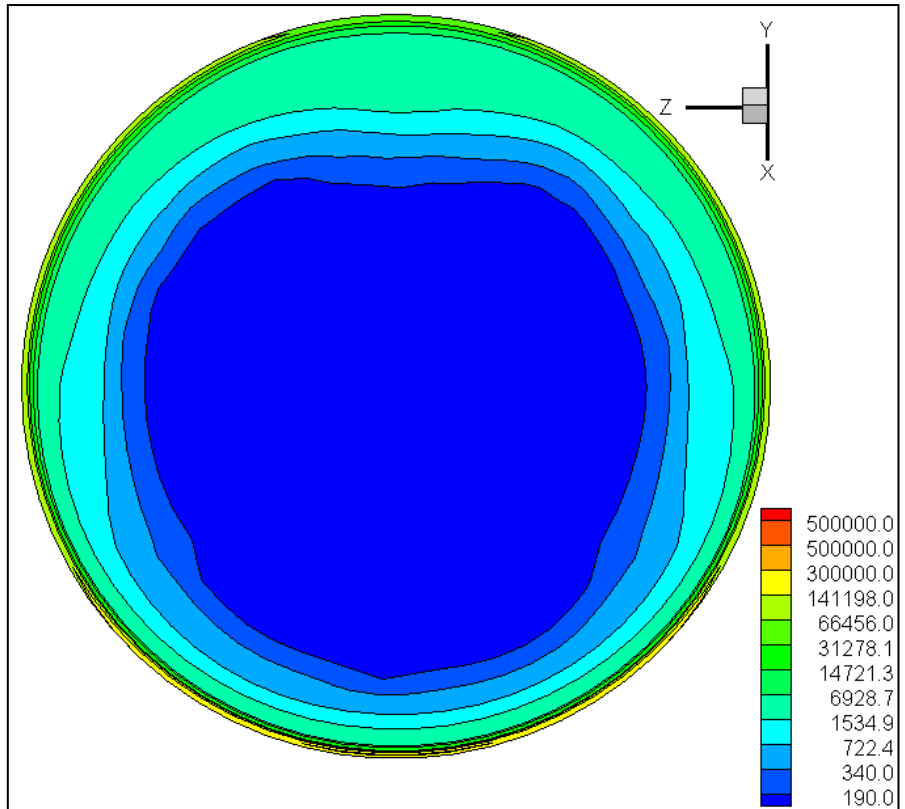
Εικόνα 6.2.2.5 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητα στην επιφάνεια O.2

Οι ισοϋψείς καμπύλες του Φ στο επίπεδο $z=0$ (εικόνα 6.2.2.6) δείχνουν ότι εμφανίζονται χαμηλότερες τιμές Φ κατά μήκος του αγωγού από αυτές της μέγιστης παροχής καθώς είναι μεγαλύτερες οι περιοχές των χαμηλών τιμών. Αυτό συμβαίνει γιατί η παροχή έχει μειωθεί και η διάχυση της ενέργειας δεν είναι αδιάστατο μέγεθος.

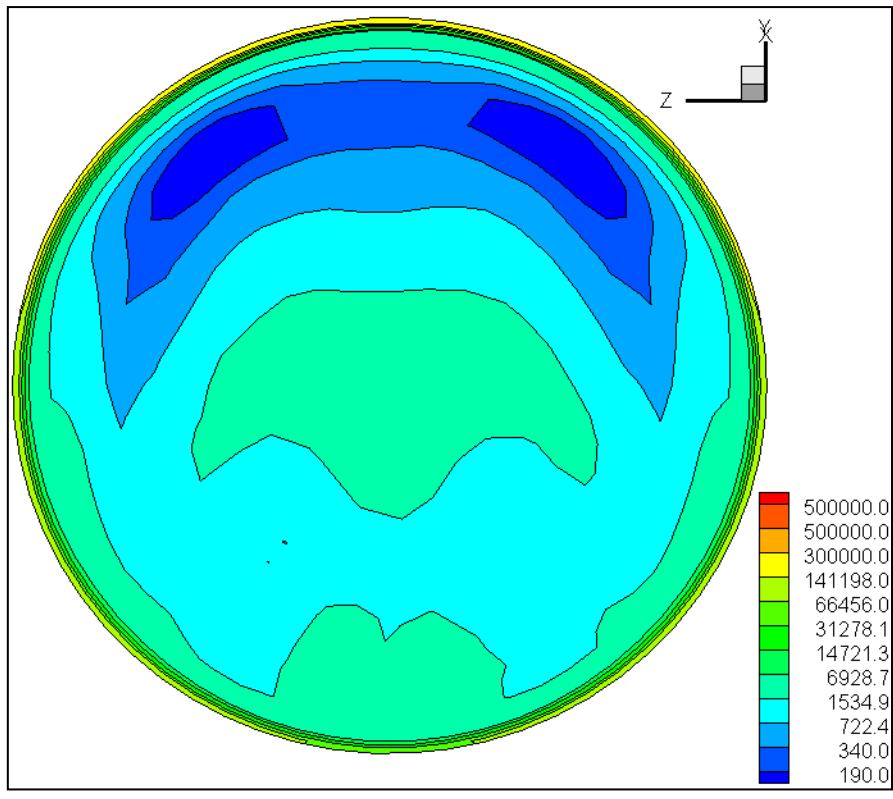


Εικόνα 6.2.2.6 Ισοϋψείς καμπύλες Φ στο επίπεδο $z=0$

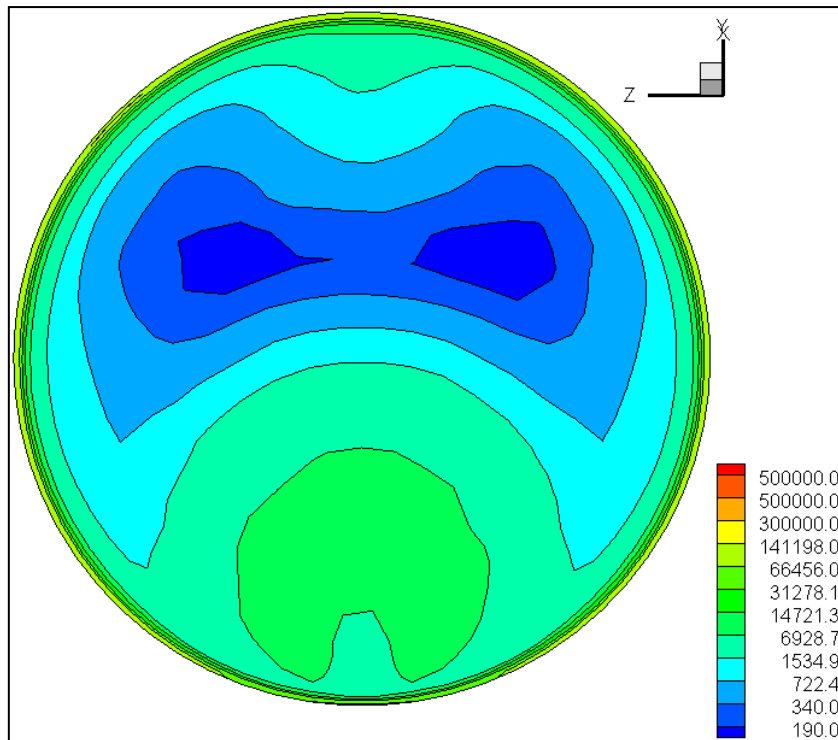
Στις εικόνες 6.2.2.7 έως 6.2.2.10 παρουσιάζονται τα προφίλ του Φ για τις διάφορες διατομές. Με εξαίρεση το γεγονός ότι παρουσιάζονται χαμηλότερες τιμές Φ απ' ό,τι στην μέγιστη παροχή κατά τα άλλα οι διακυμάνσεις του Φ είναι παρόμοιες κατ' αντιστοιχία με τις διατομές της μέγιστης παροχής.



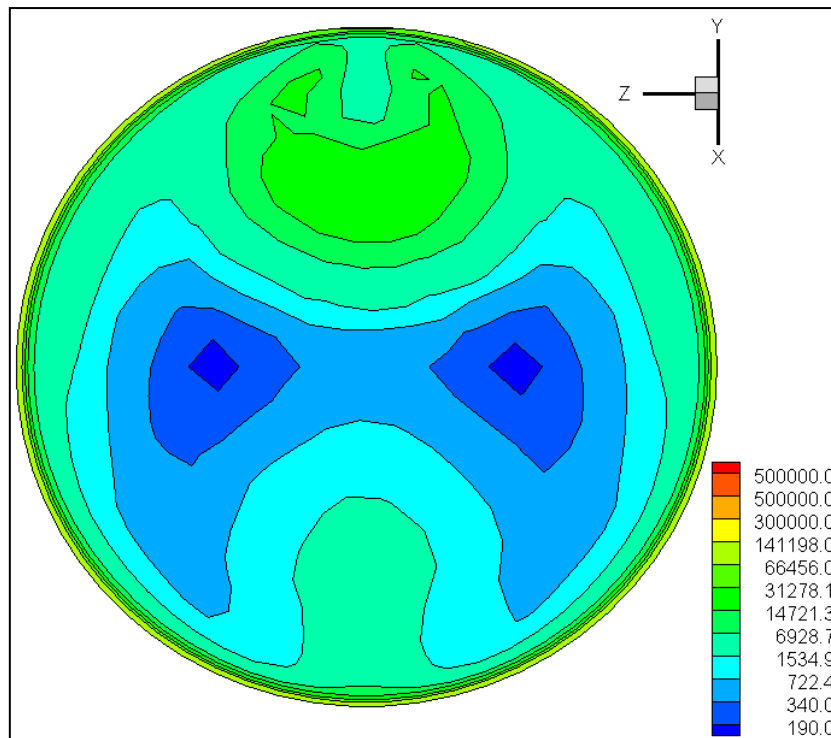
Εικόνα 6.2.2.7 Ισοϋψείς Καμπύλες Φ στην επιφάνεια Y.1



Εικόνα 6.2.2.8 Ισοϋψείς Καμπύλες Φ στην επιφάνεια Y.2

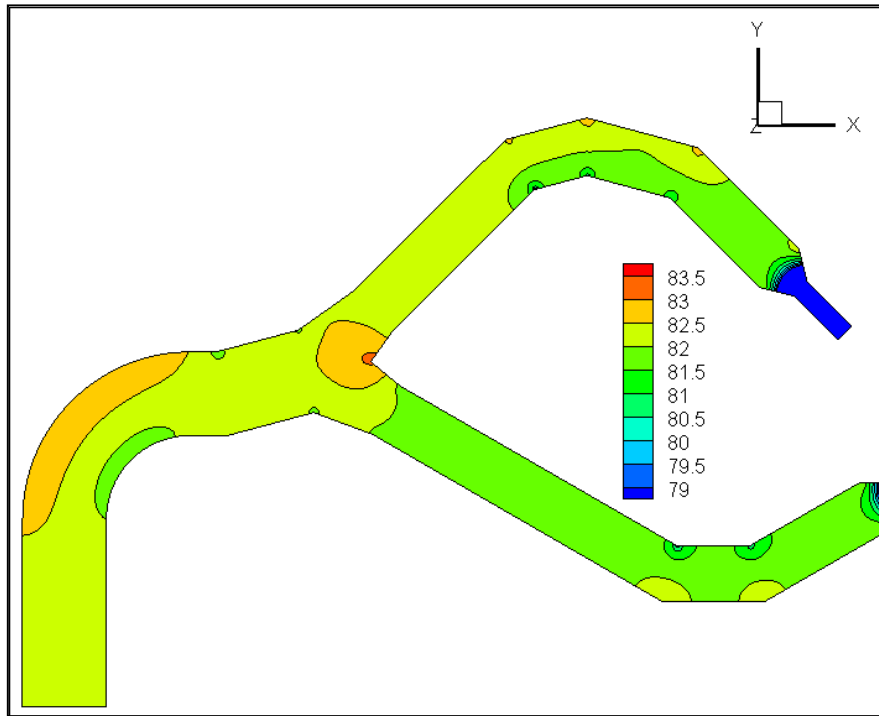


Εικόνα 6.2.2.9 Ισοϕείς Καμπύλες Φ στην επιφάνεια O.1



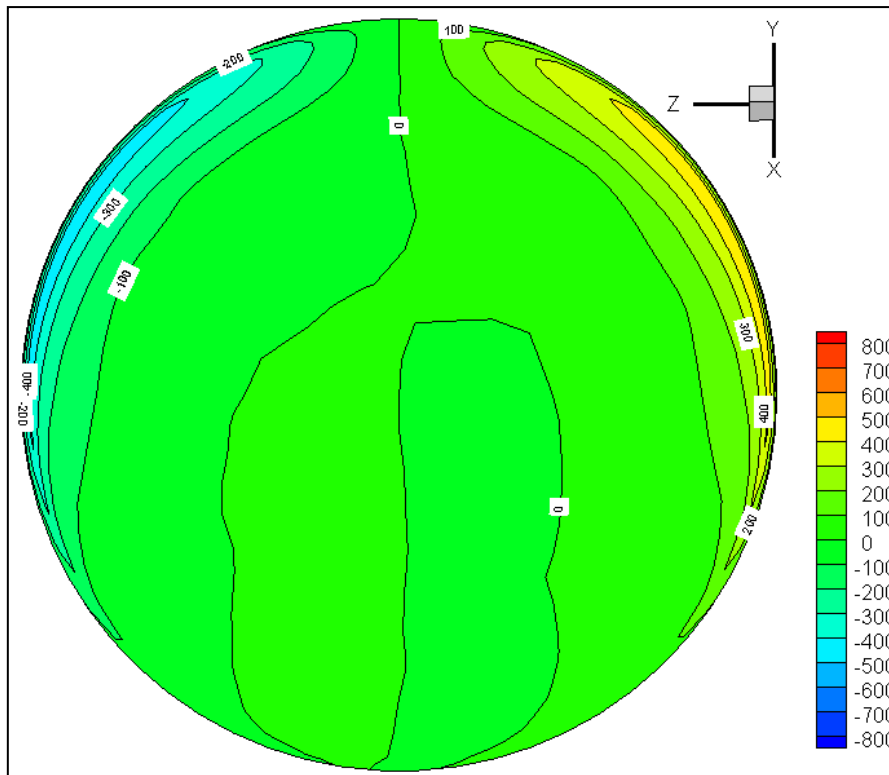
Εικόνα 6.2.2.10 Ισοϕείς Καμπύλες Φ στην επιφάνεια O.2

Στην εικόνα 6.2.2.11 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες της αδιαστατοποιημένης στατικής πίεσης. Παρατηρείται ότι οι τιμές που εμφανίζονται ιδίως μετά την διακλάδωση είναι μικρότερες από αυτές της μέγιστης παροχής. Κατά τα άλλα οι διακυμάνσεις είναι παρόμοιες με αυτές που εμφανίζονταν στη μέγιστη παροχή.

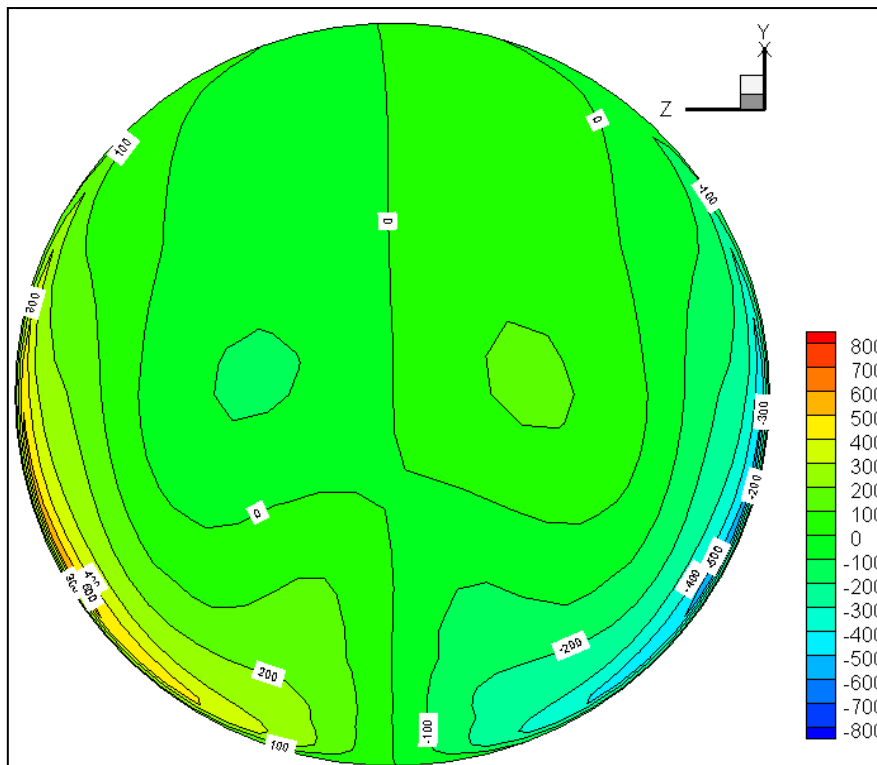


Εικόνα 6.2.2.11 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ολικής Πίεσης στο επίπεδο $z=0$

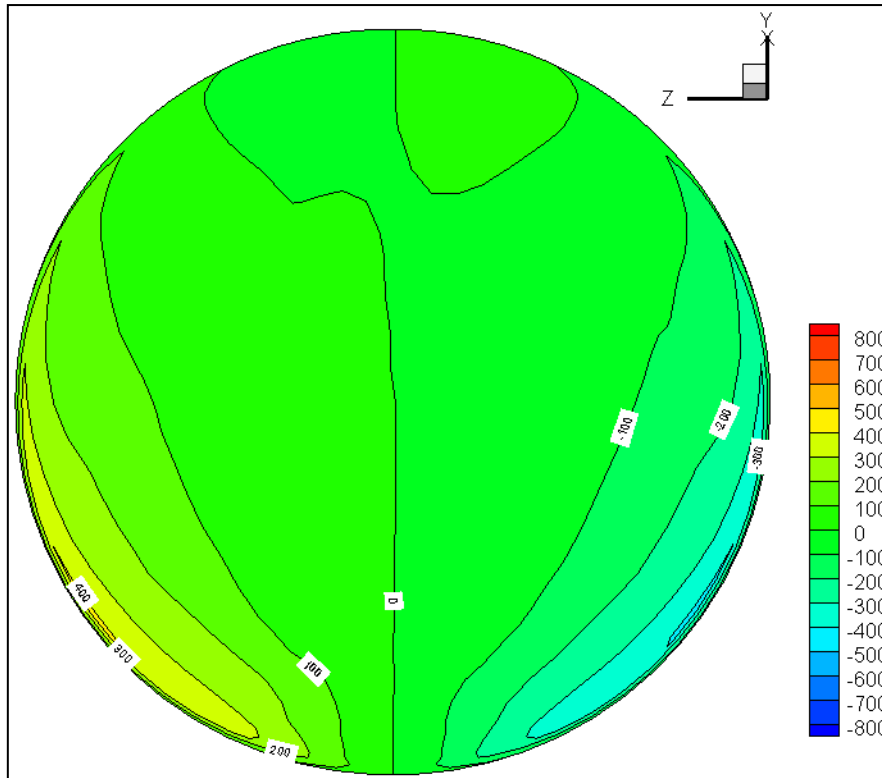
Τα προφίλ της ελικότητας για τις διάφορες επιφάνειες παρουσιάζονται στις εικόνες 6.2.2.13 έως 6.2.2.16. Οι διακυμάνσεις είναι παρεμφερείς με αυτές της μέγιστης παροχής με μηδενικές τιμές κοντά στο κέντρο του αγωγού και σταδιακή αύξηση προς τα τοιχώματα. Βέβαια, στην προκειμένη περίπτωση, οι ακραίες τιμές έχουν περίπου το μισό μέτρο από τις ακραίες τιμές ελικότητας που εμφανίζονται για την μέγιστη παροχή, εκτός από την Υ.2 που εμφανίζει λίγο μεγαλύτερες τιμές από τις άλλες επιφάνειες.



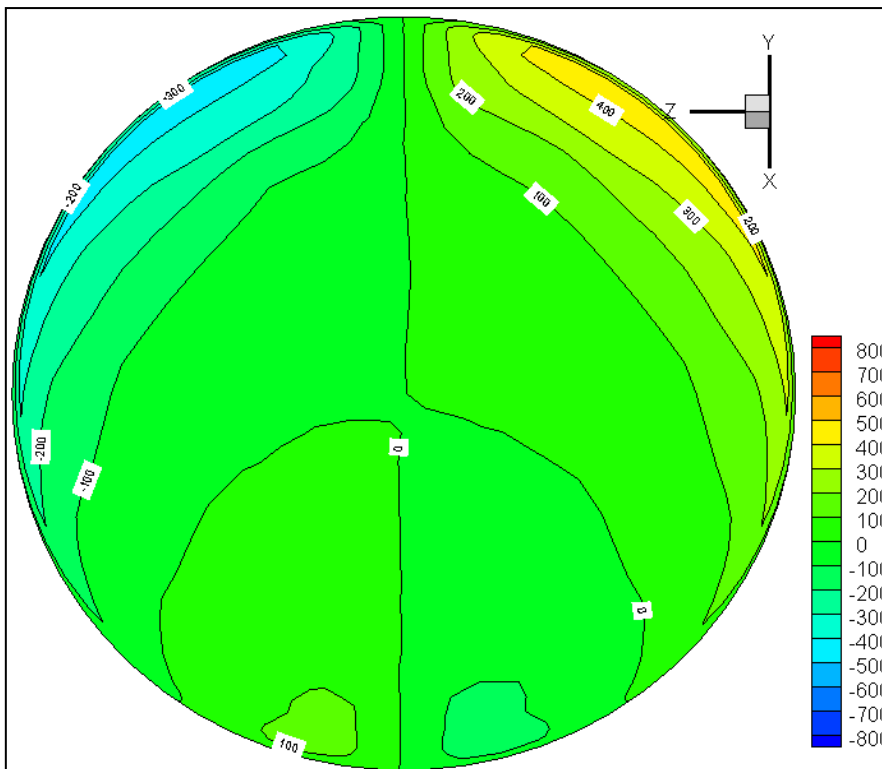
Εικόνα 6.2.2.13 Ισοϋψείς Καμπύλες Ελικότητας στην επιφάνεια Y.1



Εικόνα 6.2.2.14 Ισοϋψείς Καμπύλες Ελικότητας στην επιφάνεια Y.2

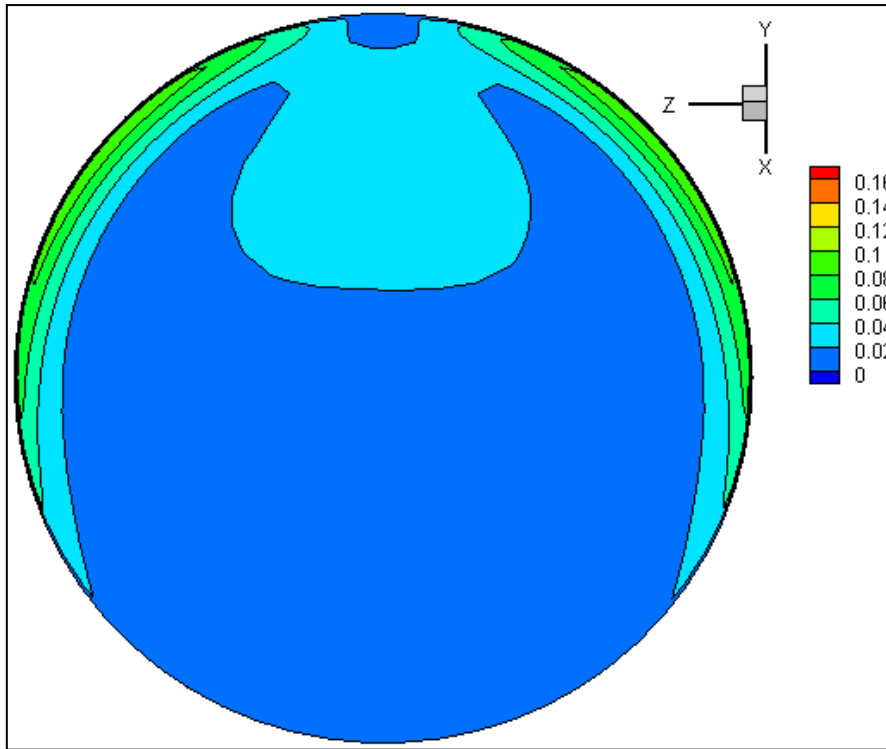


Εικόνα 6.2.2.15 Ισοϋψείς Καμπύλες Ελικότητας στην επιφάνεια O.1

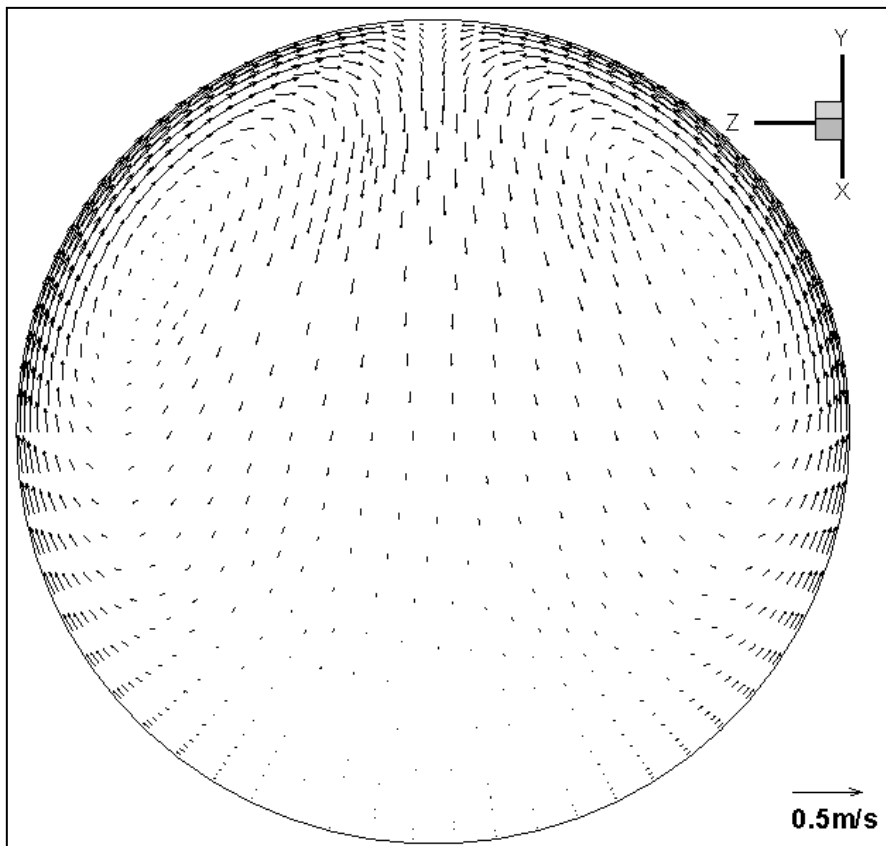


Εικόνα 6.2.2.16 Ισοϋψείς Καμπύλες Ελικότητας στην επιφάνεια O.2

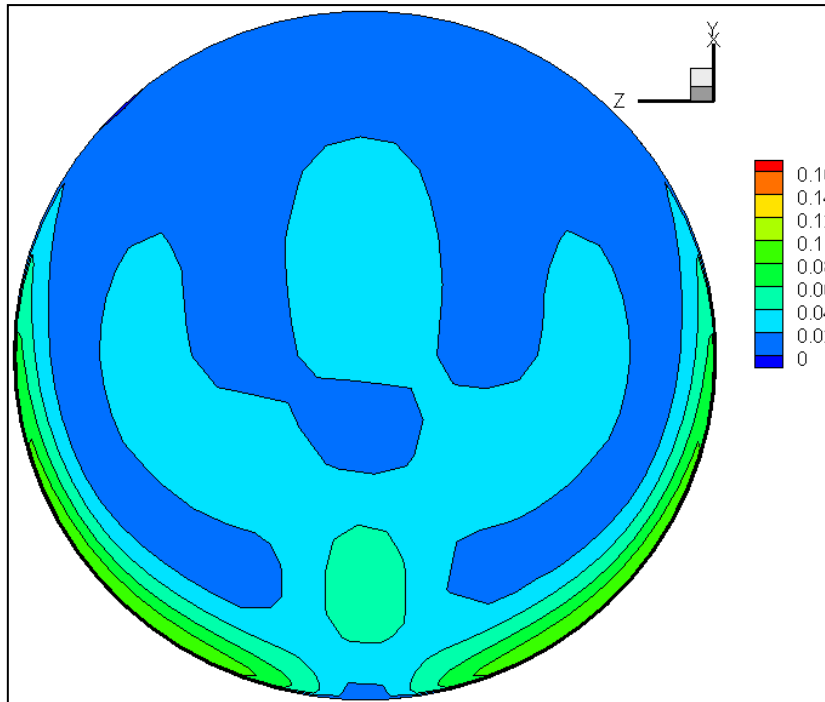
Όσον αφορά τις δευτερεύουσες ροές, παρατηρώντας τις εικόνες 6.2.2.18, 6.2.2.20, 6.2.2.22, 6.2.2.24 που δείχνουν τα διανύσματα και συγκρίνοντας τες με τις αντίστοιχες για την μέγιστη παροχή εξάγεται το συμπέρασμα ότι η φορά των δευτερευουσών ροών είναι η ίδια ενώ έχει μειωθεί το μέτρο τους. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η παροχή πλέον είναι κατά 25% μικρότερη της μέγιστης. Αυτό που είναι σημαντικό είναι το μέγεθος των δευτερευουσών ροών σε σχέση με το μέγεθος της κύριας ροής. Παρατηρώντας τις εικόνες 6.2.2.17, 6.2.2.19, 6.2.2.21, και 6.2.2.23 που δείχνουν τις ισοψείς της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας είναι εύκολα αντιληπτό ότι δεν έχουν ουσιαστική διαφορά από τα αντίστοιχα προφίλ της μέγιστης παροχής. Συγκεκριμένα για τις επιφάνειες Υ.1 και Ο.1 τα προφίλ είναι πανομοιότυπα για τις δύο παροχές ενώ οι διαφορές που εμφανίζονται στα προφίλ των Υ.2 και Ο.2 θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν αμελητέες.



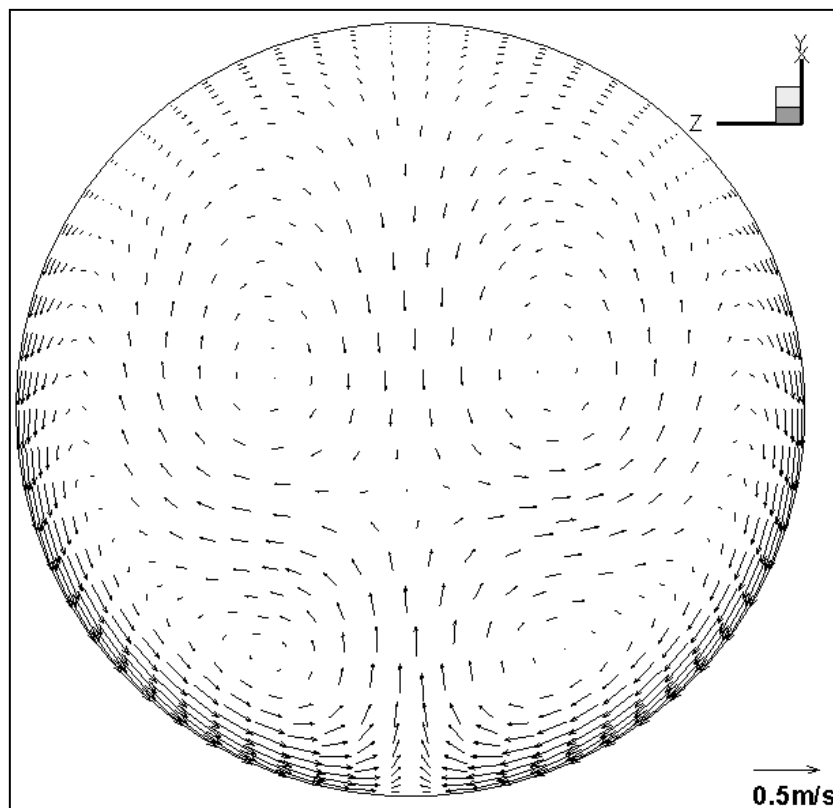
Εικόνα 6.2.2.17 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1



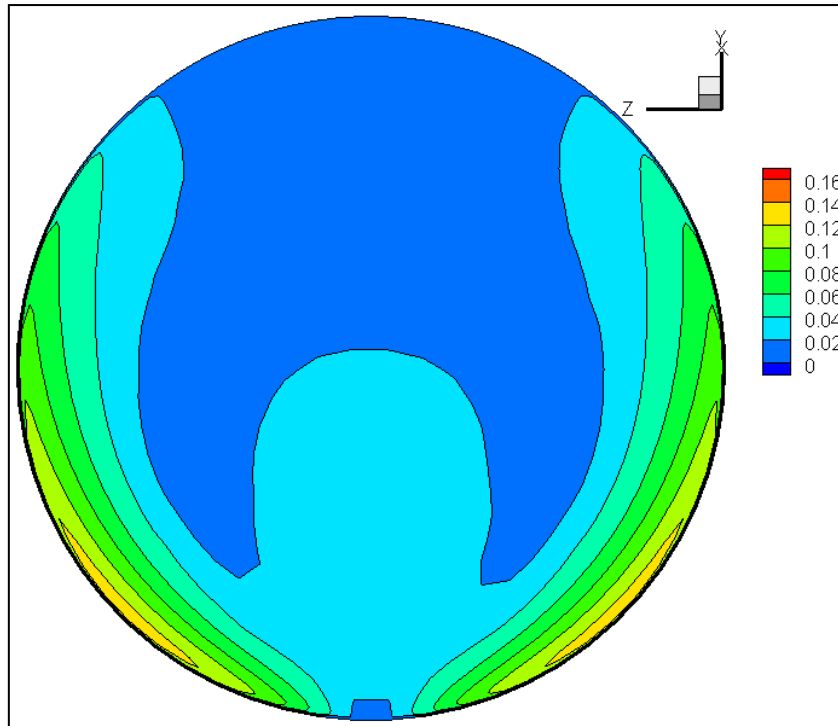
Εικόνα 6.2.2.18 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1



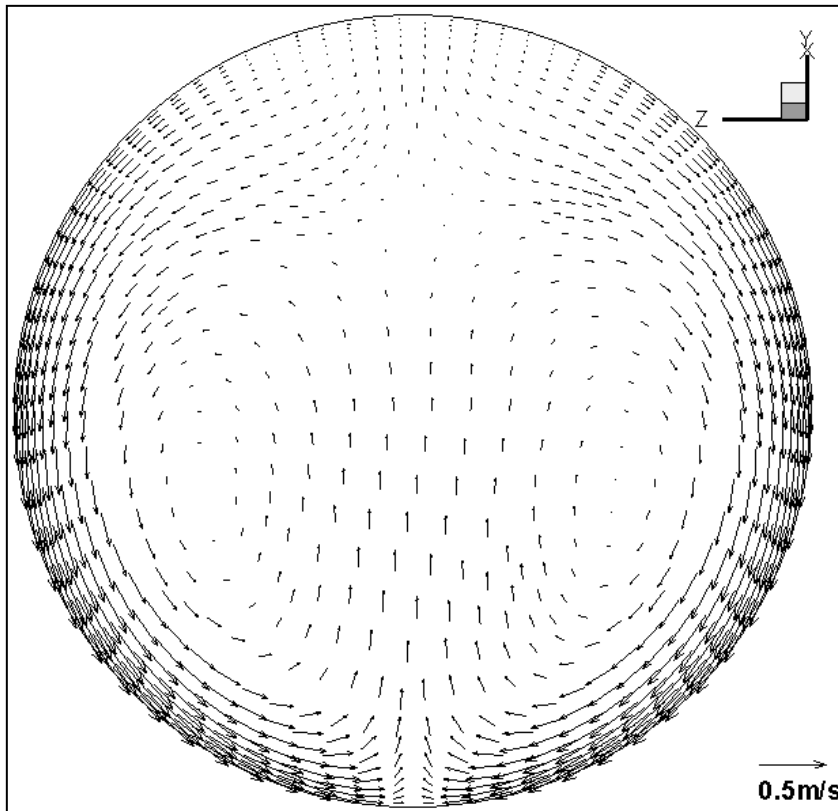
Εικόνα 6.2.2.19 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.2



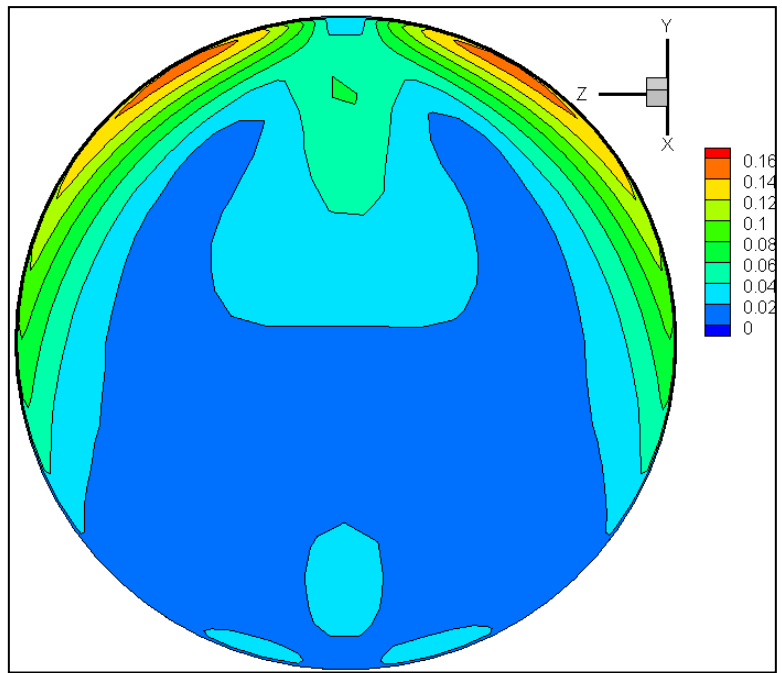
Εικόνα 6.2.2.20 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.2



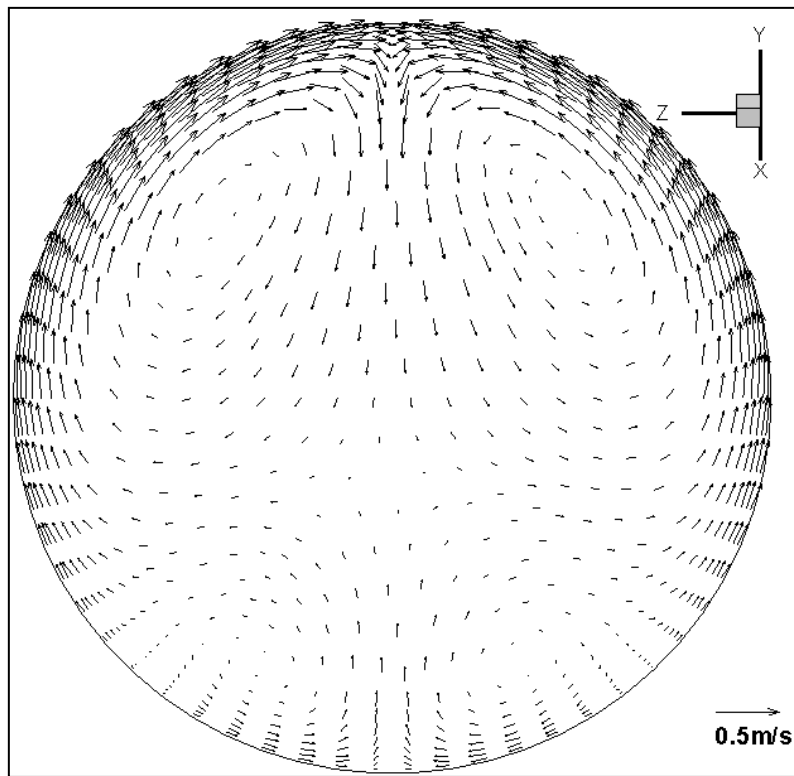
Εικόνα 6.2.2.21 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια 0.1



Εικόνα 6.2.2.22 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια 0.1



Εικόνα 6.2.2.23 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.2



Εικόνα 6.2.2.24 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.2

Ενδεικτικός είναι και ο ΑΣΔΡ των επιφανειών:

- $Y.1 = 1.6889 \cdot 10^{-2}$
- $O.1 = 3.0413 \cdot 10^{-2}$
- $Y.2 = 2.3376 \cdot 10^{-2}$
- $O.2 = 3.0031 \cdot 10^{-2}$

Οι τιμές είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτές που εμφανίζονται για την μέγιστη παροχή. Αυτό υποδεικνύει ότι οι δευτερεύουσες ροές έχουν την ίδια ή και μεγαλύτερη επίδραση στην ποιότητα της ροής. Η αύξηση του ΑΣΔΡ είναι λογική και θα αναλυθεί παρακάτω όταν θα έχουν παρατεθεί τα αποτελέσματα για όλο το εύρος παροχών λειτουργίας του υδροστροβίλου.

Η ολική πίεση στην είσοδο είναι 856186.25 Pa, στην έξοδο 1 είναι 853064.69 Pa και στην έξοδο 2 είναι 851190.31 Pa. Η παροχή όγκου είναι 0.05635 m³/s στην είσοδο και 0.028175 στην έξοδο 1 και στην έξοδο 2. Συνεπώς οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με:

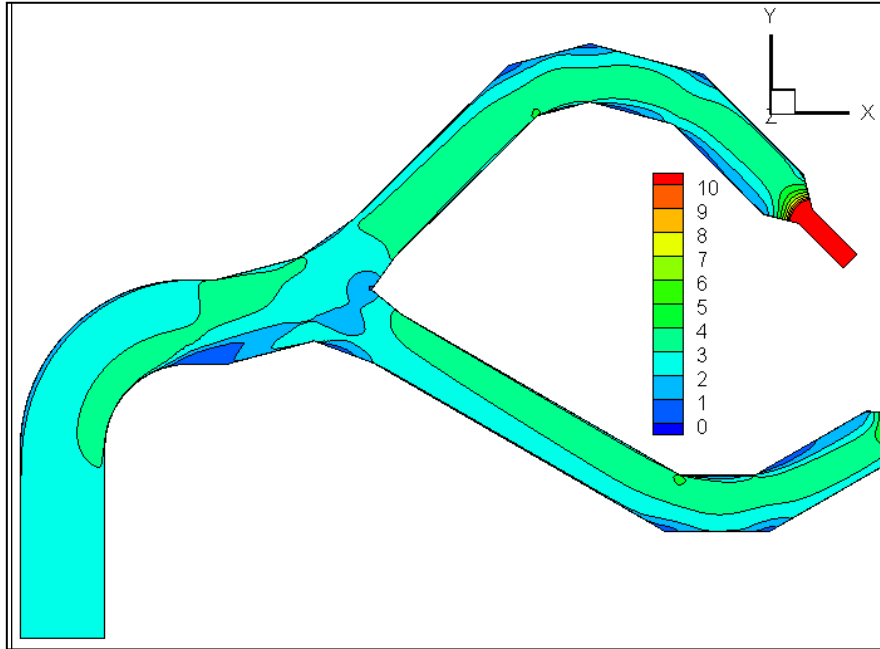
$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2} = 228,711 \text{ J/s}$$

$$\text{Ενώ σε mΣΥ είναι: } E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}} = 0,4145 \text{ mΣΥ}$$

6.2.3 Παροχή 50%

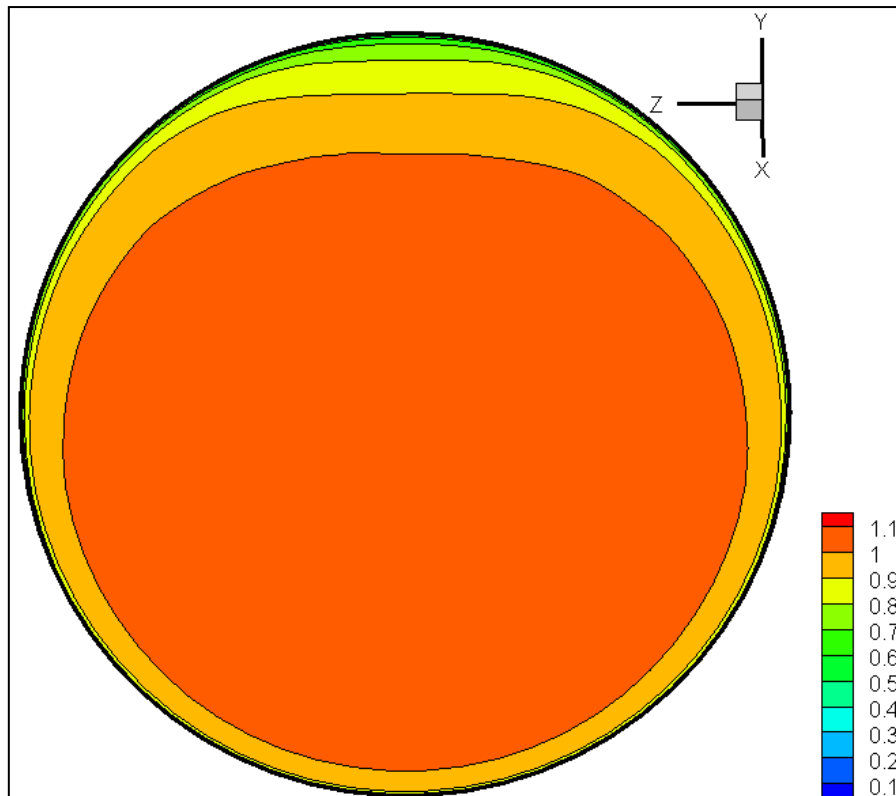
Το 50% της διερχόμενης παροχής είναι τα 37.5 kg/s. Ο αριθμός Reynolds λαμβάνει την τιμή 356751 στην είσοδο και την τιμή 1535129 στην έξοδο.

Το προφίλ της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$ (εικόνα 6.2.3.1) δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές από τα αντίστοιχα για τις προηγούμενες παροχές με εξαίρεση φυσικά τα χαμηλότερα μέτρα ταχύτητας που εμφανίζονται.

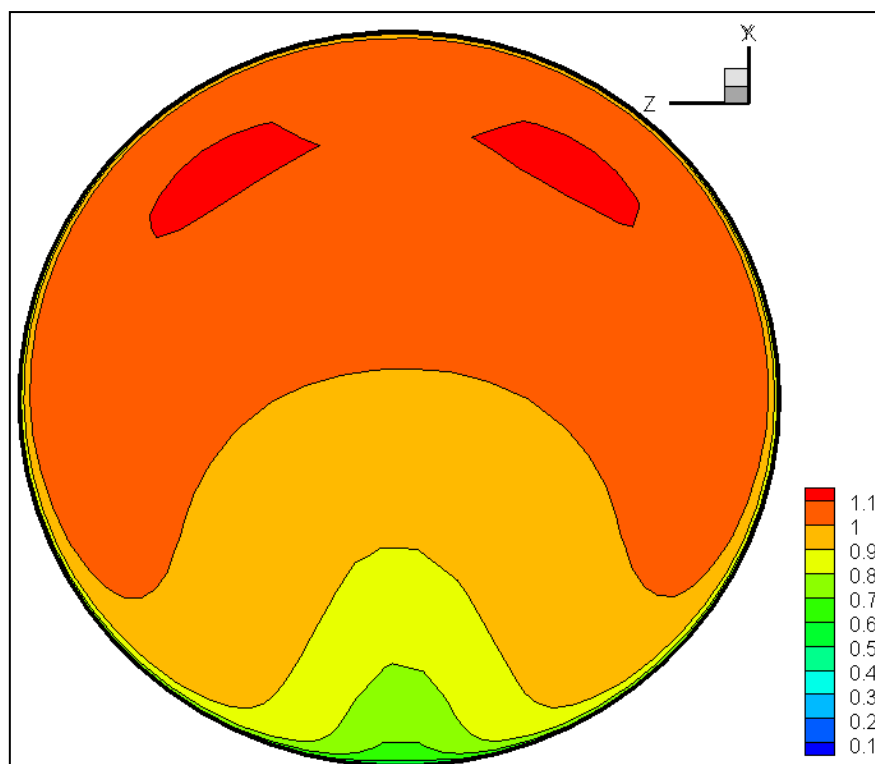


Εικόνα 6.2.3.1 Ισοταχείς Καμπύλες στο επίπεδο $z=0$

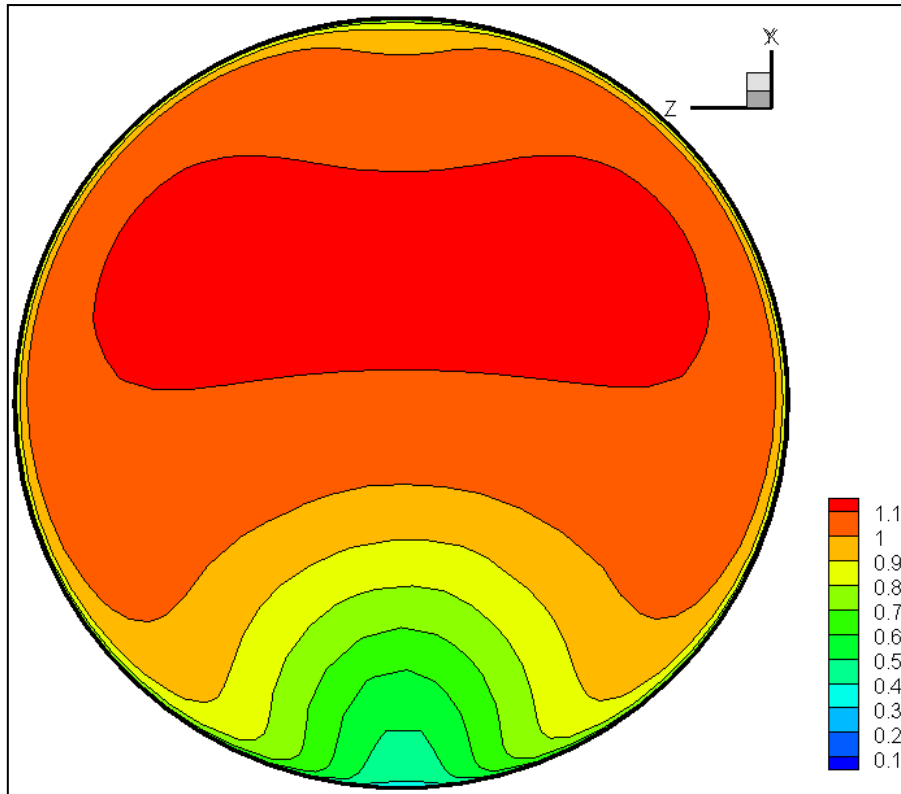
Στις εικόνες 6.2.3.2 έως 6.2.3.5 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας. Όσον αφορά την διακύμανση οι διαφορές με τις άλλες παροχές είναι μικρές. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι στην επιφάνεια $Y.2$ εμφανίζονται λίγο μεγαλύτερες τιμές της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας από τις προηγούμενες δύο παροχές. Επίσης, στις επιφάνειες $O.1$ και $O.2$ οι περιοχές της μέγιστης τιμής έχουν επεκταθεί ελαφρώς σε σχέση με την παροχή 56.25 kg/s .



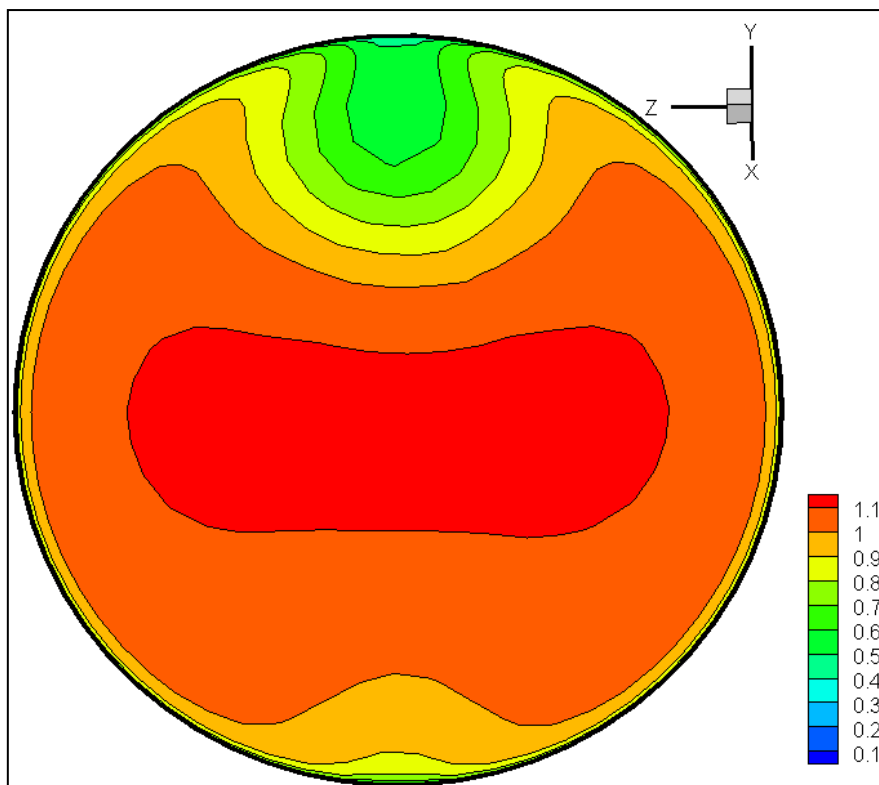
Εικόνα 6.2.3.2 Ισοϋψείς Καμπύλες της Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1



Εικόνα 6.2.3.3 Ισοϋψείς Καμπύλες της Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.2

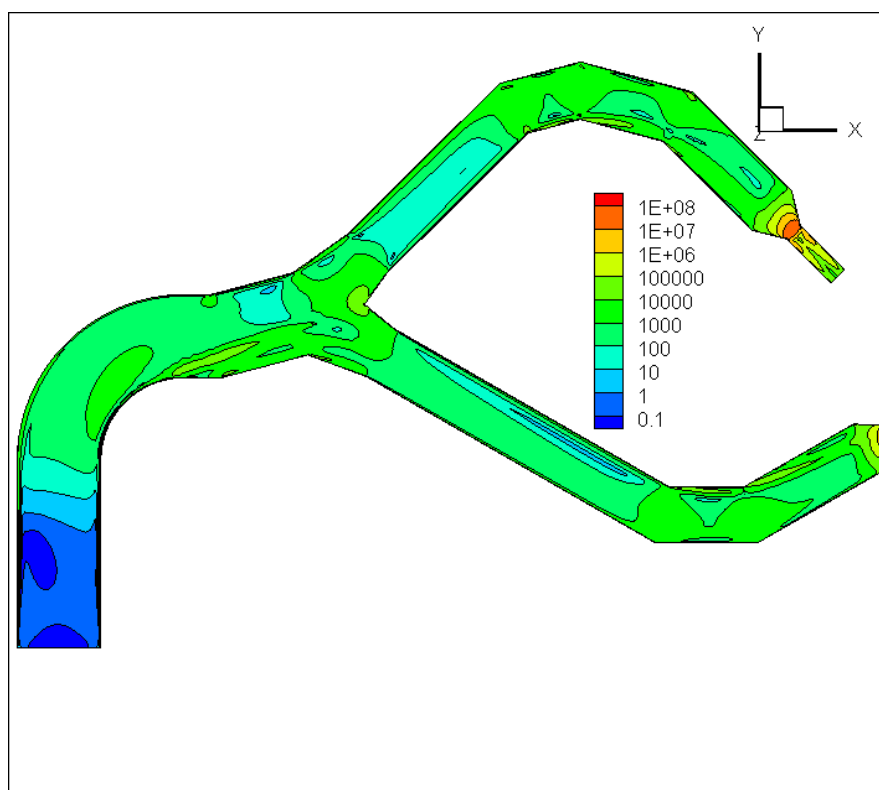


Εικόνα 6.2.3.4 Ισοϋψείς Καμπύλες της Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.1



Εικόνα 6.2.3.5 Ισοϋψείς Καμπύλες της Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.2

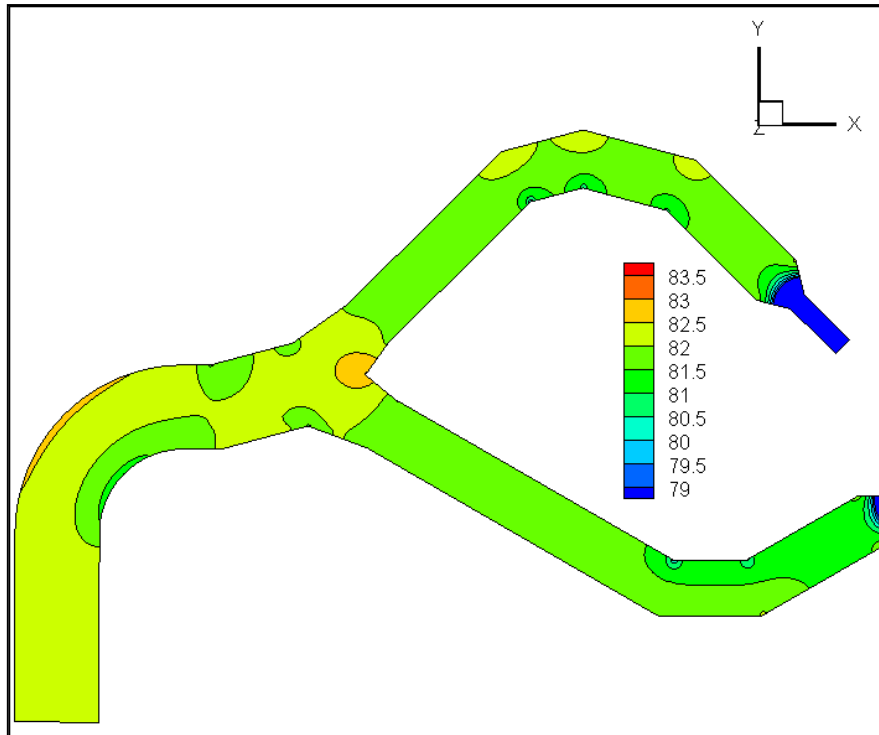
Στην εικόνα 6.2.3.6 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες του Φ . Οι τιμές που εμφανίζονται είναι χαμηλότερες από τις προηγούμενες παροχές καθώς οι περιοχές των χαμηλών τιμών έχουν επεκταθεί.



Εικόνα 6.2.3.6 Ισοϋψείς Καμπύλες Φ στο επίπεδο $z=0$

Οι ισοϋψείς καμπύλες Φ στις διάφορες επιφάνειες δεν παρουσιάζονται. Το μέτρο του Φ στις επιφάνειες αυτές έχει μειωθεί και υπάρχει μεγαλύτερη ομοιομορφία στο προφίλ του. Οι ακραίες τιμές όπως και στις προηγούμενες δύο παροχές εμφανίζονται κοντά στα τοιχώματα.

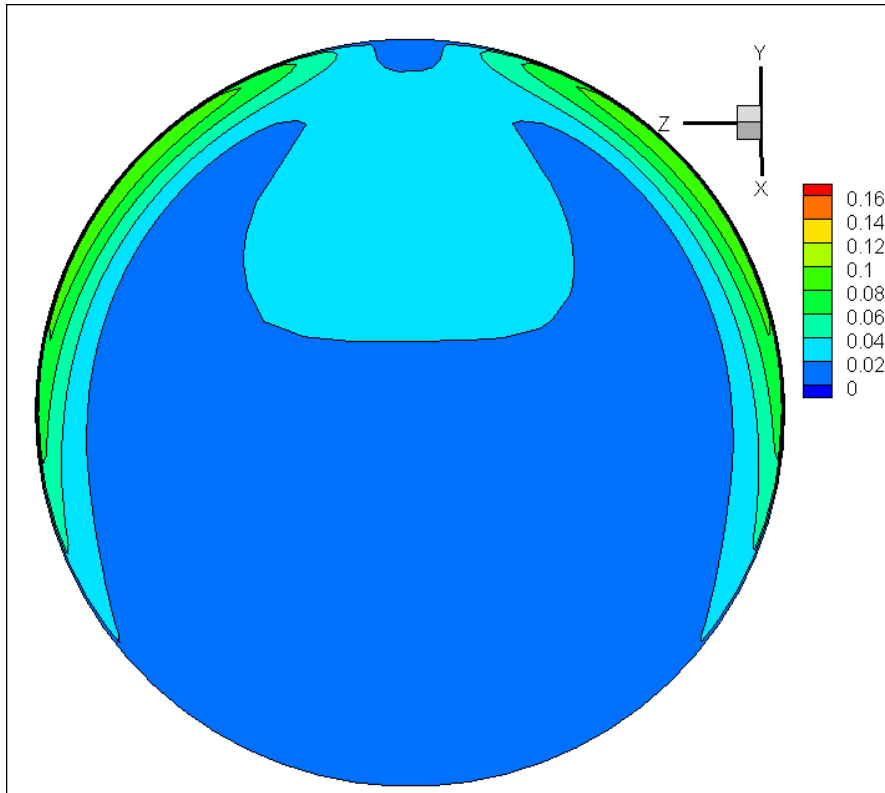
Στην εικόνα 6.2.3.7 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες της αδιαστατοποιημένης στατικής πίεσης. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται είναι εντονότερες από τις προηγούμενες παροχές κάτι το οποίο φαίνεται ιδιαίτερα στις απότομες γωνίες. Μετά τη διακλάδωση, τόσο το άνω όσο και το κάτω τμήμα παρουσιάζουν σαφώς μικρότερη πίεση από την είσοδο.



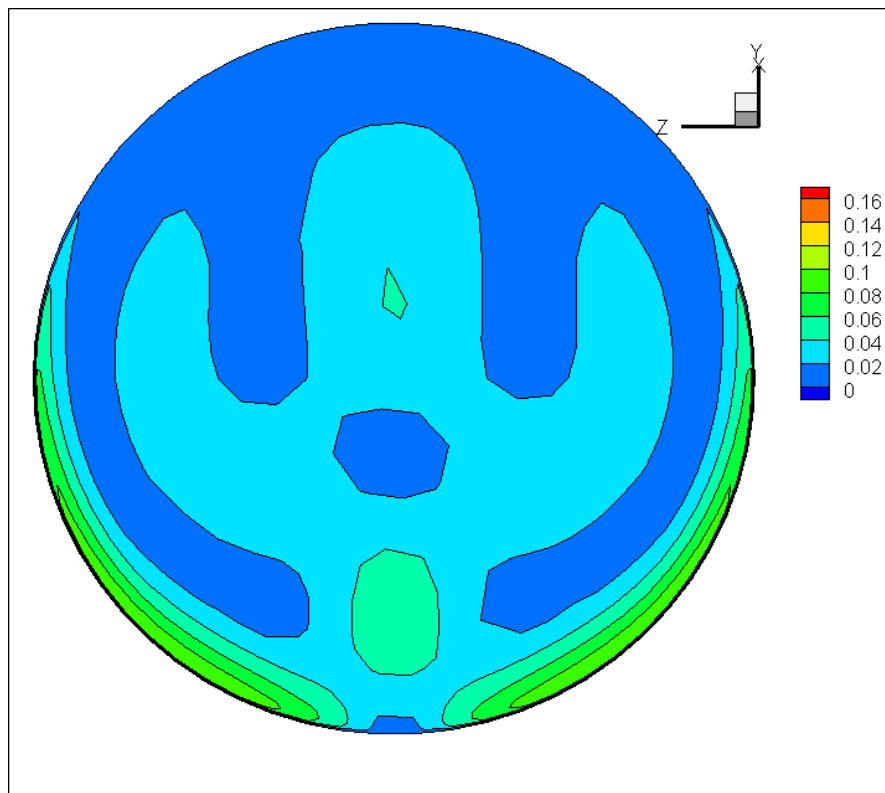
Εικόνα 6.2.3.7 Ισοϋψείς Καμπύλες της Αδιαστατοποιημένης Ολικής Πίεσης στο επίπεδο $z=0$

Το μέτρο της ελικότητας είναι μειωμένο περίπου στο μισό σε σχέση με την παροχή 75% με ακραίες τιμές περίπου ± 200 . Η επιφάνεια O.1 να παρουσιάζει ελαφρώς μικρότερες τιμές από τις υπόλοιπες επιφάνειες. Οι εικόνες που παρουσιάζουν το προφίλ της ελικότητας στις διάφορες επιφάνειες παραλείπονται.

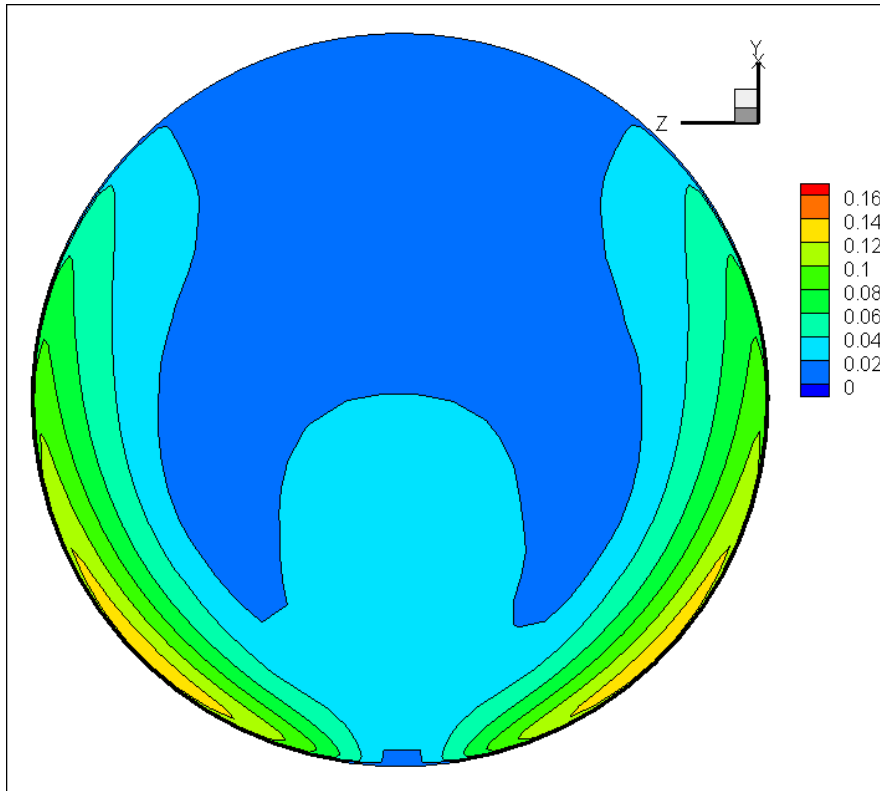
Όσον αφορά τις δευτερεύουσες ροές, όπως φαίνεται και από τα διανύσματα τους το μέτρο τους έχει μειωθεί ενώ η φορά τους παραμένει σχετικά αναλλοίωτη. Στην επιφάνεια Y.1 δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες μεταβολές ούτε στο αδιαστατοποιημένο μέτρο της επαπτόμενης ταχύτητας (εικόνα 6.2.3.8). Στην επιφάνεια Y.2 παρατηρείται ότι το αδιαστατοποιημένο μέτρο λαμβάνει ελαφρώς μικρότερες τιμές σε σχέση με τις προηγούμενες παροχές ιδιαίτερα προς το κέντρο της διατομής (εικόνα 6.2.3.9). Αμελητέες μεταβολές στην αδιαστατοποιημένη επαπτόμενη ταχύτητα παρατηρούνται και στην διατομή O.1 ενώ ελαφρώς εντονότερες είναι οι μεταβολές στην επιφάνεια O.2 με κάποιες περιοχές μικρών τιμών στο άνω και στο κάτω μέρος της διατομής να επεκτείνονται (εικόνες 6.2.3.10 και 6.2.3.11).



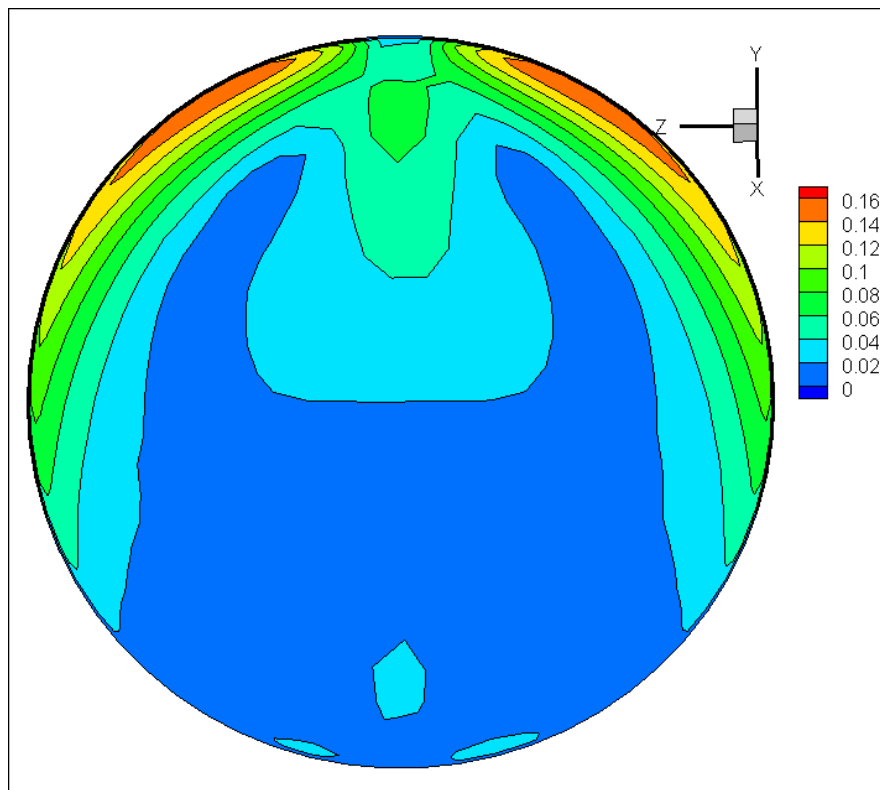
Εικόνα 6.2.3.8 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1



Εικόνα 6.2.3.9 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.2



Εικόνα 6.2.3.10 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.1



Εικόνα 6.2.3.11 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.2

Ο ΑΣΔΡ των επιφανειών λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

- $Y.1 = 1.8014 \cdot 10^{-2}$
- $O.1 = 3.0453 \cdot 10^{-2}$
- $Y.2 = 2.4985 \cdot 10^{-2}$
- $O.2 = 3.2351 \cdot 10^{-2}$

Με εξαίρεση την επιφάνεια O.1 της οποίας ο ΑΣΔΡ έχει αμελητέες μεταβολές, οι υπόλοιπες επιφάνειες εμφανίζουν ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές ΑΣΔΡ από τις προηγούμενες παροχές. Πλέον, η επιφάνεια O.2 αποκτά χειρότερο ΑΣΔΡ από την επιφάνεια O.1 αντιστρέφοντας τα δεδομένα των προηγούμενων δύο παροχών. Η επιφάνεια Y.1 εξακολουθεί να έχει την καλύτερη τιμή ΑΣΔΡ από τις υπόλοιπες.

Η ολική πίεση στην είσοδο είναι 379484.66 Pa, στην έξοδο 1 είναι 378010.31 Pa και στην έξοδο 2 είναι 377129.38 Pa. Η παροχή όγκου είναι 0.03757 m³/s στην είσοδο και 0.018758 m³/s στην έξοδο 1 και στην έξοδο 2. Συνεπώς οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με:

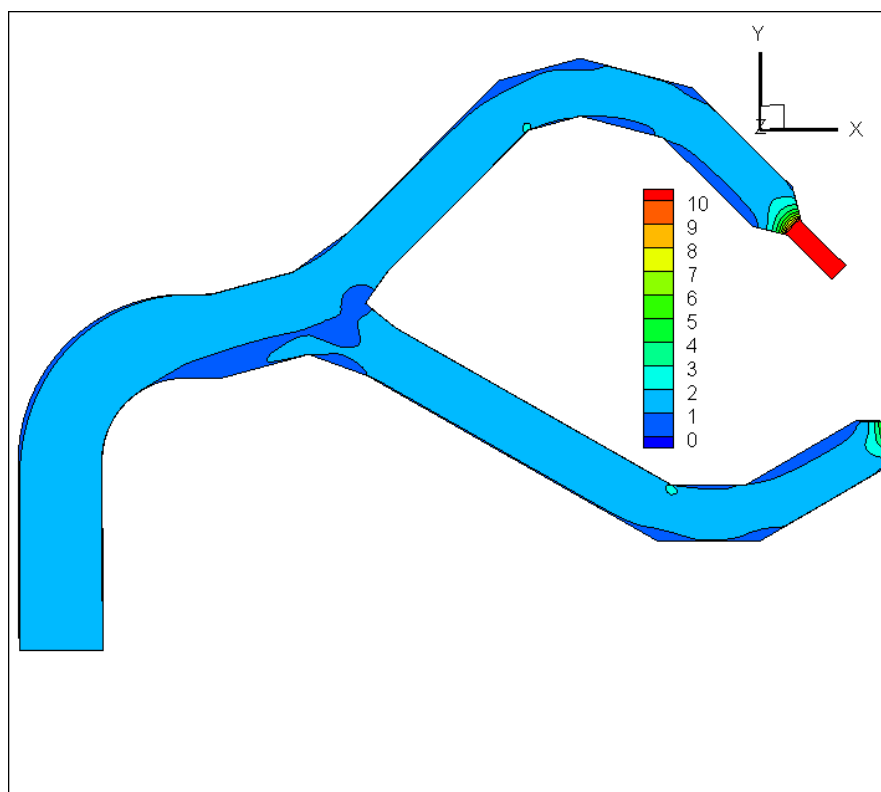
$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2} = 92.3284 \text{ J/s}$$

$$\text{Ενώ σε mΣΥ είναι: } E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}} = 0,2510 \text{ mΣΥ}$$

6.2.4 Παροχή 25%

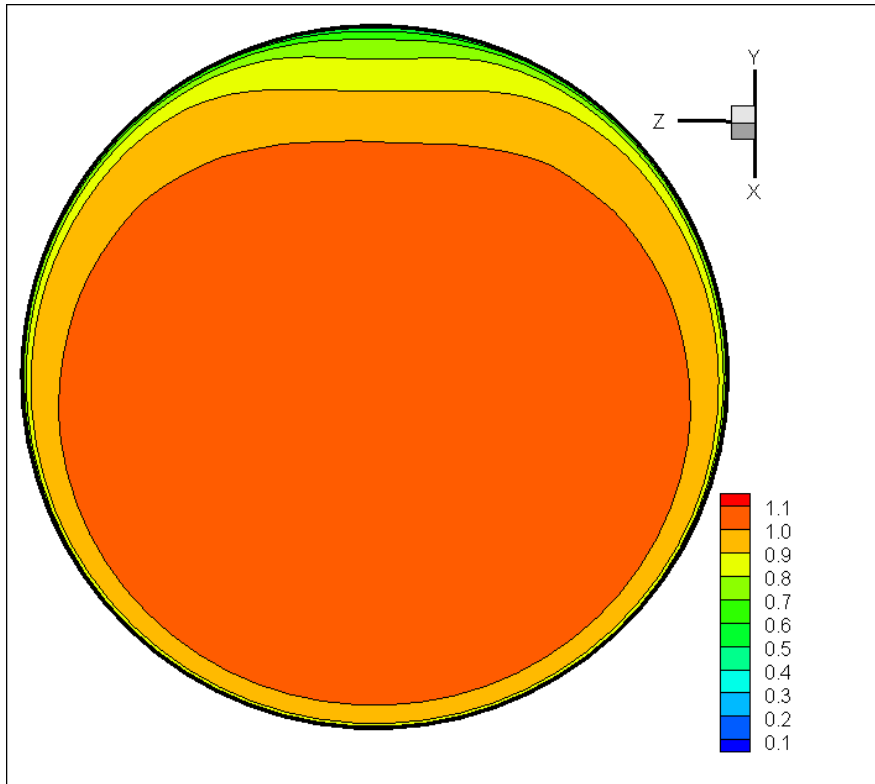
Το 25% της διερχόμενης παροχής είναι τα 18.75 kg/s. Ο αριθμός Reynolds λαμβάνει την τιμή 178285.3 στην είσοδο και την τιμή 767564.9 στην έξοδο.

Από τις ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$ (εικόνα 6.2.4.1) παρατηρούνται ταχύτητες της τάξεως των 2 m/s στο μεγαλύτερο τμήμα του αγωγού. Τα σημεία ανακοπής είναι όμοια με αυτά των υπόλοιπων παροχών.

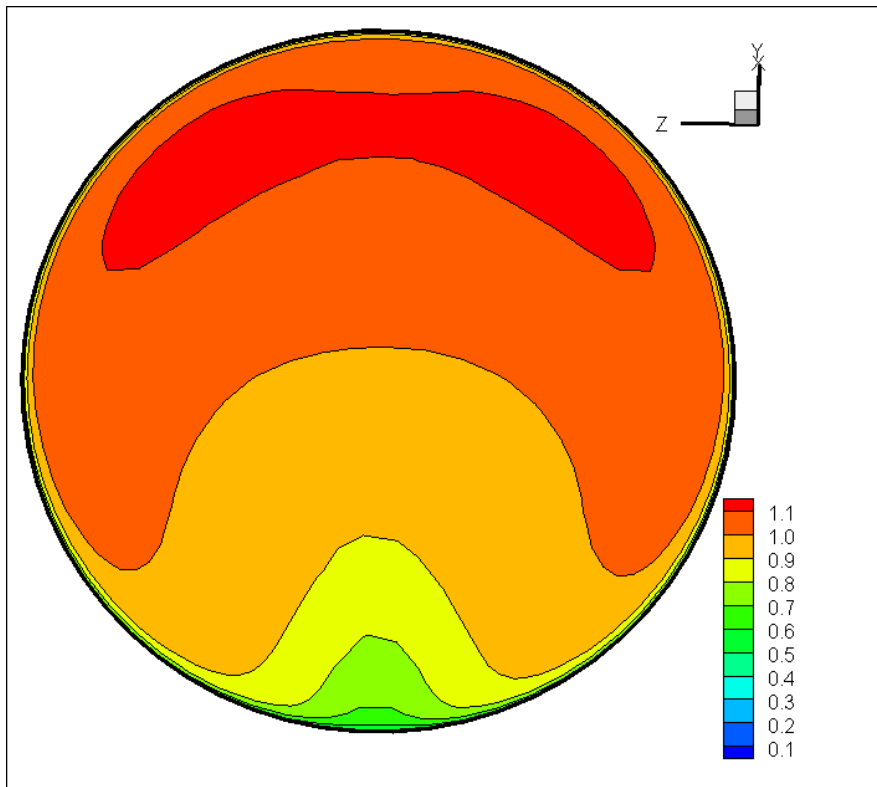


Εικόνα 6.2.4.1 Ισοταχείς Καμπύλες στο επίπεδο $z=0$

Από την εικόνα 6.2.4.2 παρατηρείται ότι η αδιαστατοποιημένη ταχύτητα στην $Y.1$ δεν παρουσιάζει διαφορές σε σχέση με τις υπόλοιπες παροχές. Στην επιφάνεια $Y.2$ (εικόνα 6.2.4.3) παρατηρείται ότι η ζώνη της μέγιστης τιμής η οποία εμφανίστηκε πρώτη φορά στην παροχή 37.5 kg/s έχει διευρυνθεί αρκετά στο άνω μέρος της διατομής.

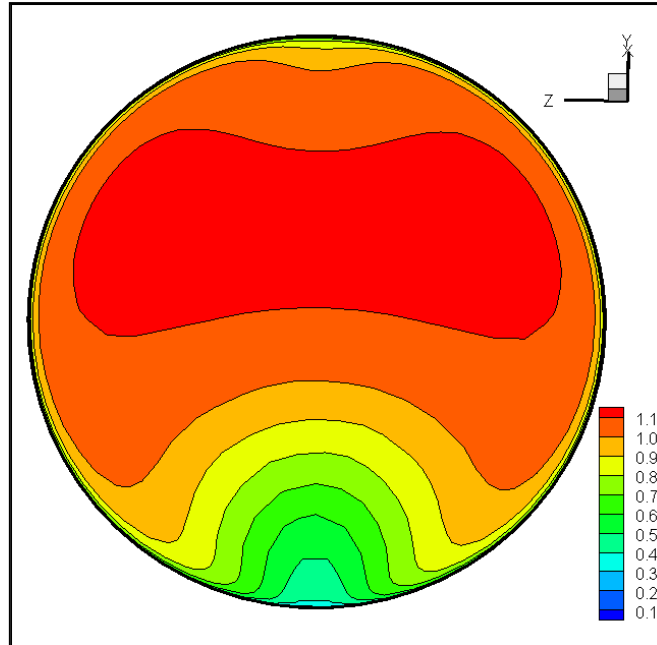


Εικόνα 6.2.4.2 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1

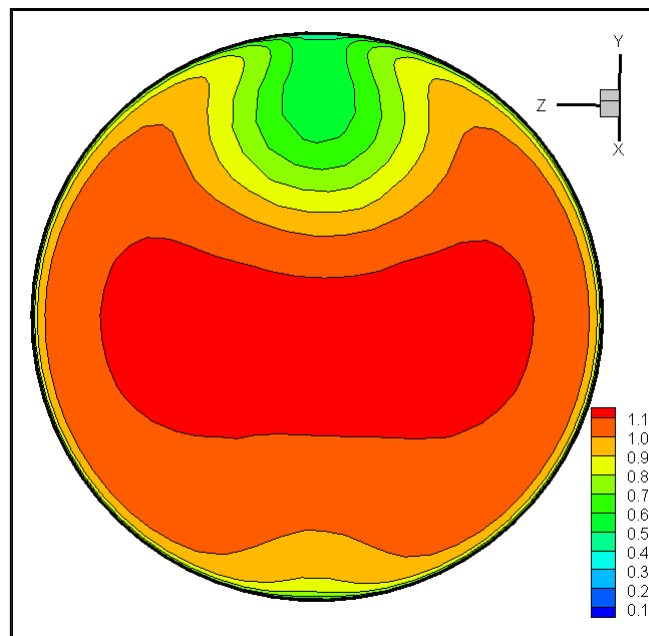


Εικόνα 6.2.4.3 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.2

Στις επιφάνειες O.1 και O.2 παρατηρείται σταδιακή επέκταση της περιοχής της μέγιστης τιμής της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας καθώς η παροχή μειώνεται. Στις εικόνες 6.2.4.4 και 6.2.4.5 είναι εμφανές ότι η ζώνη της μέγιστης τιμής για την παροχή 18.75 kg/s είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για την μέγιστη παροχή.

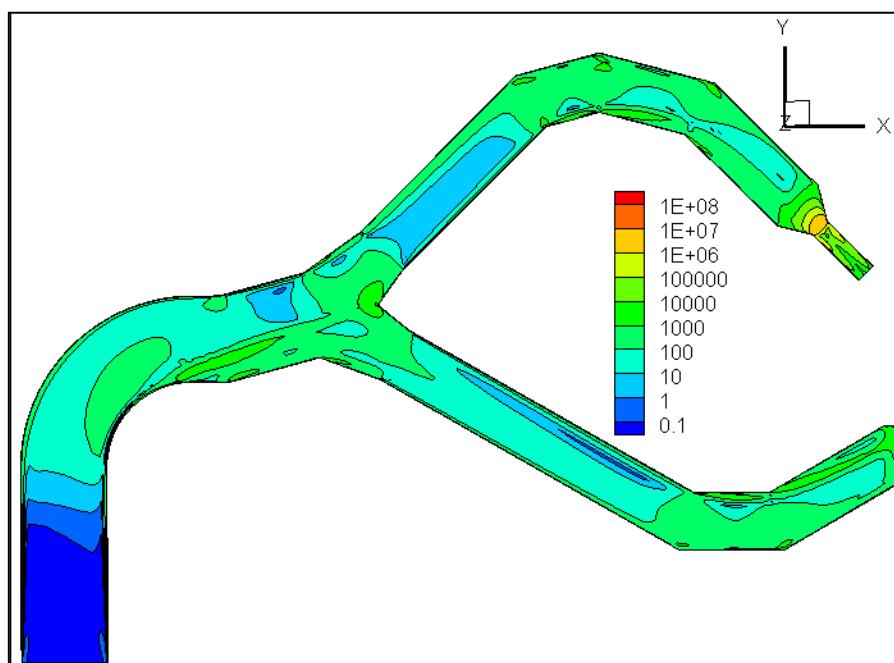


Εικόνα 6.2.4.4 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.1



Εικόνα 6.2.4.5 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.2

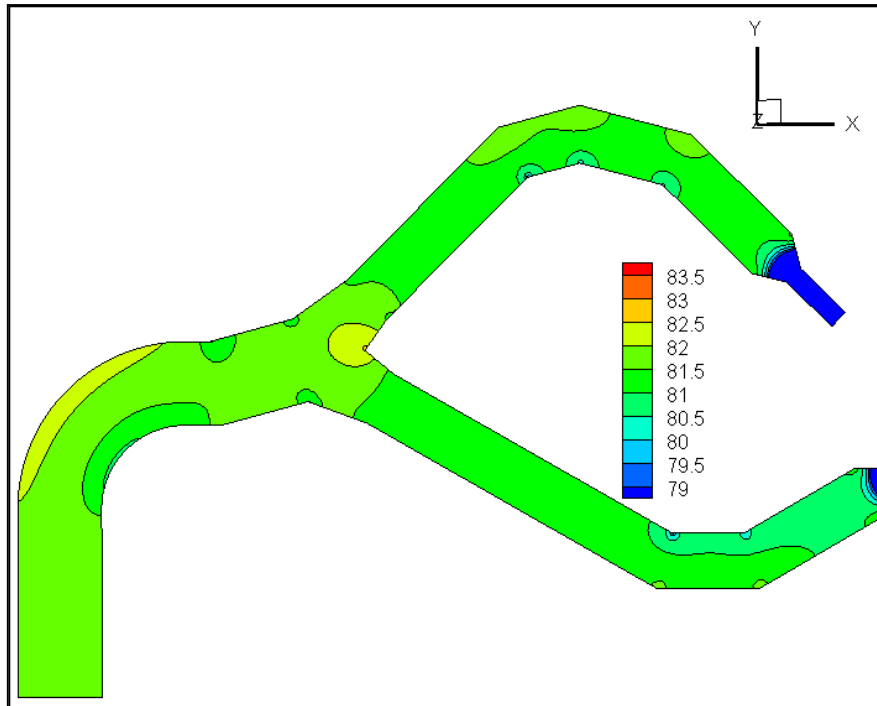
Στην εικόνα 6.2.4.6 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες του Φ στο επίπεδο $z=0$. Είναι εμφανές ότι η διάχυση της ενέργειας παίρνει μικρότερες τιμές από τις προηγούμενες παροχές στο μεγαλύτερο μέρος του αγωγού.



Εικόνα 6.2.4.6 Ισοϋψείς Καμπύλες Φ στο επίπεδο $z=0$

Οι επιφάνειες Y.1 και Y.2 (εικόνες 7.2.4.7 και 7.2.4.8) παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ομοιομορφία με πολύ χαμηλές τιμές Φ στο μεγαλύτερο μέρος της διατομής και ελαφρώς υψηλότερες στα τοιχώματα. Σημαντική διαφορά σε σχέση με τις προηγούμενες παροχές παρατηρείται κυρίως στις επιφάνειες O.1 και O.2 (εικόνες 7.2.4.9 και 7.2.4.10). Πολύ μεγάλο μέρος της διατομής παρουσιάζει μικρές τιμές Φ με λίγο υψηλότερες τιμές στα τοιχώματα και στο κάτω και στο άνω τμήμα αντίστοιχα για τις O.1 και O.2.

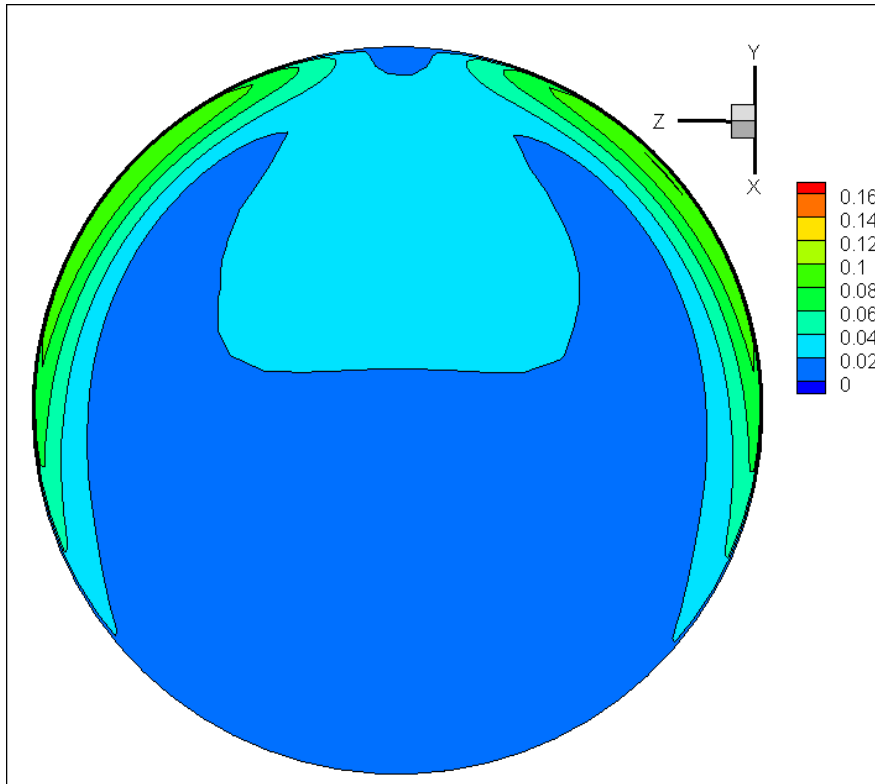
Στην εικόνα 6.2.4.7 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες της αδιαστατοποιημένης στατικής πίεσης. Παρατηρούνται μικρότερες τιμές από τις προηγούμενες παροχές. Οι διακυμάνσεις ωστόσο, είναι παρεμφερείς με αυτές της παροχής 37.5 kg/s.



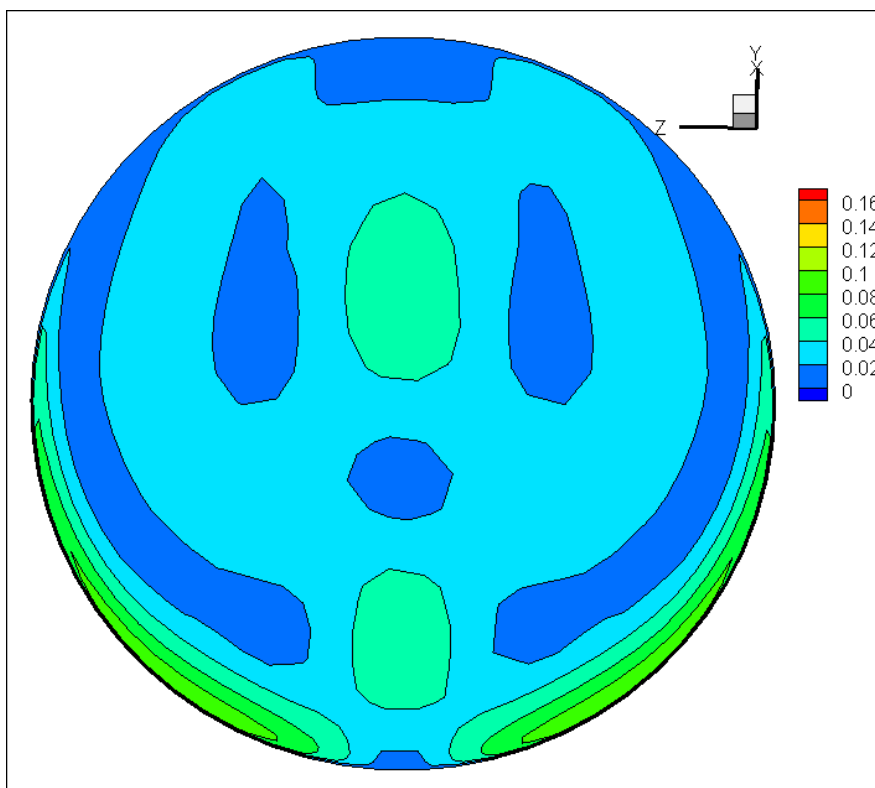
Εικόνα 6.2.4.7 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ολικής Πίεσης στο επίπεδο $z=0$

Τα προφίλ της ελικότητας στις διάφορες διατομές (εικόνας 7.2.4.12, 7.2.4.13, 7.2.4.14 και 7.2.4.15) δείχνουν πολύ μικρές τιμές στο κέντρο των διατομών με τις υψηλές τιμές στα τοιχώματα να είναι πολύ μικρότερες από αυτές των άλλων παροχών.

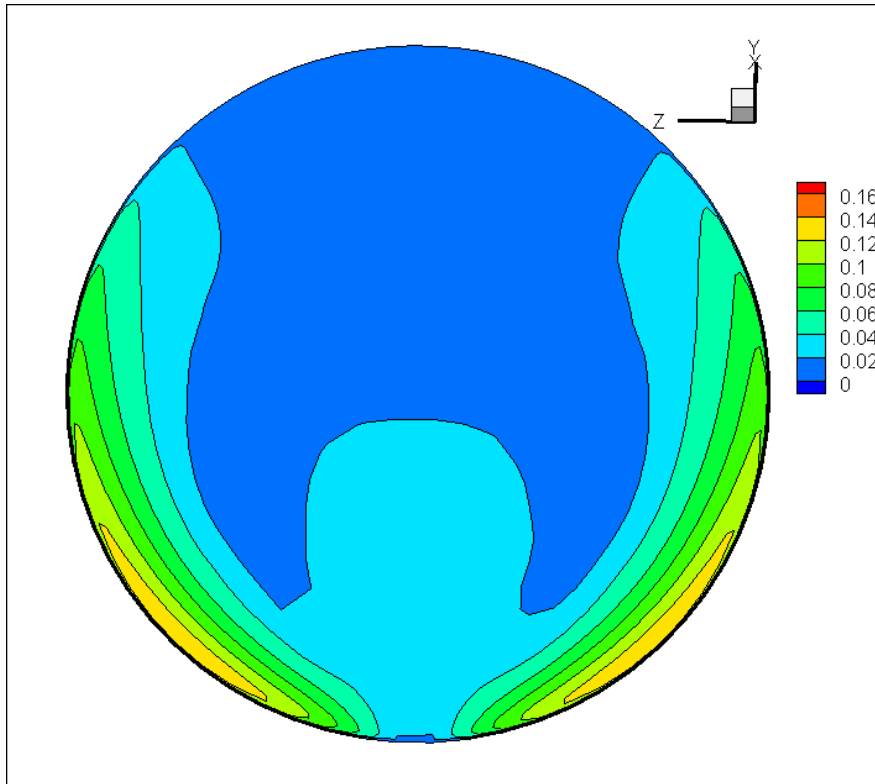
Η φορά των δευτερευουσών ροών δεν έχει μεταβληθεί αν και έχει μειωθεί το μέτρο τους. Στις ισοϋψείς καμπύλες της αδιαστατοποιημένης εφαπτόμενης ταχύτητας δεν παρατηρούνται διαφορές στην επιφάνεια $Y.1$ (εικόνα 6.2.4.8) σε σχέση με τις προηγούμενες παροχές. Στην επιφάνεια $Y.2$ (εικόνα 6.2.4.9) ωστόσο παρατηρείται αύξηση του αδιαστατοποιημένου μέτρου στο κέντρο και στο άνω μέρος του αγωγού. Στην επιφάνεια $O.1$ (εικόνα 6.2.4.10) το αδιαστατοποιημένο μέτρο της εφαπτόμενης ταχύτητας δεν εμφανίζει αξιοσημείωτες μεταβολές σε σχέση με τις προηγούμενες παροχές. Στην επιφάνεια $O.2$ ωστόσο (εικόνα 6.2.4.11) στο κάτω μέρος της διατομής παρατηρείται επέκταση της περιοχής του μικρότερου μέτρου, ενώ στο πάνω μέρος, προς το τοίχωμα, εμφανίζονται περιοχές της μέγιστης τιμής κάτι το οποίο δεν είχε συμβεί στις άλλες παροχές.



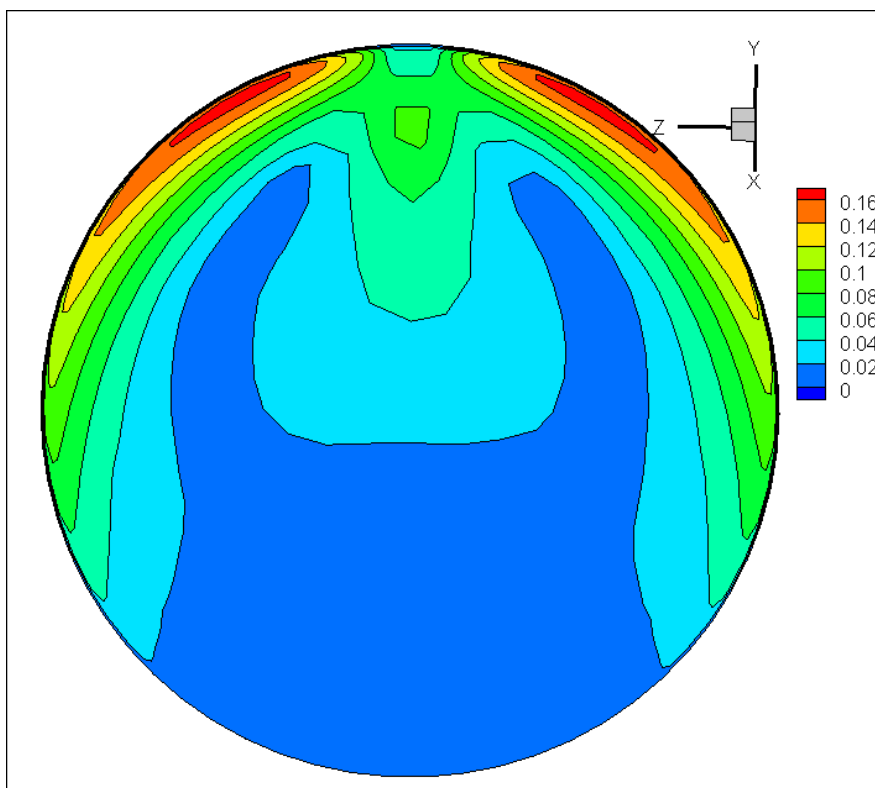
Εικόνα 6.2.4.8 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1



Εικόνα 6.2.4.9 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.2



Εικόνα 6.2.4.10 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.1



Εικόνα 6.2.4.11 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.2

Ο ΑΣΔΡ των επιφανειών λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

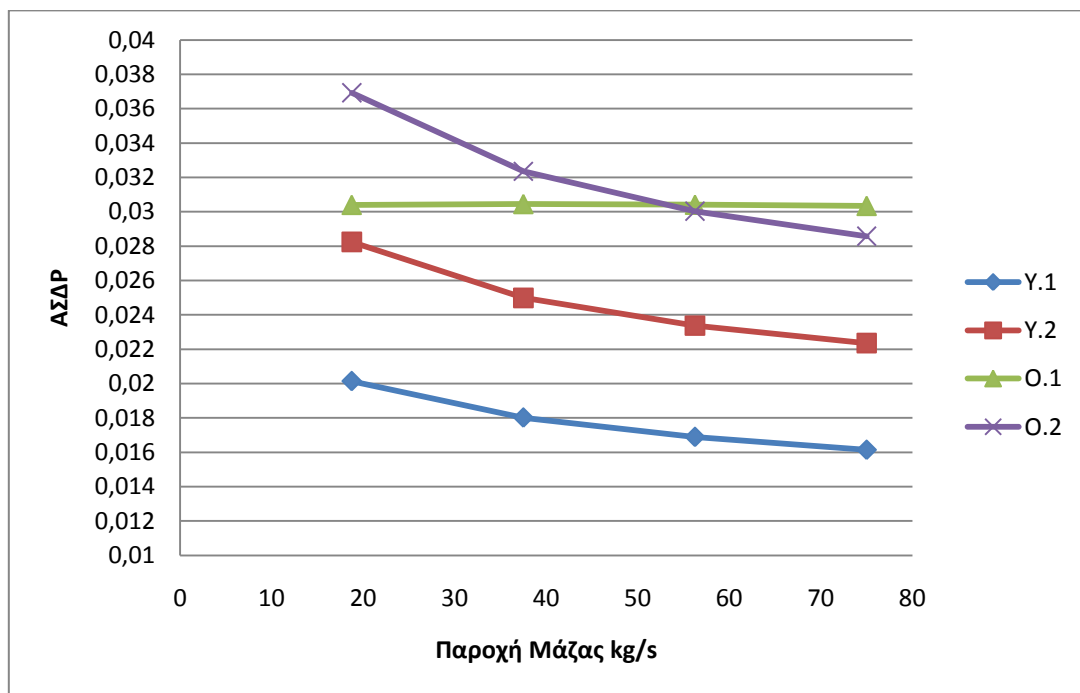
- $Y.1 = 2.0137 \cdot 10^{-2}$
- $O.1 = 3.0403 \cdot 10^{-2}$
- $Y.2 = 2.8242 \cdot 10^{-2}$
- $O.2 = 3.6924 \cdot 10^{-2}$

Η ολική πίεση στην είσοδο είναι 94410.391 Pa, στην έξοδο 1 είναι 93996.57 Pa και στην έξοδο 2 είναι 93754.055 Pa. Η παροχή όγκου είναι 0.018758 m³/s στην είσοδο και 0.0093925 m³/s στην έξοδο 1 και στην έξοδο 2. Συνεπώς οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με:

$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2} = 10.0514 \text{ J/s}$$

Ενώ σε mΣΥ είναι: $E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}} = 0,0547 \text{ mΣΥ}$

Στο διάγραμμα 7.2.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ΑΣΔΡ για τις διάφορες επιφάνειες συναρτήσει της παροχής μάζας.

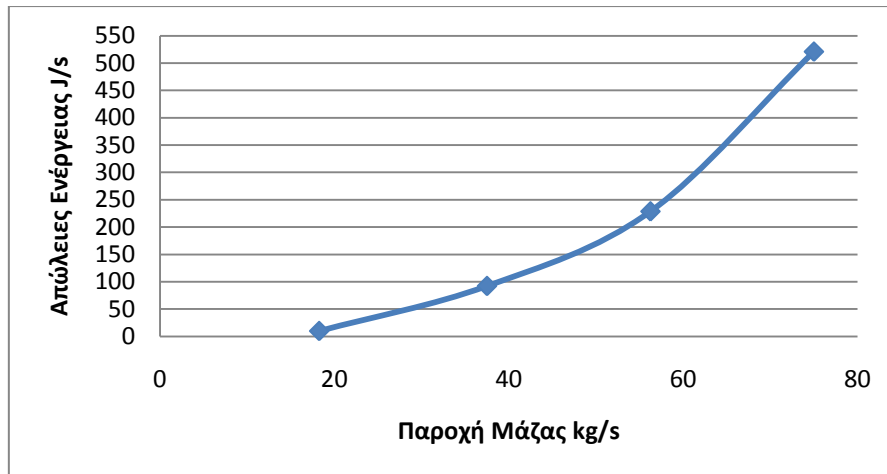


Διάγραμμα 7.2.1 ΑΣΔΡ συναρτήσει της Παροχής Μάζας

Όπως γίνεται αντιληπτό η επιφάνεια O.1 παρουσιάζει αμελητέες μεταβολές στον ΑΣΔΡ κατά τις διάφορες παροχές. Για τις υπόλοιπες επιφάνειες παρατηρείται αύξηση της τιμής του ΑΣΔΡ καθώς η παροχή μειώνεται. Αυτό υποδεικνύει ότι το

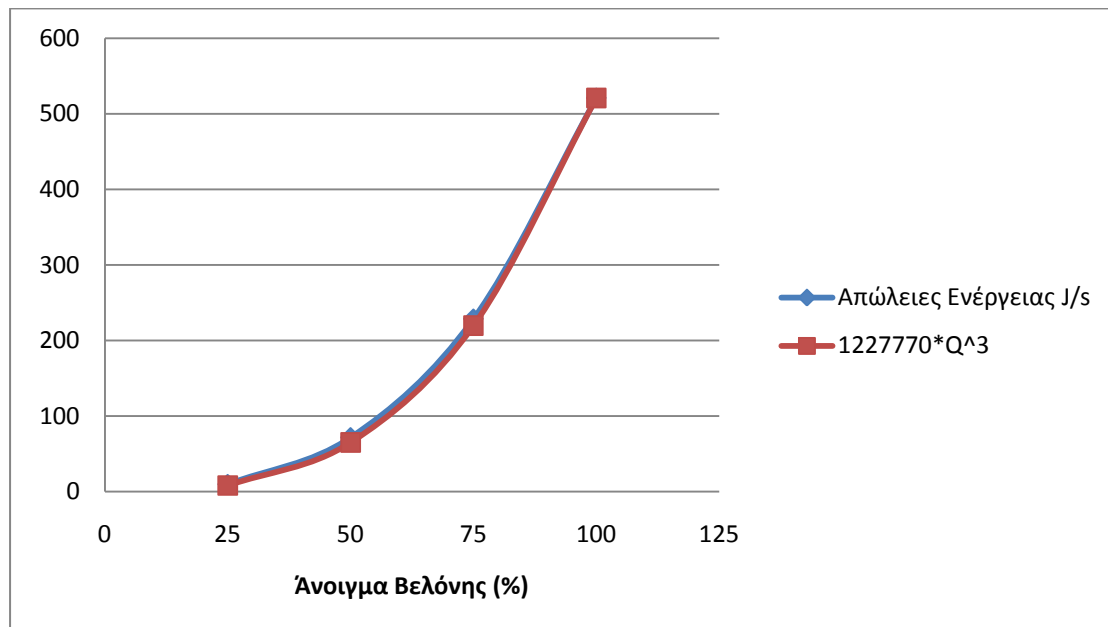
ποσοστό της επίδρασης της διαμόρφωσης του συστήματος διανομής πάνω στην ροή αυξάνει καθώς μειώνεται η παροχή.

Στο διάγραμμα 7.2.2 παρουσιάζεται η μεταβολή των απωλειών ενέργειας σε J/s σε συνάρτηση με την παροχή. Παρατηρείται ότι οι απώλειες αυξάνονται εκθετικά με την παροχή.



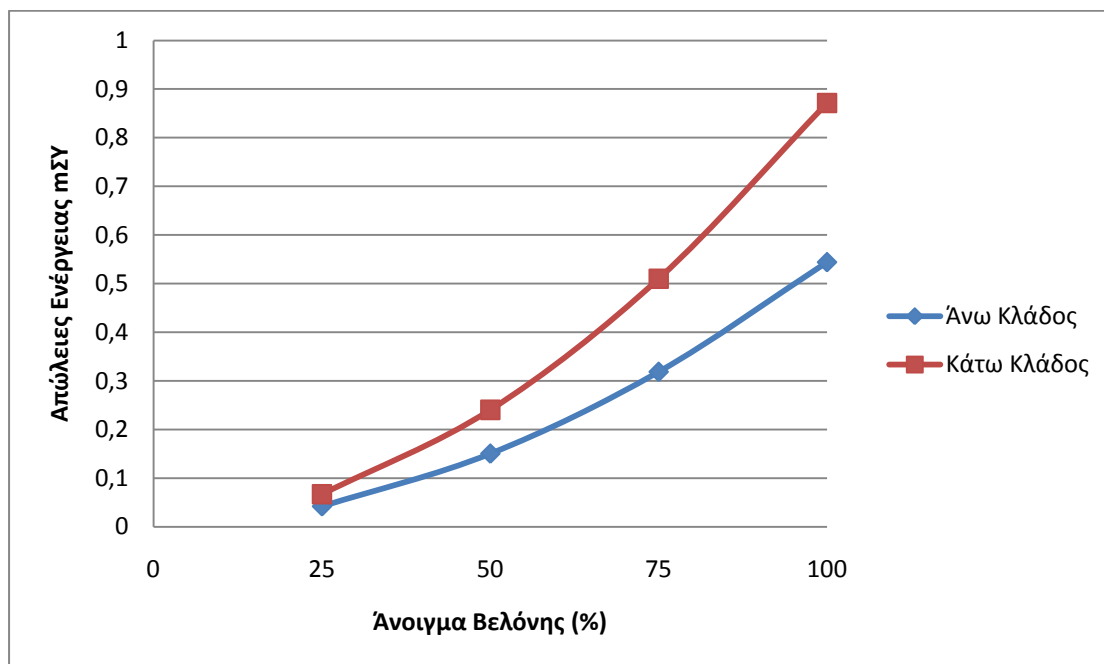
Διάγραμμα 6.2.2 Απώλειες Ενέργειας σε J/s συναρτήσει της Παροχής Μάζας

Στο διάγραμμα 6.2.2α φαίνεται ότι οι απώλειες ενέργειας είναι ανάλογες της τρίτης δύναμης της παροχής. Η καμπύλη των απωλειών ενέργειας παρουσιάζει καλό συσχετισμό με την καμπύλη $122770 \cdot Q^3$.



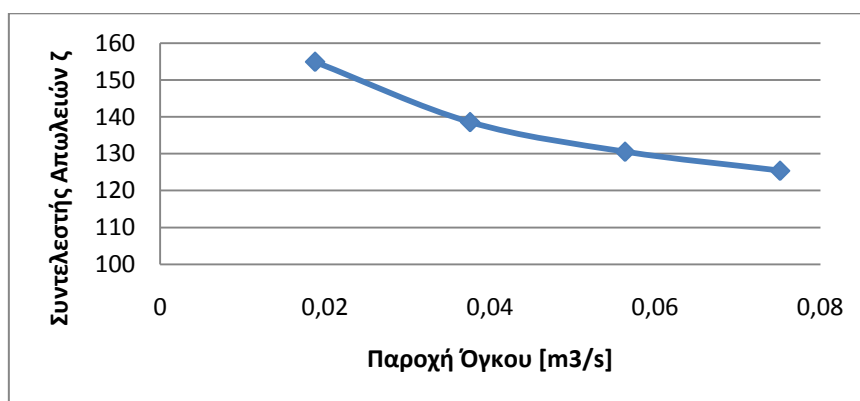
Διάγραμμα 6.2.2α Συσχετισμός Απωλειών Ενέργειας με Q^3

Στο διάγραμμα 6.2.3 παρουσιάζονται οι απώλειες ενέργειας σε mΣΥ που εμφανίζει κάθε κλάδος συναρτήσει του ανοίγματος της βελόνης. Παρατηρείται ότι ο κάτω κλάδος εμφανίζει μεγαλύτερες απώλειες από τον άνω. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι επειδή ο κάτω κλάδος έχει μεγαλύτερο μήκος από τον άνω και η αλλαγή κλίσης στη διακλάδωση που οδηγεί σε αυτόν είναι πιο απότομη από αυτήν που οδηγεί στον άνω κλάδο.



Διάγραμμα 6.2.3 Απώλειες Ενέργειας [mΣΥ] σε κάθε κλάδο για λειτουργία με δύο ακροφύσια, συναρτήσει του ανοίγματος της βελόνης.

Στο διάγραμμα 6.2.4 παρουσιάζεται ο συντελεστής απωλειών ζ συναρτήσει της παροχής όγκου. Θεωρητικά θα έπρεπε ο συντελεστής να έχει σταθερή τιμή για την πλήρως τυρβώδη περιοχή. Ωστόσο, όσο μειώνεται η παροχή τόσο η ροή εξέρχεται από την τυρβώδη περιοχή και για αυτό τον λόγο παρατηρείται αύξηση του συντελεστή απωλειών.



Διάγραμμα 6.2.4 Συντελεστής Απωλειών ζ συναρτήσει της παροχής όγκου

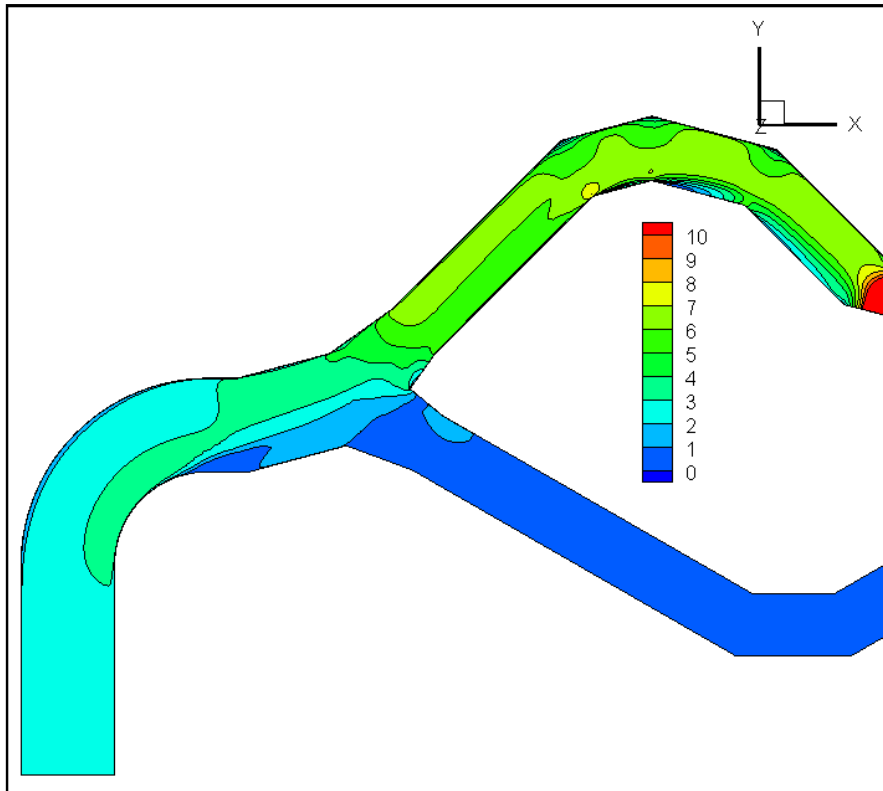
6.3 Λειτουργία μόνο με το Άνω Ακροφύσιο

Η λειτουργία μόνο με το άνω ακροφύσιο απαιτεί προφανώς το κάτω ακροφύσιο κλειστό. Το ακροφύσιο στην πραγματικότητα όπως έχει προαναφερθεί κλείνει με την χρήση της βελόνης. Στην προκειμένη μοντελοποίηση ωστόσο επειδή δεν εξετάζεται η ροή στο ακροφύσιο δεν υπάρχει τέτοια διάταξη που να προσομοιώνει το πραγματικό κλείσιμο του ακροφυσίου. Για τον λόγο αυτό, το κλείσιμο του κάτω ακροφυσίου πραγματοποιήθηκε χαρακτηρίζοντας στο Fluent την εσωτερική επιφάνεια (interior) που αποτελεί την είσοδο του ακροφυσίου ως τοίχωμα (wall).

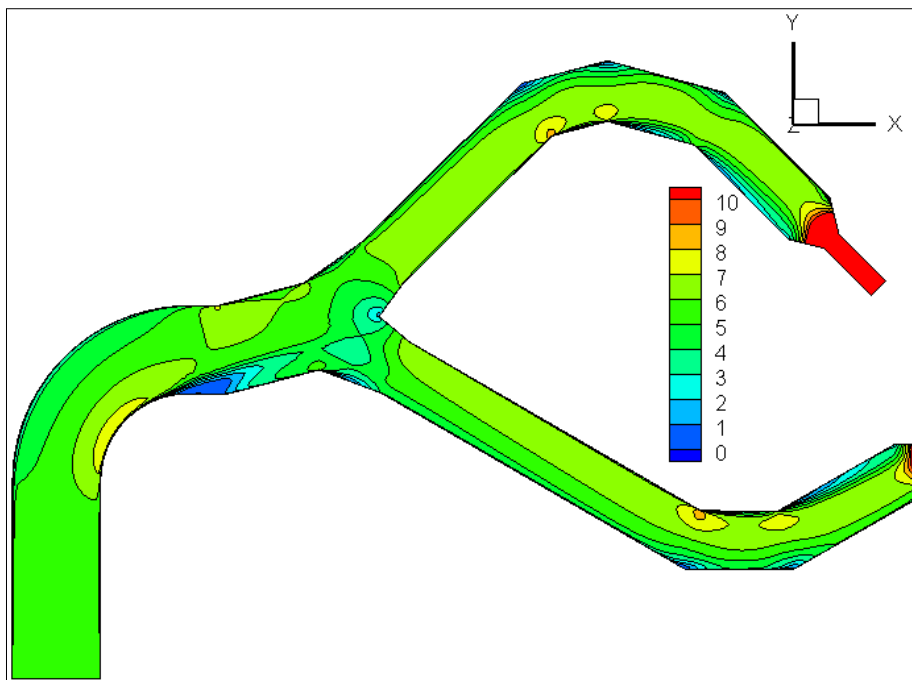
Όταν είναι ανοιχτό μόνο το άνω ακροφύσιο, η μέγιστη παροχή είναι η μισή της μέγιστης για λειτουργία με δύο ακροφύσια.

6.3.1 Παροχή 100%

Η παροχή 100% είναι 37,5 kg/s. Στην εικόνα 7.3.1.1 παρουσιάζονται οι ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$. Παρατηρείται ότι το προφίλ της ταχύτητας, από την είσοδο μέχρι λίγο πριν τη διακλάδωση, εμφανίζει σημαντικές διαφορές, τόσο στο μέτρο όσο και στις διακυμάνσεις, σε σχέση με την λειτουργία στη μέγιστη παροχή με ανοιχτά και τα δύο ακροφύσια αφού στην περιοχή διέρχονται 37.5 kg/s και όχι 75kg/s. Οι ταχύτητες που εμφανίζονται λίγο μετά τη διακλάδωση είναι ελαφρώς μικρότερες σε σχέση με τη λειτουργία με τα δύο ακροφύσια. Ωστόσο, καθώς η ροή κατευθύνεται προς το ακροφύσιο το προφίλ της ταχύτητας της μοιάζει περισσότερο με αυτό για λειτουργία με δύο ακροφύσια. Τα σημεία ανακοπής όπου υπάρχουν πιθανές αποκολλήσεις είναι τα ίδια.



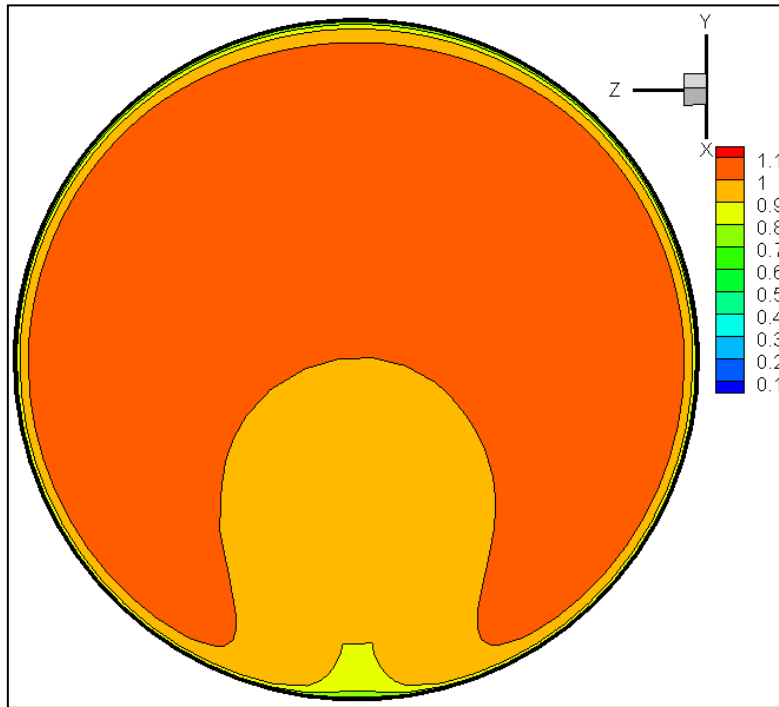
Εικόνα 6.3.1.1 Ισοταχείς Καμπύλες στο επίπεδο $z=0$



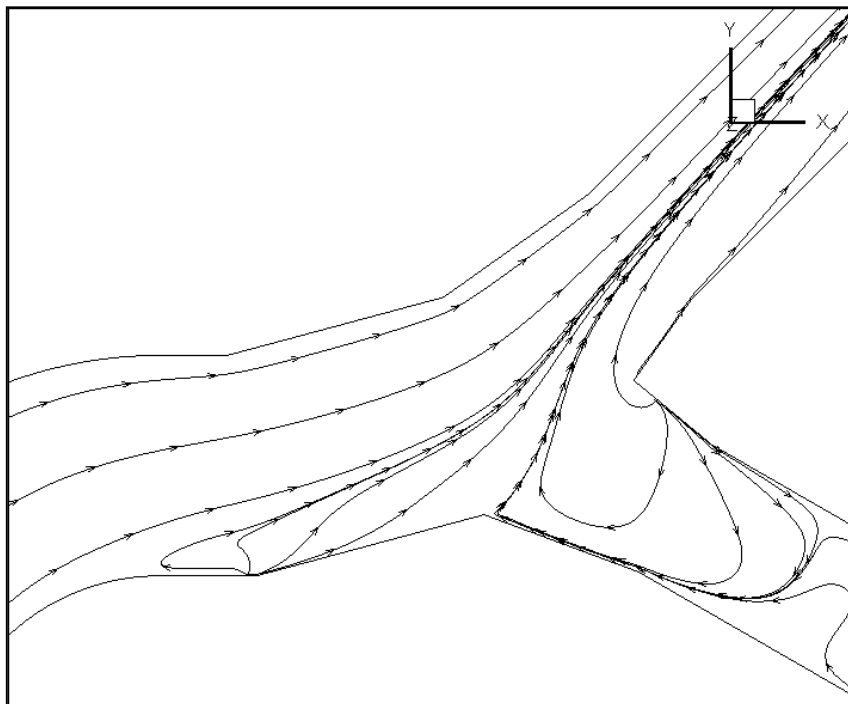
Εικόνα 6.2.1.1 Ισοταχείς Καμπύλες στο επίπεδο $z=0$ (λειτουργία με δύο ακροφύσια)

Στην εικόνα 6.3.1.2 παρουσιάζεται η αδιαστατοποιημένη ταχύτητα στην επιφάνεια $Y.1$. Αν και οι διακυμάνσεις δεν είναι μεγάλης έντασης οι διαφορές με την

αντίστοιχη επιφάνεια για τη λειτουργία με τα δύο ακροφύσια είναι εμφανής. Στην προκειμένη, η ανομοιομορφία είναι πολύ μεγαλύτερη. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό παρουσιάζεται στην εικόνα 6.3.1.3. Παρατηρείται ότι η ροή που διέρχεται από το κάτω μέρος της Υ.1 είναι ρευστό το οποίο αρχικά έχει οδηγηθεί στο κάτω τμήμα και έπειτα έχει αλλάξει κατεύθυνση προς το άνω τμήμα.

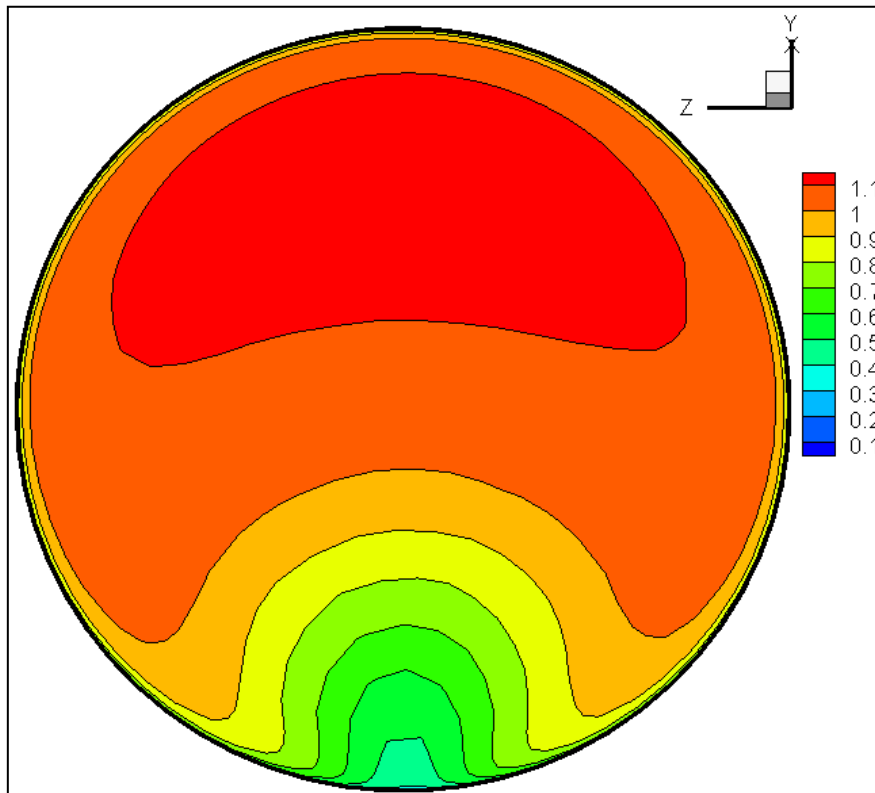


Εικόνα 6.3.1.2 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια Υ.1



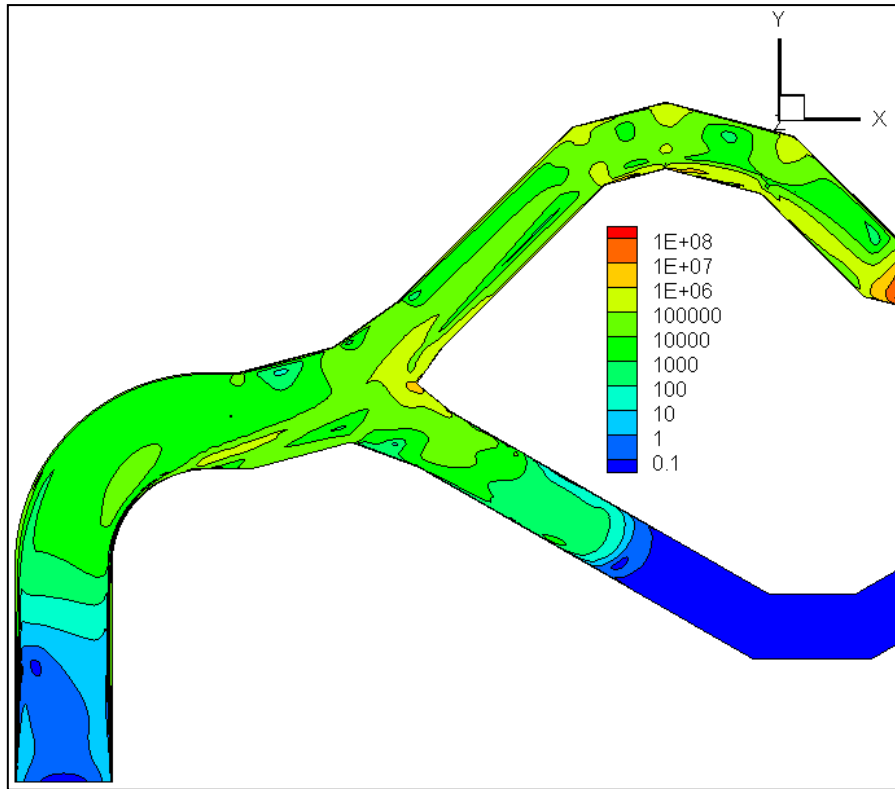
Εικόνα 6.3.1.3 Γραμμές Ροής στο επίπεδο $z=0$

Στην επιφάνεια O.1 ωστόσο το προφίλ της αδιάστατης ταχύτητας εμφανίζει σημαντικές ομοιότητες με την αντίστοιχη επιφάνεια για λειτουργία με δύο ακροφύσια. Στην προκειμένη η περιοχή της μέγιστης τιμής είναι λίγο πιο επεκταμένη.

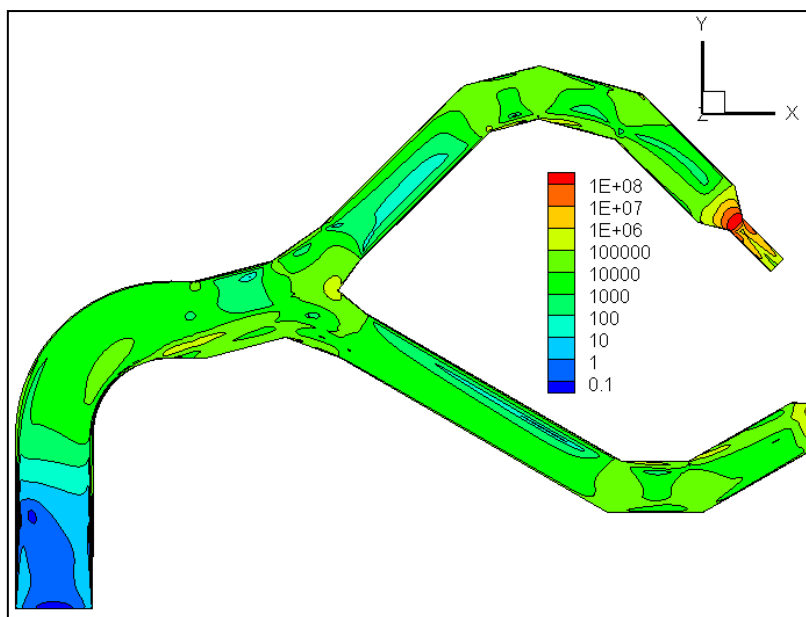


Εικόνα 6.3.1.4 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.1

Στην εικόνα 6.3.1.5 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες της διάχυσης της ενέργειας. Οι διαφορές που παρατηρούνται πριν τη διακλάδωση σε σχέση με την λειτουργία με δύο ακροφύσια είναι ελάχιστες. Στην διακλάδωση ωστόσο παρατηρούνται υψηλότερες τιμές Φ όπως και στις απότομες γωνίες. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι οι απώλειες της ενέργειας στο άνω ακροφύσιο είναι μεγαλύτερες όταν λειτουργεί μόνο του από όταν λειτουργούν και τα δύο ακροφύσια ταυτόχρονα.



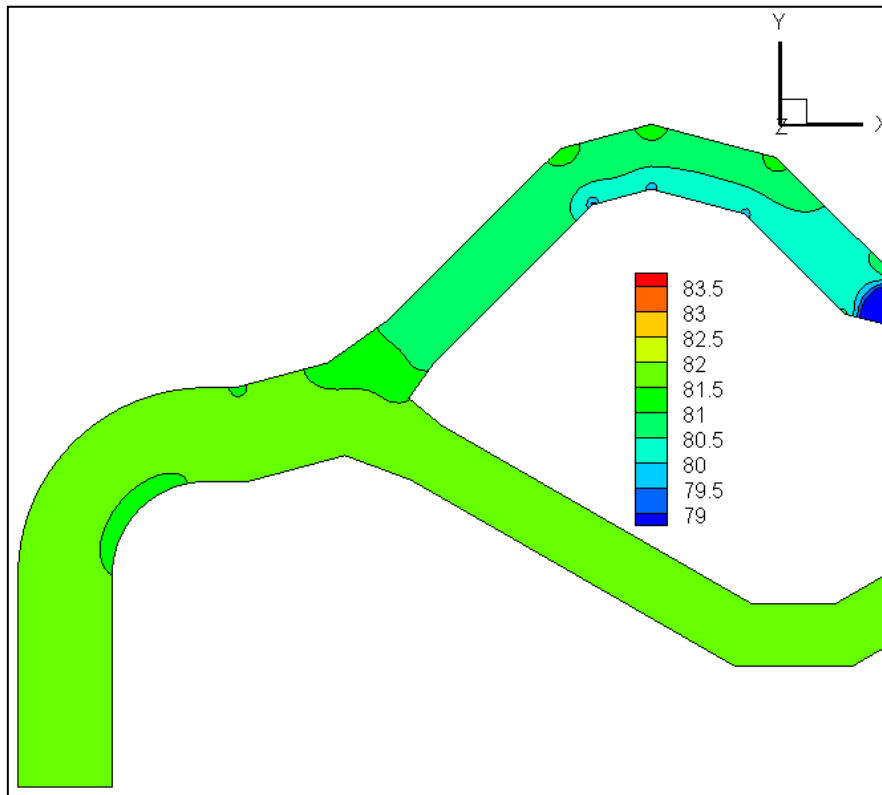
Εικόνα 6.3.1.5 Ισοϋψείς Καμπύλες Φ στο επίπεδο $z=0$



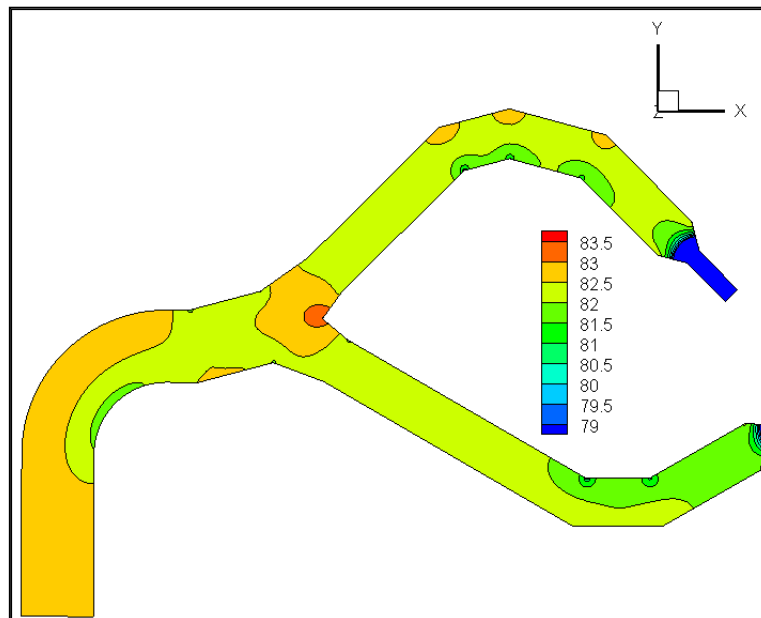
Εικόνα 6.2.1.9 Ισοϋψείς καμπύλες Φ στο επίπεδο $z=0$ (λειτουργία με δύο ακροφύσια)

Στην εικόνα 6.3.1.5α παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες της αδιασατοποιημένης στατική πίεσης στο επίπεδο $z=0$. Το προφίλ αυτό παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με το αντίστοιχο για λειτουργία με δύο ακροφύσια. Αρχικά, το μέτρο είναι μικρότερο. Επίσης, δεν εμφανίζονται υψηλές τιμές στην

διακλάδωση. Μπορεί οι ακραίες τιμές να εμφανίζονται στις απότομες γωνίες όπως συμβαίνει για λειτουργία με δύο ακροφύσια, ωστόσο η πίεση μειώνεται σταδιακά στο άνω τμήμα μετά την διακλάδωση.

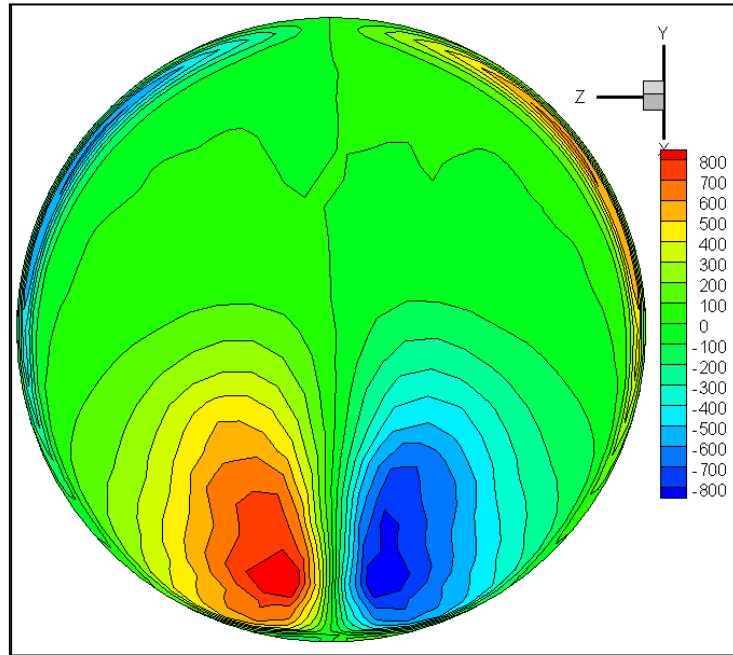


Εικόνα 6.3.1.5α Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Στατικής Πίεσης

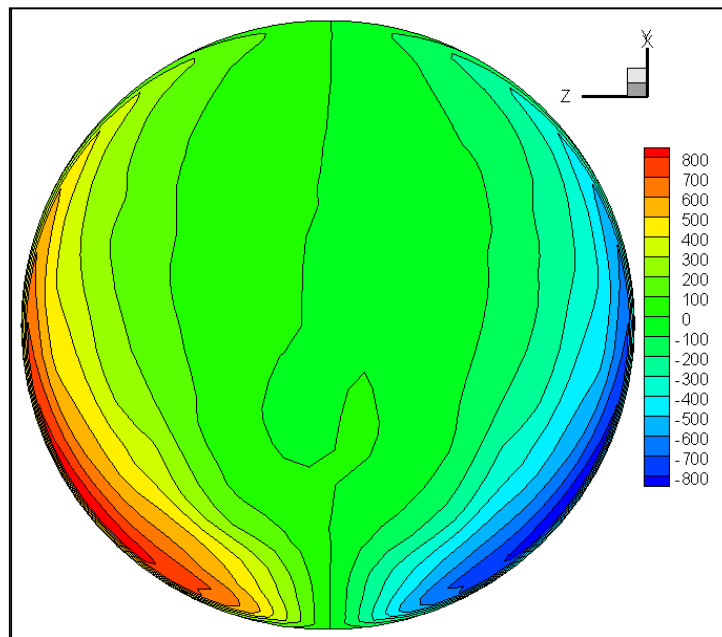


Εικόνα 6.2.1.14 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ολικής Πίεσης στο επίπεδο $z=0$ (λειτουργία με δύο ακροφύσια)

Όσον αφορά την ελικότητα, στην επιφάνεια O.1 (εικόνα 6.3.1.7), οι διακυμάνσεις είναι παρόμοιες με της αντίστοιχης επιφάνειας για την λειτουργία με δύο ακροφύσια. Στην επιφάνεια Y.1 το προφίλ της είναι τελείως διαφορετικό. Πλέον, οι ακραίες τιμές δεν εμφανίζονται αποκλειστικά στο άνω μέρος της διατομής αλλά και στο κάτω και μάλιστα όχι μόνο κοντά στα τοιχώματα αλλά και προς το κέντρο.

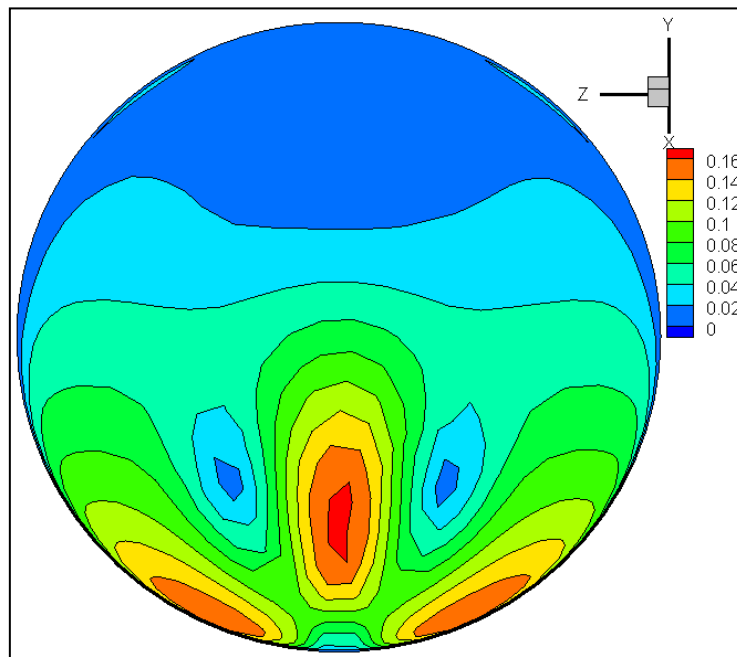


Εικόνα 6.3.1.6 Ισοϋψείς Καμπύλες Ελικότητας στην επιφάνεια Y.1

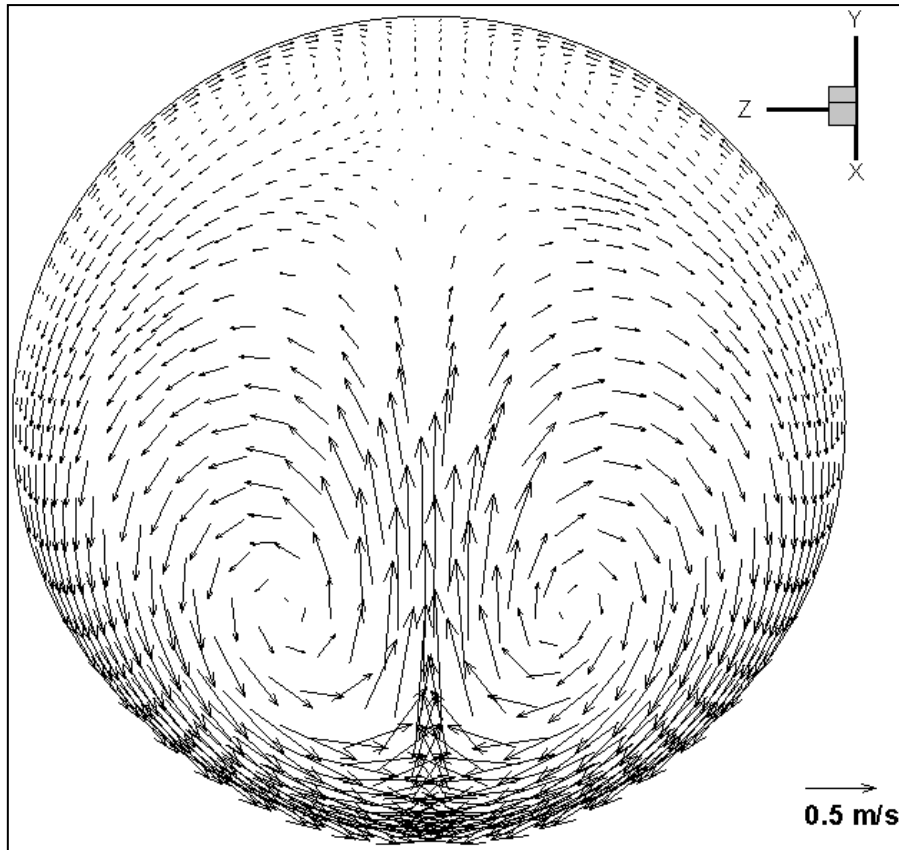


Εικόνα 6.3.1.7 Ισοϋψείς Καμπύλες Ελικότητας στην επιφάνεια O.1

Σημαντικές διαφορές σε σχέση με τη λειτουργία με δύο ακροφύσια παρατηρούνται στην Υ.1 και ως προς την εφαπτόμενη ταχύτητα. Το προφίλ του αδιαστατοποιημένου μέτρου της (εικόνα 6.3.1.8) δεν έχει καμία σχέση με την λειτουργία με δύο ακροφύσια. Στο άνω μισό της διατομής που προηγουμένως παρατηρούνταν οι υψηλές τιμές πλέον παρατηρούνται τιμές πολύ χαμηλές. Εν αντιθέσει, στο κάτω μισό που παρατηρούνταν οι χαμηλές τιμές, πλέον όχι μόνο παρατηρούνται οι υψηλές τιμές αλλά και εμφανίζονται πολύ έντονες διακυμάνσεις. Ενδεικτικό είναι και το διανυσματικό προφίλ της εφαπτόμενης ταχύτητας (εικόνα 6.3.1.9). Στο άνω μέρος της διατομής παρατηρούνται οι δίνες που εμφανίζονταν και στη λειτουργία με δύο ακροφύσια με μειωμένο μέτρο ενώ στο κάτω μέρος εμφανίζεται νέο ζεύγος δινών πολύ υψηλότερης έντασης.

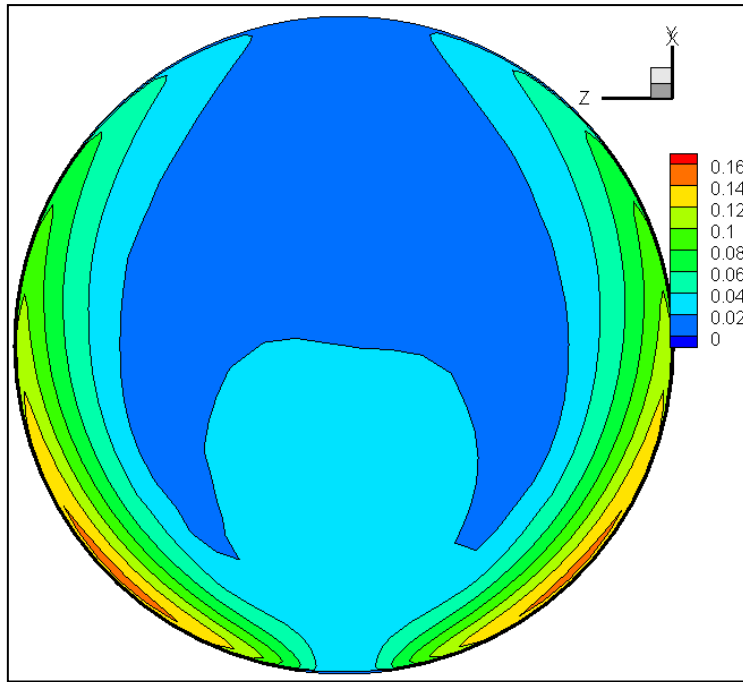


Εικόνα 6.3.1.8 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Υ.1

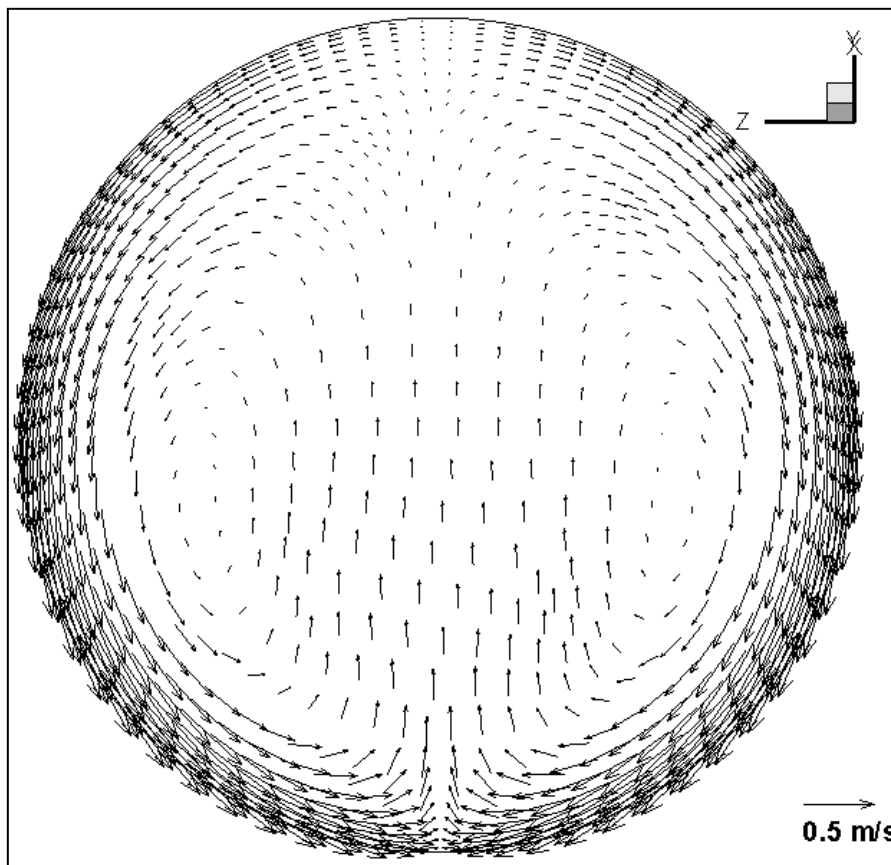


Εικόνα 6.3.1.9 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1

Στην επιφάνεια O.1 (εικόνες 7.3.1.10 και 7.3.1.11) το προφίλ των δευτερευουσών ροών εξομαλύνεται και παίρνει τη μορφή που είχε και για τη λειτουργία με δύο ακροφύσια. Το αδιαστατοποιημένο μέτρο παρουσιάζει μικρές διαφορές σε σχέση με τη λειτουργία με δύο ακροφύσια καθώς εμφανίζονται ελαφρά μεγαλύτερες τιμές σε μεγαλύτερο εύρος της διατομής.



Εικόνα 6.3.1.10 Ισοψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια 0.1



Εικόνα 6.3.1.11 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια 0.1

Ο ΑΣΔΡ των επιφανειών λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

- $Y.1 = 5.0568 \cdot 10^{-2}$
- $O.1 = 3.3456 \cdot 10^{-2}$

Παρατηρείται ότι στην επιφάνεια Y.1 ο ΑΣΔΡ σε σχέση με τη λειτουργία με δύο ακροφύσια είναι πολύ μεγαλύτερος ενώ στην O.1 σχεδόν διπλασιάζεται. Επίσης, είναι η πρώτη φορά που παρατηρείται ΑΣΔΡ μεγαλύτερος στην επιφάνεια Y.1 από την O.1.

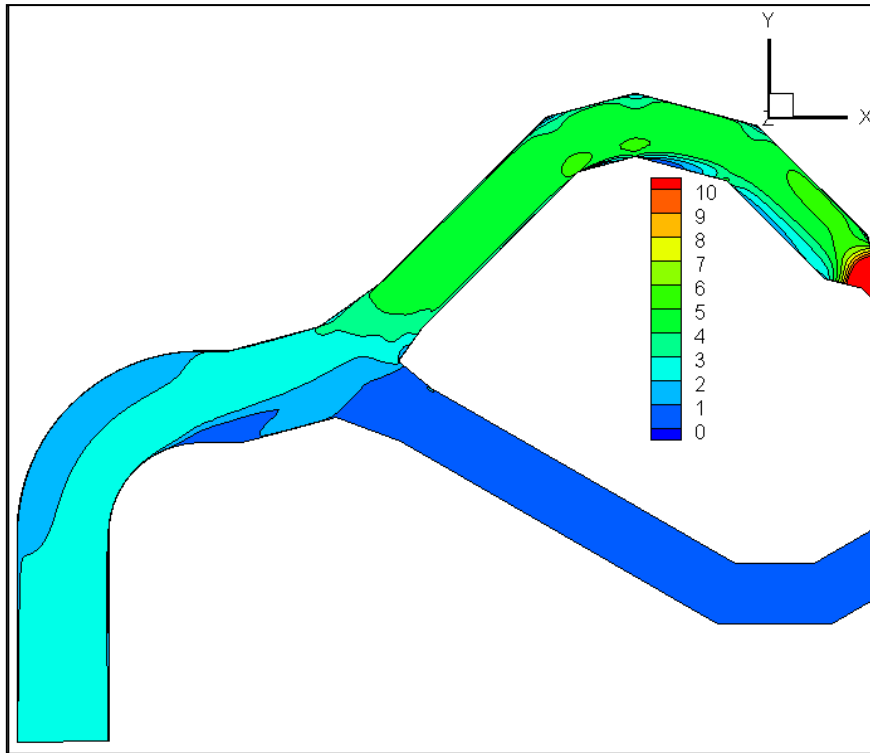
Η ολική πίεση στην είσοδο είναι 1495865 Pa, στην έξοδο 1 είναι 1490662.4 Pa και στην έξοδο 2 είναι 0 Pa. Η παροχή όγκου είναι 0.03757 m³/s στην είσοδο και στην έξοδο 1 και 0 στην έξοδο 2. Συνεπώς οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με:

$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2} = 195.462 \text{ J/s}$$

$$\text{Ενώ σε mΣΥ είναι: } E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}} = 0,5313 \text{ mΣΥ}$$

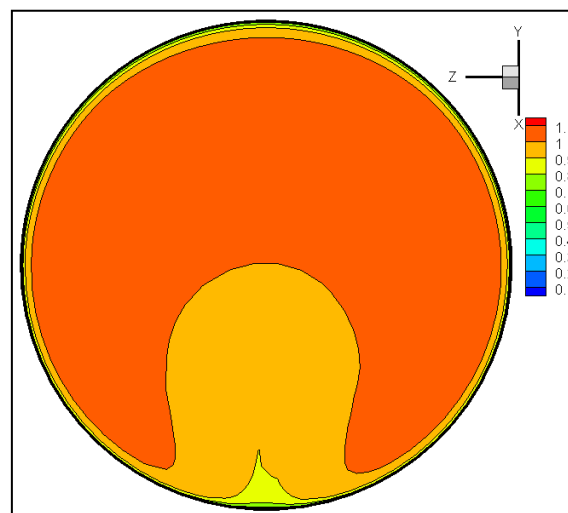
7.3.2 Παροχή 75%

Η παροχή 75% είναι 28.125 kg/s. Το προφίλ της ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού (εικόνα 6.3.2.1) παρουσιάζει μικρότερο μέτρο από της μέγιστης παροχής αλλά οι διακυμάνσεις έχουν αμελητέες διαφορές.

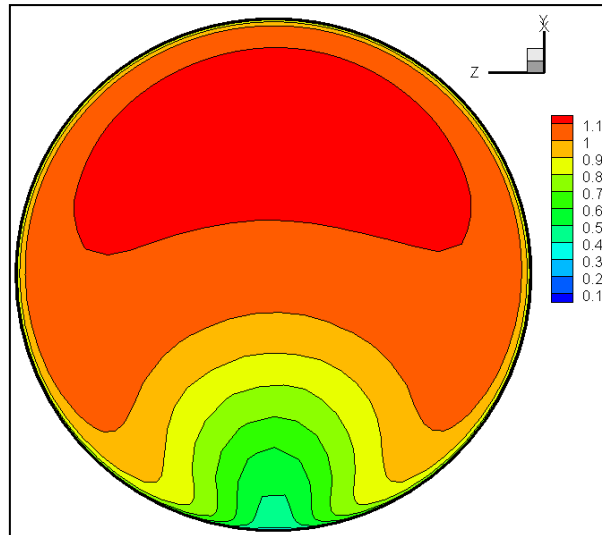


Εικόνα 6.3.2.1 Ισοταχείς Καμπύλες στο επίπεδο $z=0$

Αμελητέες διαφορές σε σχέση με τη μέγιστη παροχή παρουσιάζουν και τα προφίλ της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας στις επιφάνειες Y.1 (εικόνα 6.3.2.2) και O.1 (εικόνα 6.3.2.3).

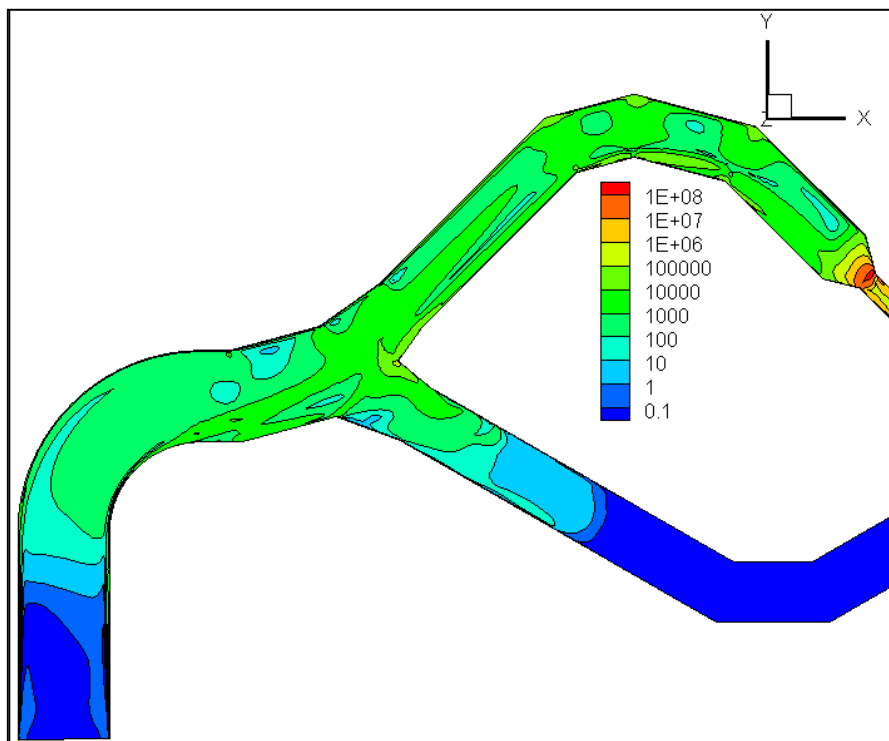


Εικόνα 6.3.2.2 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1



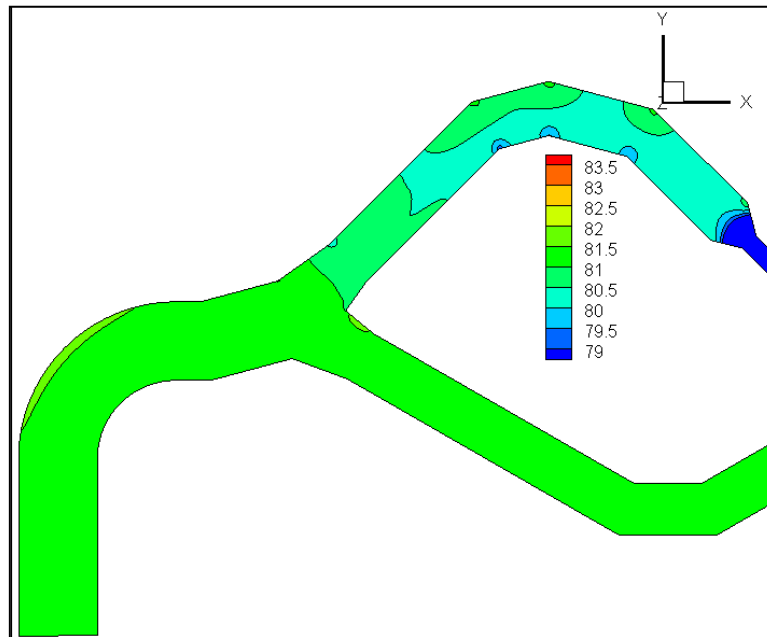
Εικόνα 6.3.2.3 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.1

Η διάχυση της ενέργειας, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.3.2.4, εμφανίζει μικρή μείωση κατά μήκος του αγωγού σε σχέση με την μέγιστη παροχή, με τις περιοχές των μικρών τιμών να διευρύνονται. Το ίδιο συμβαίνει και για την λειτουργία με δύο ακροφύσια και δικαιολογείται από το γεγονός ότι το Φ δεν είναι αδιάστατο μέγεθος.



Εικόνα 6.3.2.4 Ισοϋψείς Καμπύλες Φ στο επίπεδο $z=0$

Στην εικόνα 6.3.2.5 παρουσιάζονται οι ισούψεις καμπύλες της αδιάστατης στατικής πίεσης. Παρατηρείται σαφώς μεγαλύτερη ομοιομορφία τόσο σε σχέση με την μέγιστη παροχή όσο και σε σχέση με την λειτουργία με δύο ακροφύσια.



Εικόνα 6.2.3.5 Ισούψεις Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Στατικής Πίεσης στο επίπεδο $z=0$

Τα προφίλ της ελικότητας στις δύο διατομές εμφανίζουν τις ίδιες διακυμάνσεις με τις αντίστοιχες για την μέγιστη παροχή με την μόνο διαφορά ότι οι ακραίες τιμές είναι περίπου ± 500 . Για τον λόγο αυτό δεν παρουσιάζονται.

Το προφίλ των δευτερευουσών ροών δεν παρουσιάζει κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή σε σχέση με την μέγιστη παροχή με εξαίρεση φυσικά το μέτρο των διανυσμάτων το οποίο είναι ελαφρώς μειωμένο.

Ο ΑΣΔΡ των επιφανειών λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

- $Y.1 = 5.149 \cdot 10^{-2}$
- $O.1 = 3.4392 \cdot 10^{-2}$

Η μικρή αύξηση του ΑΣΔΡ που παρατηρείται είναι αναμενόμενη όπως ακριβώς συμβαίνει για την λειτουργία με δύο ακροφύσια.

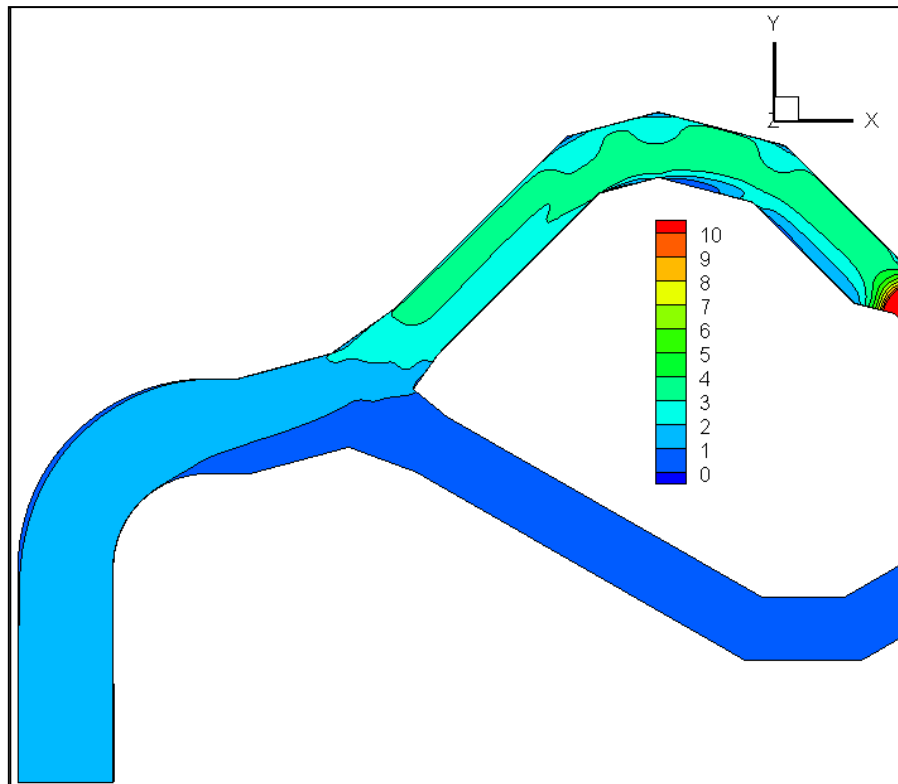
Η ολική πίεση στην είσοδο είναι 839519.3 Pa, στην έξοδο 1 είναι 836481.9 Pa και στην έξοδο 2 είναι 0 Pa. Η παροχή όγκου είναι $0.028176 \text{ m}^3/\text{s}$ στην είσοδο και στην έξοδο 1 και 0 στην έξοδο 2. Συνεπώς οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με:

$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2} = 85.58 \text{ J/s}$$

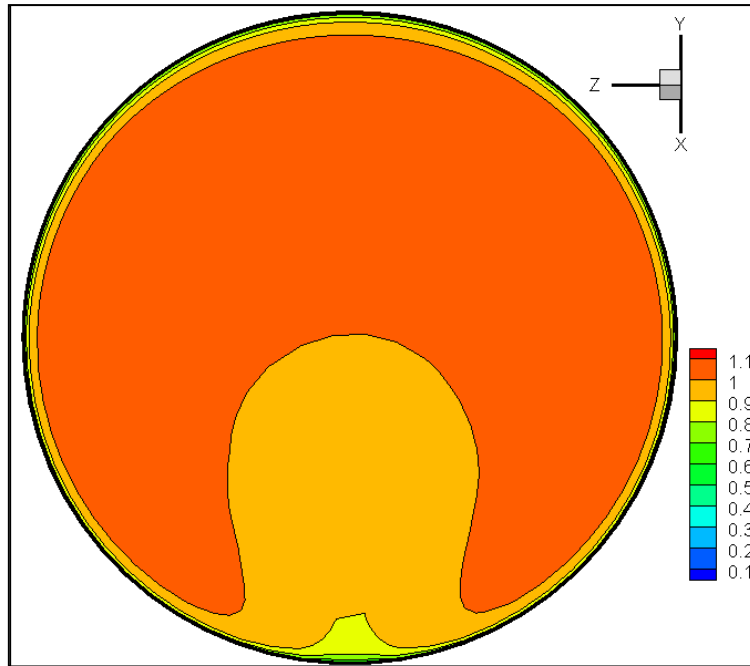
Ενώ σε mΣΥ είναι: $E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}} = 0,3102 \text{ mΣΥ}$

6.3.3 Παροχή 50%

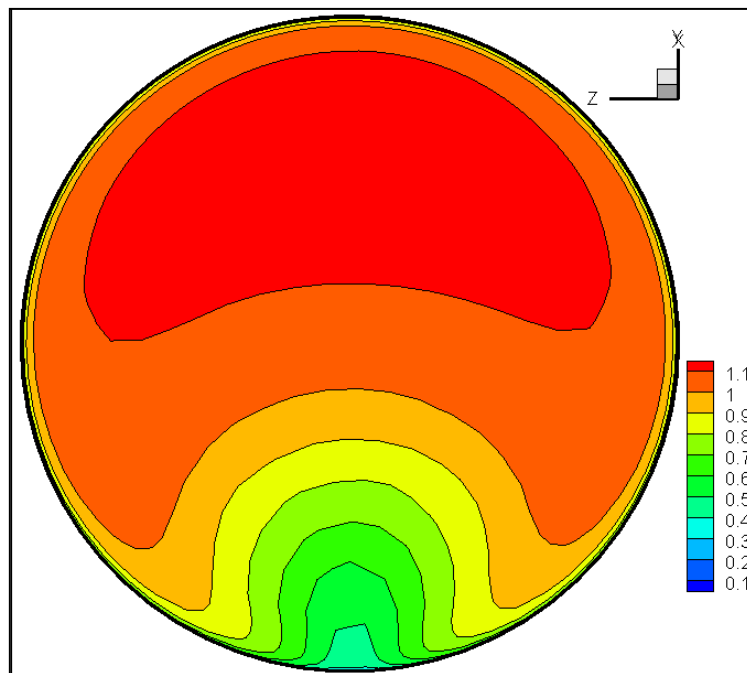
Η παροχή 50% είναι 18.75 kg/s. Η ταχύτητα κατά μήκος του αγωγού (εικόνα 7.3.4.1) παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιομορφία πριν την διακλάδωση και παρόμοιες διακυμάνσεις λίγο μικρότερης έντασης μετά την διακλάδωση σε σχέση με τις μεγαλύτερες παροχές. Η αδιαστατοποιημένη ταχύτητα εμφανίζει αμελητέες διαφορές τόσο στην επιφάνεια Y.1 (εικόνα 7.3.4.2) όσο και στην επιφάνεια O.1 (εικόνα 7.3.4.3)



Εικόνα 6.3.3.1 Ισοταχείς Καμπύλες στο επίπεδο $z=0$

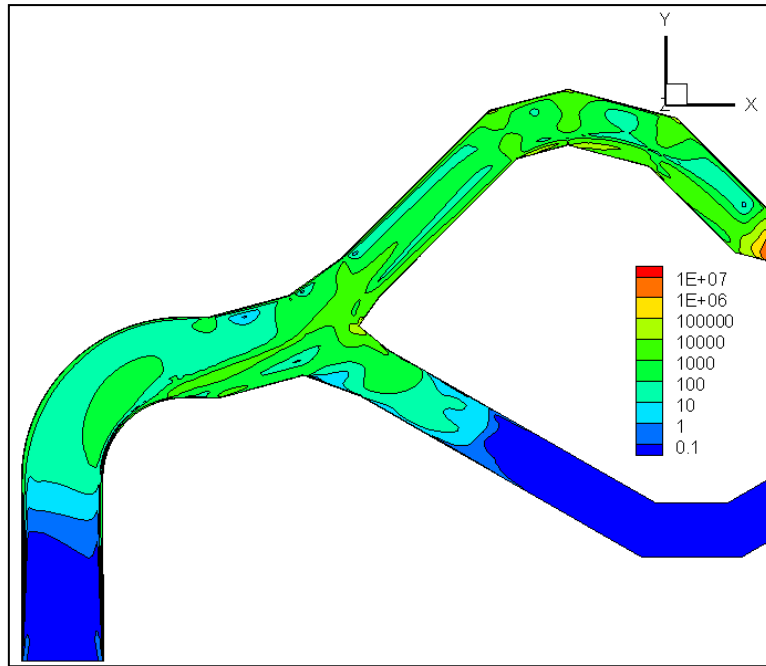


Εικόνα 6.3.3.2 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1



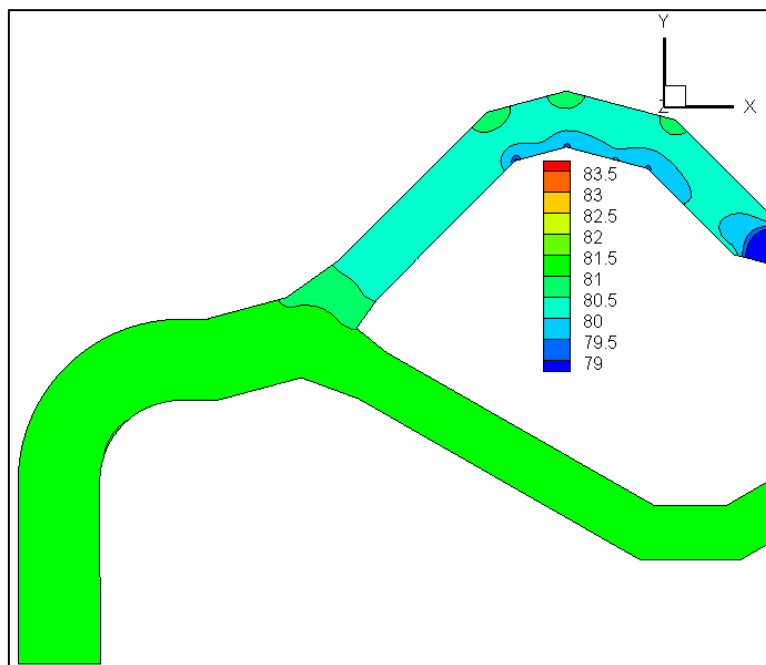
Εικόνα 6.3.3.3 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.1

Στην εικόνα 6.3.3.4 παρουσιάζεται το προφίλ της διάχυσης της ενέργειας. Παρατηρείται ότι το Φ παίρνει μικρότερες τιμές κατά μήκος του αγωγού χωρίς άλλες αξιοσημείωτες μεταβολές σε σχέση με τις προηγούμενες παροχές.



Εικόνα 6.3.3.4 Ισοϋψείς Καμπύλες Φ στο επίπεδο $z=0$

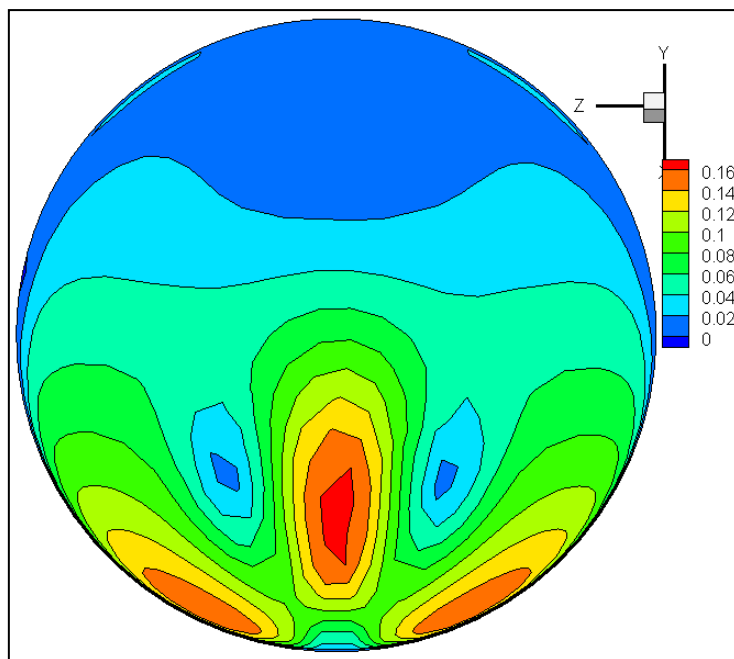
Στην εικόνα 6.3.3.5 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες της αδιάστατης στατικής πίεσης. Παρατηρούνται κάπως μεγαλύτερες διακυμάνσεις σε σχέση με την παροχή 75% ειδικά μετά την διακλάδωση. Το μέτρο είναι ελαφρώς μειωμένο.



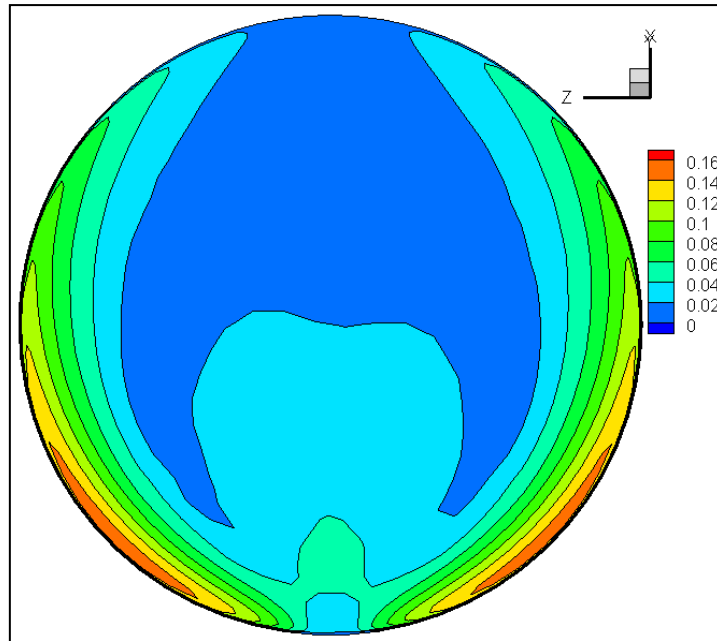
Εικόνα 6.3.3.5 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Στατικής Πίεσης στο επίπεδο $z=0$

Όπως και για την παροχή 75% η ελικότητα δεν εμφανίζει αξιοσημείωτες μεταβολές όσον αφορά τις διακυμάνσεις στις διατομές Y.1 και O.1. Οι ακραίες τιμές που εμφανίζονται είναι περίπου ± 220 .

Όσον αφορά τις δευτερεύουσες ροές που εμφανίζονται όπως προκύπτει από τις διανυσματικές απεικονίσεις η φορά τους είναι ίδια και το μέτρο τους ελαφρώς μειωμένο. Στην επιφάνεια Y.1 (εικόνα 6.3.3.6) οι διαφορές στο αδιαστατοποιημένο μέτρο της επαπτόμενης ταχύτητας σε σχέση με τις μεγαλύτερες παροχές είναι αμελητέες. Στην επιφάνεια O.1 ωστόσο (εικόνα 6.3.3.7) παρατηρείται ότι το αδιαστατοποιημένο μέτρο αυξάνεται ελαφρά και στο κάτω μέρος της διατομής κοντά στα τοιχώματα εμφανίζεται περιοχή μεγαλύτερου μέτρου από αυτές που παρατηρούνται για τις μεγαλύτερες παροχές.



Εικόνα 6.3.3.6 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1



Εικόνα 6.3.3.7 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια Ο.1

Ο ΑΣΔΡ των επιφανειών λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

- $Y.1 = 5.3115 \cdot 10^{-2}$
- $O.1 = 3.5723 \cdot 10^{-2}$

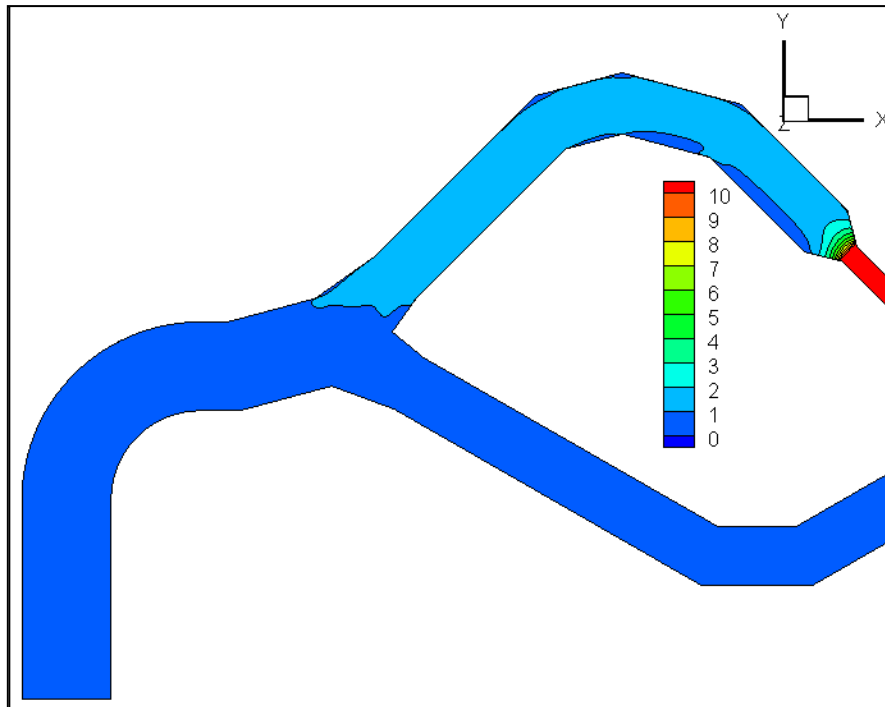
Η ολική πίεση στην είσοδο είναι 372163.34 Pa, στην έξοδο 1 είναι 370736.31 Pa και στην έξοδο 2 είναι 0 Pa. Η παροχή όγκου είναι $0.018785 \text{ m}^3/\text{s}$ στην είσοδο και στην έξοδο 1 και 0 στην έξοδο 2. Συνεπώς οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με:

$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2} = 26.8068 \text{ J/s}$$

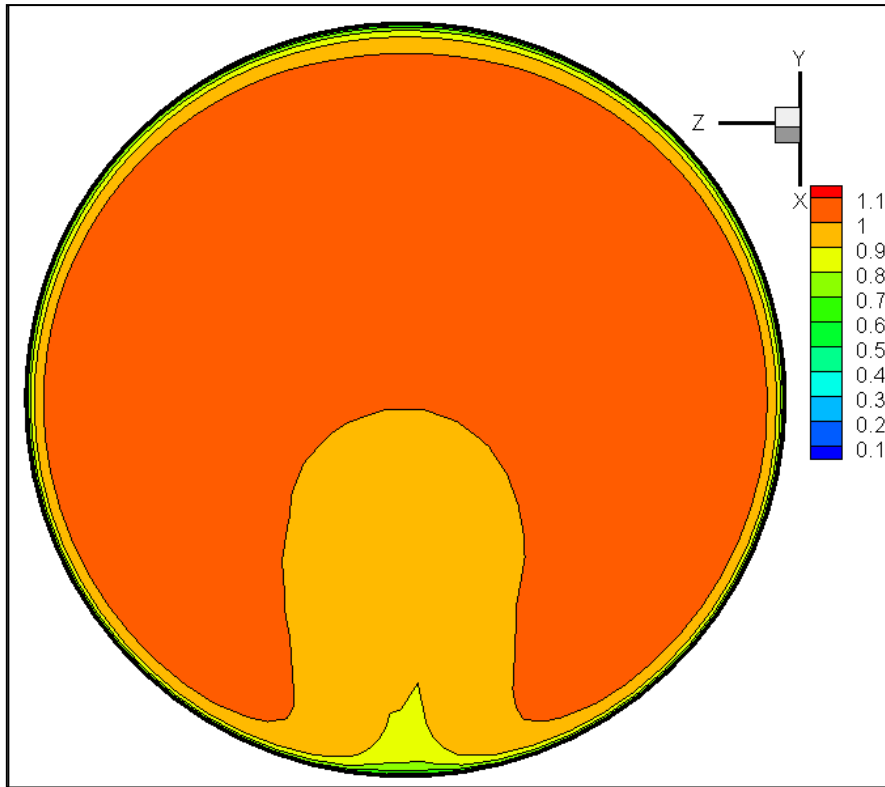
Ενώ σε mΣΥ είναι: $E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}} = 0,1457 \text{ mΣΥ}$

6.3.4 Παροχή 25%

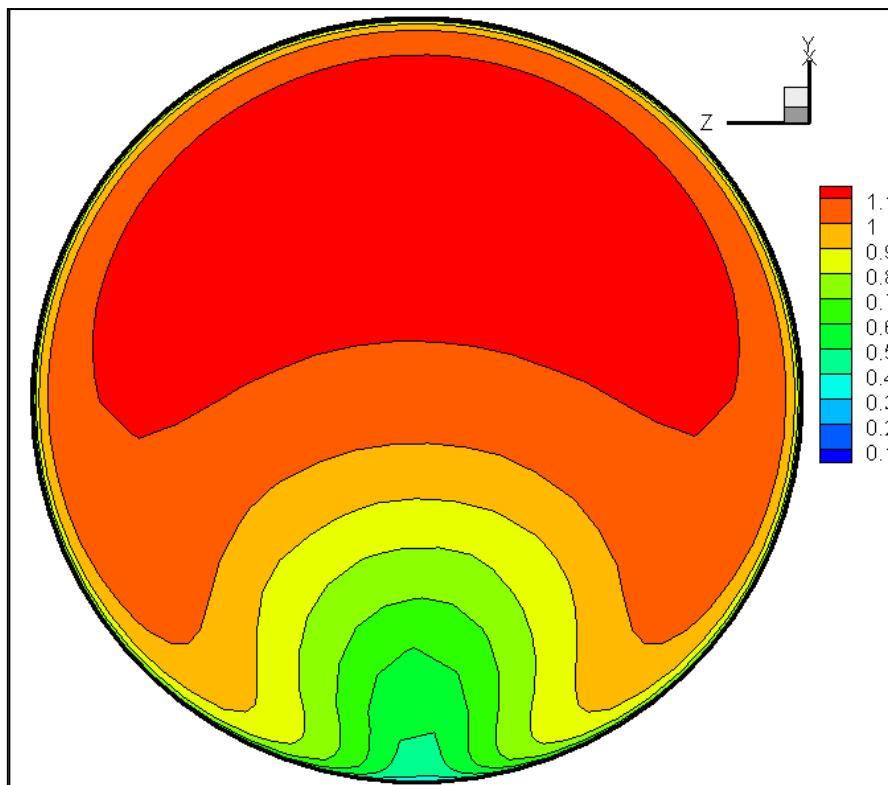
Η παροχή 25% είναι 9.375 kg/s. Η ταχύτητα κατά μήκος του αγωγού (εικόνα 6.3.4.1) παρουσιάζει πολύ μεγάλη ομοιομορφία πριν την διακλάδωση και διακυμάνσεις μικρότερης έντασης μετά την διακλάδωση σε σχέση με τις μεγαλύτερες παροχές. Η αδιαστατοποιημένη ταχύτητα εμφανίζει αμελητέες διαφορές τόσο στην επιφάνεια Y.1 (εικόνα 6.3.4.2) όσο και στην επιφάνεια O.1 (εικόνα 6.3.4.3)



Εικόνα 6.3.4.1 Ισοταχείς Καμπύλες στο επίπεδο $z=0$

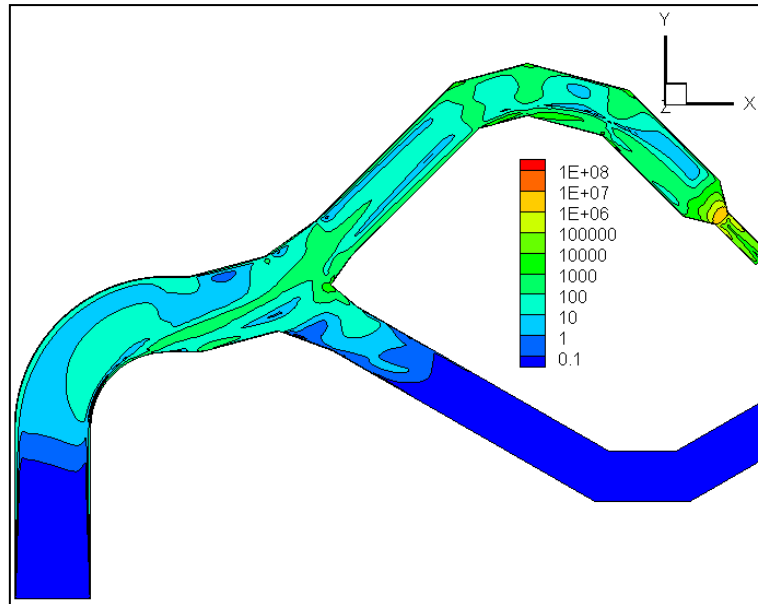


Εικόνα 6.3.4.2 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1



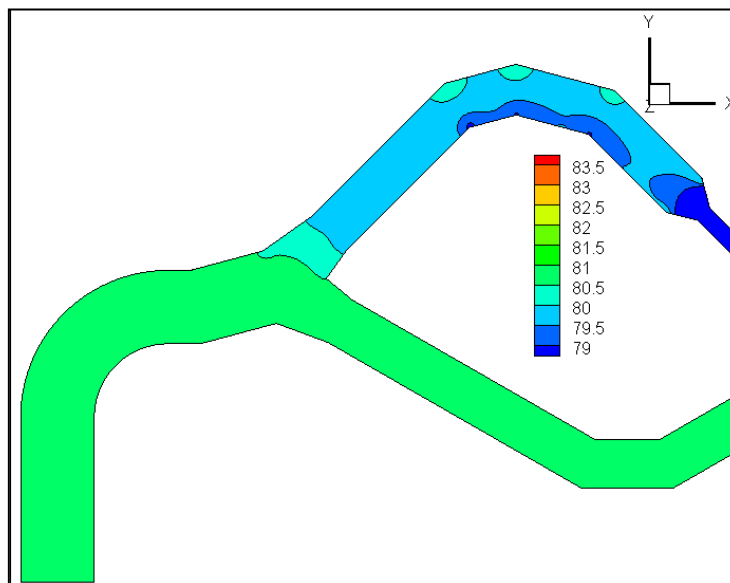
Εικόνα 6.3.4.3 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.1

Η διάχυση της ενέργειας (εικόνα 6.3.4.4) παρουσιάζει μικρότερες τιμές σε σχέση με τις μεγαλύτερες παροχές. Οι υψηλότερες τιμές εξακολουθούν να εμφανίζονται στην περιοχή της διακλάδωσης και στις απότομες γωνίες του αγωγού κοντά στα τοιχώματα.



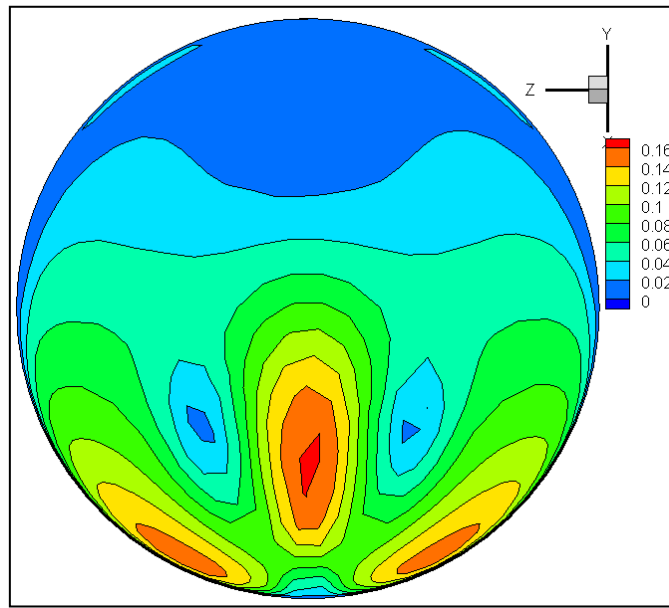
Εικόνα 6.3.4.4 Ισοϋψείς Καμπύλες Φ στο επίπεδο $z=0$

Στην εικόνα 6.3.4.5 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες της αδιαστατοποιημένης στατικής πίεσης κατά μήκος του αγωγού. Παρατηρείται μεγάλη ομοιομορφία στο τμήμα πριν την διακλάδωση ενώ μετά την διακλάδωση οι διακυμάνσεις παρατηρούνται στις απότομες γωνίες του αγωγού.

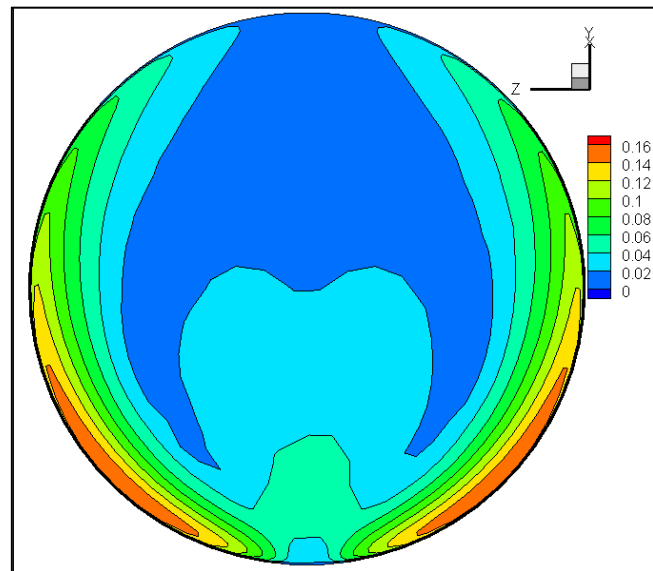


Εικόνα 6.3.4.5 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Στατικής Πίεσης στο επίπεδο $z=0$

Η φορά των δευτερευουσών ροών στις διατομές Y.1 και O.1 αντίστοιχα παραμένει αμετάβλητη ενώ το μέτρο τους έχει μειωθεί όπως είναι αναμενόμενο σε σχέση με τις μεγαλύτερες παροχές. Όσον αφορά το αδιαστατοποιημένο μέτρο τους, η επιφάνεια Y.1 (εικόνα 6.3.4.6) παρουσιάζει αμελητέες μεταβολές ενώ στην επιφάνεια O.1 (εικόνα 6.3.4.7) παρατηρείται αύξηση στο κάτω μέρος της διατομής ιδιαίτερα κοντά στο τοίχωμα.



Εικόνα 7.3.4.6 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.1



Εικόνα 7.3.4.8 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.1

Ο ΑΣΔΡ των επιφανειών λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

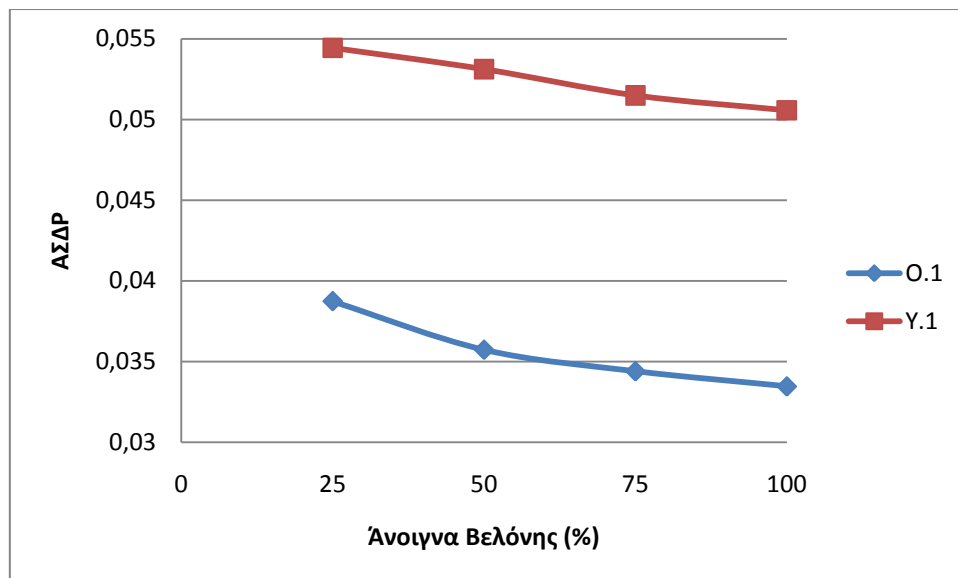
- $Y.1 = 5.4434 \cdot 10^{-2}$
- $O.1 = 3.8729 \cdot 10^{-2}$

Η ολική πίεση στην είσοδο είναι 92498.93 Pa, στην έξοδο 1 είναι 92110.6 Pa και στην έξοδο 2 είναι 0 Pa. Η παροχή όγκου είναι 0.009392 m³/s στην είσοδο και στην έξοδο 1 και 0 στην έξοδο 2. Συνεπώς οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με:

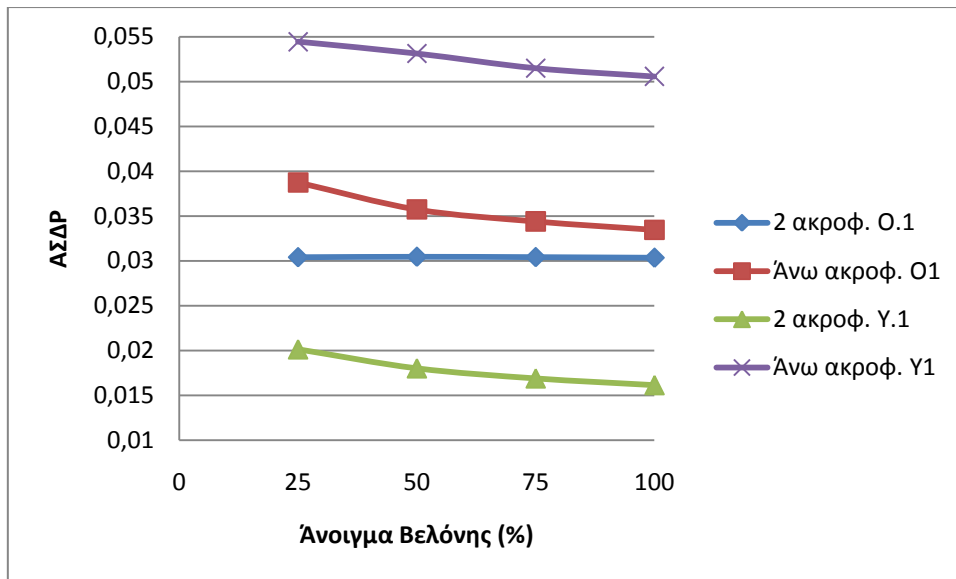
$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2} = 3.6471 \text{ J/s}$$

$$\text{Ενώ σε mΣΥ είναι: } E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}} = 0,03966 \text{ mΣΥ}$$

Στο διάγραμμα 6.3.1 παρουσιάζεται η μεταβολή των ΑΣΔΡ των επιφανειών για τις διάφορες παροχές. Όπως συμβαίνει και για την λειτουργία με δύο ακροφύσια ο ΑΣΔΡ αυξάνει καθώς μειώνεται η παροχή μάζας. Σε αυτή την περίπτωση λειτουργίας ωστόσο ο ΑΣΔΡ της επιφάνειας O.1 μεταβάλλεται αισθητά κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην περίπτωση λειτουργίας με δύο ακροφύσια. Οι τιμές ΑΣΔΡ που παρατηρούνται σε αυτή την περίπτωση λειτουργίας είναι μεγαλύτερες από αυτές που παρατηρήθηκαν στην περίπτωση λειτουργίας με τα δύο ακροφύσια ανοιχτά ειδικά για την επιφάνεια Y.1. Συγκεκριμένα, όπως προκύπτει και από το διάγραμμα 6.3.1α ο ΑΣΔΡ της Y.1 για λειτουργία μόνο με το άνω ακροφύσιο είναι σχεδόν τριπλάσιος από τον ΑΣΔΡ για λειτουργία με δύο ακροφύσια. Οι διαφορές είναι μικρότερες για την O.1 καθώς στο πλήρες άνοιγμα της βελόνης οι ΑΣΔΡ για τις δύο περιπτώσεις λειτουργίας είναι πολύ κοντινοί.

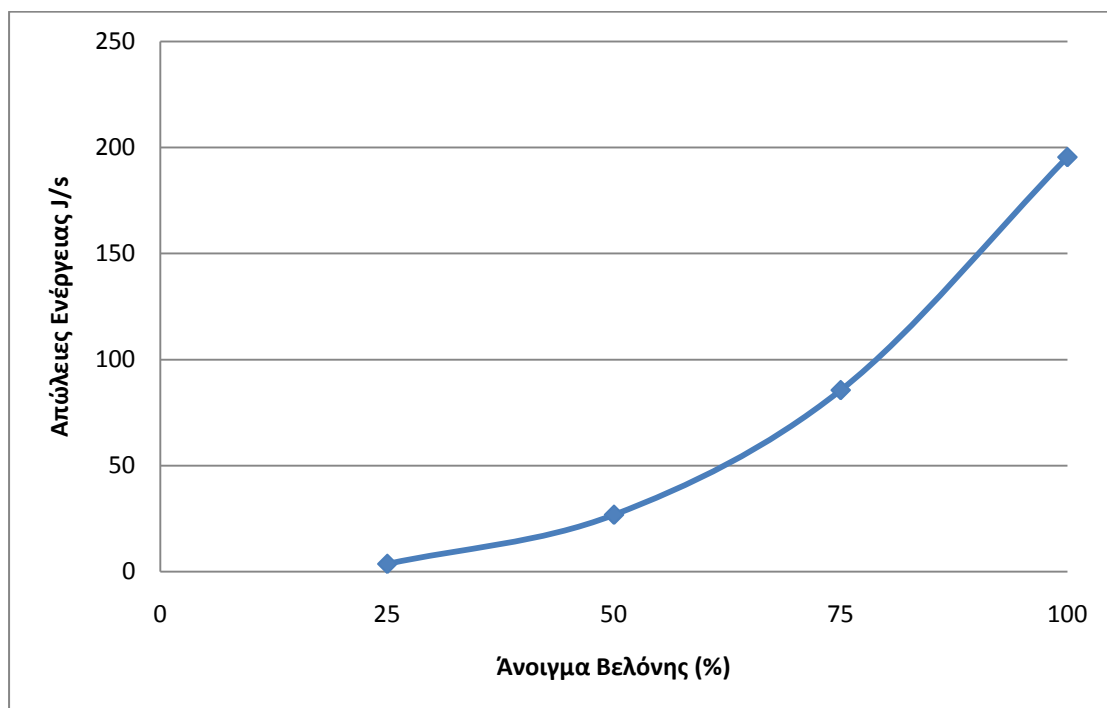


Διάγραμμα 6.3.1 ΑΣΔΡ συναρτήσεως του Ανοίγματος της Βελόνης

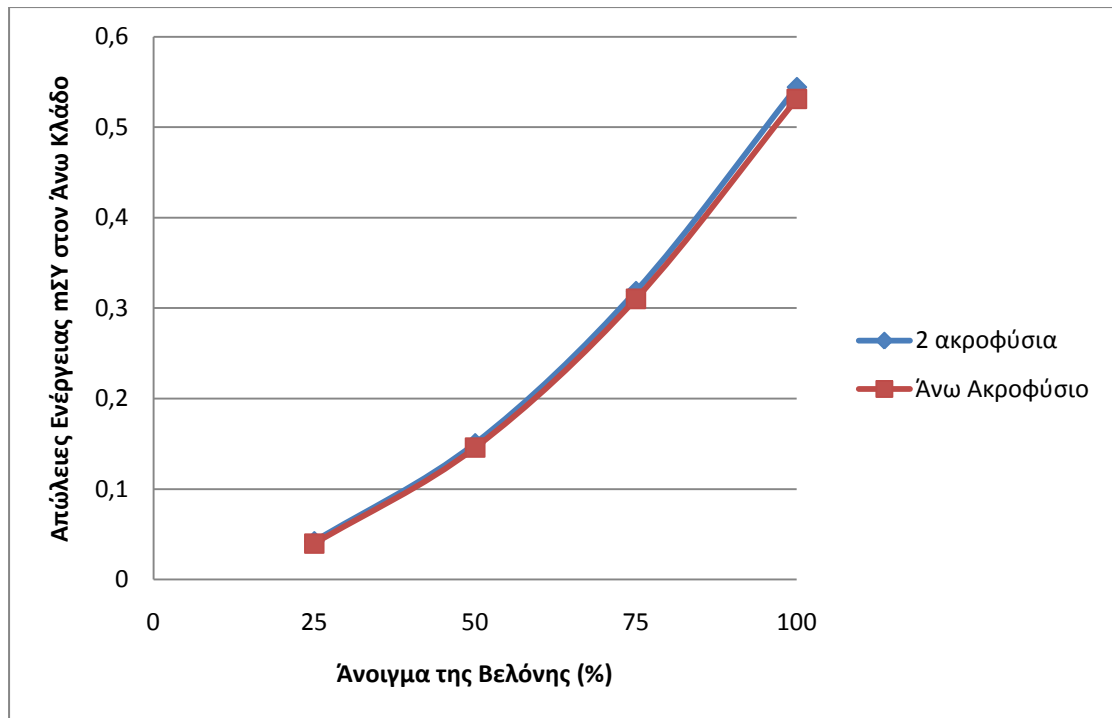


Διάγραμμα 7.3.1α ΑΣΔΡ συναρτήσεως της Παροχής Μάζας για τις περιπτώσεις λειτουργίας

Στο διάγραμμα 7.3.2 παρουσιάζεται η μεταβολή των απωλειών ενέργειας σε συνάρτηση με την παροχή μάζας. Όπως συμβαίνει και με τη λειτουργία με δύο ακροφύσια οι απώλειες αυξάνονται εκθετικά με την παροχή μάζας.



Διάγραμμα 7.3.2 Απώλειες Ενέργειας συναρτήσεως του Ανοίγματος της Βελόνης (%)



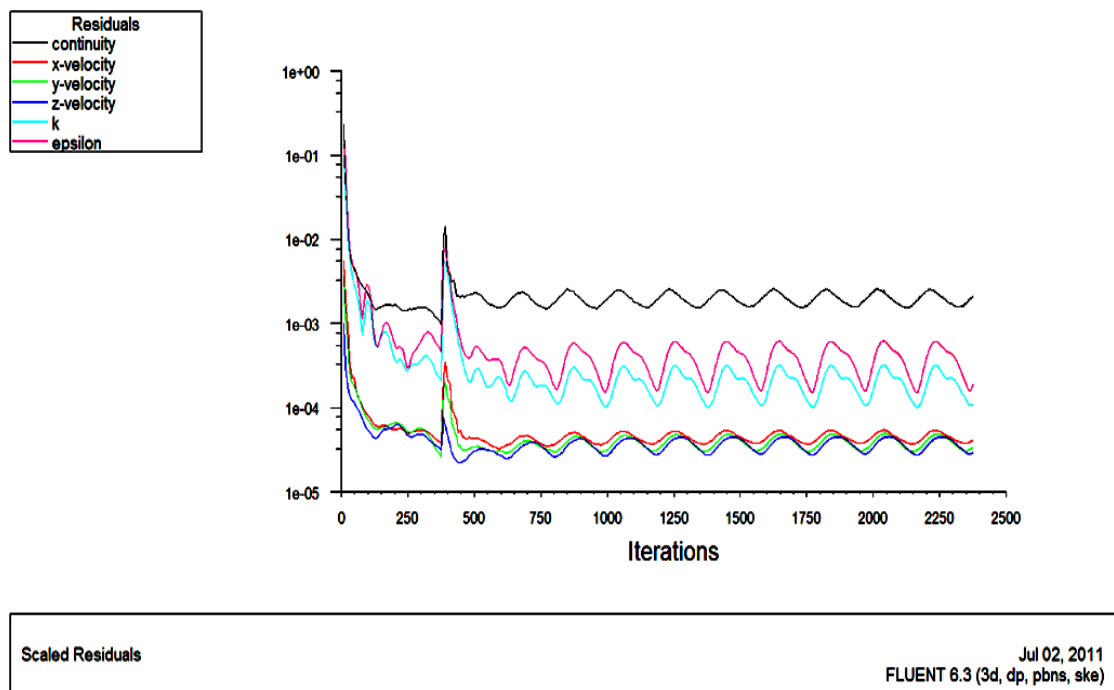
Διάγραμμα 7.3.3 Απώλειες Ενέργειας στον Άνω Κλάδο συναρτήσει του Ανοίγματος της Βελόνης (%) για τις περιπτώσεις λειτουργίας

Από το διάγραμμα 7.3.3 είναι εμφανές ότι οι απώλειες ενέργειας σε mSY που εμφανίζονται στον άνω κλάδο παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές για τις δύο περιπτώσεις λειτουργίας. Συγκεκριμένα κατά τη λειτουργία μόνο με το άνω ακροφύσιο οι απώλειες είναι ελαφρώς μικρότερες σε σχέση με τη λειτουργία με δύο ακροφύσια.

6.4 Λειτουργία με το Κάτω Ακροφύσιο

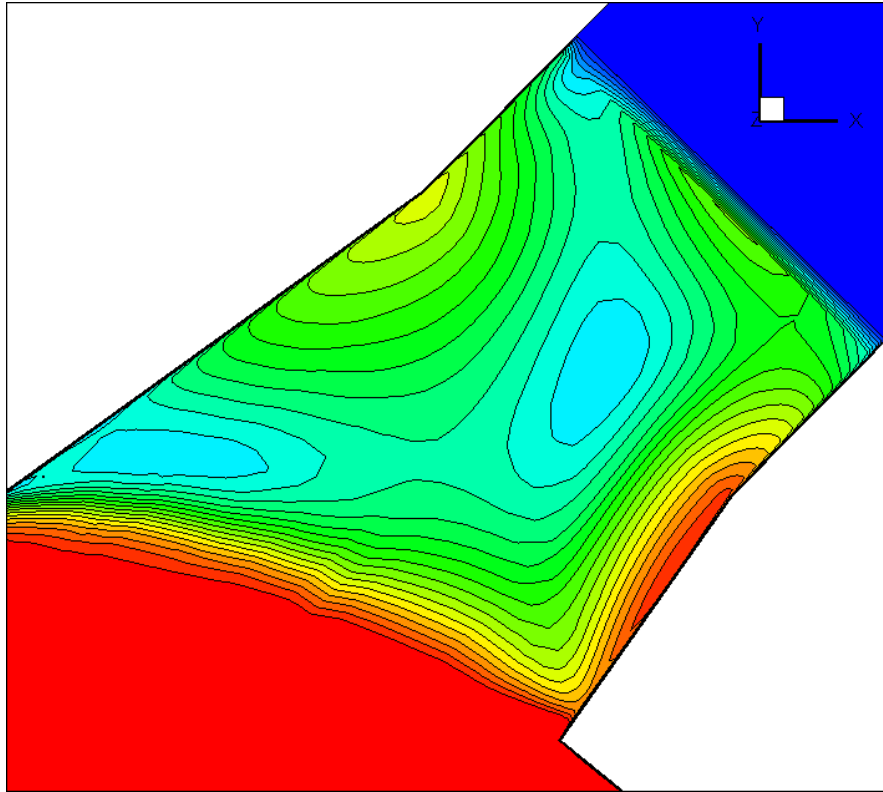
Κατά την αριθμητική επίλυση της ροής για λειτουργία μόνο με το κάτω ακροφύσιο ανοιχτό αρχικά ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που είχε ακολουθηθεί για τη λειτουργία με το άνω ακροφύσιο. Η εσωτερική επιφάνεια της εισόδου του ακροφυσίου χαρακτηρίστηκε ως τοίχωμα και έπειτα έγιναν οι επαναλήψεις. Ωστόσο, η σύγκλιση δεν ήταν δυνατή, υπό την έννοια ότι τα υπόλοιπα δεν έφταναν σε αρκετά μικρές τάξεις για να υπάρχει η απαιτούμενη ακρίβεια. Αυτό συνέβη διότι η ροή σε οποιοδήποτε αγωγό δεν είναι μόνιμο φαινόμενο. Ενώ στις δύο προηγούμενες λειτουργίες οι διακυμάνσεις με το χρόνο δεν ήταν τόσο έντονες ώστε να δημιουργείται πρόβλημα στην προκειμένη περίπτωση δεν ήταν δυνατό να εξεταστεί η ροή υπό αυτές τις συνθήκες ως μόνιμο φαινόμενο. Για τους λόγους αυτούς, είχε προβλεφθεί εναλλακτικός τρόπος επίλυσης. Με δεδομένο ότι τα φαινόμενα που δεν μπορούσαν να εξεταστούν ως μόνιμα, εμφανίζονταν, κατά κύριο λόγο, στον άνω αγωγό που ήταν κλειστός στο ένα τμήμα του, χαρακτηρίστηκε ως τοίχωμα η επιφάνεια Υ.1 που βρίσκεται λίγο μετά την διακλάδωση. Με αυτό τον τρόπο θα ήταν δυνατό, σε θεωρητικό επίπεδο τουλάχιστον, να γίνει υπολογισμός της ροής εξετάζοντας τη ως μόνιμο φαινόμενο. Ωστόσο, και αυτή η προσπάθεια ήταν ανεπιτυχής.

Στην εικόνα 6.4.1 παρουσιάζονται τα υπόλοιπα κατά τις επαναλήψεις στο Fluent. Στο σημείο που παρουσιάζονται οι απότομες κορυφές για τα έξι μεγέθη έγινε η αλλαγή από πρώτη σε δεύτερης τάξης διακριτοποίηση. Είναι εμφανές ότι στις 2000 επαναλήψεις που γίνονται για διακριτοποίηση δεύτερης τάξης, τα υπόλοιπα ταλαντώνονται χωρίς ποτέ να οδηγούνται προς την επιθυμητή τάξη του 10^{-6} .

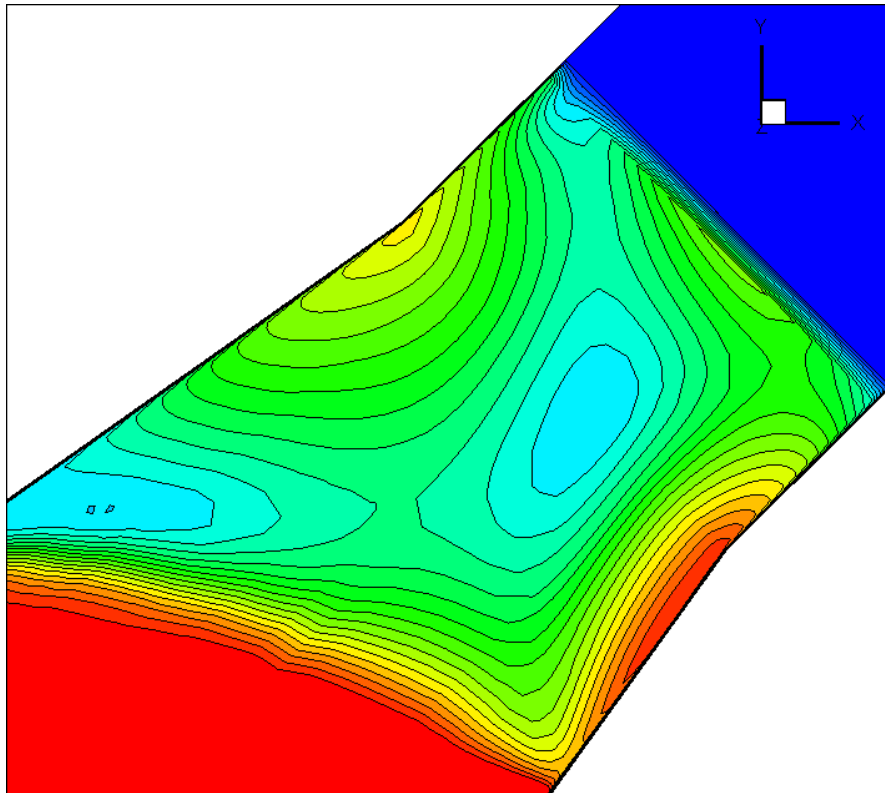


Εικόνα 6.4.1 Διάγραμμα Υπολοίπων συναρτήσει Επαναλήψεων

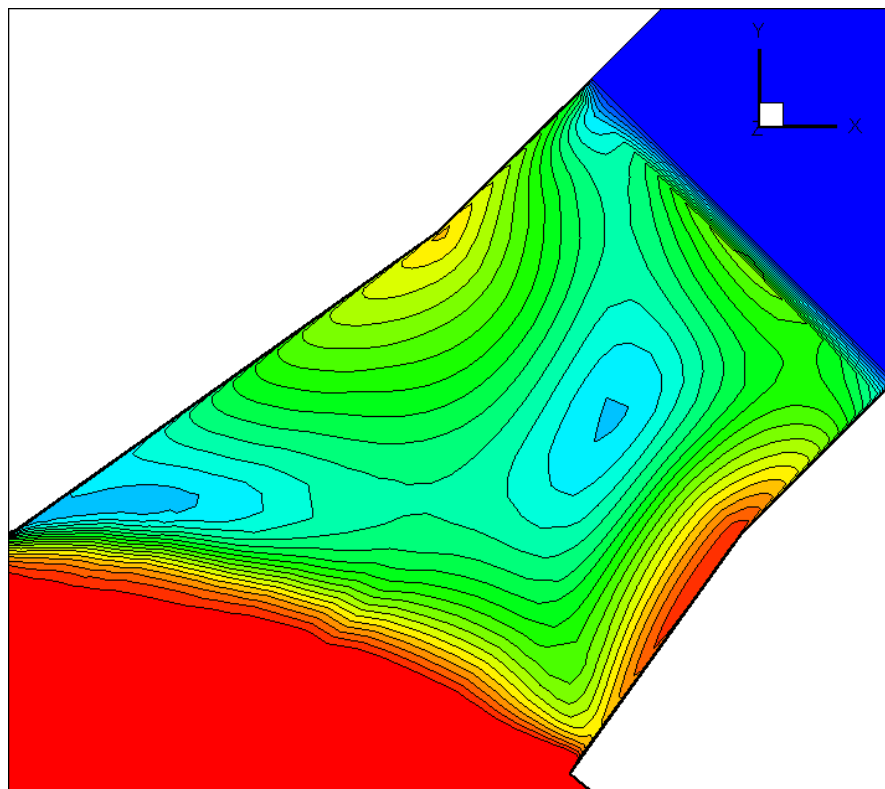
Μετά τις 2000 επαναλήψεις με διακριτοποίηση δεύτερης τάξης παρουσιάζονται οι ισοταχείς καμπύλες στην διακλάδωση στο άνω τμήμα για 2000, 2010 και 2020 επαναλήψεις καθώς και οι ισοϋψείς καμπύλες της στατικής πίεσης στην επιφάνεια Υ.1. Το Tecplot ρυθμίστηκε ώστε να εμφανίζει ακριβώς τα ίδια επίπεδα ταχύτητας και στις τρεις περιπτώσεις.



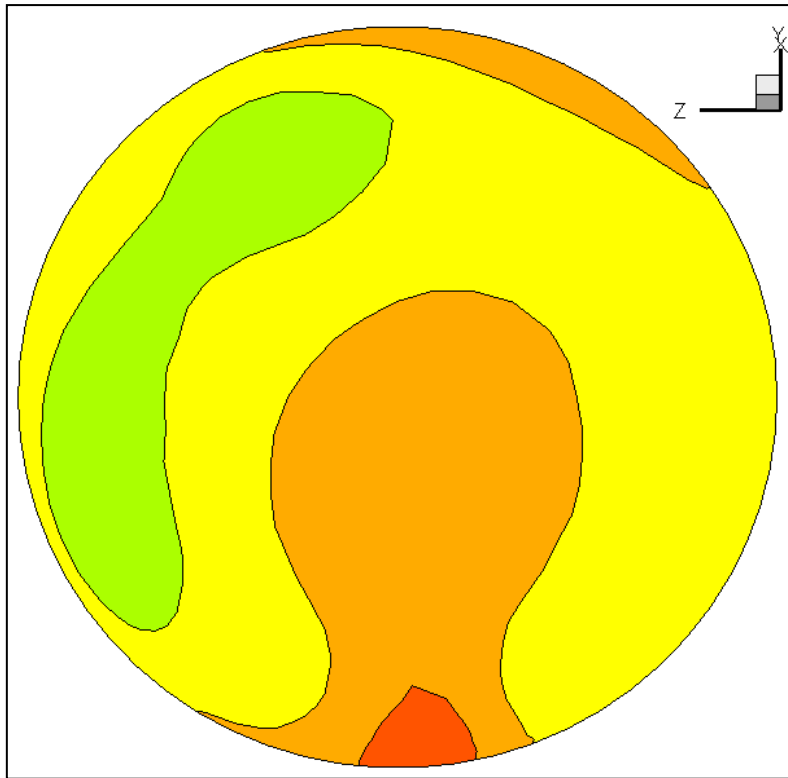
Εικόνα 6.4.2 Ισοταχείς Καμπύλες στις 2000 επαναλήψεις



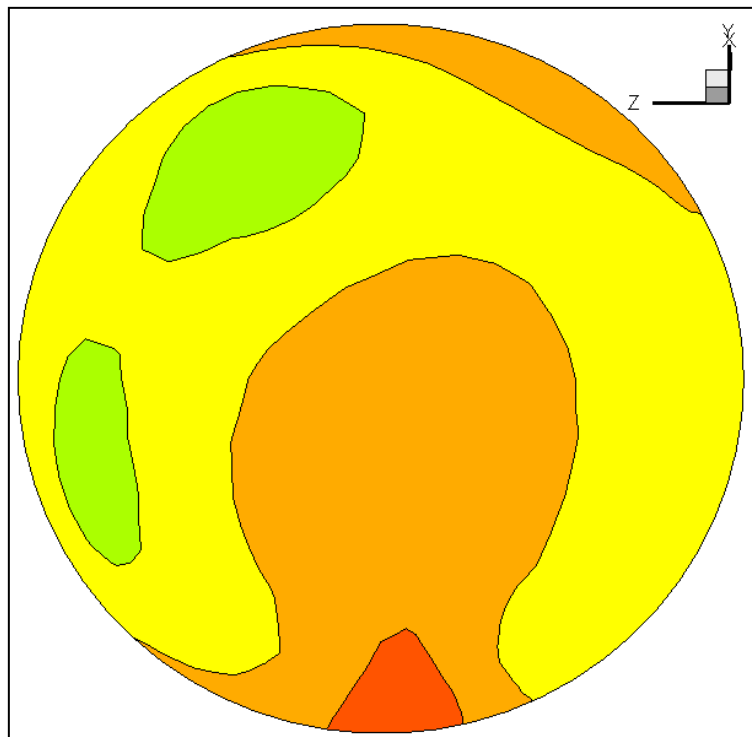
Εικόνα 6.4.3 Ισοταχείς Καμπύλες στις 2010 επαναλήψεις



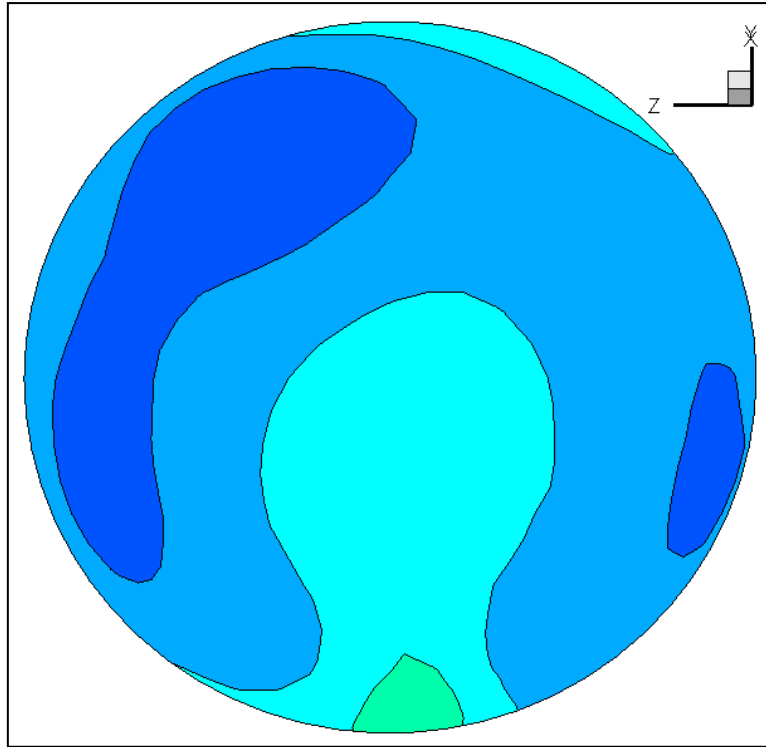
Εικόνα 6.4.3 Ισοταχείς Καμπύλες στις 2020 επαναλήψεις



Εικόνα 6.4.4 Ισοϋψείς Καμπύλες Στατικής Πίεσης στην επιφάνεια Y.1 στις 2000 επαναλήψεις



Εικόνα 6.4.5 Ισοϋψείς Καμπύλες Στατικής Πίεσης στην επιφάνεια Y.1 στις 2010 επαναλήψεις



Εικόνα 6.4.6 Ισοϋψείς Καμπύλες Στατικής Πίεσης στην επιφάνεια Υ.1 στις 2020 επαναλήψεις

Οι διαφορές στα προφίλ τόσο της ταχύτητας όσο και της στατικής πίεσης είναι εμφανείς. Σε περίπτωση σύγκλισης οι διαφορές θα ήταν πολύ μικρές, σχεδόν μηδενικές και δεν θα ήταν εμφανείς με απλή επισκόπηση ισοϋψών καμπυλών.

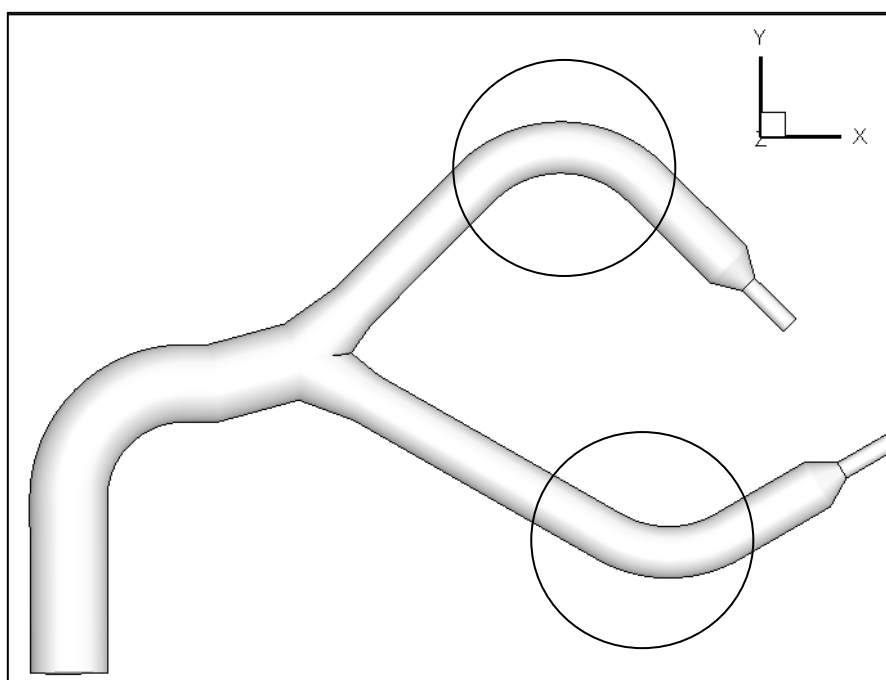
Κεφάλαιο 7 Βελτίωση της Γεωμετρίας

Το σύστημα διανομής του εξεταζόμενου υδροστροβίλου επιδέχεται πολλών βελτιώσεων. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται κάποιες από τις δυνατές βελτιώσεις ενδεικτικά. Για την παραγωγή της βέλτιστης γεωμετρίας απαιτείται εξέταση και υπολογισμός με αλγόριθμο βελτιστοποίησης κάτι το οποίο δεν περιλαμβάνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ο υπολογισμός της ροής για τις βελτιωμένες γεωμετρίες έγινε για την μέγιστη παροχή.

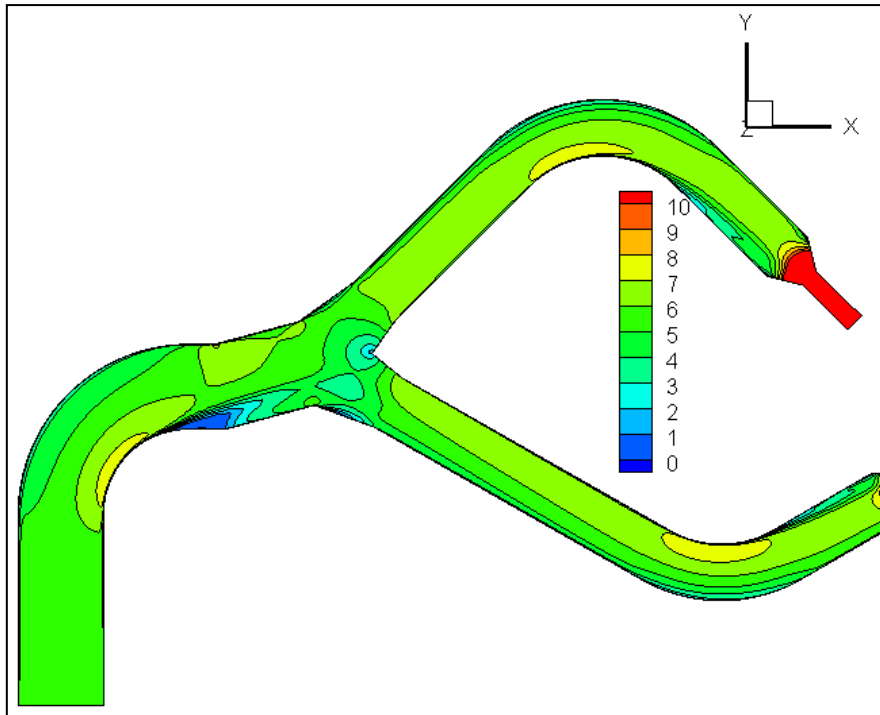
7.1 Γεωμετρία 4000

Στην γεωμετρία A έγινε αντικατάσταση των απότομων γωνιών με ενιαίους καμπύλους αγωγούς, στο άνω και κάτω τμήμα του αγωγού μετά την διακλάδωση, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.1.1.



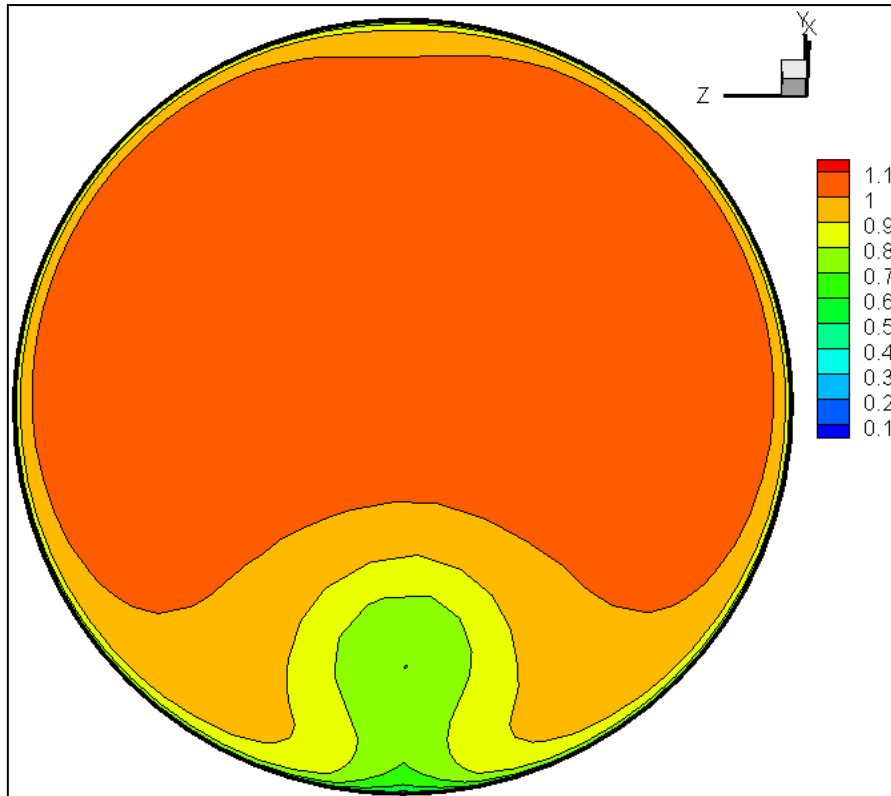
Εικόνα 7.1.1 Γεωμετρία A

Όπως φαίνεται στην εικόνα 7.1.2 το προφίλ της ταχύτητας παρουσιάζει αμελητέες διαφορές πριν την διακλάδωση. Μετά την διακλάδωση δεν υπάρχουν πλέον τα σημεία ανακοπής που εμφανίζονταν στις απότομες γωνίες ωστόσο εμφανίζεται μια μικρότερη περιοχή μηδενικής ταχύτητας αμέσως μετά τις καμπύλες. Αυτό συμβαίνει λόγω της έντονης αλλαγής της κατεύθυνσης της ροής. Γενικότερα ωστόσο παρατηρείται μεγαλύτερη ομοιομορφία στην ταχύτητα στο άνω και κάτω τμήμα του αγωγού.

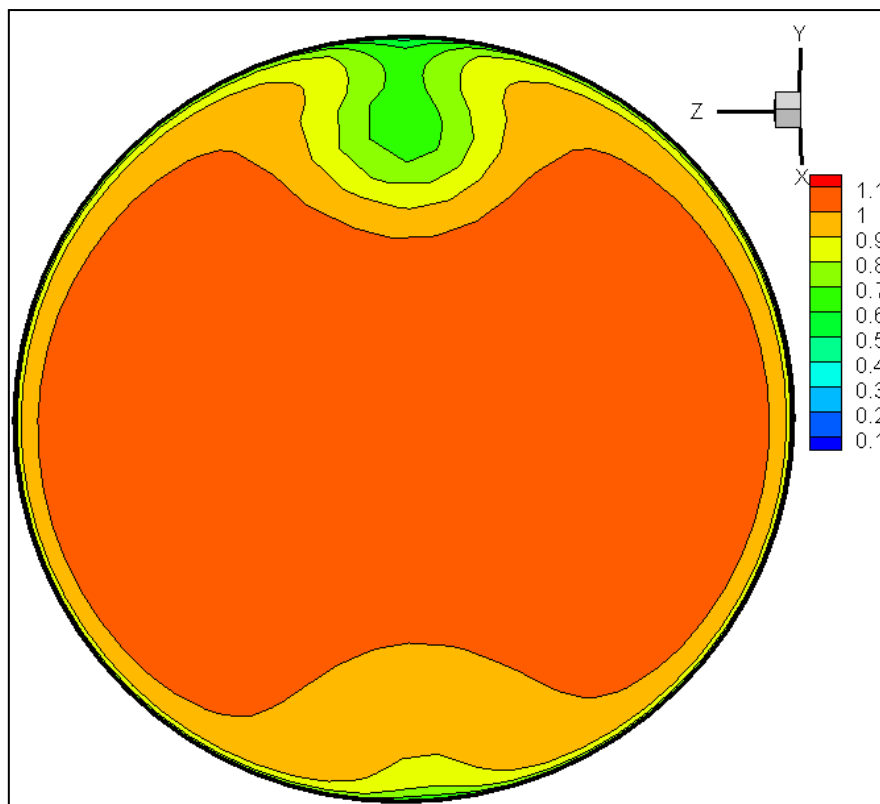


Εικόνα 7.1.2 Ισοταχείς Καμπύλες στο επίπεδο $z=0$

Στις εικόνες 7.1.3 και 7.1.4 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας στις επιφάνειες 0.1 και 0.2 αντίστοιχα. Σε αντίθεση με την αρχική γεωμετρία, το προφίλ είναι πιο ομοιομορφο. Οι διακυμάνσεις είναι πολύ ομαλότερες και γενικότερα δεν εμφανίζονται περιοχές των μικρότερων τιμών. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως προαναφέρθηκε, μετά την καμπύλη παρατηρείται μια περιοχή μηδενισμού της ταχύτητας αλλά είναι αρκετά μικρότερη από αυτή που εμφανιζόταν στην τελευταία απότομη γωνία.

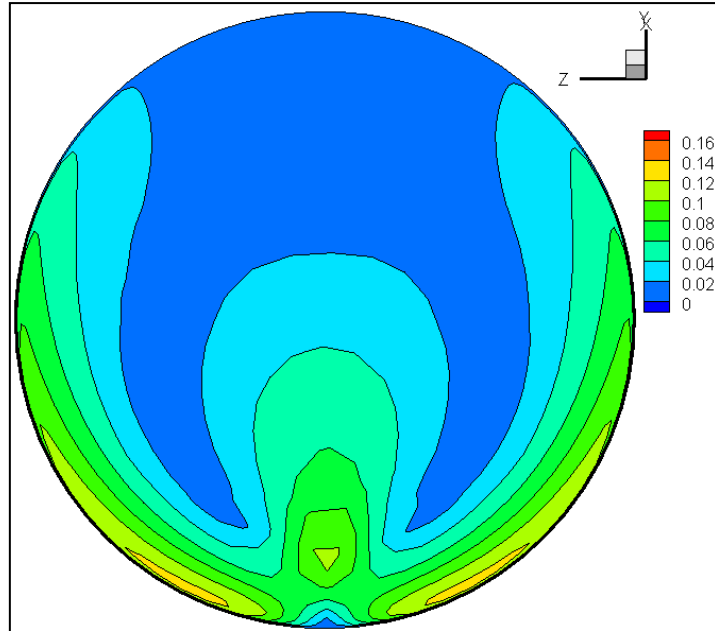


Εικόνα 7.1.3 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.1

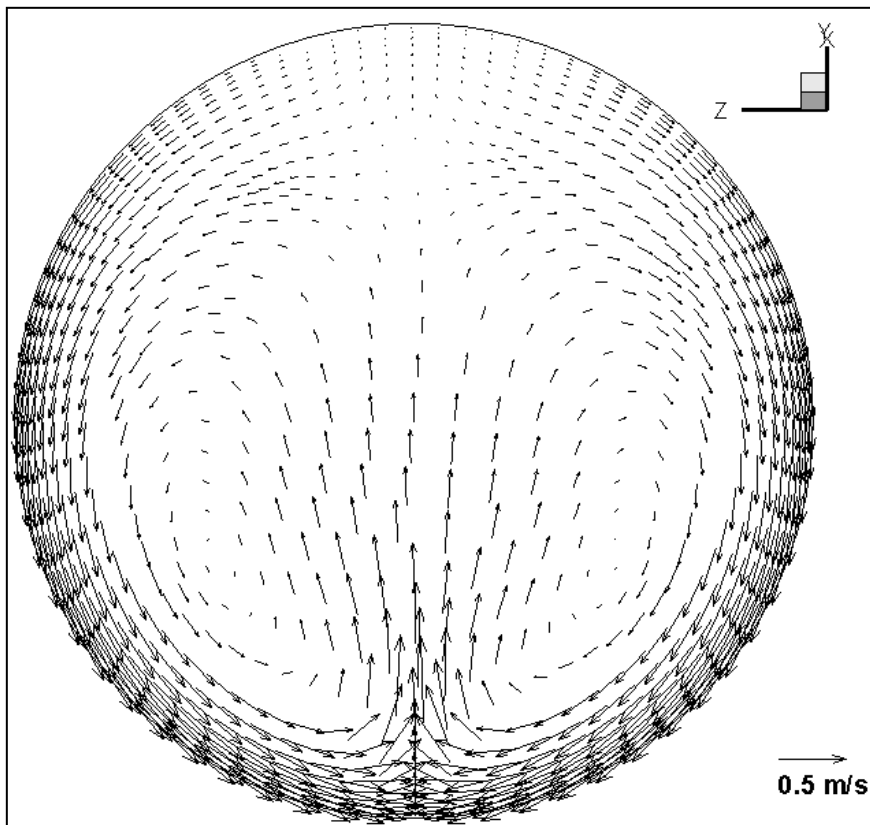


Εικόνα 7.1.4 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.2

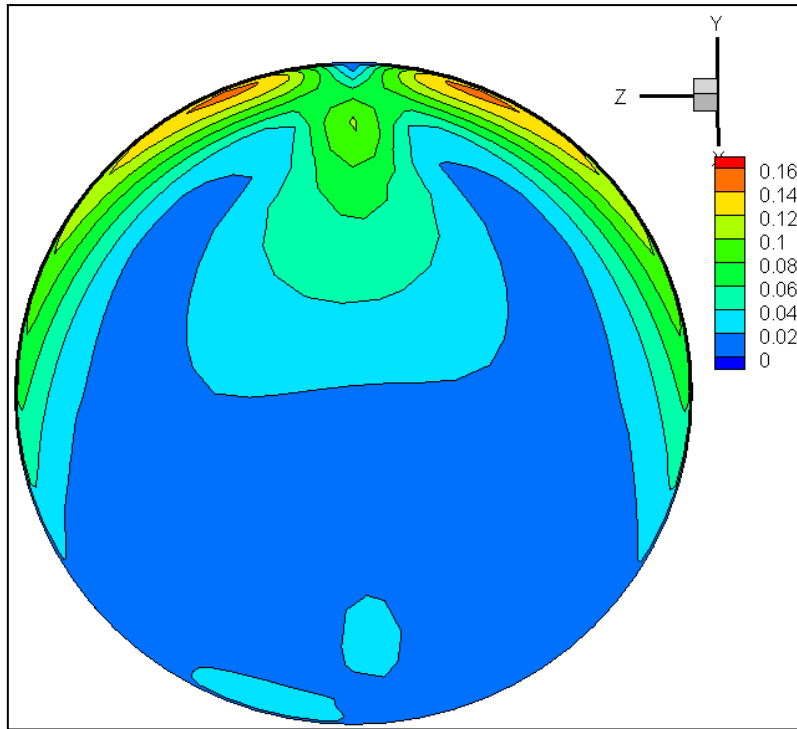
Όπως προκύπτει από τις εικόνες 7.1.7 και 7.1.9 η φορά των δευτερευουσών ροών δεν παρουσιάζει κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή. Στο αδιαστατοποιημένο μέτρο τους εμφανίζεται αύξηση στην κεντρική περιοχή κοντά στο τοίχωμα και άνω για την επιφάνεια 0.1 (εικόνα 7.1.6) και κάτω για την επιφάνεια 0.2 (εικόνα 7.1.7).



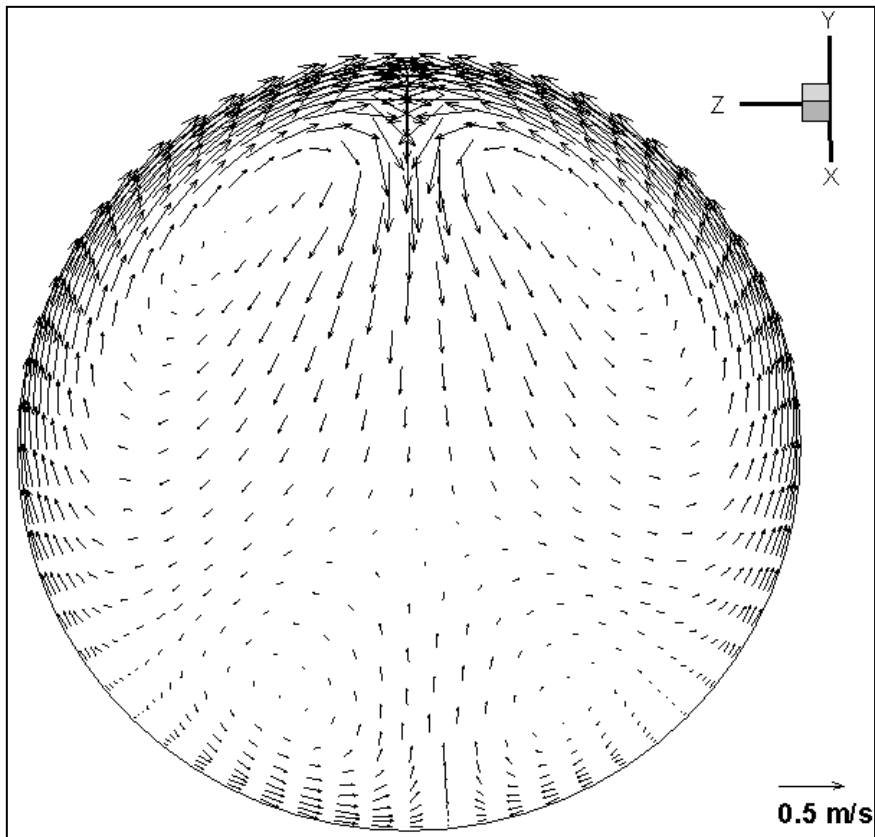
Εικόνα 7.1.6 Ισοϋνείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια 0.1



Εικόνα 7.1.7 Διανύσματα Εφαπτόμενης ταχύτητας στην επιφάνεια 0.1



Εικόνα 7.1.8 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.2



Εικόνα 7.1.9 Διανύσματα Εφαπτόμενης ταχύτητας στην επιφάνεια O.2

Ο ΑΣΔΡ των επιφανειών λαμβάνει τις ακόλουθες τιμές:

- $O.1 = 3.4275 \cdot 10^{-2}$
- $O.2 = 2.8504 \cdot 10^{-2}$

Παρατηρείται ότι υπάρχει αύξηση του ΑΣΔΡ για την επιφάνεια O.1 και μικρή – σχεδόν αμελητέα – μείωση για την O.2 σε σχέση με τις τιμές της κανονικής γεωμετρίας. Η αύξηση του ΑΣΔΡ στην O.1 συμβαίνει διότι απουσία φάλτσων κοψιμάτων αναπτύσσονται μεγαλύτερες ταχύτητες στην διατομή με αποτέλεσμα να αυξάνεται και το μέτρο της εφαπτόμενης ταχύτητας. Στην O.2 δεν παρατηρείται αύξηση του ΑΣΔΡ ενδεχομένως επειδή η αλλαγή κλίσης δεν είναι τόσο έντονη όσο στην O.1.

Η ολική πίεση στην είσοδο είναι 1521746.5 Pa στην έξοδο 1 είναι 1517598 Pa και στην έξοδο 2 είναι 1514194.6 Pa. Η παροχή όγκου είναι $0.07514 \text{ m}^3/\text{s}$ στην είσοδο και $0.03757 \text{ m}^3/\text{s}$ στην έξοδο 1 και στην έξοδο 2. Συνεπώς οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με:

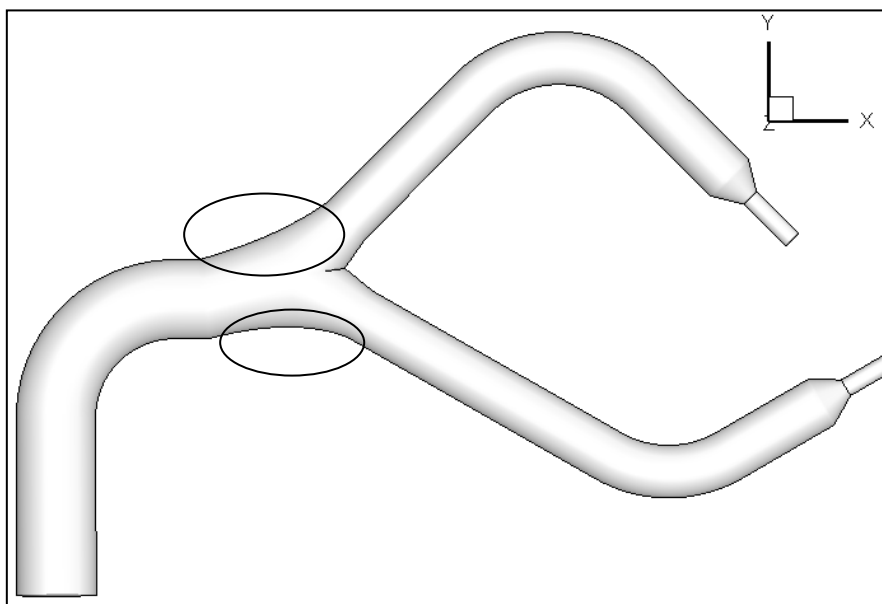
$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2} = 439.584 \text{ J/s}$$

$$\text{Ενώ σε mΣΥ είναι: } E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}} = 0.5974 \text{ mΣΥ}$$

Παρατηρείται αισθητή βελτίωση στις απώλειες ενέργειας σε σχέση με την κανονική γεωμετρία. Για την ακρίβεια παρατηρείται μείωση της τάξεως του 15.6%. Πρόκειται για σημαντική μείωση ειδικά αν αναλογιστεί κανείς ότι η αλλαγή που έγινε στην γεωμετρία δεν είναι ιδιαίτερα σύνθετη και συνεπώς δεν έχει και μεγάλο κόστος.

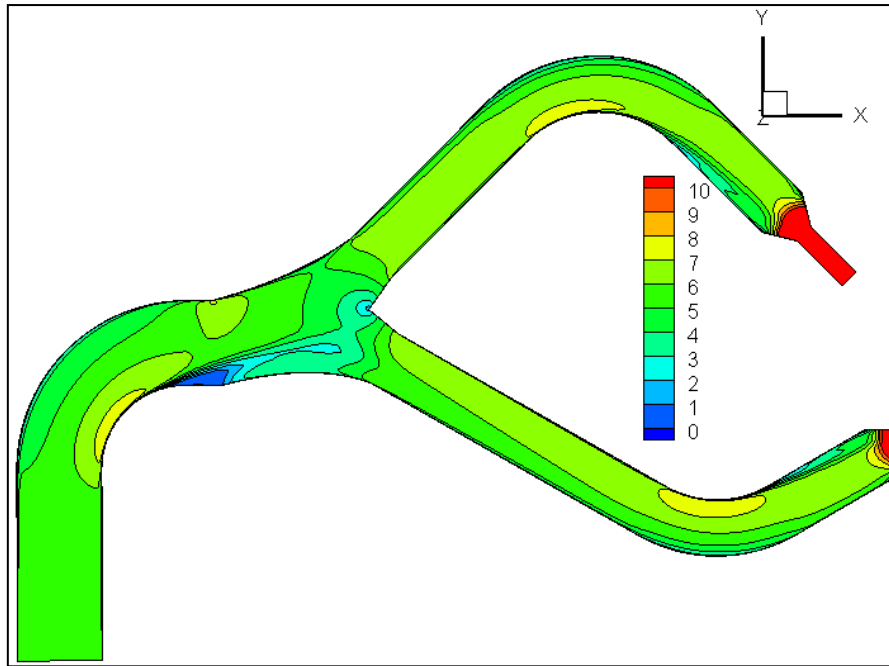
7.2 Γεωμετρία Β

Στην γεωμετρία 5000 έγινε εξομάλυνση των απότομων αλλαγών κατεύθυνσης, κάνοντας ηπιότερες τις αλλαγές κλίσεων στα τοιχώματα του αγωγού, ακριβώς πριν την διακλάδωση (εικόνα 7.2.1). Για να γίνει αυτή η αλλαγή της γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε η εντολή nurbs.



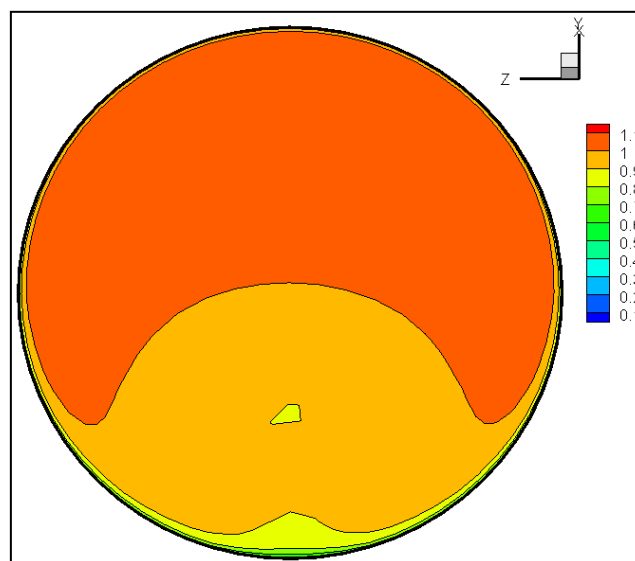
Εικόνα 7.2.1 Γεωμετρία 5000

Στην εικόνα 7.2.2 παρουσιάζονται οι ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$. Παρατηρείται ότι οι περιοχές ανακοπής που εμφανίζονται στην αρχική γεωμετρία στα κωνικά τμήματα της διακλάδωσης δεν υπάρχουν στην γεωμετρία Β. Γενικά η ταχύτητα στην περιοχή που βελτιώθηκε παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιομορφία.

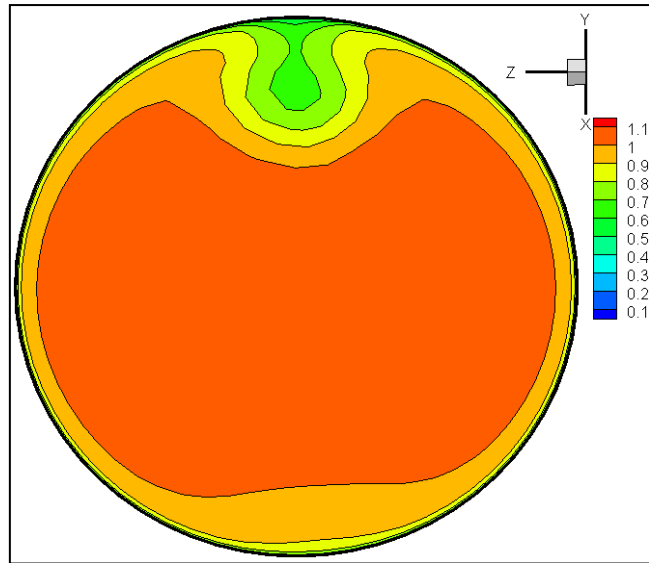


Εικόνα 7.2.2 Ισοταχείς Καμπύλες στο επίπεδο $z=0$

Το προφίλ της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας για την επιφάνεια Y.1 δεν παρουσιάζει διαφορές σε σχέση με την αρχική γεωμετρία. Το ίδιο συμβαίνει και για την επιφάνεια O.1 σε σχέση με την γεωμετρία A. Στην επιφάνεια Y.2 (εικόνα 7.2.3) ωστόσο, παρατηρείται μεγαλύτερη ομοιομορφία – σε σχέση με την αρχική γεωμετρία – ειδικά στο κάτω μέρος της διατομής. Αυτό συμβαίνει διότι όπως προαναφέρθηκε δεν υπάρχει περιοχή μηδενισμού της ταχύτητας στο κωνικό τμήμα της διακλάδωσης. Λόγω αυτού, προκύπτει μεγαλύτερη ομοιομορφία και στο κάτω μέρος της επιφάνειας O.2 (εικόνα 7.2.4).

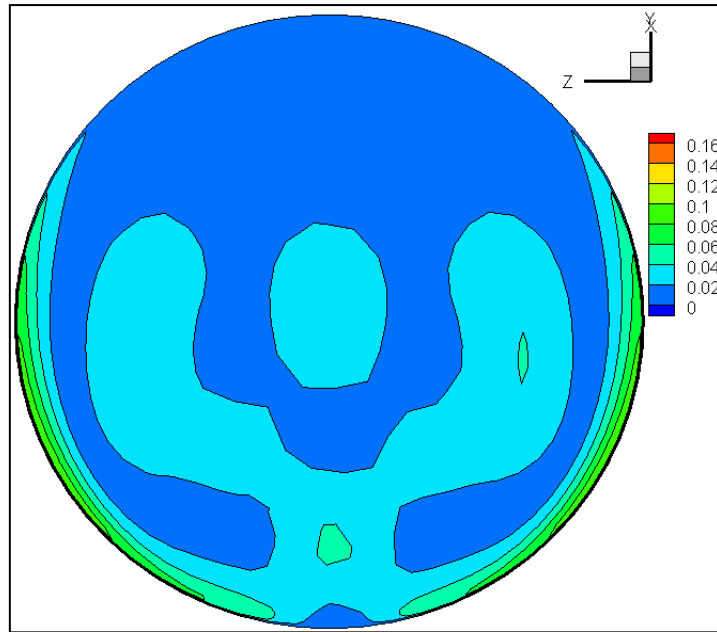


Εικόνα 7.2.3 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.2

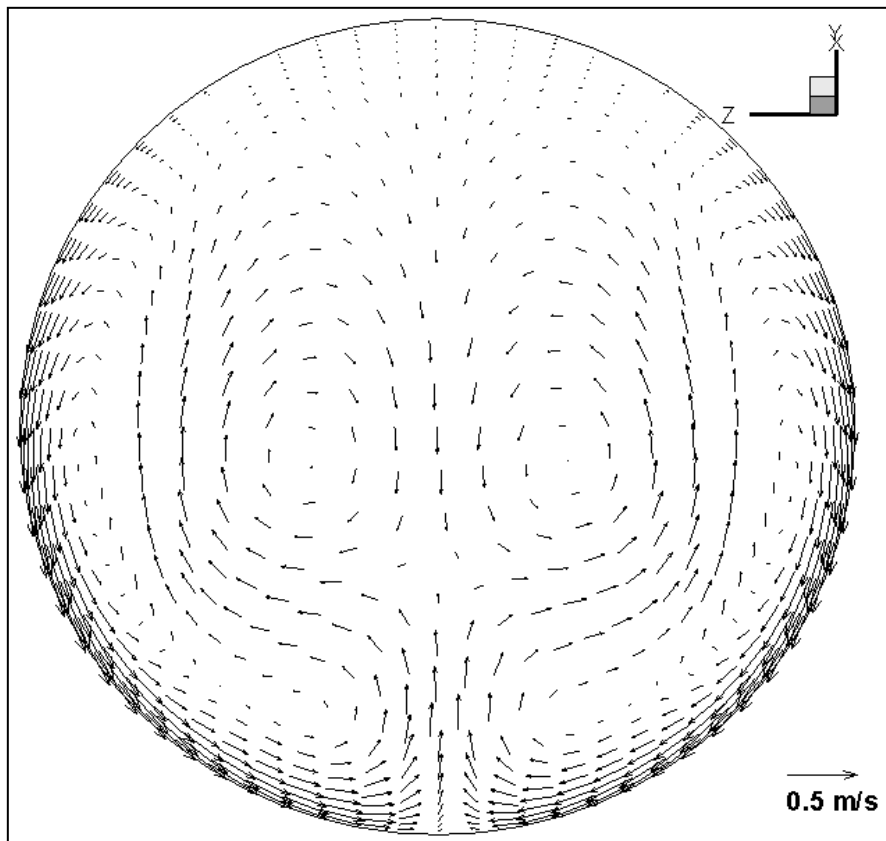


Εικόνα 7.2.4 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.2

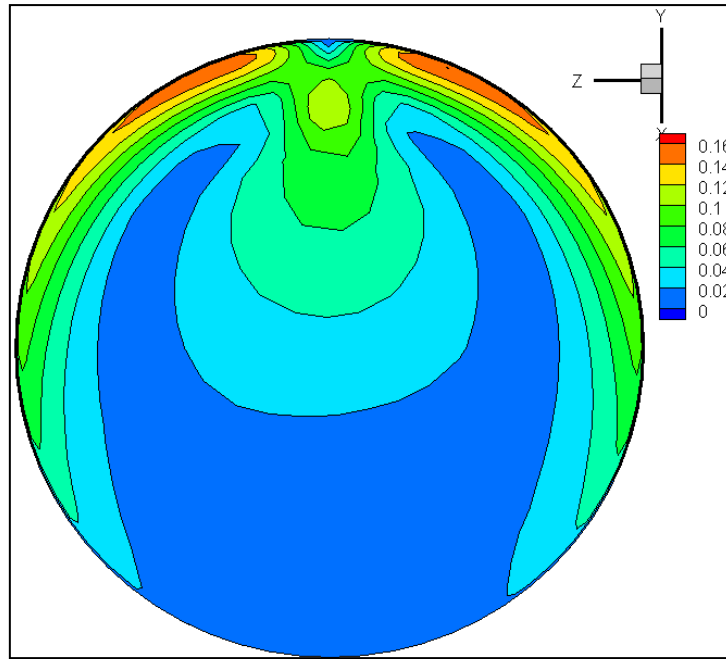
Όσον αφορά το προφίλ των δευτερευουσών ροών στην επιφάνεια Y.1 δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες μεταβολές σε σχέση με την αρχική γεωμετρία ούτε στην O.1 σε σχέση με την γεωμετρία A. Στην Y.2 ωστόσο παρατηρούνται κάποιες μεταβολές στο αδιαστατοποιημένο μέτρο (εικόνα 7.2.6) σε σχέση με την αρχική γεωμετρία αλλά κυρίως παρατηρείται ότι το άνω ζεύγος των δινών που εμφανίζονται στην κανονική γεωμετρία είναι μετατοπισμένο ελαφρά προς τα κάτω ενώ το κάτω ζεύγος δείχνει μια εξασθένιση (εικόνα 7.2.7). Στην O.2 το αδιαστατοποιημένο μέτρο της εφαπτόμενης ταχύτητας (εικόνα 7.2.8) παρουσιάζει αύξηση σε σχέση με την γεωμετρία A, αλλά όπως προκύπτει από τα διανύσματα της εφαπτόμενης ταχύτητας (εικόνα 7.2.9) το κάτω ζεύγος δινών που εμφανίζεται και στην αρχική γεωμετρία και στην γεωμετρία A δεν υφίσταται στην γεωμετρία B.



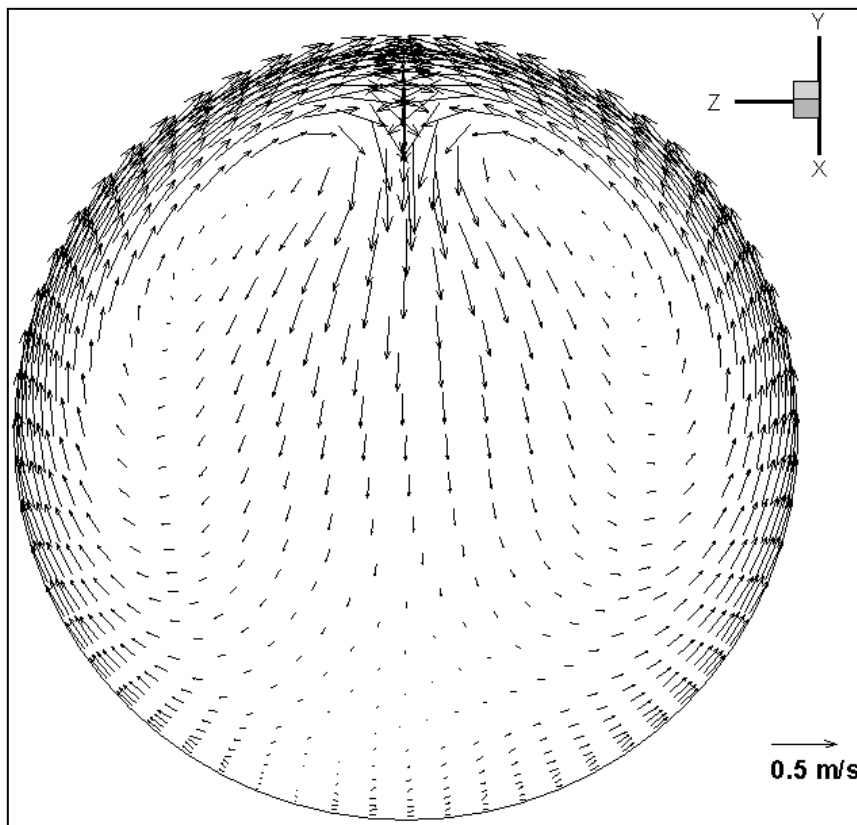
Εικόνα 7.2.6 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.2



Εικόνα 7.2.7 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.2



Εικόνα 7.2.8 Ισοϋνείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια 0.2



Εικόνα 7.2.9 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια 0.2

Οι ΑΣΔΡ των επιφανειών είναι οι ακόλουθοι:

- $Y.1 = 1.6969 \cdot 10^{-2}$
- $O.1 = 3.7056 \cdot 10^{-2}$
- $Y.2 = 2.0547 \cdot 10^{-2}$
- $O.2 = 3.5161 \cdot 10^{-2}$

Παρατηρείται μικρή αύξηση στους ΑΣΔΡ των επιφανειών σε σχέση με την αρχική γεωμετρία με εξαίρεση την επιφάνεια Y.2 στην οποία παρατηρείται μείωση. Όπως έχει προαναφερθεί, στην κανονική γεωμετρία, η ροή που διέρχεται από την επιφάνεια Y.2 αλλάζει κλίση πολύ εντονότερα σε σχέση με τη ροή που διέρχεται από την Y.1. Η αλλαγή που συμβαίνει στην γεωμετρία Β βελτιώνει περισσότερο το κάτω τμήμα της διακλάδωσης ενώ οι μεταβολές στο άνω τμήμα είναι μικρότερες.

Η ολική πίεση στην είσοδο είναι 1519383.5 Pa στην έξοδο 1 είναι 1515446.5 Pa και στην έξοδο 2 είναι 1512382.4 Pa. Η παροχή όγκου είναι 0.07514 m³/s στην είσοδο και 0.03757 m³/s στην έξοδο 1 και στην έξοδο 2 . Συνεπώς οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με:

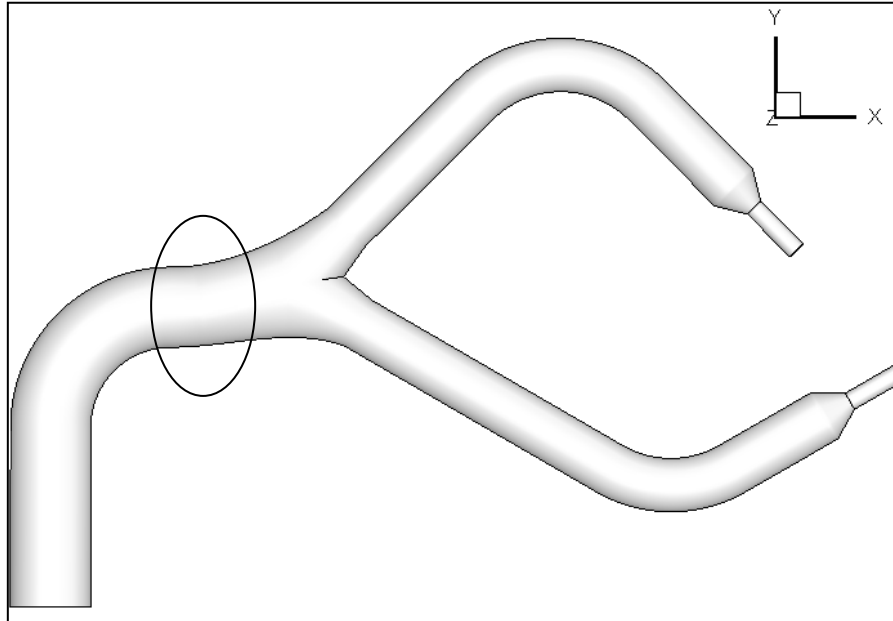
$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2} = 410.944 \text{ J/s}$$

$$\text{Ενώ σε mΣΥ είναι: } E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}} = 0.5585 \text{ mΣΥ}$$

Μείωση στις απώλειες ενέργειας παρατηρείται και τόσο σε σχέση με την αρχική γεωμετρία αλλά και με την γεωμετρία Α. Συγκεκριμένα η μείωση των απωλειών σε σχέση με την αρχική γεωμετρία φτάνει το 21% ενώ σε σχέση με την γεωμετρία Α φτάνει το 6.5%.

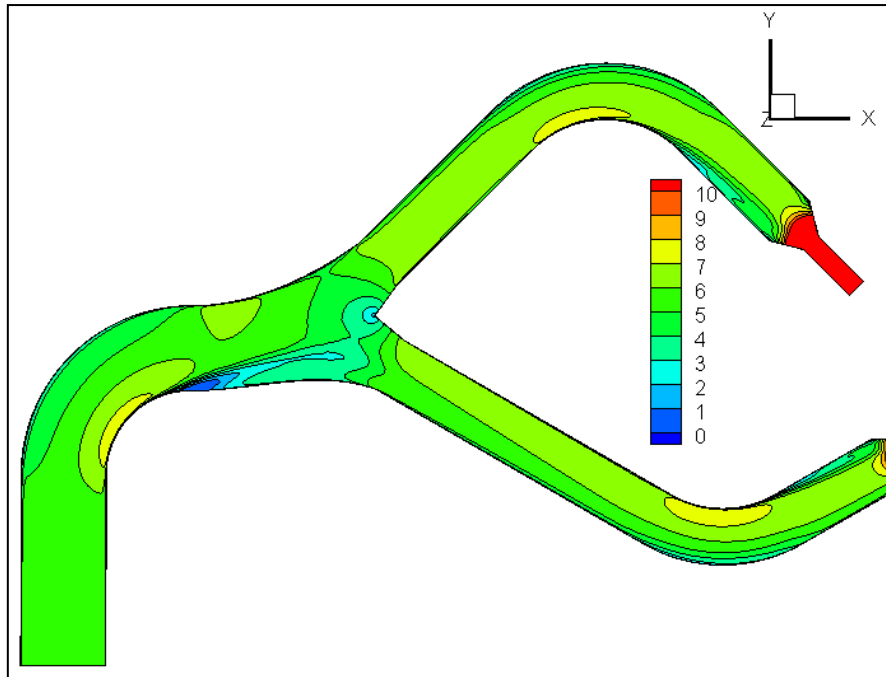
7.3 Γεωμετρία Γ

Στην γεωμετρία Γ αντικαταστάθηκε η απότομη αλλαγή κλίσης αμέσως μετά την καμπυλότητα με μία πιο ομαλή.

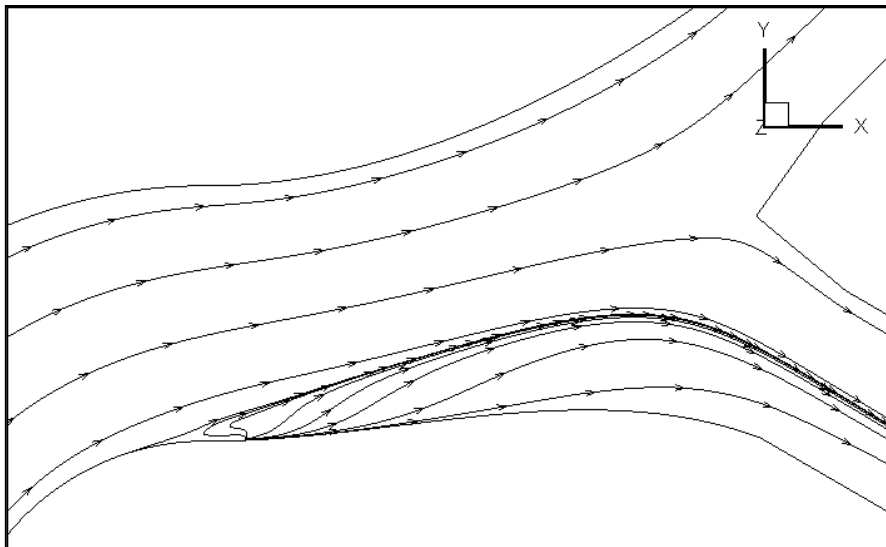


Εικόνα 7.3.1 Γεωμετρία 6000

Από τις ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$ (εικόνα 7.3.2) προκύπτει πως δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές σε σχέση με την γεωμετρία Β. Το επιθυμητό με αυτήν την αλλαγή θα ήταν να σταματήσουν να εμφανίζονται οι δίνες που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 6.2.1 μετά την αρχική καμπυλότητα. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, παρ' όλα αυτά υπάρχει μία μείωση της έντασης των ανακυκλοφοριών σε εκείνη την περιοχή όπως προκύπτει και από την εικόνα 7.3.3.



Εικόνα 7.3.2 Ισοταχείς Καμπύλες στο επίπεδο $z=0$



Εικόνα 7.3.3 Γραμμές Ροής στο επίπεδο $z=0$

Το προφίλ της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας στις διάφορες διατομές δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες μεταβολές. Συγκεκριμένα, η επιφάνεια Y.1 παρουσιάζει ελάχιστα μεγαλύτερη ομοιομορφία σε σχέση με την αρχική γεωμετρία και η O.2 έχει προφίλ σχεδόν πανομοιότυπο με της γεωμετρίας A, δηλαδή είναι λίγο πιο έντονες οι διακυμάνσεις στο κάτω μέρος σε σχέση με την γεωμετρία B. Όσο για τις επιφάνειες Y.2 και O.1 δεν παρουσιάζουν σχεδόν καμία μεταβολή σε σχέση με την γεωμετρία B.

Όσον αφορά τις δευτερεύουσες ροές καμία αξιοσημείωτη μεταβολή δεν παρατηρείται σε σχέση με την γεωμετρία B εκτός από την επιφάνεια O.2 στην οποία

παρατηρείται επανεμφάνιση του κάτω ζεύγους δινών και το προφίλ της είναι ίδιο με της γεωμετρίας A.

Οι ΑΣΔΡ των επιφανειών είναι οι ακόλουθοι:

- $Y.1 = 1.6640 \cdot 10^{-2}$
- $O.1 = 3.7249 \cdot 10^{-2}$
- $Y.2 = 2.1334 \cdot 10^{-2}$
- $O.2 = 3.1015 \cdot 10^{-2}$

Παρατηρείται μικρή αύξηση στους ΑΣΔΡ των επιφανειών O.1 και Y.2 σε σχέση με την γεωμετρία B και μικρή μείωση στους ΑΣΔΡ των επιφανειών Y.1 και O.2. Όλες οι επιφάνειες ωστόσο έχουν μεγαλύτερο ΑΣΔΡ από τις αντίστοιχες της αρχικής γεωμετρίας εκτός από την Y.2.

Η ολική πίεση στην είσοδο είναι 1517441.5 Pa στην έξοδο 1 είναι 1513587.5 Pa και στην έξοδο 2 είναι 1510691.5 Pa. Η παροχή όγκου είναι 0.07514 m³/s στην είσοδο και 0.03757 m³/s στην έξοδο 1 και στην έξοδο 2. Συνεπώς οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με:

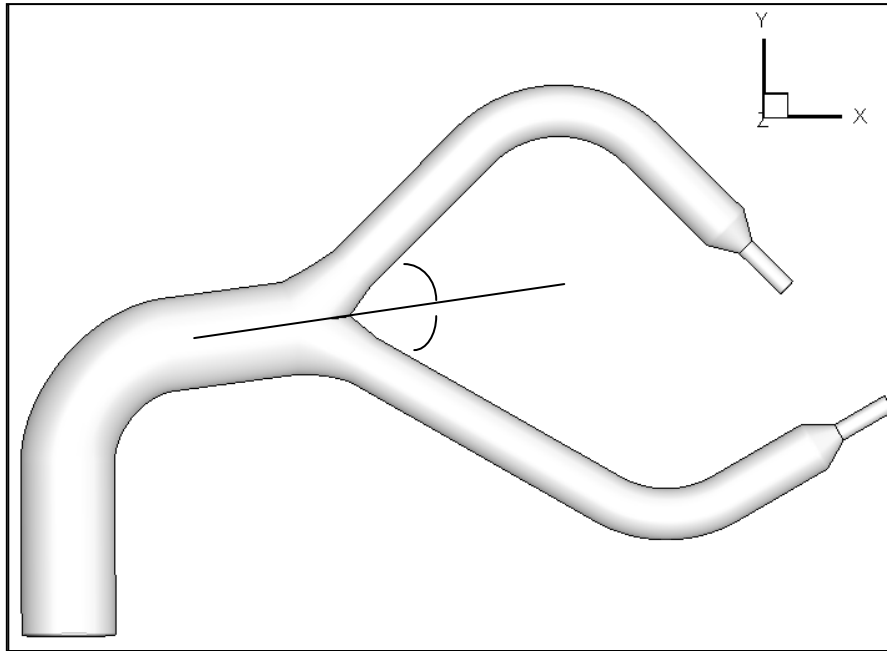
$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2} = 398.335 \text{ J/s}$$

$$\text{Ενώ σε m}\Sigma\text{Y είναι: } E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}} = 0.5414 \text{ m}\Sigma\text{Y}$$

Παρατηρείται μείωση των απωλειών ενέργειας τόσο σε σχέση με την αρχική γεωμετρία όσο και σε σχέση με την γεωμετρία B. Συγκεκριμένα η μείωση των απωλειών σε σχέση με την αρχική γεωμετρία είναι της τάξης του 23.5% ενώ σε σχέση με την γεωμετρία B είναι της τάξης του 3%.

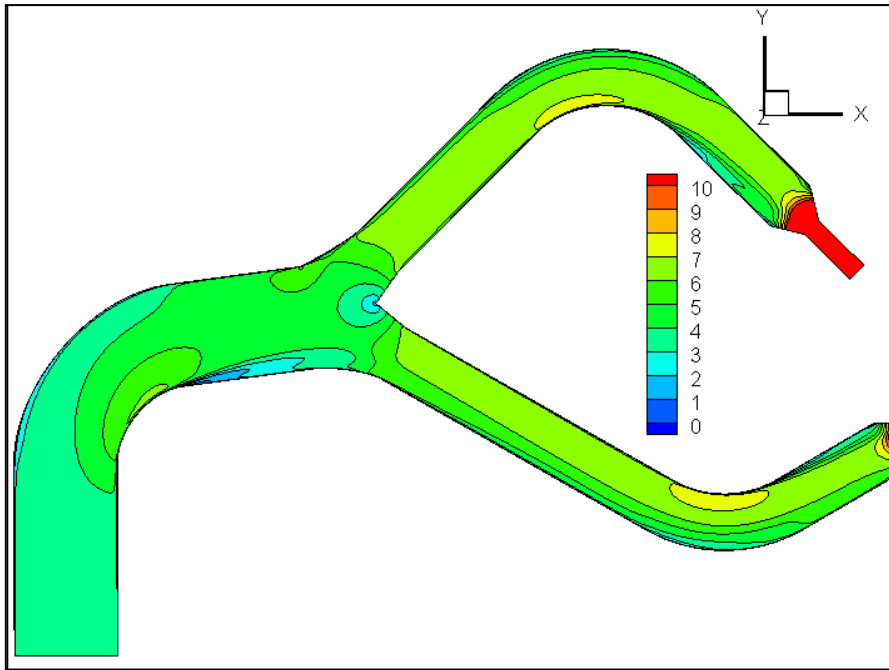
7.4 Γεωμετρία Δ

Στην τελευταία βελτίωση του συστήματος διανομής, αντί για απόπειρα ομαλοποίησης των αλλαγών κλίσης πριν την διακλάδωση, έγινε αντικατάσταση του τμήματος που ενώνει την αρχική καμπυλότητα με τα κωνικά τμήματα της διακλάδωσης από ενιαίο αγωγό. Η νοητή κεντρική γραμμή του ενιαίου αγωγού διέρχεται από το κέντρο της διατομής στο τέλος της καμπυλότητας και διχοτομεί την γωνία των κωνικών τμημάτων όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.4.1.

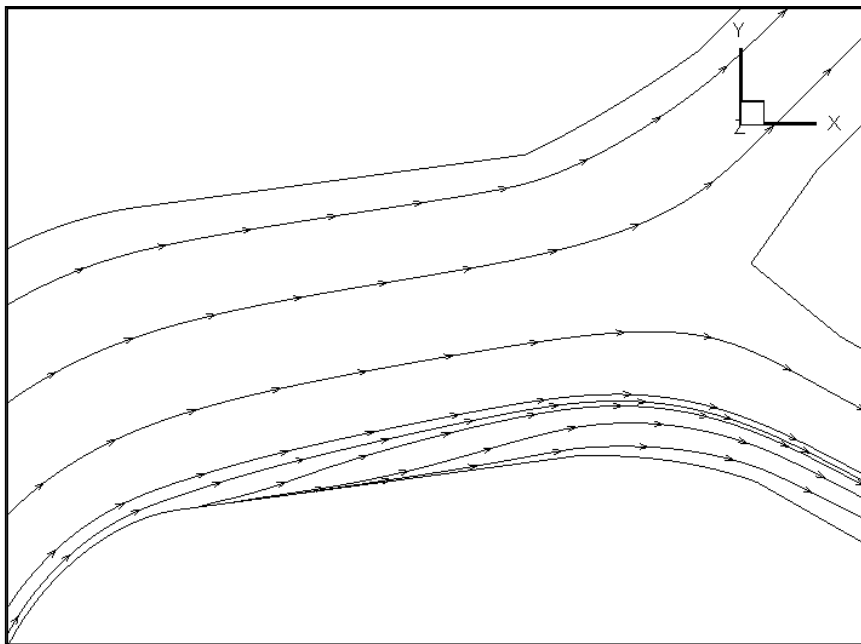


Εικόνα 7.4.1 Γεωμετρία Δ

Από τις ισοταχείς καμπύλες (εικόνα 7.4.2) παρατηρείται μεγαλύτερη ομοιομορφία πριν την διακλάδωση σε σχέση με την αρχική γεωμετρία. Η περιοχή αμέσως μετά την καμπυλότητα στην οποία παρατηρούνται ανακυκλοφορίες στην αρχική γεωμετρία, πλέον εμφανίζει πολύ μικρή περιοχή μηδενισμού της ταχύτητας. Οι δίνες που εμφανίζονται στην κανονική γεωμετρία στην περιοχή εκείνη, δεν δημιουργούνται στην γεωμετρία Δ. Αυτό είναι ξεκάθαρο και από την εικόνα 7.4.3 στην οποία παρατηρείται ότι οι γραμμές ροής ακολουθούν την πορεία που επιβάλλει το σύστημα διανομής. Βέβαια, η περιοχή ανακοπής δεν έχει εξαφανιστεί λόγω της απότομης αλλαγής κλίσης στην καμπυλότητα μετά την είσοδο. Το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να εξαλειφθεί με επέκταση του αρχικού τμήματος του αγωγού διανομής ώστε η μεταβολή στην κλίση να είναι πιο ομαλή. Οι συγκεκριμένες διαστάσεις ωστόσο επιβάλλονται από τις γενικότερες απαιτήσεις λειτουργικότητας του εργαστηρίου που στεγάζεται ο υδροστρόβιλος. Συνεπώς, δεδομένου ότι το μήκος του αγωγού δεν δύναται να αλλάξει, η διάταξη αυτή επιβραδύνει κατά το δυνατόν λιγότερο την ροή μετά την καμπυλότητα και, το σπουδαιότερο, δεν δημιουργεί δίνες στο τμήμα αυτό. Παράλληλα, προκαλεί συμμετρικότερο διαχωρισμό της ροής στη διακλάδωση.



Εικόνα 7.4.2 Ισοταχείς Καμπύλες στο επίπεδο $z=0$

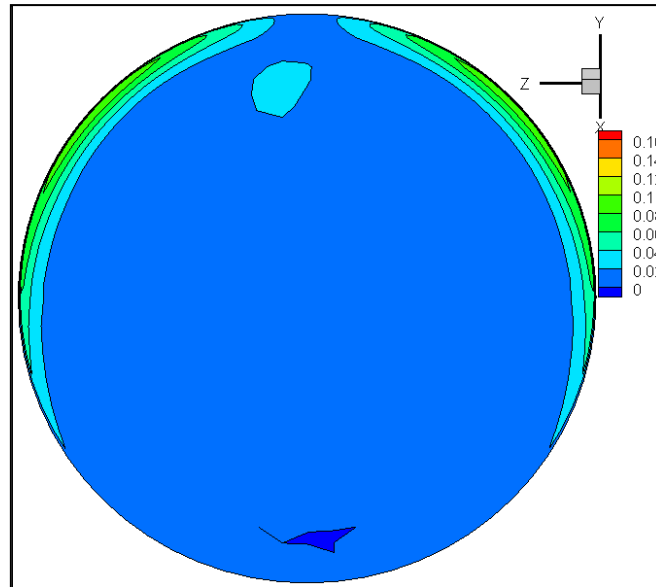


Εικόνα 7.4.3 Γραμμές Ροής στο επίπεδο $z=0$

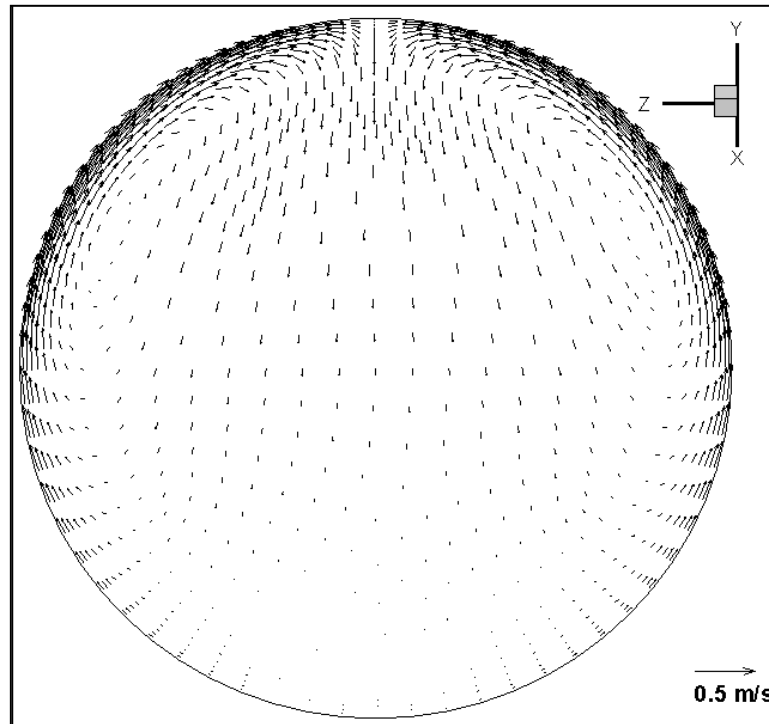
Το προφίλ της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας στις εξεταζόμενες επιφάνειες παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιομορφία σε σχέση με την κανονική γεωμετρία ενώ είναι και λίγο πιο ομοιόμορφο σε σχέση με τις υπόλοιπες βελτιωμένες γεωμετρίες.

Όσον αφορά τις δευτερεύουσες ροές που αναπτύσσονται στην γεωμετρία Δ, παρατηρείται ότι στην Υ.1 η φορά τους (εικόνα 7.4.5) δεν έχει αλλάξει σε σχέση με την αρχική γεωμετρία αλλά το αδιαστατοποιημένο μέτρο τους (εικόνα 7.4.4) είναι πολύ μικρότερο και πολύ ομαλότερο. Η επιφάνεια Ο.1 (εικόνες 7.4.8 και 7.4.9)

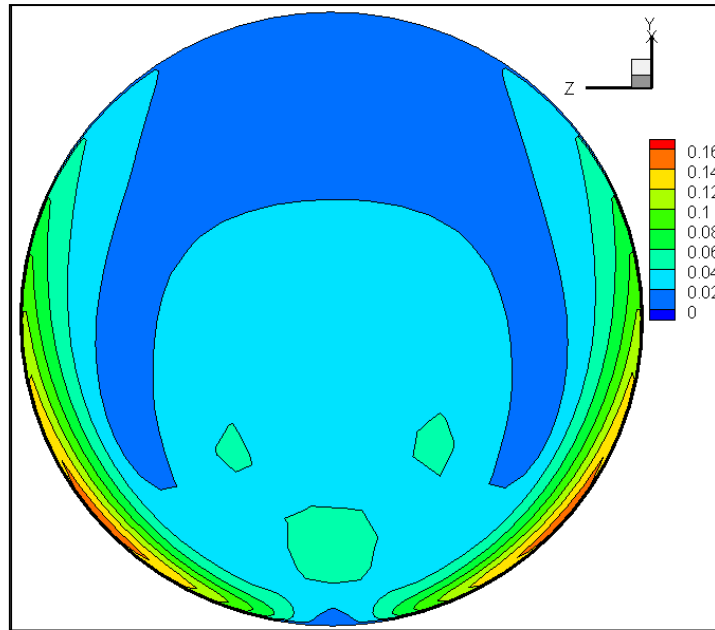
παρουσιάζει το ίδιο προφίλ με τη γεωμετρία Α. Η επιφάνεια Υ.2 παρουσιάζει πολύ διαφορετικό προφίλ εφαπτόμενης ταχύτητας (εικόνες 7.4.6 και 7.4.7) σε σχέση με την αρχική γεωμετρία καθώς δεν υπάρχουν δύο ζεύγη δινών αλλά ένα ενώ το αδιαστατοποιημένο μέτρο της εφαπτόμενης ταχύτητας είναι μεγαλύτερο σχεδόν σε όλη τη διατομή. Στην επιφάνεια Ο.2 (εικόνες 7.4.10 και 7.4.11) ωστόσο οι δίνες επανεμφανίζονται λόγω των μεταβολών της φυγοκέντρου εξ' αιτίας του μεγάλου μήκους του κάτω τμήματος της διακλάδωσης.



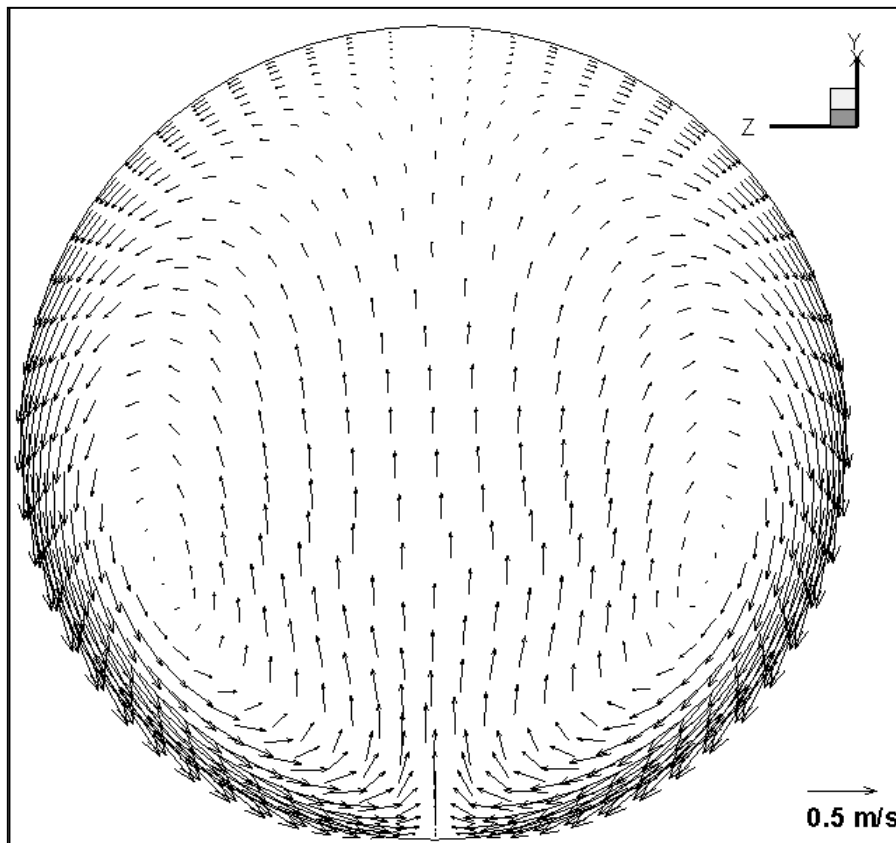
Εικόνα 7.2.4 Ισοϋνείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Υ.1



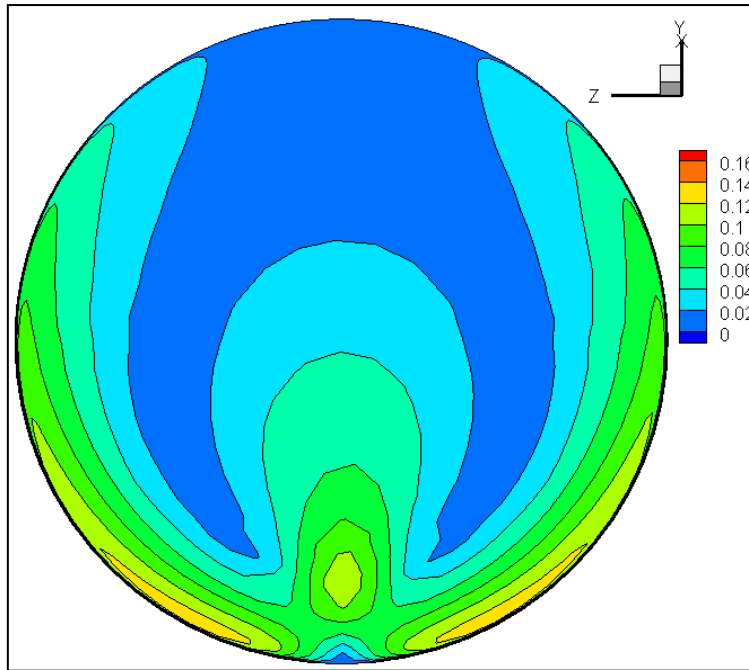
Εικόνα 7.2.5 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Υ.1



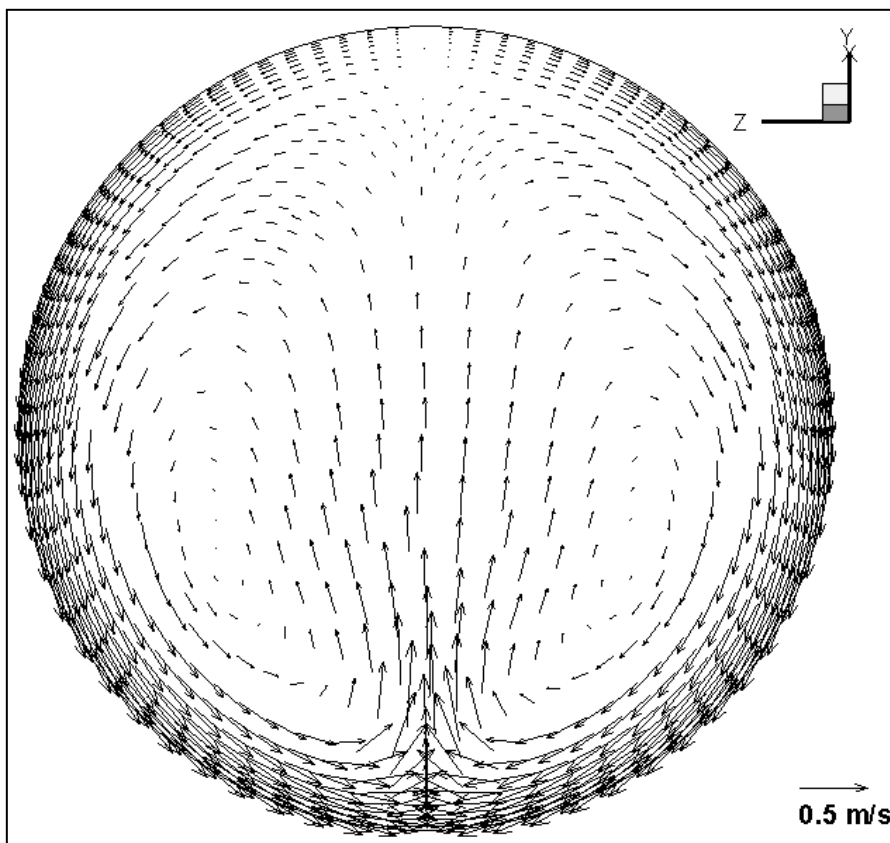
Εικόνα 7.2.6 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.2



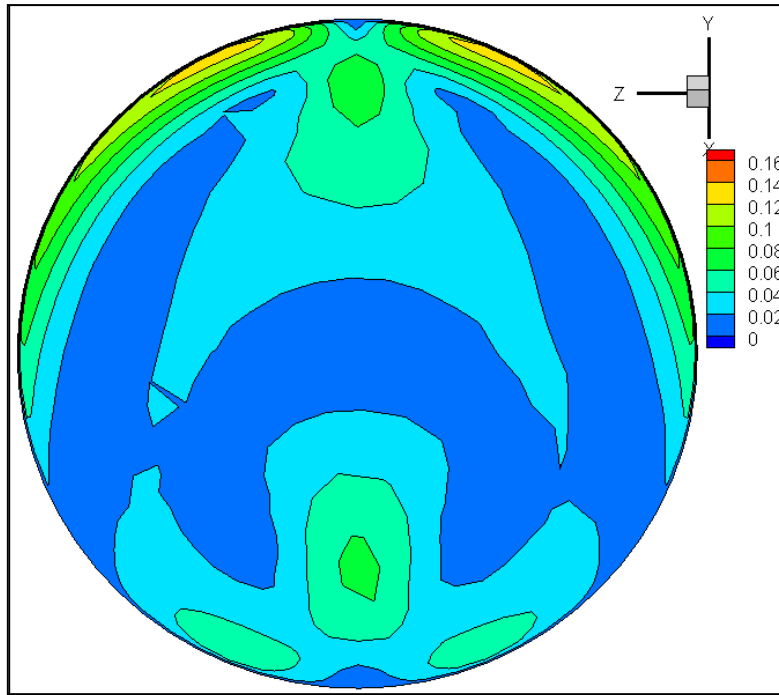
Εικόνα 7.2.7 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια Y.2



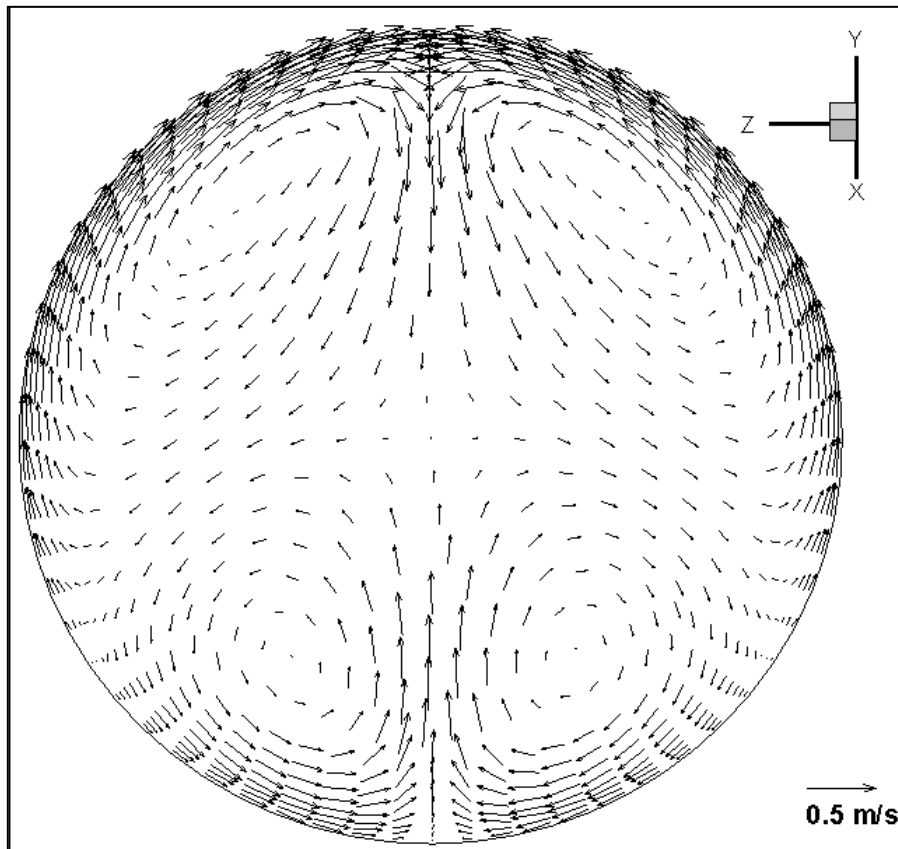
Εικόνα 7.2.8 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.1



Εικόνα 7.2.9 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια O.1



Εικόνα 7.2.10 Ισοϋψείς Καμπύλες Αδιαστατοποιημένης Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια 0.2



Εικόνα 7.2.11 Διανύσματα Εφαπτόμενης Ταχύτητας στην επιφάνεια 0.2

Οι ΑΣΔΡ των επιφανειών είναι οι ακόλουθοι:

- $Y.1 = 1.2642 \cdot 10^{-2}$
- $O.1 = 3.7665 \cdot 10^{-2}$
- $Y.2 = 3.1781 \cdot 10^{-2}$
- $O.2 = 3.0057 \cdot 10^{-2}$

Παρατηρείται πως μόνο η επιφάνεια Y.1 έχει χαμηλότερο ΑΣΔΡ σε σχέση με την κανονική γεωμετρία. Η Y.2 αν και δεν εμφανίζει δύο ζεύγη διών έχει μεγαλύτερο ΑΣΔΡ από την O.2 αλλά και από την αντίστοιχη επιφάνεια στην κανονική γεωμετρία. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι αρκετά αυξημένο το μέτρο των δευτερευουσών ροών στην επιφάνεια αυτή κυρίως προς το κέντρο της σε σχέση με την κανονική γεωμετρία.

Η ολική πίεση στην είσοδο είναι 1518230.3 Pa στην έξοδο 1 είναι 1514643.1 Pa και στην έξοδο 2 είναι 1513072.1 Pa. Η παροχή όγκου είναι 0.07514 m³/s στην είσοδο και 0.03757 m³/s στην έξοδο 1 και στην έξοδο 2. Συνεπώς οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με:

$$E_{loss} = P_{t_{in}} Q_{in} - P_{t_{out1}} Q_{out1} - P_{t_{out2}} Q_{out2} = 328.565 \text{ J/s}$$

$$\text{Ενώ σε m}\Sigma\text{Y είναι: } E_l = \frac{E_{loss}}{\rho g Q_{in}} = 0.5414 \text{ m}\Sigma\text{Y}$$

Πρόκειται για μείωση των απωλειών ενέργειας σχεδόν 37% σε σχέση με την κανονική γεωμετρία ενώ σε σχέση με την γεωμετρία Δ είναι της τάξης του 17.5%. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι μεγάλο μέρος των απωλειών συμβαίνει στο αρχικό τμήμα πριν τη διακλάδωση λόγω των απότομων αλλαγών κλίσης. Η γεωμετρία Δ παρουσιάζει τις μικρότερες απώλειες ενέργειας από όλες τις γεωμετρίες που έχουν εξεταστεί. Το πιο ενδιαφέρον ωστόσο είναι ότι οι αλλαγές που έγιναν δεν είναι ούτε εξεζητημένες ούτε ιδιαίτερα ακριβές. Ουσιαστικά, αν στο υπάρχον σύστημα διανομής αντικατασταθούν οι απότομες γωνίες, στο άνω και κάτω τμήμα μετά την διακλάδωση, με ενιαίους καμπύλους αγωγούς και αντικατασταθεί και το τμήμα από την καμπυλότητα μετά την είσοδο μέχρι τα κωνικά τμήματα από ενιαίο ευθύγραμμο αγωγό οι απώλειες θα μειωθούν σε πολύ μεγάλο βαθμό ακόμα και αν δεν φτάσουν το 37%. Κάνοντας μια πρόχειρη εκτίμηση με βάση τα δεδομένα που προέκυψαν από τις γεωμετρίες Α και Β, η ομαλοποίηση των κωνικών τμημάτων συνεισφέρει στην μείωση των απωλειών περίπου κατά 6%. Συνεπώς, με την απλή αντικατάσταση που προαναφέρθηκε πιθανολογείται ότι η μείωση των απωλειών θα είναι γύρω στο 30%.

Εξετάζοντας τη μείωση των απωλειών από οικονομικής άποψης προκύπτουν τα ακόλουθα:

Αρχικά, η μείωση των απωλειών ενέργειας σε mΣΥ από την αρχική γεωμετρία στην γεωμετρία Δ είναι ίση με 0.2613 mΣΥ. Ετησίως θα παράγονται επιπρόσθετα 1683 kWh. Συνεπώς, αν η τιμή πώλησης της kWh είναι περίπου 0.1 €/kWh, το επιπρόσθετο ετήσιο κέρδος θα είναι 168 €.

Όπως γίνεται αντιληπτό από την ανωτέρω εκτίμηση, το κέρδος το οποίο θα προέκυπτε από μια αντικατάσταση της αρχικής γεωμετρίας με την γεωμετρία Δ δεν υπερκαλύπτει το κόστος που απαιτείται για την αντικατάσταση. Ωστόσο, ο σχεδιασμός της γεωμετρίας Δ θα ήταν προτιμότερος από αυτόν της αρχικής γεωμετρίας σε περίπτωση που ο εξεταζόμενος υδροστρόβιλος δεν είχε ήδη κατασκευαστεί.

Κεφάλαιο 8: Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μοντελοποίηση του συστήματος διανομής υδροτροβίλου Pelton του εργαστηρίου Υδροδυναμικών Μηχανών του Ε.Μ.Π. και υπολογισμός της ροής σε αυτόν. Έπειτα εξετάστηκε η δυνατότητα βελτίωσης της γεωμετρίας ώστε να εμφανίζει λιγότερες απώλειες ενέργειας. Μελετώντας τα αποτελέσματα της εργασίας προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η κανονική γεωμετρία που χρησιμοποιείται έχει πολλές απότομες γωνίες και απότομες αλλαγές κλίσης με αποτέλεσμα η ροή να έχει έντονη ανομοιομορφία με πολλά σημεία τοπικής επιβράδυνσης της ροής και μία περιοχή – μετά την καμπυλότητα της εισόδου – στην οποία δημιουργούνται ανακυκλοφορίες και η ροή αποκολλάται.
2. Οι απώλειες ενέργειας που παρατηρούνται οφείλονται κυρίως στις υδραυλικές απώλειες στα τοιχώματα του αγωγού, στις απώλειες λόγω τυρβώδους ροής, στην αποκόλληση της ροής μετά την είσοδο και στις δίνες Dean που δημιουργούνται λόγω των αλλαγών κλίσεων ιδιαίτερα μετά την διακλάδωση.
3. Οι απώλειες ενέργειας αυξάνονται καθώς αυξάνεται η παροχή μάζας ωστόσο η ενέργεια που μεταφέρεται, όπως είναι λογικό, είναι μικρότερη όσο μικρότερη είναι η παροχή μάζας. Συνεπώς, το ποσοστό των απωλειών ενέργειας μειώνεται καθώς αυξάνεται η παροχή.
4. Το άνω τμήμα της διακλάδωσης παρουσιάζει μικρότερες απώλειες ολικής πίεσης σε σχέση με το κάτω τμήμα παρόλο που το άνω τμήμα έχει εντονότερη αλλαγή κλίσης. Αυτό συμβαίνει γιατί το κάτω τμήμα έχει εμφανώς μεγαλύτερο μήκος από το άνω.
5. Οι απώλειες ενέργειας καθώς επίσης και το ποσοστό απωλειών ενέργειας κατά τη λειτουργία μόνο με το άνω ακροφύσιο είναι εμφανίζουν μικρότερες τιμές σε σχέση με τη λειτουργία με δύο ακροφύσια.
6. Το ποσοστό απωλειών ολικής πίεσης στο άνω τμήμα της διακλάδωσης για λειτουργία μόνο με το άνω ακροφύσιο δεν εμφανίζει ιδιαίτερες διαφορές σε σχέση με τη λειτουργία με δύο ακροφύσια.
7. Οι απότομες γωνίες μετά την διακλάδωση προκαλούν σημαντικότερες απώλειες ενέργειας. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι απλή αντικατάσταση τους από ενιαίους καμπύλους αγωγούς οδηγεί σε μείωση των απωλειών κατά άνω από 15%.
8. Από τις βελτιωμένες γεωμετρίες που εξετάστηκαν η καλύτερη, δηλαδή αυτή που είχε τις ομαλότερες αλλαγές κλίσης και κανένα φάλτσο κόνιμο, εμφάνισε μείωση των απωλειών ενέργειας σε σχέση με την κανονική γεωμετρία κατά 37%. Το αποτέλεσμα αυτό δεν είναι τυχαίο καθώς η γεωμετρία αυτή ήταν η μόνη από της εξεταζόμενες στην οποία δεν δημιουργούνται δίνες μετά την καμπυλότητα.

Προτάσεις για Περεταίρω Μελέτη

- Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκε το σύστημα διανομής του υδροστροβίλου χωρίς τα ακροφύσια. Στην μελέτη θα μπορούσαν να ενταχθούν και τα ακροφύσια ώστε να δύναται να εξεταστεί και η ποιότητα της δέσμης που εξέρχεται από αυτά.
- Επίσης, είναι δυνατή η εξέταση της μείωσης των δευτερευουσών ροών με την τοποθέτηση διαφραγμάτων σε επιλεγμένες θέσεις.
- Με βάση την μελέτη που έγινε στην παρούσα εργασία, θα μπορούσε να διεξαχθεί μελέτη και άλλων συστημάτων διανομής καθώς και να γίνει μεταξύ τους σύγκριση.
- Η αρχική γεωμετρία υποβλήθηκε σε τροποποιήσεις από τις οποίες μία εμφάνιζε τις μικρότερες απώλειες και τη μεγαλύτερη ομοιομορφία. Η γεωμετρία αυτή ωστόσο δεν είναι απαραίτητα η βέλτιστη. Για την βέλτιστη γεωμετρία απαιτείται αριθμητική βελτιστοποίηση σχεδιασμού της διάταξης με χρήση κατάλληλης μεθόδου βελτιστοποίησης.

Βιβλιογραφία

1. Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, 'Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα', Εκδόσεις Συμμεών 2008

2. Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, ‘Υδροδυναμικές Μηχανές: Αντλίες – Υδροστρόβιλοι’, Εκδόσεις Συμεών 2002
3. World Energy Council, 2010 Survey of Energy Resources
4. www.jfccivilengineer.com
5. Σωκράτης Τσαγγάρης, ‘Μηχανική των Ρευστών’, Εκδόσεις Συμεών 2005
6. Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, ‘Υδροδυναμικές Εγκαταστάσεις: Σωληνώσεις – Αντλιοστάσια Υδραυλικό Πλήγμα’, Εκδόσεις Συμεών 1998
7. Γεώργιος Μπεργελές, ‘Υπολογιστική Ρευστομηχανική’, Εκδόσεις Συμεών 2006
8. Joel H. Ferziger, Milovan Peric, ‘Computational Methods for Fluid Dynamics’, 3rd revised edition, Springer 2002
9. Philip M. Ligrani, ‘A Study of Dean Vortex Development and Structure in a Curved Rectangular Channel With Aspect Ratio of 40 at Dean Number up to 430’, NASA, U.S. Army Research Laboratory, 1994
10. Gilbert Gilkes & Gordon Ltd., ‘Low Cost Pelton Turbine Design and Testing’ 2003
11. Filip Sadlo, Ronald Peikert, Etienne Parkinson, Markus Gross, ‘Vorticity Based Flow Analysis and Visualization for Pelton Turbine Design Optimization’, ETH Zurich
12. FLUENT, www.fluent.com
13. Αγαμέμνων Α. Βαρόνος, Διδακτορική Διατριβή, ‘ Μέθοδοι Αριθμητικής Προσομοίωσης και Εφαρμογή στην Καύση Στερεών Καυσίμων σε Βιομηχανικούς Ατμοπαραγωγούς’ Ε.Μ.Π. Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 1999
14. Μαθιουλάκης Δ., Αναγνωστόπουλος Ι., Τουζόπουλος Δ., Βιομηχανική Ρευστομηχανική, Ε.Μ.Π. 2005
15. www.energystorage.com
16. Fluent, Gambit. Released Notes, Tutorials

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Μέτρο Εφαπτόμενης Ταχύτητας

Ενώ για τη φορά της εφαπτόμενης ταχύτητας το Tecplot έχει έτοιμη την εντολή tangential vectors για τον υπολογισμό του μέτρου της απαιτούνταν μια πιο πολύπλοκη διαδικασία. Αρχικά, με την εντολή calculate variables υπολογίστηκε η μεταβλητή Grid K-Unit (vector). Έπειτα με την εντολή specify equations υπολογίστηκε η κάθετη στην επιφάνεια συνιστώσα της ταχύτητας (variable=-(u*x grid k unit + v * y grid k unit + w * z grid k unit)) εν συνεχεία, με την ίδια εντολή, έγινε αφαίρεση του μέτρου της κάθετης συνιστώσας από το μέτρο της ταχύτητας

(velocity magnitude) ώστε να βρεθεί το μέτρο της εφαπτόμενης συνιστώσας της ταχύτητας ($\text{variable} = \sqrt{(\text{velocity magnitude})^2 - (\text{κάθετη συνιστώσα})^2}$)

Υπολογισμός ΑΣΔΡ

Αρχικά, οι προς εξέταση διατομές, εξήχθησαν (export) από το Fluent με όλα τα δεδομένα που το πρόγραμμα είχε υπολογίσει κατά την επαναληπτική διαδικασία. Μέσα στις ήδη υπολογισμένες μεταβλητές ήταν και η cell volume δηλαδή ο όγκος του κελιού. Παρόλο που η διατομή έχει δύο διαστάσεις, τα δισδιάστατα στοιχεία αποτελούν επιφάνειες τρισδιάστατων στοιχείων συνεπώς το ήδη υπολογισμένο cell volume δίνει την πληροφορία του όγκου του τρισδιάστατου στοιχείου στο οποίο κάθε δισδιάστατο στοιχείο. Όπως έχει αναφερθεί, ήταν επιθυμητό να υπολογιστεί η επιφάνεια του κάθε στοιχείου. Ωστόσο, ούτε το Fluent ούτε το Tecplot δίνει την δυνατότητα απ' ευθείας υπολογισμού της επιφάνειας των δισδιάστατων στοιχείων. Για το λόγο αυτό, μέσω της εντολής του Tecplot calculate variables έγινε επανυπολογισμός της μεταβλητής cell volume. Το Tecplot όμως, δεν είχε τις συνολικές πληροφορίες που διέθετε το Fluent οπότε κατά την εκτέλεση αυτής της εντολής αναγνώριζε τα δισδιάστατα στοιχεία της διατομής σαν τρισδιάστατα στοιχεία με μηδενική τη μία διάσταση και τελικά αυτό που υπολόγισε ήταν το ζητούμενο εμβαδόν της επιφάνειας του κάθε στοιχείου.

Τα δεδομένα για το cell volume και το μέτρο της εφαπτόμενης ταχύτητας γράφτηκαν (write) σε αρχείο data και έπειτα έγιναν οι ζητούμενοι υπολογισμοί μέσω του Excell.