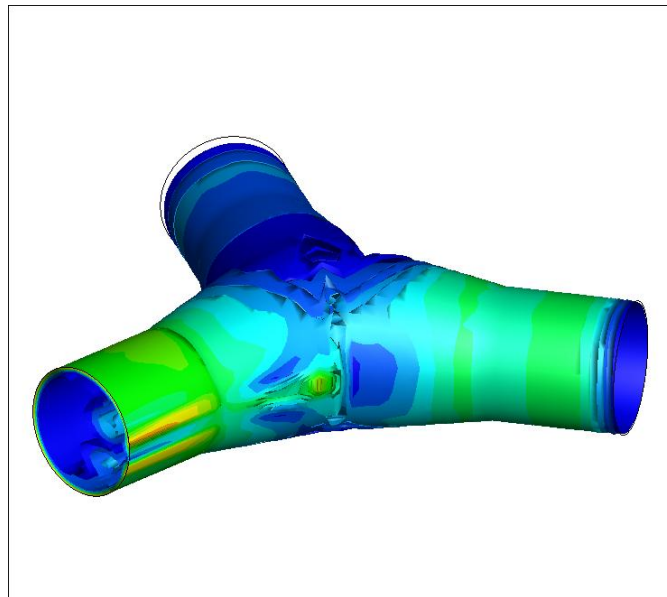




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ
ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΝΑΣΤΡΕΨΙΜΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΝΤΛΙΑΣ-
ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑΚΗΣ Θ. ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ι. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2011

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και ως αντικείμενο είχε την αριθμητική επίλυση της ροής σε μία υδραυλική διάταξη διανομής μιας αναστρέψιμης μονάδας αντλίας-υδροστροβίλου με αντλησιοταμίευση. Η διάταξη αυτή έχει σχεδιαστεί στα πλαίσια των μελετών για την κατασκευή του συστήματος αντλησιοταμίευσης ενός υβριδικού υδροηλεκτρικού έργου στο νησί El Hierro και επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία άντλησης και παραγωγής ισχύος με την χρήση ενός αγωγού προσαγωγής μεταξύ άνω και κάτω ταμιευτήρα.

Πρωταρχικός στόχος της εργασίας ήταν η αριθμητική επίλυση της ροής στη διάταξη με τη βοήθεια του εμπορικού υπολογιστικού πακέτου FLUENT για διάφορες περιπτώσεις λειτουργίας του υβριδικού σταθμού παραγωγής. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά υπολογίστηκαν οι συνολικές απώλειες σε περίοδο ενός έτους για δεδομένη χρονοσειρά παροχών αντλιών και υδροστροβίλων που αντιστοιχεί σε μελετώμενο υβριδικό σταθμό παραγωγής από ΑΠΕ σε ελληνικό νησί.

Στην συνέχεια έγινε μια παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης των βασικών γεωμετρικών παραμέτρων σχεδίασης της διάταξης στις συνολικές ενεργειακές απώλειες. Μέσα από αυτήν την διαδικασία βρέθηκε η βέλτιστη γεωμετρία της διάταξης η οποία ελαχιστοποιεί τις συνολικές ετήσιες απώλειες ενέργειας στη διάταξη διανομής για δεδομένη χρονοσειρά παροχών και προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν τα χαρακτηριστικά της ροής. Τα αποτελέσματα έδειξαν μεγάλη εξάρτηση των συνολικών ετήσιων απωλειών ενέργειας από την διακινούμενη παροχή και από την γωνία αλλαγής κατεύθυνσης της ροής. Τέλος βρέθηκε και για τυχαία χρονοσειρά παροχών μια διαφορετική βέλτιστη γεωμετρία που ελαχιστοποιεί τις συνολικές απώλειες.

Abstract

This diploma thesis developed at the School of Mechanical Engineering of NTUA and had an object of study the numerical solution of a flow through a hydraulic distribution system which is used in a reversible pumped storage hydroelectric plant. This distribution system is designed as part of studies of the construction of a hybrid pumped storage hydroelectric plant on the island of El Hierro and allows simultaneous operation of pumps and turbines using only one penstock between the upper and lower reservoir.

The primary objective of this work was the numerical solution of the flow through the distribution system using the commercial software package FLUENT for various cases of operation of the hybrid power plant. Based on the results the total losses of energy in one year were calculated for a given time series of volume flow which is used in a hybrid pumped storage hydroelectric plant on a Greek island.

Then there was a parametric study of the effect of basic geometric design parameters of the distribution system on the total energy losses. Through this process the optimum geometry of the distribution system which minimizes the total annual energy losses was found and there were extracted many useful conclusions about the characteristics of the flow. The results have shown great dependence of the total annual energy losses by the volume flow and the angle of the direction change of the flow. Finally a different geometry that minimizes the total loss was found for another time series of volume flow.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκ. Καθηγητή κ. Ι. Αναγνωστόπουλο για την συνεργασία και τις πολύτιμες υποδείξεις και κατευθύνσεις σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου προσέφερε κατά τα μαθητικά και φοιτητικά μου χρόνια.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract.....	3
Κεφάλαιο 1 ^ο -Εισαγωγή	9
1.1 Σπουδαιότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	9
1.2 Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	10
1.3 Διάρθρωση εργασίας	13
Κεφάλαιο 2 ^ο – Αντλησιοταμίευση και απώλειες ενέργειας.....	15
2.1 Εισαγωγή.....	15
2.2 Αρχή λειτουργίας και πλεονεκτήματα	16
2.3 Μονάδες αντλησιοταμίευσης που εντάσσονται σε υβριδικούς σταθμούς.	17
2.4 Μονάδα αντλησιοταμίευσης με αναστρέψιμη μηχανή	18
2.5 Απλή αντλησιοταμίευση με διπλό αγωγό	19
2.6 Απλή αντλησιοταμίευση με έναν αγωγό.....	20
2.7 Σύνθετη λειτουργία αντλησιοταμίευσης με μονή σωλήνωση.....	21
2.8 Απώλειες ενέργειας σε σωληνώσεις	22
2.9 Μόνιμη ροή σε ευθύγραμμο σωλήνα	23
2.9.1 Στρωτή ροή σε ευθύγραμμο κυλινδρικό σωλήνα	23
2.9.2 Τυρβώδης ροή σε ευθύγραμμο κυλινδρικό σωλήνα.....	24
2.10 Απώλειες σε στοιχεία σωληνώσεων	25
2.11 Μεταβολή διαμέτρου σωλήνα	25
2.12 Μεταβολή κατεύθυνσης της ροής.....	28
2.13 Διακλαδώσεις ροής	30
Κεφάλαιο 3 ^ο – Αριθμητική μοντελοποίηση	33
3.1 Εισαγωγή.....	33
3.2 Εφαρμογή των μεθόδων ανάλυσης υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.....	33
3.3 Εξισώσεις Navier-Stokes	35
3.4.1 Μοντελοποίηση τύρβης.....	35
3.4.2 Μοντέλο k-ε.....	36
3.5 Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων	37
3.6 Η μέθοδος SIMPLE.....	39
3.7 Συναρτήσεις τοιχώματος.....	39
Κεφάλαιο 4 ^ο - Γεωμετρία Διάταξης	41

4.1.1 Κατασκευή του μοντέλου της γεωμετρίας.....	41
4.1.2 Διαδικασία κατασκευής	43
4.2.1 Δημιουργία πλέγματος	46
4.2.2 Πλεγματοποίηση των επιφανειών.	47
4.2.3 Δημιουργία τρισδιάστατου πλέγματος.....	50
4.3 Χαρακτηρισμός επιφανειών	52
Κεφάλαιο 5 ^ο - Έλεγχος ανεξαρτησίας πλέγματος.....	55
5.1 Εισαγωγή.....	55
5.2 Πλέγμα για χαμηλές ταχύτητες.....	57
5.2.1 Εισαγωγή υπολογιστικού πλέγματος στο Fluent.....	58
5.2.2 Καθορισμός ρευστού και συνθηκών πίεσης.....	59
5.2.3 Καθορισμός οριακών συνθηκών	59
5.2.4 Καθορισμός παραμέτρων επίλυσης.....	60
5.2.5 Επίλυση της ροής	60
5.2.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	61
5.3 Πλέγμα για υψηλές ταχύτητες	65
5.3.1 Επίλυση της ροής στο Fluent.....	66
5.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	67
Κεφάλαιο 6 ^ο -Αριθμητική επίλυση ροής.....	71
6.1 Εισαγωγή.....	71
6.2 Επίλυση σεναρίων στο Fluent.....	72
6.2.1 Σενάριο 1ο	74
6.2.2 Σενάριο 2ο	80
6.2.3 Σενάριο 3ο	85
6.2.4 Σενάριο 4ο	89
6.2.5 Σενάριο 5ο	95
6.2.6 Σενάριο 6ο	99
6.2.7 Σενάριο 7ο	103
6.2.8 Σενάριο 8ο	110
6.2.9 Σενάριο 9ο	118
6.3 Υπολογισμός ενεργειακών απωλειών	125
Κεφάλαιο 7 ^ο -Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης των γεωμετρικών παραμέτρων σχεδίασης της διάταξης στις συνολικές απώλειες.....	133
7.1 Εισαγωγή.....	133

7.2 Παραμετρική διερεύνηση με παράμετρο την διάμετρο d_{max}	134
7.2.1 Περίπτωση με $d_{max}=2.5m$	134
7.2.2 Περίπτωση με $d_{max}=1.5 m$	136
7.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις περιπτώσεις με $d_{max}=1,5 m$, $d_{max}=2 m$ και $d_{max}=2,5 m$	139
7.3 Παραμετρική διερεύνηση με παράμετρο τις γωνία α_2	158
7.3.1 Περίπτωση με $\alpha_2=140^\circ$	158
7.3.2 Περίπτωση με $\alpha_2=100^\circ$	160
7.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για $\alpha_2=100^\circ$, $\alpha_2=120^\circ$ και $\alpha_2=140^\circ$	162
7.4 Παραμετρική διερεύνηση με παράμετρο την γωνία α_1	183
7.4.1 Περίπτωση για $\alpha_1=80^\circ$	183
7.4.2 Περίπτωση για $\alpha_1=60^\circ$	186
7.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για $\alpha_1=120^\circ$, $\alpha_1=80^\circ$ και $\alpha_1=60^\circ$	188
7.5 Παραμετρική διερεύνηση με παράμετρο την γωνία φ	209
7.5.1 Περίπτωση με $\varphi=8^\circ$	209
7.5.2 Περίπτωση με $\varphi=12^\circ$	211
7.5.3 Περίπτωση με $\varphi=5^\circ$	213
7.5.4 Περίπτωση με $\varphi=6.5^\circ$	215
7.5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις διάφορες γωνίες φ	217
7.6 Βέλτιστη γεωμετρία για άλλη χρονοσειρά παροχών.....	218
Κεφάλαιο 8° Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα.....	221
8.1 Εισαγωγή.....	221
8.2 Συμπεράσματα.....	221
8.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	222
Βιβλιογραφία.....	224
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	225

Κεφάλαιο 1^ο-Εισαγωγή

1.1 Σπουδαιότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Η τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΗΕ) δίνει την δυνατότητα της ανάπτυξης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), όπως είναι η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, συμβάλλοντας έτσι στην μείωση των αέριων του θερμοκηπίου από τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο και τον ήλιο δεν εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αλλά είναι μεταβλητή. Παραγωγή αιολικής ενέργειας έχουμε όταν υπάρχει άνεμος και ηλιακή ενέργεια όταν έχουμε ηλιοφάνεια, ενώ η ισχύς που παράγεται μεταβάλλεται ανάλογα με την ισχύ του ανέμου και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την απαίτηση να είναι η παραγωγή ενέργειας ίση με την ζήτηση κάνει τις ΑΠΕ λιγότερο ανταγωνιστικές σε σχέση με τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας) όσον αφορά την διείσδυση τους στο δίκτυο. Επομένως η ΑΗΕ είναι μία λύση ώστε να επιτευχθεί μέγιστη διείσδυση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο από ΑΠΕ. Ήδη κάποιες χώρες έχουν φθάσει στο όριο διείσδυσης αιολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό τους δίκτυο μιας και περαιτέρω διείσδυση αυτής θα προκαλούσε αστάθεια στο δίκτυο τους επομένως γίνεται απαραίτητη η χρήση μεθόδων ΑΗΕ. Επίσης σε περιόδους χαμηλού φορτίου οι μεγάλοι θερμοκοί σταθμοί δεν μπορούν να μειώσουν την παραγωγή τους κάτω από ένα τεχνικό ελάχιστο όριο οπότε τις χρονικές αυτές περιόδους φαίνεται να περισσεύει ισχύς στο δίκτυο. [1]

Εκτός αυτού, η ΑΗΕ συμβάλει στην ευστάθεια και αξιοπιστία του δικτύου, θέματα τα οποία είναι σημαντικά σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) και ιδιαίτερα σε απομονωμένα δίκτυα όπως είναι αυτά των νησιών.

Επίσης, η ΑΗΕ συμβάλλει στην οικονομικότερη λειτουργία των ΣΗΕ. Η απότομη διακύμανση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (αιχμές φορτίου) κατά τη διάρκεια μίας ημέρας μπορούν τώρα να καλυφθούν από την αποθηκευμένη ενέργεια ενός σταθμού που εκμεταλλεύεται την αποθηκευμένη ενέργεια και όχι να ενεργοποιηθεί ένας σταθμός αιχμής, του οποίου η λειτουργία κοστίζει πολύ.

1.2 Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Τα συστήματα ΑΗΕ ποικίλουν ανάλογα με την μέθοδο αποθήκευσης, την ποσότητα της ενέργειας την οποία μπορούν να αποθηκεύσουν, το πόσο γρήγορα και για πόσο χρόνο μπορούν να απελευθερώσουν την αποθηκευμένη ενέργεια.

Οι χρονικοί ορίζοντες για τη χρήση των αποθηκευτικών διατάξεων αποθήκευσης χωρίζονται σε:

- Διατάξεις Βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης: Πρόκειται για τις διατάξεις αποθήκευσης που μπορούν να προσφέρουν ή να απορροφήσουν ενέργεια για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (λίγα δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά). Τυπικές εφαρμογές αυτού του είδους είναι η αδιάλειπτη παροχή ισχύος και η ευστάθεια λειτουργίας ενός ΣΗΕ.
- Διατάξεις Μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης: Αφορά διατάξεις που χρησιμοποιούνται για χρονικούς ορίζοντες από μερικά λεπτά ως μερικές ώρες. Τέτοιου είδους εφαρμογές είναι η διαχείριση ενέργειας από μονάδες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας με σκοπό την ενίσχυση της παροχής στρεφόμενης εφεδρείας και η διαχείριση παρεχόμενης ισχύος στους καταναλωτές.
- Διατάξεις Μακροπρόθεσμης αποθήκευσης: Αφορά διατάξεις αποθήκευσης από αρκετές ώρες μέχρι βδομάδα και μήνες. Χρησιμοποιείται κυρίως για την εξομάλυνση της ζήτησης μεταξύ ωρών αιχμής και μη αιχμής ή την ικανοποίηση ζήτησης αιχμής έχοντας αποθηκεύσει ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.

Τα διάφορα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζουν τη λειτουργία τους σε μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, μαγνητική, δυναμική ενέργεια και στη συνέχεια την εκ νέου μετατροπή της ενέργειας αυτής σε ηλεκτρική. Υπάρχουν και μέσα τα οποία αποθηκεύουν κατευθείαν την ηλεκτρική ενέργεια.[2]

Συνοπτικά τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι [4]:

- i. Συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες όπως νατρίου-θειου (NaS), ιόντων λιθίου, ροής και προχωρημένου τύπου (BESS).
- ii. Συστήματα αποθήκευσης με υπέρ-πυκνωτές (ultracapacitors) και υπεραγωγίμα πηνία (SMES)
- iii. Στρεφόμενες μάζες – Σφόνδυλοι (flywheels)
- iv. Συστήματα αποθήκευσης με συμπιεσμένο αέρα (CAES)
- v. Υδρογόνο
- vi. Αντλησιοταμίευση (Pump-Hydro Storage, PHS)
- vii. Συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

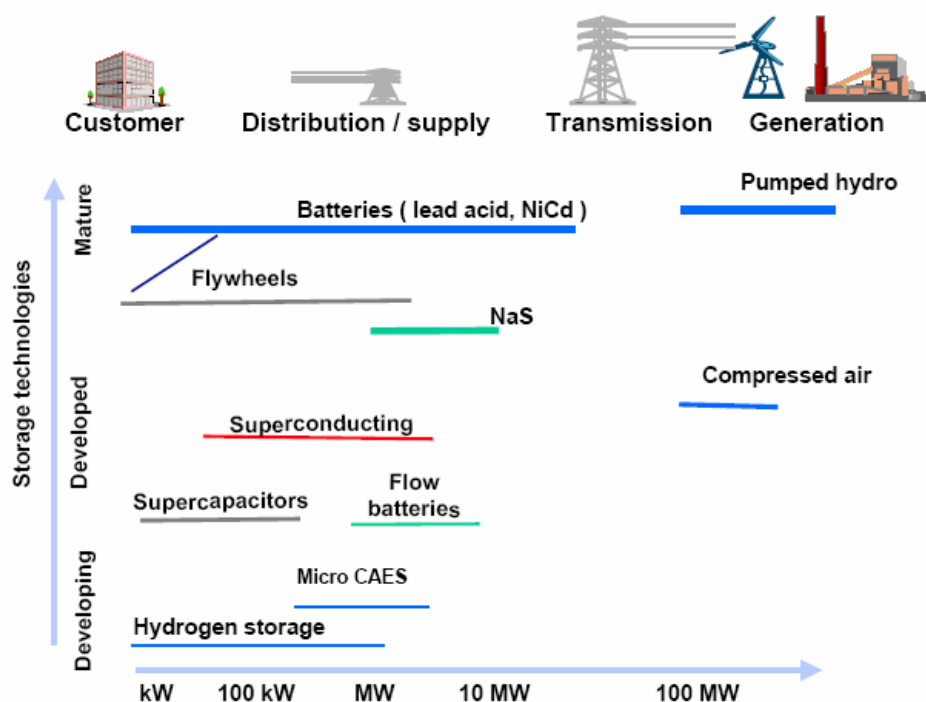
Οι διάφορες μπαταρίες, σφόνδυλοι και υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται ισχύς λίγων ωρών-λεπτών (π.χ. εξομάλυνση αιχμών, διασφάλιση ποιότητας ισχύος, διανομή) . Αντίθετα η αντλησιοταμίευση και τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται παραγωγή μεγάλης ισχύος για πολλές ώρες. Αυτά μπορούν να φανούν καλύτερα στο σχετικό διάγραμμα για τα τυπικά μεγέθη των αποθηκευτικών διατάξεων, τις τυπικές εφαρμογές τους και την ωριμότητά τους που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.1. Η Εικόνα 1.2 παρουσιάζει το χρονικό ορίζοντα και την ισχύ που απαιτείται για τις διάφορες ομάδες εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας [3]. Παρατηρείται ότι για την διασφάλιση της ποιότητας και αξιοπιστίας του δικτύου απαιτείται ισχύς έως 10MW η οποία θα διαρκεί για λίγα λεπτά. Αντίθετα σε περίπτωση άμεσης ζήτησης ενέργειας απαιτείται μεγάλη ισχύς για περισσότερη από μια ώρα.

Τέλος όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.1 μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία αποθήκευσης είναι αυτή του υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου (fuel cell) είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε για μεταφορές. Το υδρογόνο έχει πάρα πολύ μεγάλη θερμογόνο δύναμη ενώ σημαντική έρευνα έχει πραγματοποιηθεί για την ασφαλή αποθήκευσή του σε μεταλλικά δοχεία ή ράβδους διαφόρων σχημάτων με χρήση νερού ή αέρα για την ψύξη του και υπάρχουν ήδη διαθέσιμα σχετικά εμπορικά προϊόντα.

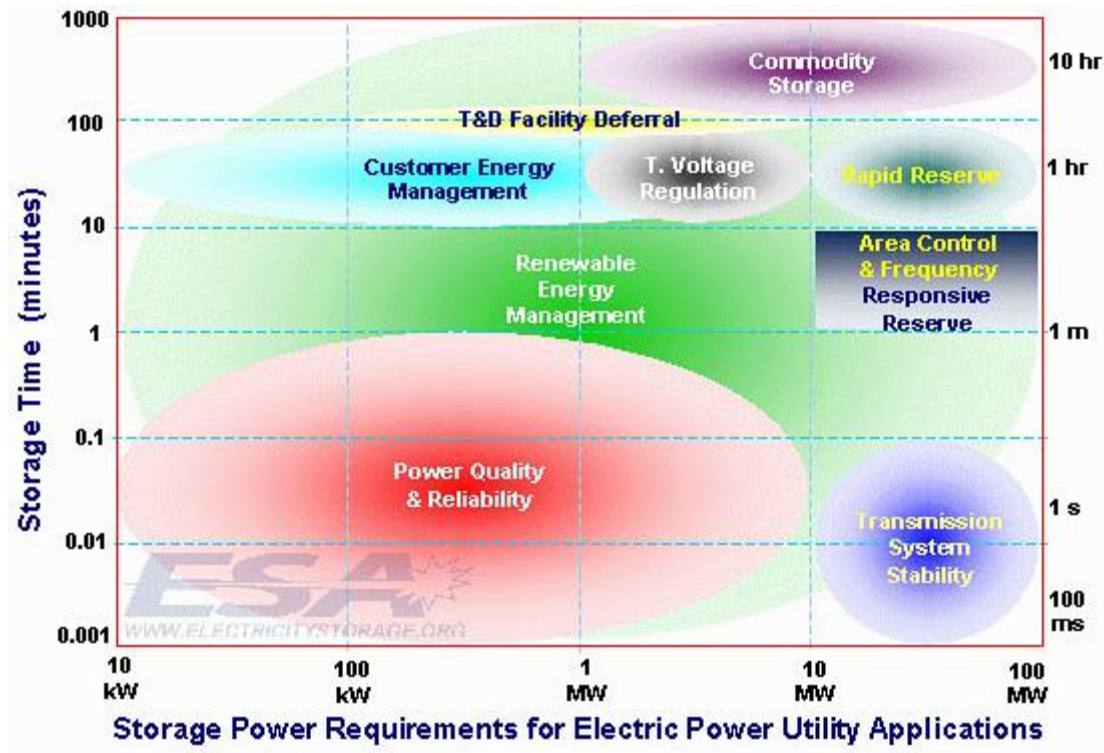
Όλες οι μέθοδοι αποθήκευσης έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους και είναι κατάλληλες για συγκεκριμένες εφαρμογές η κάθε μια. Άλλες χρησιμοποιούνται μόνο για την διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ευστάθειας του δικτύου (ηλεκτρικός συσσωρευτής, σφόνδυλος, μπαταρίες) και άλλες για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας (αντλησιοταμίευση, πεπιεσμένος αέρας). Κατά την διαδικασία αποθήκευσης ενέργειας και στην συνέχεια επαναπόδοσής της υπάρχουν απώλειες οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα η ενέργεια που αποδίδεται να είναι μικρότερη από αυτή που αποθηκεύεται. Ορίζεται λοιπόν ως βαθμός απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ο λόγος της ενέργειας που αποδίδεται προς την ενέργεια αποθηκεύεται [1]. Στον Πίνακα 1.1 παρατηρείται για τις διάφορες τεχνολογίες ο βαθμός απόδοσης και το μέγεθος.

Τεχνολογία Αποθήκευσης	Βαθμός Απόδοσης (%)	Μέγεθος (MWh)
Αντλησιοταμίευση	-75	0-20000
Πεπιεσμένος αέρας	70	250-2200
Σφόνδυλος	90+	0.1-20
Ηλεκτρικός συσσωρευτής	70-84	17-40

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την αντλησιοταμίευση και τις διάφορες παραλλαγές της.



Εικόνα 1.1 Μέγεθος, εφαρμογές και τεχνολογική ωριμότητα των διάφορων μεθόδων αποθήκευσης



Εικόνα 1.2 Απαιτήσεις ισχύος και χρονικής διάρκειας αποθήκευσης για διάφορες εφαρμογές των ΣΗΕ.

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η αριθμητική επίλυση και μελέτη της ροής σε ένα πρότυπο σύστημα διανομής που χρησιμοποιείται σε έναν αναστρέψιμο σταθμό παραγωγής με αντλησιοταμίευση και η εύρεση των ετήσιων απωλειών ενέργειας αυτού για δεδομένη χρονοσειρά παροχών.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια βιβλιογραφική επισκόπηση για την αντλησιοταμίευση και τις απώλειες ενέργειας στις σωληνώσεις.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται η αριθμητική μοντελοποίηση του προβλήματος και παρουσιάζονται διάφορα στοιχεία για τις εξισώσεις ροής και τον τρόπο που επιλύονται.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η γεωμετρία της διάταξης και η διαδικασία κατασκευής του υπολογιστικού πλέγματος.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται ο έλεγχος ανεξαρτησίας πλέγματος. Ουσιαστικά εκλέγεται το υπολογιστικό πλέγμα για την επίλυση των διάφορων σεναρίων.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται η επίλυση των διάφορων σεναρίων για τυχαία γεωμετρία και η εύρεση των συνολικών ετήσιων απωλειών.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται μια παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης των βασικών γεωμετρικών παραμέτρων σχεδίασης της διάταξης στις συνολικές ενεργειακές απώλειες.

Τέλος στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

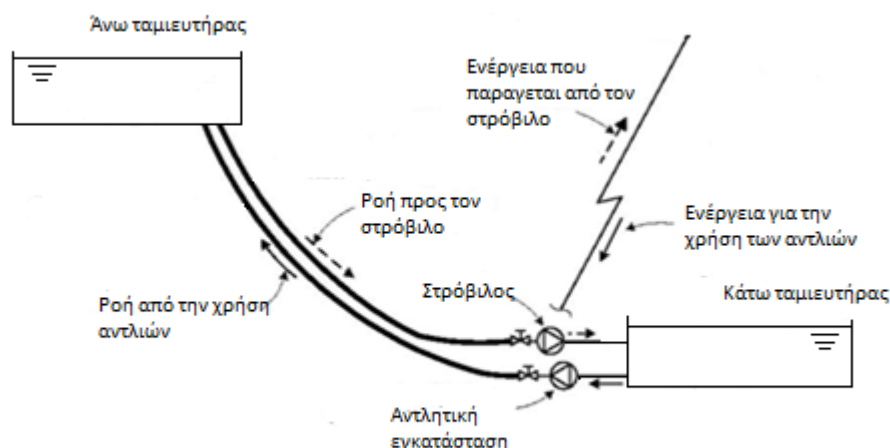
Κεφάλαιο 2^ο - Αντλησιοταμίευση και απώλειες ενέργειας

2.1 Εισαγωγή

Η πιο διαδεδομένη ιδέα για τη μαζική αποθήκευση ενέργειας είναι η χρήση μονάδων αντλησιοταμίευσης. Η αντλησιοταμίευση προκύπτει από την ανάγκη της αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, όταν αυτά διατίθενται με κάποιο τρόπο μία δεδομένη χρονική στιγμή, κατά την οποία δεν μπορούν να απορροφηθούν. Τα αποθηκευμένα ποσά ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν μία άλλη χρονική στιγμή, όταν προκύψει σχετική ανάγκη για παροχή ενέργειας.

Ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Μία αντλία ή ένα σύνολο παράλληλα συνδεδεμένων αντλιών
- Ένα υδροστροβίλο ή ένα σύνολο παράλληλα συνδεδεμένων υδροστροβίλων
- Δύο ταμιευτήρες νερού οι οποίες βρίσκονται σε ικανή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους
- Μία σωληνογραμμή για την άντληση του νερού από την κάτω δεξαμενή προς την άνω
- Μία σωληνογραμμή για την προσαγωγή του νερού από την άνω δεξαμενή προς την κάτω μέσω του υδροστροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας



Εικόνα 2.1 Μονάδα αντλησιοταμίευσης

2.2 Αρχή λειτουργίας και πλεονεκτήματα

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος αντλησιοταμίευσης είναι απλή. Η περίσσεια ενέργειας τροφοδοτεί τις αντλίες, μέσω των οποίων το εργαζόμενο μέσο (νερό) ανυψώνεται διά του αγωγού ανόδου από τον κάτω ταμιευτήρα στον άνω, δίνοντάς μας έτσι τη δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας με τη μορφή υδραυλικής ενέργειας. Όταν κάποια άλλη χρονική στιγμή χρειαζόμαστε ενέργεια, το νερό από τον άνω ταμιευτήρα αφήνεται να οδεύσει μέσω του αγωγού καθόδου προς τον κάτω ταμιευτήρα, διερχόμενο δε μέσω των υδροστροβίλων παράγει την επιθυμητή ενέργεια.

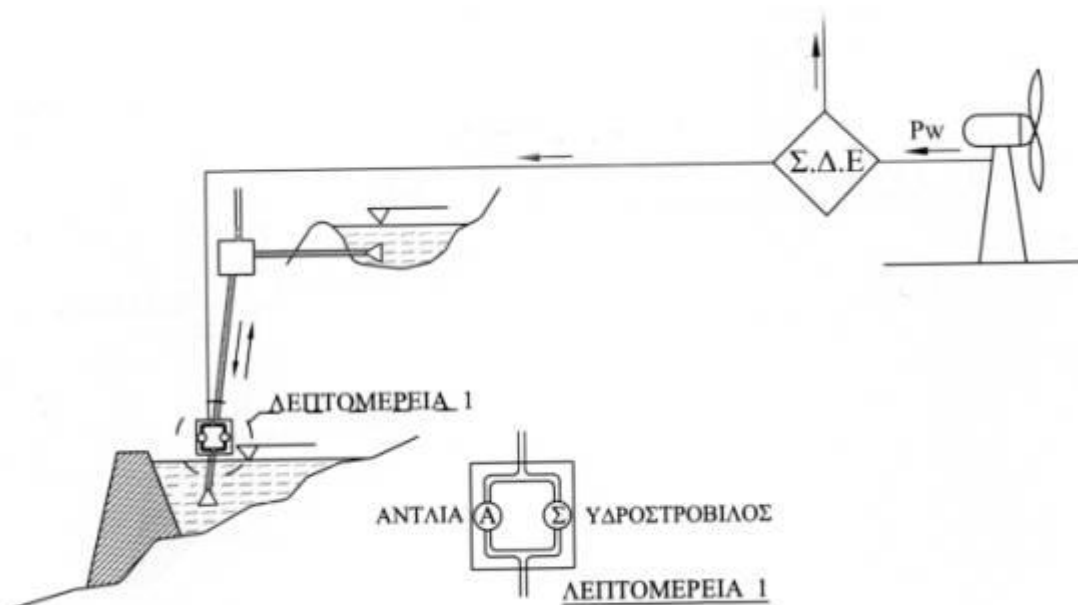
Επομένως η αντλησιοταμίευση έχει διπλό όφελος. Από την μία απορροφά περίσσεια ενέργειας κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης μετατρέποντάς την σε υδραυλική ενέργεια (και η οποία αποθηκεύεται στον άνω ταμιευτήρα και από την άλλη αποδίδει στο δίκτυο κατά της ώρες αιχμής την ενέργεια που έχει αποταμιεύσει [5]. Μια μονάδα αντλησιοταμίευσης λειτουργεί και σαν μια απλή υδροηλεκτρική μονάδα αποδίδοντας πρωτογενή ενέργεια από την αξιοποίηση των φυσικών εισροών του άνω ταμιευτήρα.

Λόγω των βαθμών απόδοσης αντλιών και υδροστροβίλων αλλά και των υδραυλικών απωλειών στις σωληνώσεις, από την αρχική διατιθέμενη προς αποθήκευση ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας μόνο ένα μέρος αυτής τελικά παίρνουμε πίσω, μέσω της παραγωγής του υδροστροβίλου, το οποίο ανέρχεται σε 65-80% του αρχικού ποσού[1]. Τούτο καταδεικνύει τον

ορθολογισμό χρήσης της αντλησιοταμίευσης μόνο ως αποθηκευτικού μέσου περισσευμάτων ενέργειας.

2.3 Μονάδες αντλησιοταμίευσης που εντάσσονται σε υβριδικούς σταθμούς.

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης μπορούν να λειτουργήσουν εξαιρετικά συνδυαζόμενα με αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκά πάρκα ή με θερμικά συστήματα, αποθηκεύοντας πάντα περίσσεια παραγόμενης ενέργειας ή ενέργειας που δεν μπορεί να απορροφηθεί. Η χρήση υβριδικών αιολικών-υδροηλεκτρικών συστημάτων για παραγωγή ισχύος σε νησιά ή άλλες μη διασυνδεδεμένες περιοχές φαίνεται να είναι η καλύτερη λύση για να ξεπεραστούν τα προβλήματα αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας, αλλά και της διείσδυσης του ανέμου στο δίκτυο [6]. Για μικρά νησιά με χαμηλή εγκατεστημένη ισχύ, η μέθοδος της αντλησιοταμίευσης φαίνεται να είναι ο πλέον ελπιδοφόρος τρόπος για την εκμετάλλευση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού σε υψηλό βαθμό διείσδυσης. Σε μεγαλύτερα νησιά, μια τέτοια ενεργειακή μονάδα θα μπορούσε να αντικαταστήσει μια ή περισσότερες βασικές θερμικές μονάδες, καθιστώντας έτσι την επένδυση πιο επικερδή. Σχηματικά, ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης συνδυαζόμενο με αιολικά πάρκα φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 2.2 Υβριδική μονάδα αντλησιοταμίευσης

Κεφάλαιο 2^ο - Αντλησιοταμίευση και απώλειες ενέργειας

Σε ένα τέτοιο σύστημα η μονάδα αντλησιοταμίευσης αποτελεί την αποθηκευτική μονάδα του συστήματος η οποία όταν απαιτηθεί μπορεί να αποδώσει και ισχύ στο δίκτυο. Όταν υπάρχει έλλειψη αιολικής ισχύος και δεν μπορούμε να καλύψουμε τις ενεργειακές απαιτήσεις του δικτύου τότε νερό από τον άνω ταμιευτήρα τροφοδοτεί τον υδροστρόβιλο, ο οποίος παράγει μέσω των γεννητριών ηλεκτρική ισχύ. Όταν υπάρχει πλεονάζουσα αιολική ισχύς αυτή χρησιμοποιείται για την άντληση του νερού από των κάτω ταμιευτήρα στον άνω. Έτσι επιτυγχάνεται η αποθήκευση της αιολικής ενέργειας σε δυναμική. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας είναι αυτό που ελέγχει και αποφασίζει για το πότε θα λειτουργούν οι αντλίες και ο υδροστρόβιλος λαμβάνοντας στοιχεία από το δίκτυο, το αιολικό πάρκο και την μονάδα αντλησιοταμίευσης.

Επομένως μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής λειτουργίες σε μία υβριδική μονάδα αντλησιοταμίευσης [7].

- Η υβριδική μονάδα δεν λειτουργεί. Δεν υπάρχει παραγωγή ισχύος ούτε από το αιολικό πάρκο ούτε από τους στροβίλους. Επίσης δεν υπάρχει λειτουργία των αντλιών και επομένως δεν έχουμε αποθήκευση ενέργειας.
- Η μονάδα αποθηκεύει ενέργεια μέσω της διαδικασίας άντλησης με ισχύ που προέρχεται από το αιολικό πάρκο
- Η μονάδα παράγει ενέργεια και τροφοδοτεί το δίκτυο μέσω των στροβίλων.
- Η μονάδα παράγει αιολική ενέργεια που τροφοδοτείται κατευθείαν στο δίκτυο.
- Ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας και από τον στρόβιλο και από το αιολικό πάρκο
- Ταυτόχρονη λειτουργία αντλιών και στροβίλου (αν το επιτρέπει η εγκατάσταση) όπου η αιολική ενέργεια αποθηκεύεται ενώ ταυτόχρονα παράγεται ισχύς από τον στρόβιλο.
- Αποθήκευση ενέργειας που προέρχεται από άλλες μονάδες του δικτύου που μπορεί να είναι είτε συμβατικές είτε ανανεώσιμες.

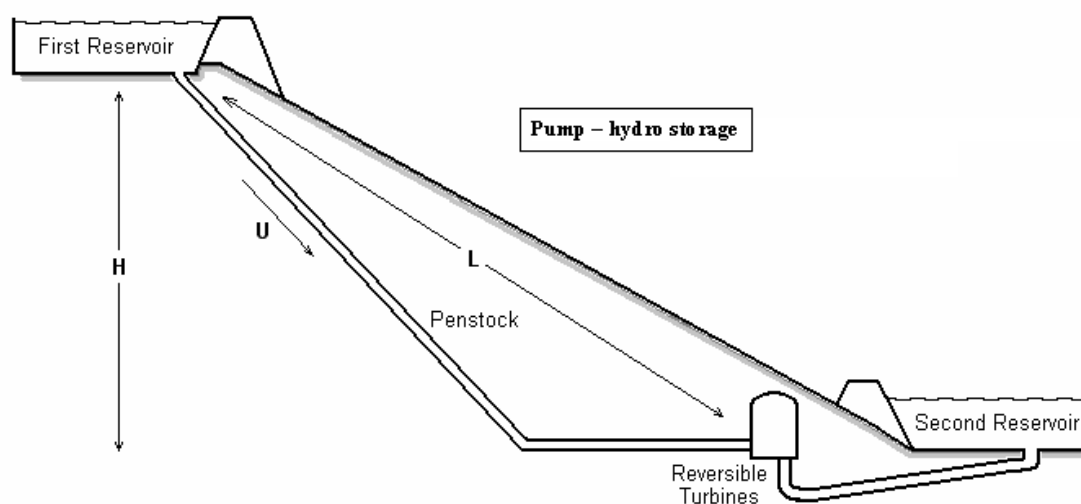
2.4 Μονάδα αντλησιοταμίευσης με αναστρέψιμη μηχανή

Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε μια αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή που λειτουργεί και ως αντλία και ως στρόβιλος. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι χρειάζεται ένας αγωγός κάνει την μονάδα αυτή πιο οικονομική από πλευράς κόστους σε σχέση με τις προηγούμενες. Όπως είναι φυσικό, δεν μπορεί να υπάρξει παράλληλη λειτουργία αντλίας και στροβίλου αφού

Κεφάλαιο 2^ο - Αντλησιοταμίευση και απώλειες ενέργειας

ουσιαστικά έχουμε μία μηχανή. Επομένως δεν μπορεί να υπάρχει ταυτόχρονη λειτουργία της διαδικασίας άντλησης και της διαδικασίας παραγωγής ισχύος. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι αυτό της βέλτιστης λειτουργίας της μηχανής. Στις προηγούμενες περιπτώσεις οι αντλίες και οι υδροστρόβιλοι επιλέγονταν να λειτουργούν στο κανονικό σημείο λειτουργίας τους ενώ σε αυτήν την περίπτωση επειδή έχουμε μία μηχανή αυτό δεν μπορεί να γίνει και για τις δύο διεργασίες, δηλαδή άντληση και παραγωγή ισχύος. Έτσι, οι απώλειες αναμένονται να είναι μεγαλύτερες σε σχέση με την περίπτωση όπου έχουμε ξεχωριστές μηχανές.

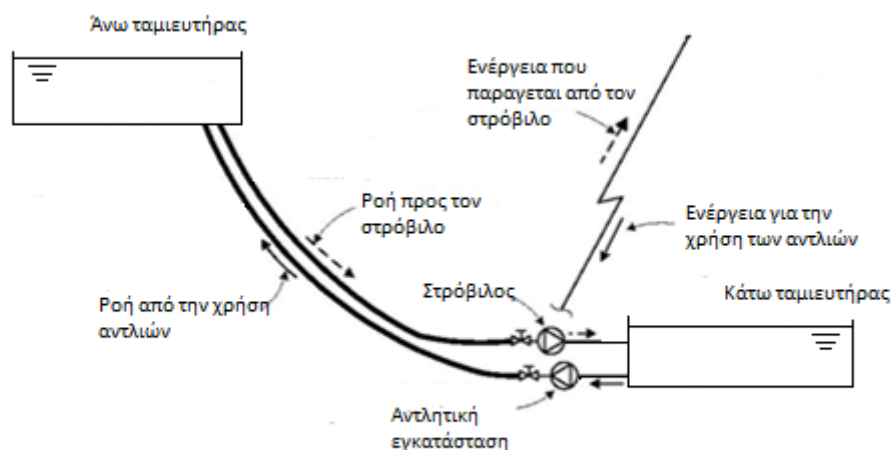
Τέλος αυτή η μονάδα δεν ενδείκνυται για μεγάλες υδραυλικές πτώσεις γιατί σε αυτήν την περίπτωση ο υδροστρόβιλος που χρησιμοποιείται είναι τύπου Pelton και ως γνωστόν δεν μπορεί να λειτουργήσει σαν αντλία.



Εικόνα 2.3 Αναστρέψιμη μονάδα αντλησιοταμίευσης

2.5 Απλή αντλησιοταμίευση με διπλό αγωγό

Σε αυτήν την περίπτωση η μονάδα αποτελείται από δύο αγωγούς οι οποίοι συνδέουν τις δύο δεξαμενές μεταξύ τους, έναν υδροστρόβιλο ή ένα σύστημα υδροστροβίλων και μια αντλία ή ένα σύστημα αντλιών.

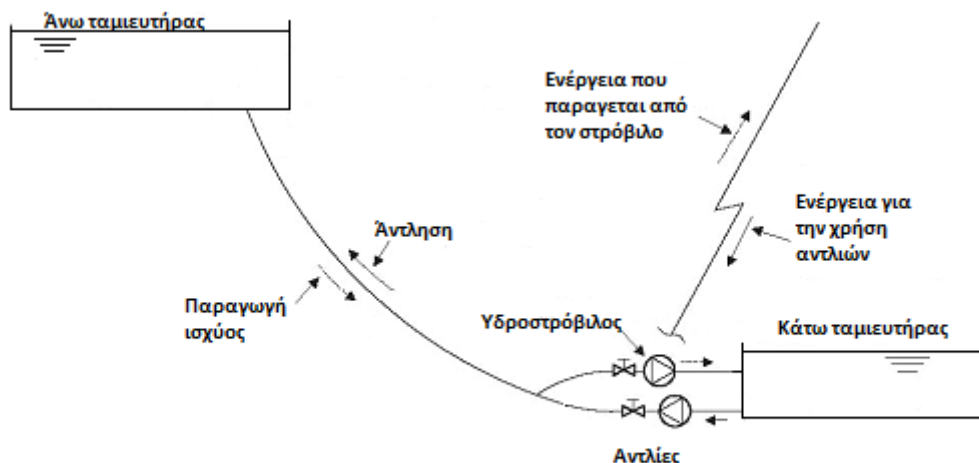


Εικόνα 2.4 Μονάδα αντλησιοταμίευσης με διπλό αγωγό

Το πλεονέκτημα αυτής της εγκατάστασης είναι ότι οι αντλίες μπορούν να λειτουργούν παράλληλα με τον υδροστρόβιλο ή τους υδροστροβίλους πληρώνοντας όμως το τίμημα του υψηλότερου κόστους της εγκατάστασης κυρίως λόγω των δύο αγωγών και λόγω περισσότερων μηχανών.

2.6 Απλή αντλησιοταμίευση με έναν αγωγό

Σε αυτήν την περίπτωση το μόνο που αλλάζει είναι ότι έχουμε μόνο έναν αγωγό που συνδέει την άνω με την κάτω δεξαμενή. Το κόστος κατασκευής της παραπάνω μονάδας είναι μικρότερο σε σχέση με τη μονάδα διπλού αγωγού αλλά σε αυτήν την περίπτωση δεν μπορεί να υπάρξει ταυτόχρονη λειτουργία αντλιών και υδροστροβίλου. Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο υποπεριπτώσεις όπου στην μια προτεραιότητα έχει ο στρόβιλος και στην άλλη οι αντλίες. Όταν λειτουργεί ο υδροστρόβιλος, η περίσσεια αιολικής παραγωγής δεν μπορεί να αποθηκευτεί και απορρίπτεται. Αντίθετα, όταν λειτουργούν οι αντλίες δεν υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό.

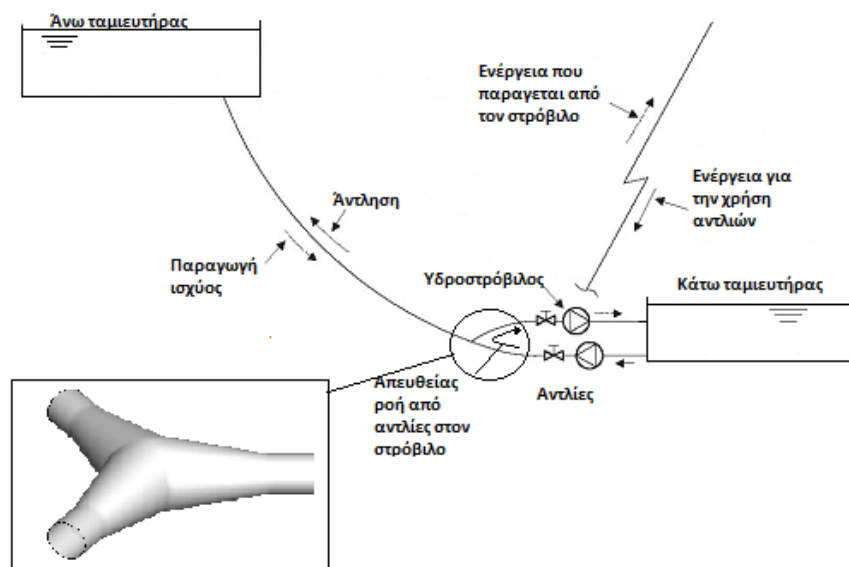


Εικόνα 2.5 Μονάδα αντλησιοταμίευσης με μονό αγωγό

2.7 Σύνθετη λειτουργία αντλησιοταμίευσης με μονή σωλήνωση

Μια πρωτότυπη διάταξη έχει σχεδιαστεί στα πλαίσια των μελετών για την κατασκευή του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού έργου στο νησί El Hierro του συμπλέγματος των Καναρίων νησιών της Ισπανίας [8]. Σύμφωνα με αυτήν υπάρχει η δυνατότητα διπλής ταυτόχρονης λειτουργίας με χρήση μονής σωλήνωσης (Εικόνα 2.6). Αυτό συμβαίνει με την ενσωμάτωση μιας διάταξης διανομής. Χάρη σε αυτήν, η παροχή των αντλιών μπορεί να διοχετεύεται απευθείας στους υδροστρόβιλους. Όταν η παροχή των αντλιών είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για την παραγωγή ενέργειας τότε μέρος αυτής κατευθύνεται προς την άνω δεξαμενή. Αντίθετα όταν είναι μικρότερη τότε η απαιτούμενη παροχή συμπληρώνεται με νερό από την άνω δεξαμενή. Αυτή η προτεινόμενη λύση έχει το πλεονέκτημα ότι είναι σαφέστατα οικονομικότερη επειδή αποφεύγει την κατασκευή διπλού αγωγού ενώ ταυτόχρονα μπορεί να εκμεταλλεύεται την παραγωγή ΑΠΕ ακόμη και κατά τις ώρες λειτουργίας των υδροστροβίλων.

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τις απώλειες ενέργειας που παρουσιάζει η παραπάνω διάταξη για τις διάφορες λειτουργίες της.



Εικόνα 2.6 Πρωτότυπη διάταξη διανομής

2.8 Απώλειες ενέργειας σε σωληνώσεις [9]

Οι σωλήνες και οι σωληνώσεις χρησιμοποιούνται για την μεταφορά ύλης και ενέργειας. Χαρακτηρίζονται είτε από το μεταφερόμενο ρευστό (νερό, έλαιο, αέριο) είτε από την πίεση του μεταφερόμενου ρευστού (υψηλής, χαμηλής πίεσης). Οι σωλήνες μεταφοράς είναι κλειστοί αγωγοί με κυκλική συνήθως διατομή, η οποία έχει μικρότερο κόστος κατασκευής, λιγότερες υδραυλικές απώλειες και μεγαλύτερη αντοχή. Μια σωλήνωση περιλαμβάνει συνήθως έναν αριθμό ευθύγραμμων σωλήνων συνδεδεμένων εν σειρά ή παράλληλα, καθώς και στοιχεία σύνδεσης σωλήνων (διαμορφωμένα τμήματα, συστολές, διαστολές) στοιχεία αλλαγής κατεύθυνσης (καμπύλες, γόνατα), διακλαδώσεις (διαχωριστές, συμβολές), εξοπλισμό που χρησιμεύει για την ρύθμιση των παροχών, όπως διαφράγματα (στραγγαλιστικά) και άλλα εξαρτήματα και μηχανισμούς. Επίσης είναι δυνατόν να υπάρχουν μηχανές που αναλώνουν ενέργεια ροής (στρόβιλοι) ή μηχανές που προσφέρουν ενέργεια ροής (αντλίες).

2.9 Μόνιμη ροή σε ευθύγραμμο σωλήνα

Ο τύπος της ροής ενός ρευστού μέσα σε αγωγό καθορίζεται από τον αριθμό Reynolds, που ορίζεται ως:

$$Re = \frac{\bar{u}D_h}{\nu} = \frac{\rho\bar{u}D_h}{\mu}$$

Όπου \bar{u} η μέση ταχύτητα της ροής, ν η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού, μ το ιξώδες, ρ η πυκνότητα και D_h η υδραυλική διάμετρος του αγωγού:

$$D_h = \frac{4A}{S}$$

και A , S , το εμβαδόν και η περίμετρος της διατομής του αγωγού αντιστοίχως (π.χ. για σωλήνα κυκλικής διατομής είναι $D_h=D$).

Στην πράξη η ροή ενός ρευστού σε ευθύγραμμο σωλήνα παραμένει στρωτή περίπου μέχρι $Re \approx 2300$. Όταν ο Re αυξηθεί προκαλούνται αστάθειες λόγω της έναρξης εμφάνισης τύρβης (έως περίπου την τιμή 4000) και στη συνέχεια η ροή περνά στην τυρβώδη, μεταβατική περιοχή. Η τιμή του Re για την οποία η ροή γίνεται πλήρως τυρβώδης εξαρτάται σημαντικά από τις συνθήκες εισόδου στον αγωγό και από την τραχύτητα των επιφανειών του. Έτσι σε τραχείς σωλήνες η ροή μπορεί να γίνει πλήρως τυρβώδης για Re της τάξης του 10^4 , ενώ σε πολύ λείους για Re έως και 10^8 .

2.9.1 Στρωτή ροή σε ευθύγραμμο κυλινδρικό σωλήνα

Όταν η ροή είναι διαμορφωμένη μόνιμη και αξονοσυμμετρική οι εξισώσεις Navier -Stokes επιλύονται αναλυτικά και προκύπτει το παραβολικό προφίλ ταχύτητας:

$$u(r) = -\frac{\partial p}{\partial x} \frac{R^2}{4\mu} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

Οι απώλειες μηχανικής ενέργειας λόγω τριβών του συνεκτικού ρευστού σε μήκος αγωγού L εκφράζονται από την αντίστοιχη πτώση πίεσης:

$$\delta p_f = \frac{32L\mu}{D^2} \bar{u} = \left(\frac{64\mu}{\bar{u}D\rho} \right) \frac{L\rho}{D} \frac{\bar{u}^2}{2} = \lambda \frac{L\rho}{D} \frac{\bar{u}^2}{2}$$

Ορίζεται έτσι και ο συντελεστής τριβής $\lambda=64/Re$ για στρωτή ροή.

2.9.2 Τυρβώδης ροή σε ευθύγραμμο κυλινδρικό σωλήνα

Οι περισσότερες ροές σε σωληνώσεις είναι τυρβώδεις εκτός κάποιων περιπτώσεων μεταφοράς πολύ συνεκτικών υγρών σε αγωγούς σχετικά μικρής διατομής ή ροής σε μικροαγωγούς. Οι ενεργειακές απώλειες στην τυρβώδη ροή είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι στην στρωτή, λόγω του φαινομένου της τυρβώδους ανάμιξης και της δημιουργίας δινών. Έτσι παρά το γεγονός ότι η διαμητική τάση έχει την ίδια θεωρητική έκφραση όπως και στην στρωτή ροή, η πτώση πίεσης κατά μήκος της ροής είναι τώρα ανάλογη του τετραγώνου της μέσης ταχύτητας και δεν εκφράζεται αναλυτικά.

Οι συνολικές απώλειες μηχανικής ενέργειας (πίεσης) λόγω συνεκτικότητας και τύρβης μπορούν να γραφούν, όπως και στη στρωτή ροή, ως συνάρτηση της γεωμετρίας του αγωγού και της κινητικής ενέργειας του ρευστού.

$$\delta p_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho}{2} \bar{u}^2$$

Στη σχέση αυτή, που είναι γνωστή και ως σχέση των Darcy - Weisback, ο συντελεστής τριβής λ για λείους αγωγούς προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τον εμπειρικό νόμο του Blasius, για Re έως 10^5 :

$$\lambda = 0.3164 Re^{-1/4}$$

Στην πραγματικότητα όμως οι σωλήνες δεν είναι λείοι και εμφανίζουν τόσο μεγαλύτερη αντίσταση στη ροή όσο πιο τραχεία είναι η εσωτερική τους επιφάνεια. Επομένως ο συντελεστής τριβής εξαρτάται εδώ και από την τραχύτητα. Έχουν προταθεί διάφορες εκφράσεις για την εκτίμηση του λ στην περιοχή της τυρβώδους ροής, ως συνάρτηση της τραχύτητας της επιφάνειας του αγωγού. Η ακριβέστερη είναι αυτή των Colebrook – White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon/D}{3.71} \right)$$

Όπου ε είναι η απόλυτη τραχύτητα της εσωτερικής επιφάνειας του αγωγού, που δίνεται από τον κατασκευαστή. Ο συντελεστής τριβής χρειάζεται να επιλυθεί αριθμητικά αλλά μπορεί και να ληφθεί από το διάγραμμα Moody. Οι καμπύλες του διαγράμματος Moody αποτελούν ουσιαστικά τη γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης και αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές που έχουν προκύψει από πολυάριθμα μετρητικά δεδομένα, με μέγιστη απόκλιση $\pm 10\%$.

Εκτός από αυτήν τη σχέση υπάρχει και αυτή του Jain:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.14 - 2 \log_{10} \left(\frac{21.25}{Re^{0.9}} + \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

Η οποία δίνει άμεσα την τιμή του λ και έχει πολύ ικανοποιητική ακρίβεια, με σφάλμα μικρότερο του 1% σε σύγκριση με την παραπάνω.

2.10 Απώλειες σε στοιχεία σωληνώσεων

Εκτός από τις γραμμικές απώλειες στα ευθύγραμμα τμήματα μιας σωλήνωσης, ενεργειακές απώλειες λόγω συνεκτικότητας προκαλούνται και κατά τη ροή μέσω των διάφορων στοιχείων και εξαρτημάτων που περιλαμβάνονται σε αυτήν, όπως γωνίες, διακλαδώσεις, μεταβολές διατομής, βαλβίδες κλπ. Οι εντοπισμένες αυτές απώλειες οφείλονται κυρίως στις τοπικές αποκολλήσεις της ροής και στην έντονη ανάμιξη που δημιουργείται στην περιοχή. Επίσης σε ορισμένα στοιχεία (π.χ. γωνίες) αναπτύσσεται και δευτερεύουσα ροή, η οποία μπορεί να διατηρείται για πολλές διαμέτρους κατάντι και που συνεπάγεται πρόσθετες απώλειες λόγω αύξησης της ταχύτητας κοντά στα τοιχώματα και επομένως της διαμητρικής τάσης.

Πολλές πειραματικές εργασίες διάφορων ερευνητών έχουν δείξει ότι οι εντοπισμένες απώλειες πίεσης στα διάφορα στοιχεία και εξαρτήματα μίας σωλήνωσης είναι ανάλογες του τετραγώνου περίπου της ταχύτητας της ροής και ότι η πιο πιθανή συσχέτιση είναι η γενική έκφραση:

$$\delta h_e = \zeta \frac{u^2}{2g} = \zeta \frac{8Q^2}{g\pi^2 D^4}$$

Όπου ο συντελεστής απωλειών ζ μπορεί να εξαρτάται από τον αριθμό Re και δίνεται συνήθως σε πίνακες με βάση πειραματικά δεδομένα.

Για απλοποίηση των σχετικών εξισώσεων, κάθε εντοπισμένη απώλεια μπορεί να αντικατασταθεί με μια «ισοδύναμη» γραμμική. Δηλαδή

$$\delta h_e = \delta h_f \Rightarrow \zeta \frac{u^2}{2g} = \lambda \frac{L_e}{D} \frac{u^2}{2g} \Rightarrow L_e = \frac{\zeta}{\lambda} D$$

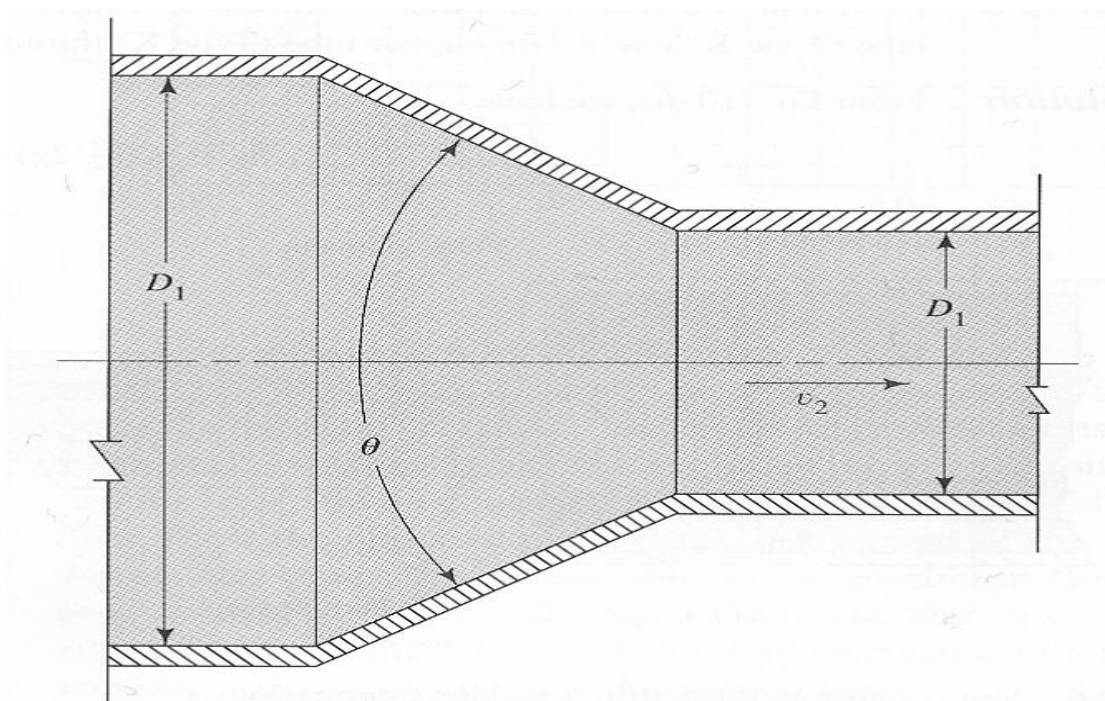
2.11 Μεταβολή διαμέτρου σωλήνα

Ένα στοιχείο μεταβολής διαμέτρου συνδέει δύο τμήματα μιας σωλήνωσης με διαφορετικές διατομές και μπορεί να είναι στοιχείο διαστολής ή συστολής. Η

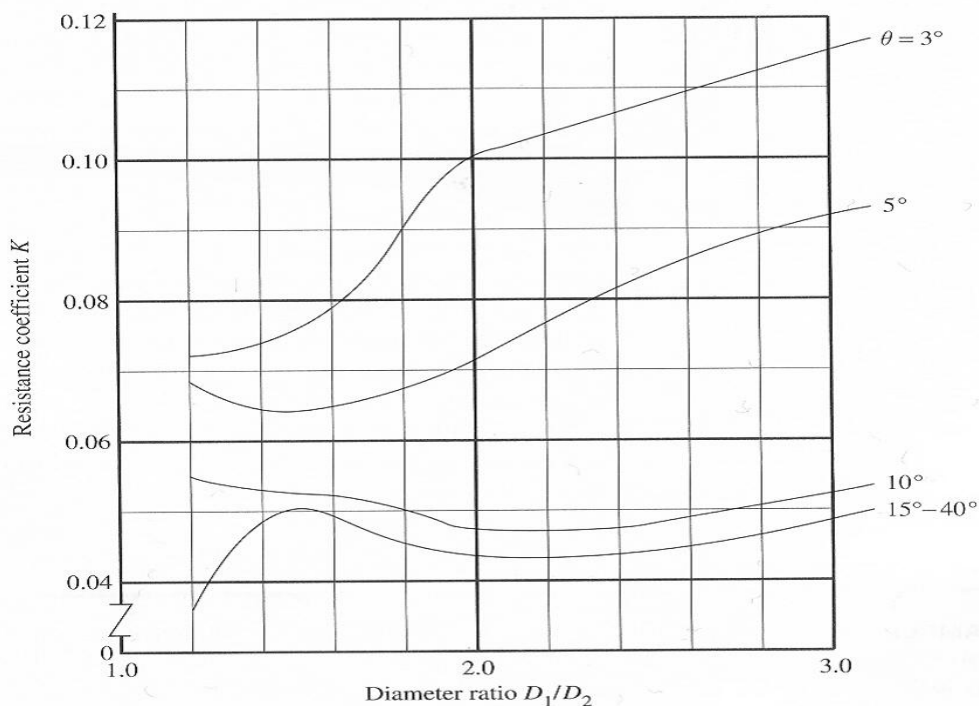
Κεφάλαιο 2^ο - Αντλησιοταμίευση και απώλειες ενέργειας

μεταβολή της πίεσης σε τέτοια στοιχεία οφείλεται αφ ενός στην μεταβολή της μέσης ταχύτητας της ροής και αφ ετέρου στις απώλειες λόγω συνεκτικότητας.

Στην περίπτωση ενός στοιχείου συστολής όταν αυτή γίνεται προοδευτικά με κωνικό τμήμα (Εικόνα 2.7) τότε ο συντελεστής απωλειών ελαχιστοποιείται για μια γωνία περίπου $40^\circ - 50^\circ$ ενώ για μικρές γωνίες ο συντελεστής K αυξάνει (Εικόνα 2.8).

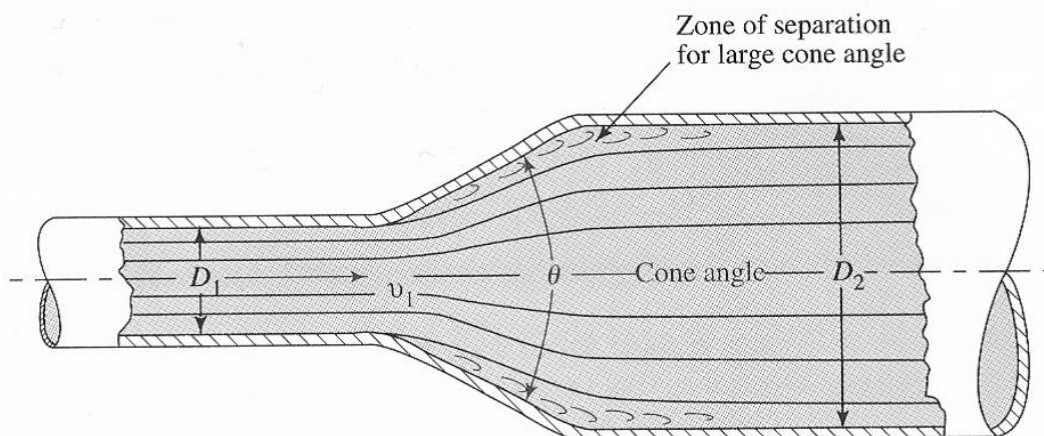


Εικόνα 2.7 Προοδευτική συστολή.

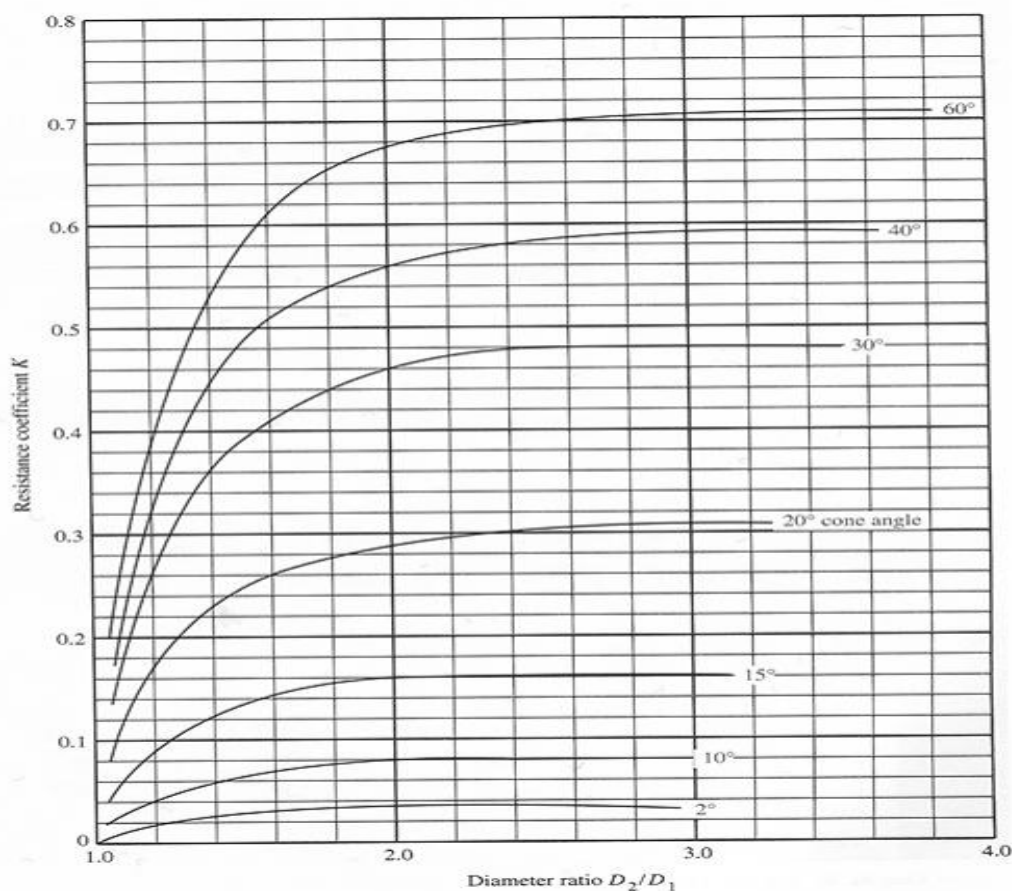


Εικόνα 2.8 Συντελεστής απωλειών για διάφορες γωνίες και λόγους διαμέτρων.

Όταν η αύξηση της διατομής του σωλήνα γίνεται προοδευτικά, όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 2.9), οι απώλειες ενέργειας μπορούν να ελαχιστοποιηθούν εάν η γωνία διαστολής διατηρηθεί επαρκώς μικρή ώστε να μην προκαλείται αποκόλληση της ροής.



Εικόνα 2.9 Προοδευτική διεύρυνση διατομής.



Εικόνα 2.10 Συντελεστής απωλειών για διάφορες γωνίες και λόγους διαμέτρων.

Όπως παρατηρούμε το παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 2.10) αυξάνοντας την γωνία θ αυξάνονται οι εντοπισμένες απώλειες ενώ μειώνοντας την γωνία η απώλειες μειώνονται και αυτές. Όμως για μικρές γωνίες χρειαζόμαστε πιο μακρύς αγωγούς για να πετύχουμε την διεύρυνση αυξάνοντας έτσι τις απώλειες τριβής. Η βέλτιστη γωνία είναι περίπου στις 8° .

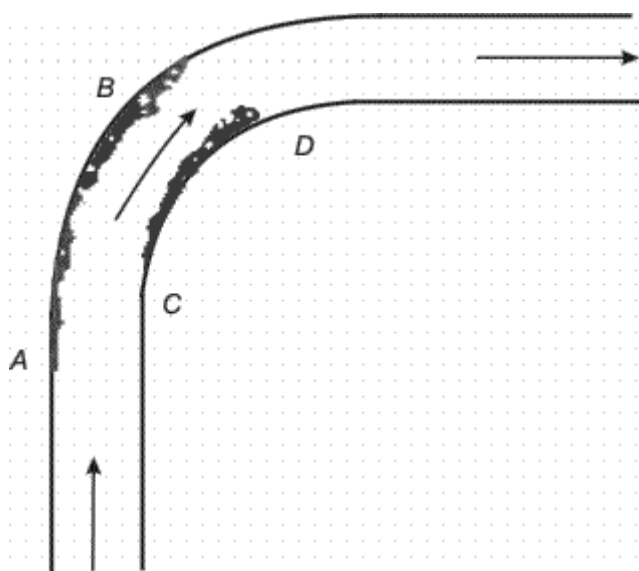
2.12 Μεταβολή κατεύθυνσης της ροής

Η ροή σε στοιχεία αλλαγής κατεύθυνσης (Εικόνα 2.11), δηλαδή γωνίες και μη-ευθύγραμμα τμήματα σωλήνων, χάνει την αξονική συμμετρία της, ενώ οι ροϊκές γραμμές καμπυλώνονται, προκαλώντας πρόσθετες ενεργειακές απώλειες. Συγκεκριμένα λόγω της επίδρασης των φυγόκεντρων δυνάμεων δημιουργείται αύξηση της πίεσης προς το εξωτερικό τμήμα του σωλήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ροή εκεί να συναντά περιοχή θετικής κλίσης πίεσης και να επιβραδύνεται ενώ το αντίθετο συμβαίνει στο εσωτερικό τμήμα του αγωγού. Προς το τέλος της γωνίας η ακτινική μεταβολή της πίεσης

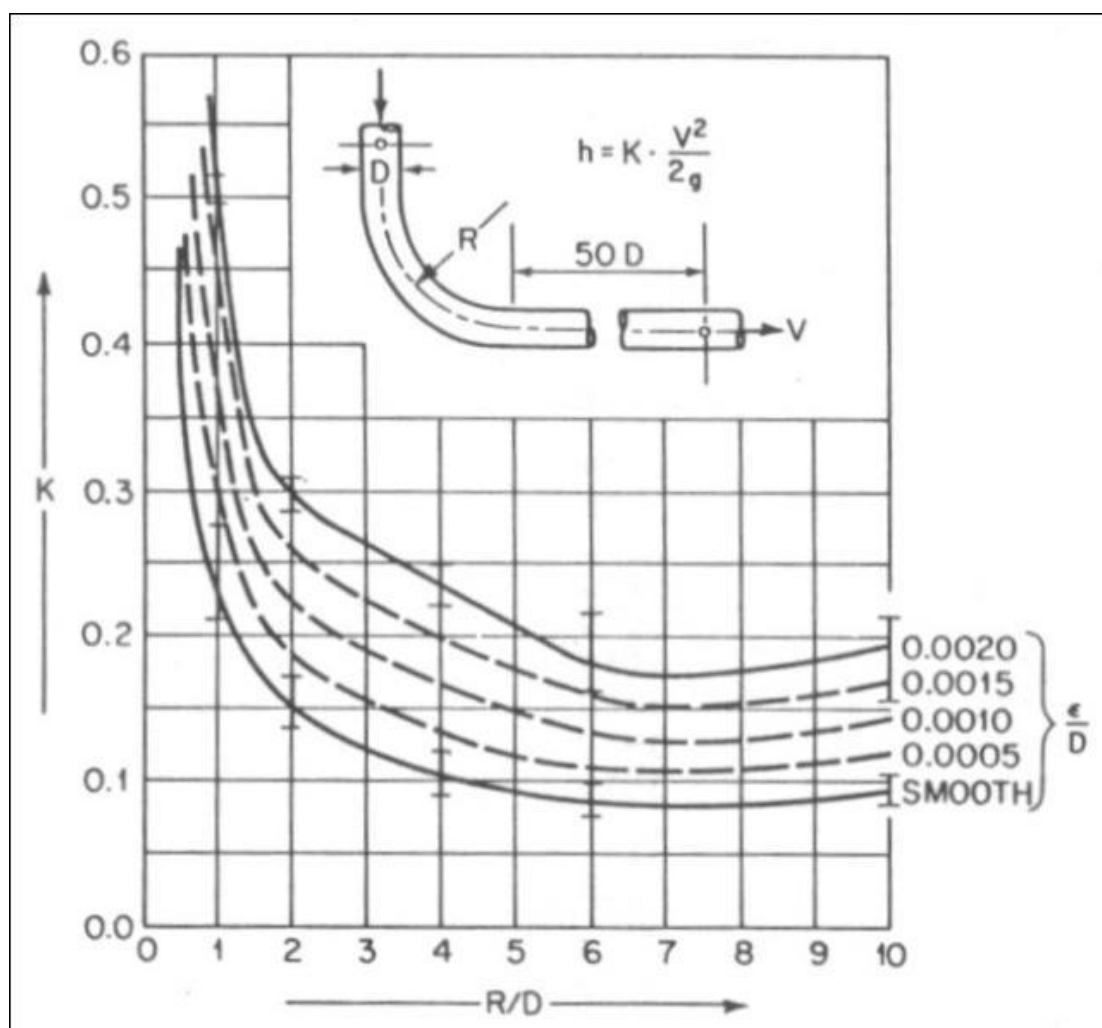
Κεφάλαιο 2^ο - Αντλησιοταμίευση και απώλειες ενέργειας

αντιστρέφεται, ενώ η ροή γίνεται τελικά αξονοσυμμετρική μετά από ορισμένη απόσταση. Η ανομοιομορφία στο προφίλ ταχυτήτων συνεπάγεται αύξηση των απωλειών λόγω αύξησης της κινητικής ενέργειας και ασυμμετρίας των διατμητικών τάσεων και επιπλέον μπορεί να προκληθεί αποκόλληση της ροής στις περιοχές αυξανόμενης πίεσης.

Η αλλαγή κατεύθυνσης του ρευστού συνοδεύεται επίσης από την ανάπτυξη δευτερεύουσας ροής με την μορφή ενός ή περισσοτέρων ζευγών στρόβιλων στην εγκάρσια προς την κύρια ροή διεύθυνση. Οι στρόβιλοι αυτοί προκαλούνται από τις διαφορές των πιέσεων στη εξωτερική και την εσωτερική περιοχή μιας διατομής και μπορεί να διατηρούνται σε μήκος αρκετών διαμέτρων σωλήνα κατάντι, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα της ροής και τις απώλειες τριβής. Ο συντελεστής απωλειών στα στοιχεία αλλαγής κατεύθυνσης συμπεριλαμβάνει όλους τους μηχανισμούς και δίνεται σε διαγράμματα ως συνάρτηση της γωνίας στροφής, της ακτίνας καμπυλότητας ή και της τραχύτητας της επιφάνειας για διάφορους τύπους γωνιών (Εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.11 Αλλαγή κατεύθυνσης ροής.



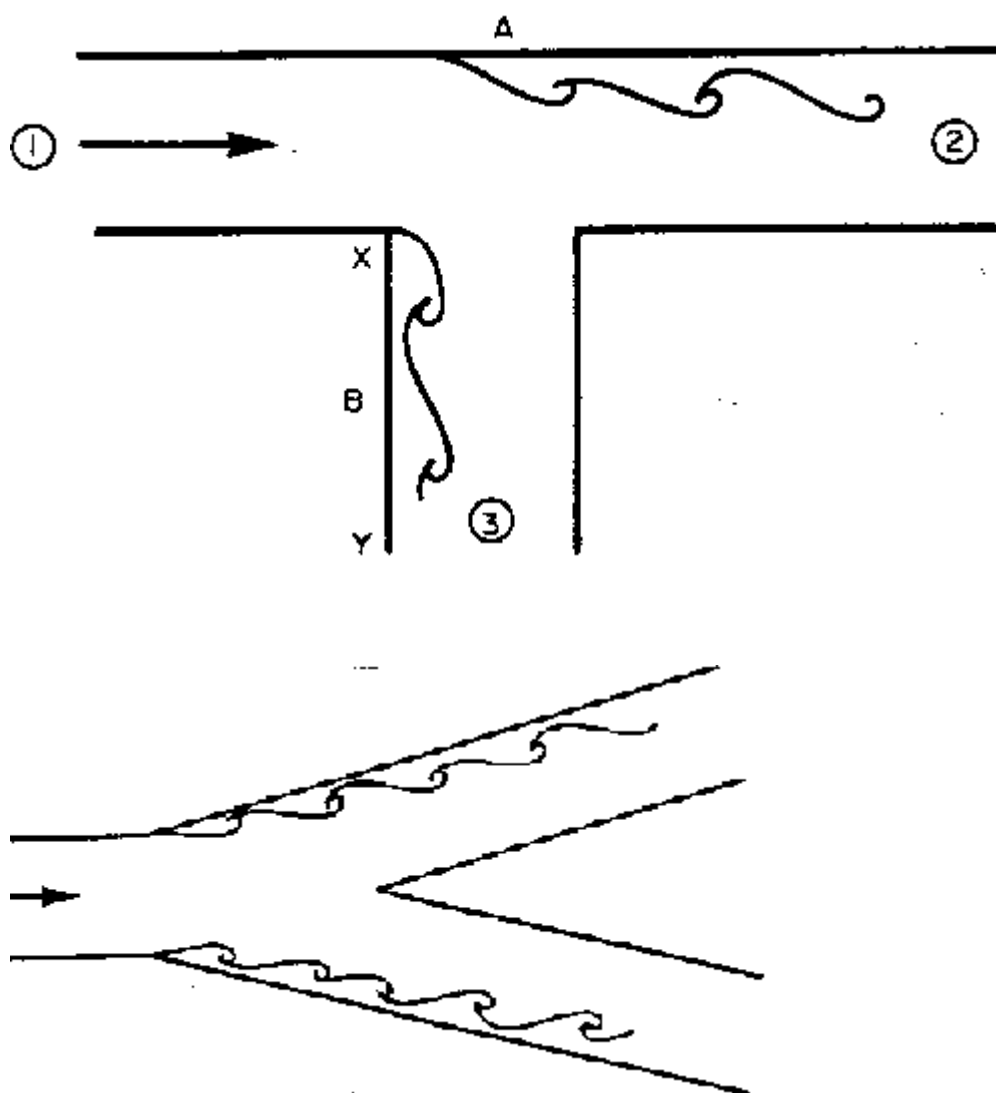
Εικόνα 2.12 Συντελεστής απωλειών για στοιχεία αλλαγής κατεύθυνσης.

2.13 Διακλαδώσεις ροής

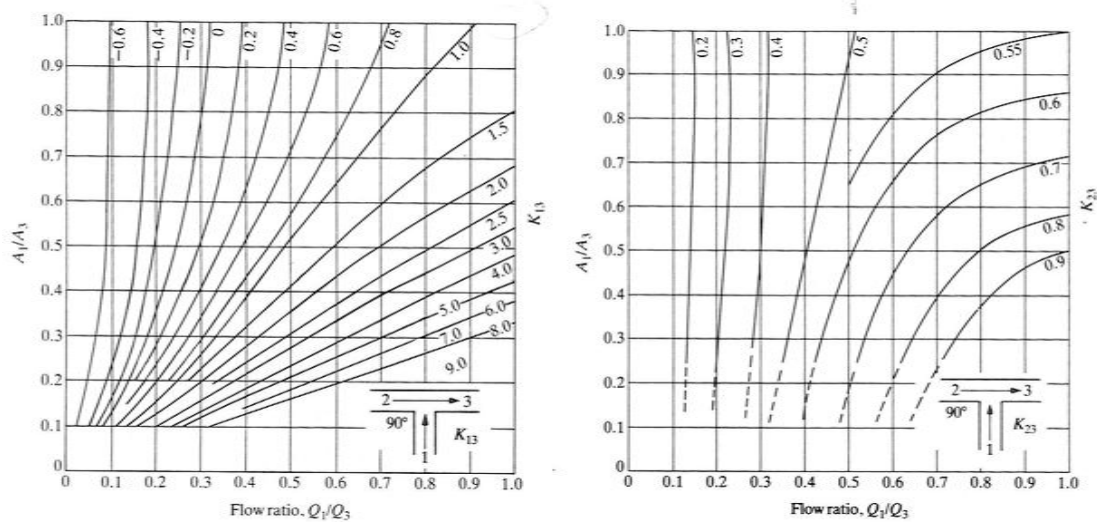
Ο όρος διακλάδωση περιλαμβάνει κάθε περίπτωση συμβολής δύο συνήθως ροών ή διαχωρισμού μιας κύριας ροής. Στα στοιχεία αυτά (Εικόνα 2.13) ορίζονται δύο συντελεστές απωλειών, που σχετίζουν την κύρια ροή με κάθε μία δευτερεύουσα, με την γενική σχέση:

$$\zeta_{ij} = \frac{p_{o,i} - p_{o,j}}{\rho u_m^2 / 2}$$

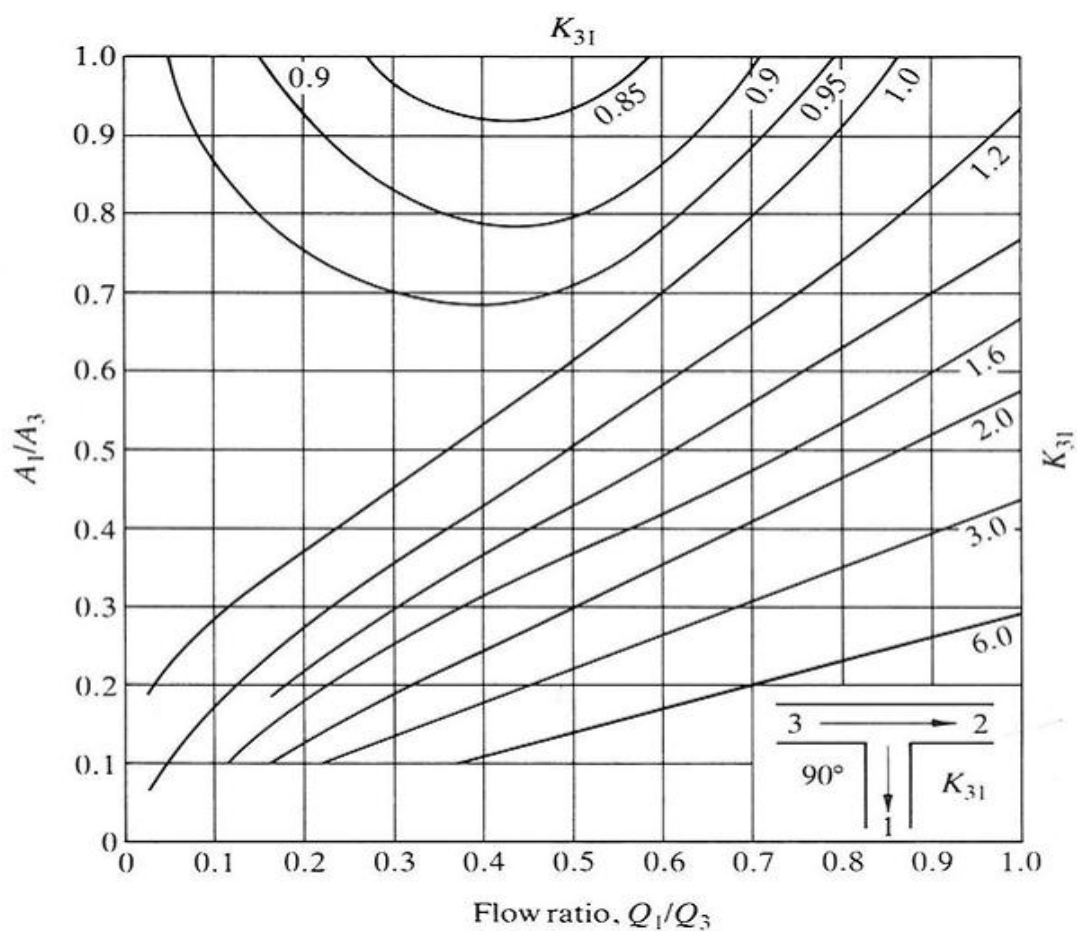
Όπου οι δείκτες i και j του ζ γράφονται κατά την κατεύθυνση της ροής, ενώ ο δείκτης m αναφέρεται στην κύρια ροή. Τιμές των συντελεστών αυτών για τις δύο περιπτώσεις φαίνονται στις εικόνες 2.14, 2.15, 2.16.



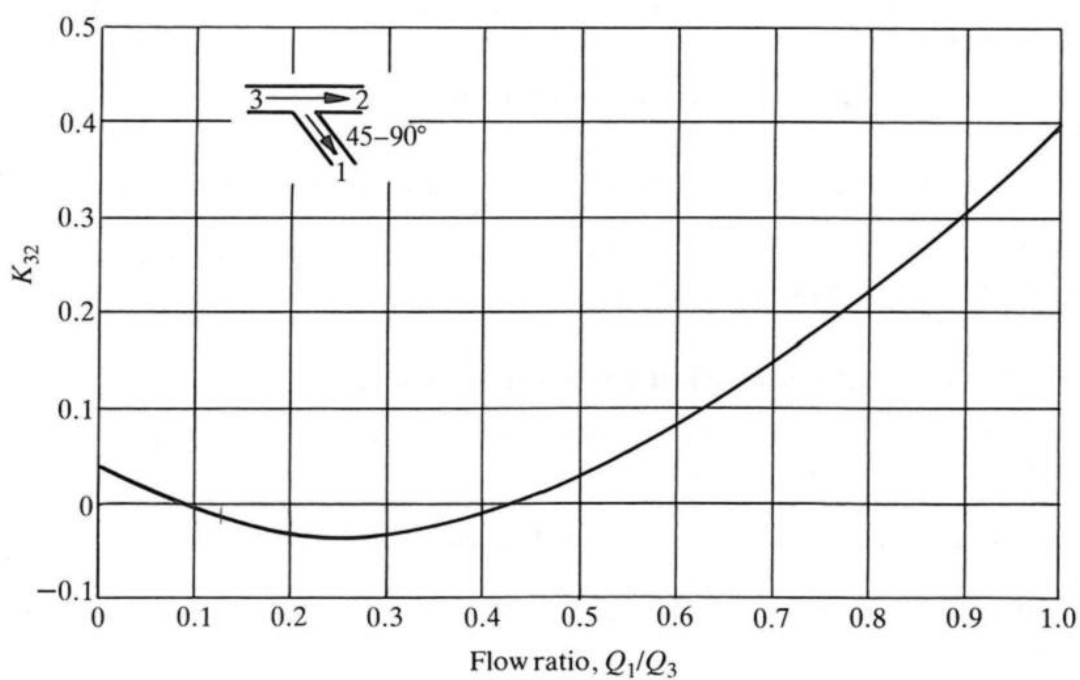
Εικόνα 2.13 Διακλαδώσεις ροής.



Εικόνα 2.14 Συντελεστές απωλειών K_{13} και K_{23} για συμβολή δύο ροών.



Εικόνα 2.15 Συντελεστής απωλειών K_{31} για διαχωρισμό ροής.



Εικόνα 2.16 Συντελεστής απωλειών K_{32} για διαχωρισμό ροής

Κεφάλαιο 3^ο – Αριθμητική μοντελοποίηση

3.1 Εισαγωγή

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics) ή CFD είναι η επιστήμη της πρόβλεψης της ροής των ρευστών, της μετάδοσης θερμότητας και μάζας, των χημικών αντιδράσεων και άλλων σχετικών φαινομένων μέσω της επίλυσης των μαθηματικών εξισώσεων που διέπουν τις διεργασίες αυτές, χρησιμοποιώντας μια αριθμητική μέθοδο με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης της ροής με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι χρήσιμα δεδομένα για ένα μηχανικό, ώστε να τα χρησιμοποιήσει στην αρχική μελέτη νέων σχεδίων (conceptual design), στην ανίχνευση προβλημάτων (troubleshooting) ή ακόμα και στον ανασχεδιασμό - βελτιστοποίηση (redesign - optimization) κατασκευών ή τμημάτων τους.

Το σημαντικότερο όμως στοιχείο που θα λέγαμε ότι χαρακτηρίζει την υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι ότι η ανάλυση αυτού του είδους προσφέρει φθηνά και γρήγορα αποτελέσματα, ενώ ταυτόχρονα δίνει τη δυνατότητα προσέγγισης του φυσικού προβλήματος σε πραγματική κλίμακα, χωρίς περιορισμούς και όρια. Επιπροσθέτως, η ανάλυση με CFD δίνει πληροφορίες σε όλο το χώρο του πεδίου το οποίο επιλύεται και όχι μόνο σε μεμονωμένα σημεία, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει εύκολη διερεύνηση σεναρίων καθώς και παραμετρική ανάλυση. Σήμερα, περισσότερο ίσως από κάθε άλλη φορά, η τεχνολογία της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) βρίσκει εφαρμογή σε όλους τους κλάδους της επιστήμης του μηχανικού που ασχολείται με την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ρευστών. Προς την κατεύθυνση αυτή σημαντικό ρόλο έπαιξε η ανάπτυξη καθώς και το χαμηλό κόστος των σύγχρονων ισχυρών υπολογιστών.

3.2 Εφαρμογή των μεθόδων ανάλυσης υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Η εφαρμογή ξεκινά από ένα μαθηματικό μοντέλο ενός φυσικού προβλήματος. Η διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας πρέπει να ικανοποιείται στην περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή στην περιοχή ανάλυσης της ροής. Κατά την επίλυση γίνονται απλοποιητικές παραδοχές ώστε να καταστεί εφικτή και πρακτική η προσέγγιση του φυσικού προβλήματος. Έτσι, λοιπόν, μπορούμε να θεωρούμε ως προς το χρόνο μόνιμη κατάσταση της ροής, ως προς το χώρο δισδιάστατη ροή και ως προς τη φύση ασυμπίεστη ή ακόμα και ατριβή

ροή. Στη συνέχεια εφαρμόζονται οι κατάλληλες αρχικές και/ ή οριακές συνθήκες για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Η υπολογιστική ρευστοδυναμική εφαρμόζει αριθμητικές μεθόδους (συνήθως καλούνται μέθοδοι διακριτοποίησης) ώστε να δημιουργήσει προσεγγίσεις των φυσικών εξισώσεων της ρευστοδυναμικής για την περιοχή που επιλύεται. Έτσι, οι διαφορικές εξισώσεις γίνονται αλγεβρικές ενώ ο χώρος επίλυσης μετατρέπεται σε ένα σύνολο κελιών/ στοιχείων (cells) που καθορίζουν το πλέγμα ή κানাβο επίλυσης (computational mesh).

Το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων επιλύεται αριθμητικά, με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, για κάθε μεταβλητή της ροής σε κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος. Όπως ήδη έχει αναφερθεί η χρήση της διαδικασίας CFD παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα και προσφέρει γρήγορα και σε χαμηλό κόστος πλούσια πληροφορία εξασφαλίζοντας, σε συνεργασία και με το πείραμα, την πλήρη περιγραφή του φυσικού φαινομένου. Ωστόσο, η τεχνολογία της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής δεν παύει να χαρακτηρίζεται και από αρκετούς σημαντικούς περιορισμούς. Καταρχάς, ως προς τα μαθηματικά μοντέλα τα οποία χρησιμοποιεί. Οι επιλύσεις βασίζονται σε μοντέλα των πραγματικών φαινομένων, όπως μοντέλα τύρβης, συμπίεστότητας, πολυφασικής ροής ή ακόμα και χημικών αντιδράσεων. Έτσι, οι λύσεις που αποκτώνται από αυτά θα είναι τόσο ακριβείς όσο και τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται.

Σε συνδυασμό με τα παραπάνω, το αριθμητικό σφάλμα επηρεάζει επίσης την ποιότητα της λύσης. Η επίλυση με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή αναπόφευκτα εισάγει σφάλμα. Η στρογγυλοποίηση εισάγει σφάλμα εξαιτίας της πεπερασμένης μνήμης αποθήκευσης των αριθμών, ενώ σφάλμα προκαλείται και λόγω της αποκοπής εξαιτίας της προσέγγισης κατά τη διακριτοποίηση των εξισώσεων (μετατροπή διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές). Το σφάλμα λόγω της στρογγυλοποίησης είναι σχεδόν αναπόφευκτο, ενώ το σφάλμα αποκοπής είναι δυνατόν να περιοριστεί στο ελάχιστο με την αυξημένη πύκνωση του υπολογιστικού πλέγματος ή με τη χρήση σχημάτων τάξης.

Περιορισμοί, όμως, προκύπτουν και λόγω των οριακών συνθηκών. Όπως και με τα μαθηματικά μοντέλα έτσι και εδώ η ακρίβεια της λύσης είναι τόσο καλή όσο και οι αρχικές/ οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν. Η ποιότητα των αρχικών/ οριακών συνθηκών ουσιαστικά εκφράζεται μέσω της ρεαλιστικότητας με την οποία αυτές χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα, αν αναλύεται ένα πρόβλημα ροής σε αγωγό και δεν χρησιμοποιείται κατάλληλο μήκος του αγωγού για την ανάπτυξη της ροής (μήκος αναπτύξεως), τότε το προφίλ της ταχύτητας στην είσοδο του αγωγού θα πρέπει να ορίζεται για πλήρως ανεπτυγμένη ροή και να μην καθορίζεται ως ομοιόμορφο.

Καταλήγουμε, λοιπόν, στο συμπέρασμα ότι η υπολογιστική ρευστοδυναμική μπορεί να αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την μοντελοποίηση της ροής των

ρευστών, έχοντας πάντα υπόψη τις όποιες απλοποιητικές παραδοχές, προσεγγίσεις και περιορισμούς που αναπόφευκτα εφαρμόζονται.

3.3 Εξισώσεις Navier-Stokes

Οι εξισώσεις διατήρησης μάζας και ορμής είναι οι γνωστές εξισώσεις Navier-Stokes. Σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x,y,z) εκφράζουν την αρχή της συνέχειας και το νόμο του Νεύτωνα σε ένα στοιχειώδες στοιχείο ρευστού. Η τανυστική μορφή των εξισώσεων προκύπτει αντιστοιχώντας τους δείκτες i,j,k στα (x,y,z) .

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (3.2)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις u_i είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας του ρευστού, ρ η πυκνότητα του, P η στατική πίεση, μ η δυναμική του συνεκτικότητα και δ_{ij} το δέλτα του Kronecker. Οι εξισώσεις (3.1) και (3.2) περιγράφουν με μαθηματική αυστηρότητα το πεδίο ροής στον χρόνο και στον χώρο και ισχύουν για όλες τις περιπτώσεις στρωτών και τυρβωδών ροών, αφού συσχετίζουν τις στιγμιαίες τιμές των εξαρτημένων μεγεθών.

3.4.1 Μοντελοποίηση τύρβης [10]

Τα τυρβώδη πεδία ροής είναι μη μόνιμα επειδή τα χαρακτηριστικά τους εμφανίζουν υψίσυχνες χρονικές διαταραχές. Τα μεγέθη ενός τυρβώδους πεδίου μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελούνται από μια μέση τιμή στην οποία προστίθεται η διακύμανση λόγω τύρβης. Ο Reynolds αποσύνθεσε τα τυρβώδη χαρακτηριστικά ως $\varphi = \bar{\varphi} + \varphi'$ όπου φ συμβολίζει μια από τις εξαρτημένες μεταβλητές του πεδίου, $\bar{\varphi}$ η μέση χρονικά τιμή και φ' η διακύμανση. Η εισαγωγή της παραπάνω σχέσης στις εξισώσεις Navier-Stokes επιτρέπει την κατά Reynolds χρονική τους ολοκλήρωση. Οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι μόνιμες, εκφράζοντας πλέον όχι τις στιγμιαίες, αλλά τις μέσες τιμές των μεταβλητών του πεδίου. Έχουμε λοιπόν

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] \quad (3.4)$$

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (3.2) και (3.4) προκύπτει ότι όλοι οι όροι είναι ίδιοι, με την διαφορά ότι η (3.4) αναφέρεται στις μέσες χρονικά τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών. Επιπλέον περιλαμβάνει και τον όρο $-\overline{\rho u_i' u_j'}$, ο οποίος εμφανίστηκε μετά από την χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων και ονομάζεται τανυστής τάσεων Reynolds. Το πρόβλημα που προκύπτει όμως έγκειται ακριβώς στον υπολογισμό αυτού του όρου μιας και είναι άγνωστος και δεν μπορεί να υπολογιστεί από τις μέσες τιμές των ταχυτήτων, αφού αφορά τις τυρβώδεις διακυμάνσεις τους. Έτσι σε τρισδιάστατα πεδία ροής άγνωστοι είναι η πίεση, οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και οι έξι συνιστώσες των τάσεων Reynolds. Επομένως πρόκειται για πρόβλημα δέκα αγνώστων για τους οποίους υπάρχουν μόνο τέσσερις εξισώσεις: οι τρεις της ορμής (3.4) και αυτή της συνέχειας (3.3)

Άρα αντικείμενο της μοντελοποίησης της τύρβης είναι ο συσχετισμός των τάσεων Reynolds με τις μέσες τιμές των μεγεθών του πεδίου ροής. Με αυτόν τον τρόπο το παραπάνω σύστημα εξισώσεων κλείνει και μπορεί να επιλυθεί, επειδή οι εξισώσεις διατήρησης περιλαμβάνουν πλέον ως αγνώστους μόνο τις μέσες τιμές των μεταβλητών και όχι τις διακυμάνσεις τους. Ο συσχετισμός των τάσεων Reynolds με τις μέσες τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών βασίζεται στην υπόθεση Boussinesq όπου οι τάσεις Reynolds εκφράζονται ως:

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \bar{k} \quad (3.5)$$

με

$$\bar{k} = \frac{1}{2} \frac{\overline{\rho u_i' u_i'}}{\rho} \quad (3.6)$$

να είναι η κινητική ενέργεια της τύρβης.

3.4.2 Μοντέλο k-ε

Για την μοντελοποίηση της τύρβης επιλέχθηκε το γνωστό μοντέλο δύο εξισώσεων k-ε. Το μοντέλο k-ε αναπτύχθηκε από τους Jones and Launder και η επιλογή του στηρίζεται στη μεγάλη διεθνή εμπειρία από τη χρήση του, η οποία έχει καταστήσει σαφή τόσο τα πλεονεκτήματα, όσο και τα μειονεκτήματα του. Οι βασικές παραδοχές του μοντέλου k-ε είναι ότι ισχύει η υπόθεση Boussinesq και ότι η τύρβη είναι ισότροπη. Η τυρβώδης συνεκτικότητα μ_t δίδεται από την σχέση

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\bar{k}^2}{\bar{\epsilon}} \quad (3.7)$$

όπου $C_\mu=0.09$ είναι σταθερά. Με $\tilde{\epsilon}$ συμβολίζεται ο ρυθμός καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας \tilde{k} και ορίζεται αυστηρά ως

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\mu}{\rho} \overline{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}} \quad (3.8)$$

Τα \tilde{k} και $\tilde{\epsilon}$ υπολογίζονται επιλύοντας δύο διαφορικές εξισώσεις για την μεταφορά τους. Η εξίσωση μεταφοράς της τυρβώδους κινητικής ενέργειας διατυπώθηκε αρχικά από τον Kolmogorov. Χάριν συντομίας παρατίθενται οι τελικές εξισώσεις. Για το πώς προκύπτουν αυτές μπορούν να βρεθούν στα βιβλία των Σ. Τσαγγάρη (Μηχανική των ρευστών) [11] και Γ. Μπεργελέ (Υπολογιστική Ρευστομηχανική) [12].

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \tilde{k}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_j} \right] - \overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\mu_t}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \rho \tilde{\epsilon} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \tilde{\epsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu \right) \frac{\partial \tilde{\epsilon}}{\partial x_j} \right] - C_1 \left(\frac{\tilde{\epsilon}}{\tilde{k}} \overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} \right) - C_2 \rho \frac{\tilde{\epsilon}^2}{\tilde{k}} \quad (3.10)$$

όπου $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$. Ο όρος $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ αντικαθίσταται από την σχέση (3.5).

3.5 Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων

Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων με τις εξισώσεις Navier-Stokes και τις εξισώσεις του μοντέλου k-ε (εξισώσεις διατήρησης) είναι αδύνατον να επιλυθεί αναλυτικά. Γι αυτόν τον λόγο επιλύεται αριθμητικά, αφού διαφοροποιηθούν οι παραπάνω εξισώσεις. Η επικρατέστερη μέθοδος, για την διακριτοποίηση εξισώσεων, είναι αυτή των πεπερασμένων όγκων [12]. Η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων οδηγεί την διαφορική μορφή των εξισώσεων σε αλγεβρική μορφή, η οποία μπορεί να επιλυθεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η χρήση αριθμητικού πλέγματος. Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων συνίσταται στην ολοκλήρωση των εξισώσεων διατήρησης σε όγκους το οποίο πρέπει να επικαλύπτει το πεδίο ροής. Μετά την ολοκλήρωση των εξισώσεων, η μορφή που προκύπτει συνδέει αλγεβρικά τις τιμές των γειτονικών πεπερασμένων όγκων, δημιουργώντας ένα σύστημα εξισώσεων για κάθε εξίσωση διατήρησης, το οποίο επιλύεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Κατά αυτόν τον τρόπο οι εξισώσεις του πεδίου ροής διακριτοποιούνται επί του αριθμητικού

πλέγματος, αποτελώντας πλέον ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων, το οποίο είναι τόσο ακριβέστερο, όσο πυκνότερο είναι το αριθμητικό πλέγμα. Η διαδικασία κατασκευής του αριθμητικού πλέγματος βρίσκεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Η διακριτοποίηση των εξισώσεων που διέπουν τη ροή μπορεί να επεξηγηθεί πιο εύκολα θεωρώντας την εξίσωση διατήρησης για την μεταφορά ενός βαθμωτού μεγέθους ϕ σε μόνιμη κατάσταση. Έτσι οι εξισώσεις μπορούν να γραφούν στην μορφή

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{\phi}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\phi, \text{eff}} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right) \quad (3.11)$$

όπου $\Gamma_{\phi, \text{eff}}$ ο συντελεστής διαχύσεως για το μέγεθος ϕ . Σύμφωνα με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων η εξίσωση ολοκληρώνεται σε κάθε υπολογιστική κυψέλη ως εξής

$$\iiint_V \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{\phi}) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\phi, \text{eff}} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right) \right] dV = 0 \quad (3.12)$$

όπου V ο όγκος της υπολογιστικής κυψέλης. Με την εφαρμογή του θεωρήματος του Gauss το τριπλό ολοκλήρωμα μετατρέπεται σε επιφανειακό το οποίο αναφέρεται στις επιφάνειες του πεπερασμένου όγκου. Έτσι έχουμε

$$\iint_A \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{\phi}) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\phi, \text{eff}} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right) \right] dA = 0 \quad (3.13)$$

όπου A η συνολική επιφάνεια των πλευρών της υπολογιστικής κυψέλης. Μετά την ανάπτυξη του επιφανειακού ολοκληρώματος της εξίσωσης σε κάθε επιφάνεια της κυψέλης έχουμε

$$\sum_f^N \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{\phi}) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\phi, \text{eff}} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \right) \right]_f A_f \quad (3.14)$$

όπου N ο αριθμός των επιφανειών και A_f το εμβαδόν της επιφάνειας f .

Το εμπορικό πακέτο FLUENT το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιεί την παραπάνω μέθοδο διακριτοποίησης για την επίλυση των εξισώσεων συνέχειας, Navier-Stokes και των εξισώσεων του μοντέλου τύρβης k - ϵ . Ο κώδικας FLUENT αποθηκεύει διακριτές τιμές του βαθμωτού μεγέθους ϕ στα κέντρα των κελιών. Ωστόσο, οι τιμές στις όψεις των κελιών θα πρέπει να παρεμβληθούν από τις τιμές στα κέντρα των κελιών. Για την παρεμβολή των όρων της ροής, που είναι αποθηκευμένες στα κέντρα των κελιών, στις όψεις των πεπερασμένων όγκων ο κώδικας προσφέρει έναν

αριθμό από σχήματα διαφόρισης. Το σχήμα διαφόρισης που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία είναι το ανάντι σχήμα δεύτερης τάξης όπου θεωρείται ότι η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής στο ανατολικό σύνορο της κυψέλης (φ_e) υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών φ_P (τιμή στο κέντρο) και φ_w (τιμή στο δυτικό σύνορο). Συντομογραφικά αναφέρεται ως SOU από τα αρχικά Second Order Upwind και δίδεται από την σχέση

$$\varphi_e = \frac{3}{2}\varphi_P - \frac{1}{2}\varphi_w \quad (3.15)$$

3.6 Η μέθοδος SIMPLE

Το βασικότερο πρόβλημα, κατά την επίλυση των εξισώσεων διατήρησης, ήταν ιστορικά η επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes. Η εξάρτηση των εξισώσεων ορμής από την πίεση, σε συνδυασμό με την ανάγκη ικανοποίησης της εξίσωσης συνέχειας, καθιστούν πρακτικά αδύνατη την ταυτόχρονη αριθμητική επίλυση των εξισώσεων. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος, για την αποσύζευξη των εξισώσεων ορμής από την πίεση είναι, είναι η μέθοδος SIMPLE των Patankar and Spalding (1972) [10]. Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην επίλυση των εξισώσεων ορμής, υποθέτοντας ένα αρχικό πεδίο πίεσης, το οποίο συμβολίζεται με P^* . Τότε προκύπτει ένα επίσης προσωρινό πεδίο ταχυτήτων που ικανοποιεί τις εξισώσεις ορμής αλλά όχι αυτή της συνέχειας. Επομένως η εξίσωση της συνέχειας χρησιμοποιείται για την διόρθωση της αρχικής πίεσης P^* .

3.7 Συναρτήσεις τοιχώματος

Η ύπαρξη τυρβώδους οριακού στρώματος στο στερεό τοίχωμα έχει σημαντική επίδραση στο πεδίο ροής. Το ρευστό δέχεται, μακροσκοπικά, λόγω των τυρβωδών διαταραχών μεγαλύτερη διατμητική τάση, η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη στις εξισώσεις ορμής. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά, ότι στα τυρβώδη οριακά στρώματα η ταχύτητα έχει γραμμική κλίση πολύ κοντά στο τοίχωμα, ενώ πιο μακριά ακολουθεί λογαριθμική κλίση. Επειδή ο ακριβής υπολογισμός των δύο κλίσεων με το μοντέλο k-ε απαιτεί ιδιαίτερα πυκνό πλέγμα κοντά στο τοίχωμα, έχει επικρατήσει η χρήση των συναρτήσεων τοιχώματος (wall functions), οι οποίες προτάθηκαν από τους Launder and Spalding (1972) [10]. Οι δύο βασικές παραδοχές που γίνονται κατά την διαδικασία αυτή είναι, ότι η ροή πολύ κοντά στο τοίχωμα συμπεριφέρεται ως μονοδιάστατη ροή Couette και ότι στο οριακό στρώμα η παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας ισούται με το ρυθμό καταστροφής της. Ο

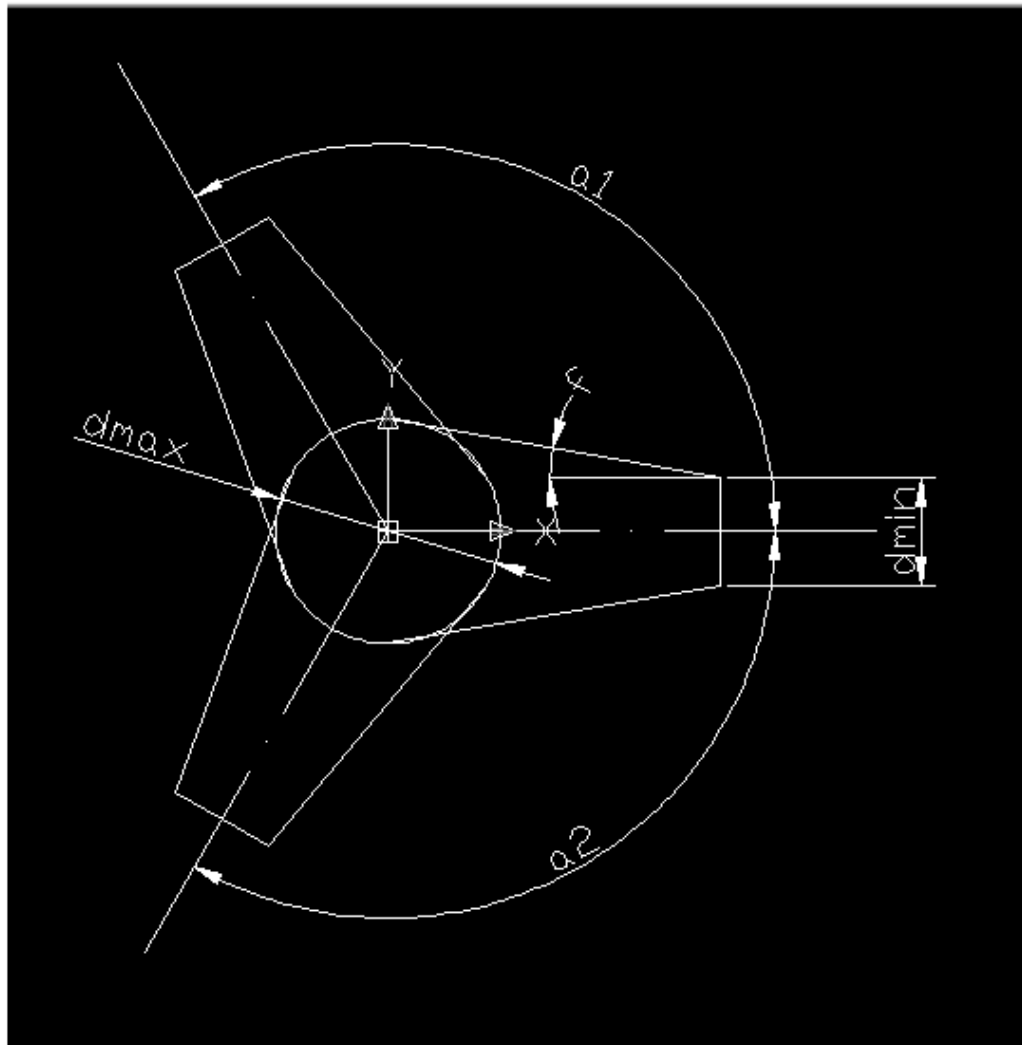
κώδικας Fluent παρέχει την δυνατότητα χρησιμοποίησης των συναρτήσεων αυτών μέσω της επιλογής των Standard Wall Functions όπου η ροή επιλύεται από την αρχή της λογαριθμικής περιοχής. Οδηγός για την επιλογή αυτή αποτελεί η απόσταση του πρώτου κελιού από τον τοίχο και εκφράζεται από το $y^+ (= \rho u y / \mu)$. Για την επιλογή των Standard Wall Functions απαιτείται να είναι $30 < y^+ < 300$.

Κεφάλαιο 4^ο - Γεωμετρία Διάταξης

4.1.1 Κατασκευή του μοντέλου της γεωμετρίας

Η κατασκευή της γεωμετρίας μπορεί να γίνει με διάφορα εξειδικευμένα προγράμματα τα οποία είναι συμβατά με άλλα υπολογιστικά που επιλύουν και επεξεργάζονται τα πεδία με μεθόδους πεπερασμένων όγκων που εμπίπτουν στα πλαίσια υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Στην δικιά μας περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα Gambit [13].

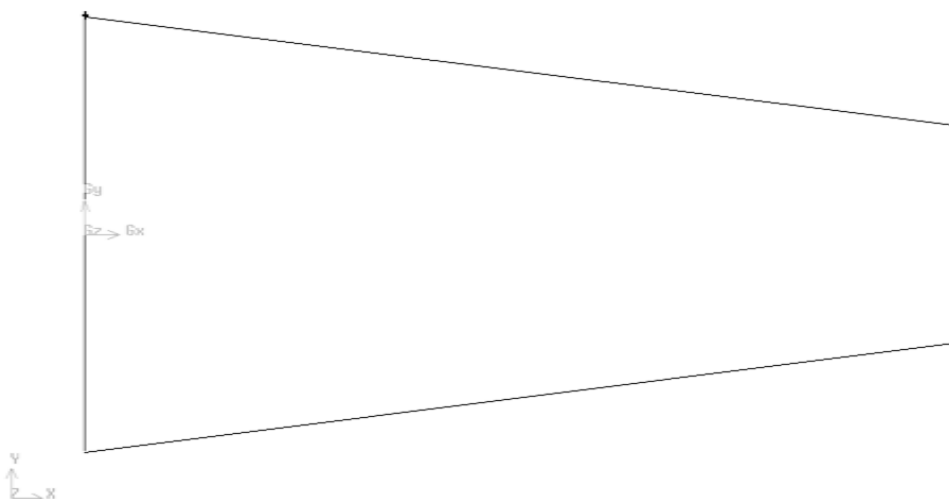
Η διάταξη που μελετάται αποτελεί το τμήμα του αγωγού που συνδέει τον υδροστρόβιλο με τις αντλίες και τον αγωγό πτώσεως. Αποτελείται από τρεις αγωγούς οι οποίοι έχουν μια προοδευτική αύξηση της διατομής τους (κωνικής διατομής) και συνδέονται μεταξύ τους υπό γωνία. Οι κύριες διαστάσεις που χαρακτηρίζουν την γεωμετρία είναι η αρχική διάμετρος d_{\min} , η τελική διάμετρος d_{\max} , η γωνία αύξησης της διατομής φ (γωνία κώνου) και οι γωνίες α_1 και α_2 μεταξύ των αγωγών. Τα παραπάνω φαίνονται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1 Γεωμετρία διάταξης

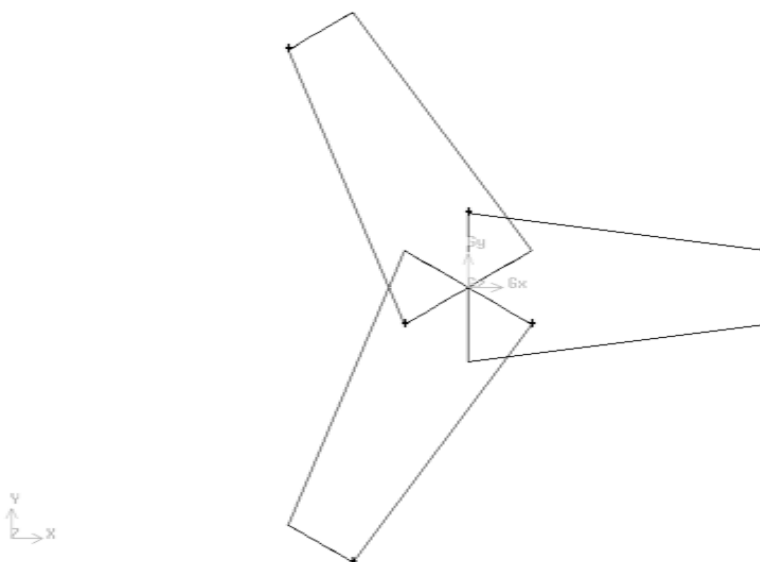
4.1.2 Διαδικασία κατασκευής

Αρχικά σχεδιάζεται ο κώνος κώνος (Εικόνα 4.2) με δεδομένα τις διαμέτρους του κώνου και το ύψος του με άξονα τον άξονα x .



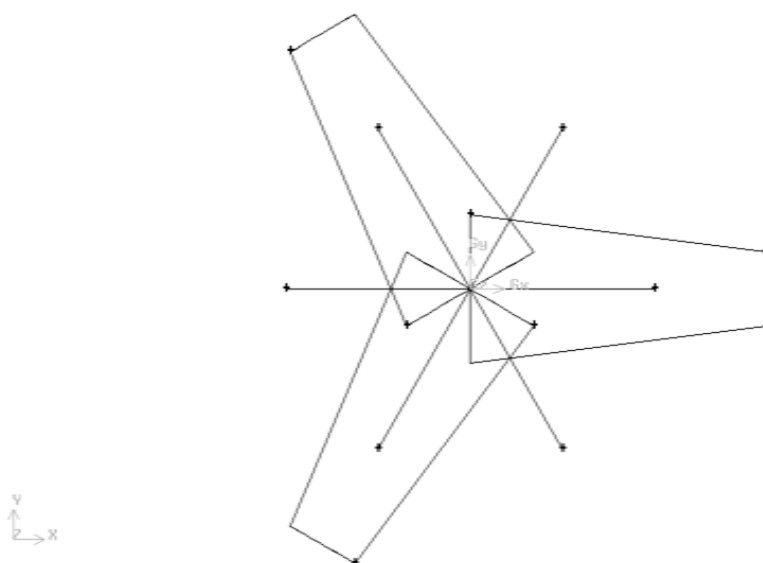
Εικόνα 4.2 Κατασκευή κώνου.

Στην συνέχεια γίνεται αντιγραφή και περιστροφή του κώνου κατά τις γωνίες α_1 και α_2 (Εικόνα 4.3).



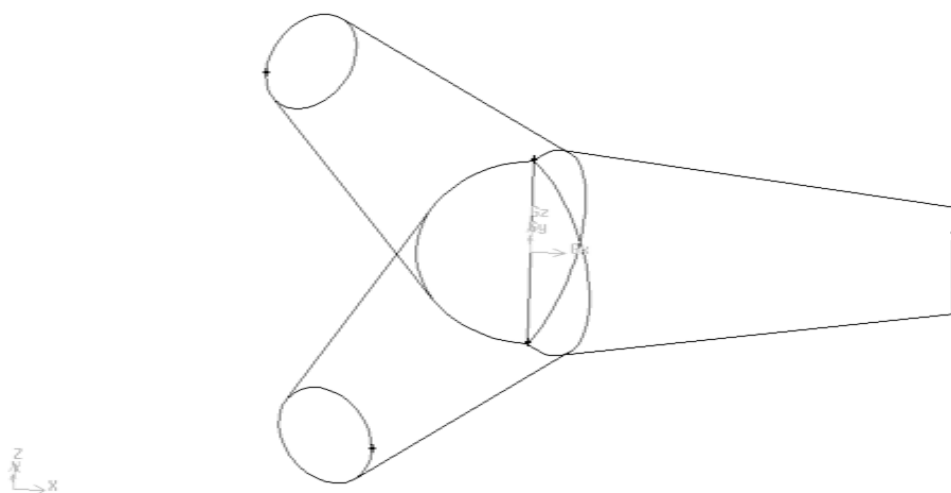
Εικόνα 4.3 Κατασκευή υπόλοιπων κώνων.

Στην συνέχεια δημιουργούνται τρεις επιφάνειες οι οποίες τέμνουν τους τρεις όγκους (κώνους) (Εικόνα 4.4).



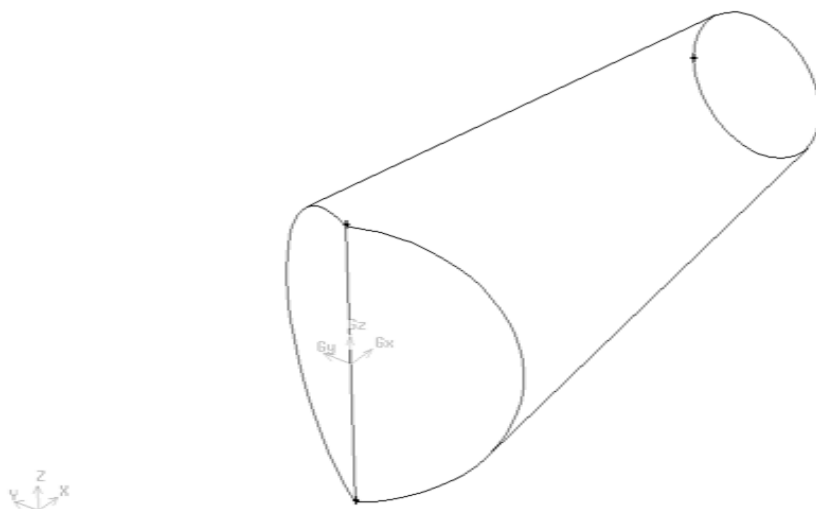
Εικόνα 4.4 Κατασκευή επιφανειών.

Με αυτές τις τρεις επιφάνειες «κόβουμε» τους όγκους διαγράφοντας τα «υπολείμματα» που δημιουργούνται (Εικόνα 4.5).



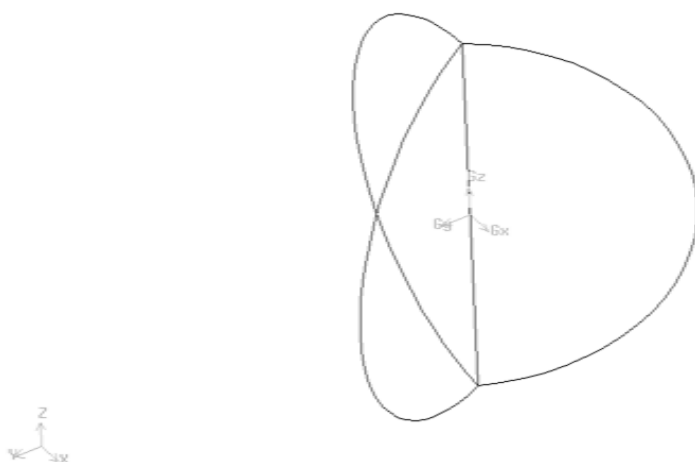
Εικόνα 4.5 Γεωμετρία μετά «κόψιμο» των όγκων.

Η διαδικασία δεν τελειώνει εδώ διότι προκύπτει πρόβλημα κατά τη διαδικασία της δημιουργίας του πλέγματος. Το πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι για την δημιουργία εξαέδρων στοιχείων πλέγματος η γεωμετρία πρέπει να έχει αυτή την μορφή δηλαδή να αποτελείται από τρεις όγκους αυτής της μορφής (Εικόνα 4.6). Όμως αυτοί οι 3 όγκοι όπως έχουν κατασκευαστεί δεν είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους ώστε να έχουν κοινούς κόμβους.



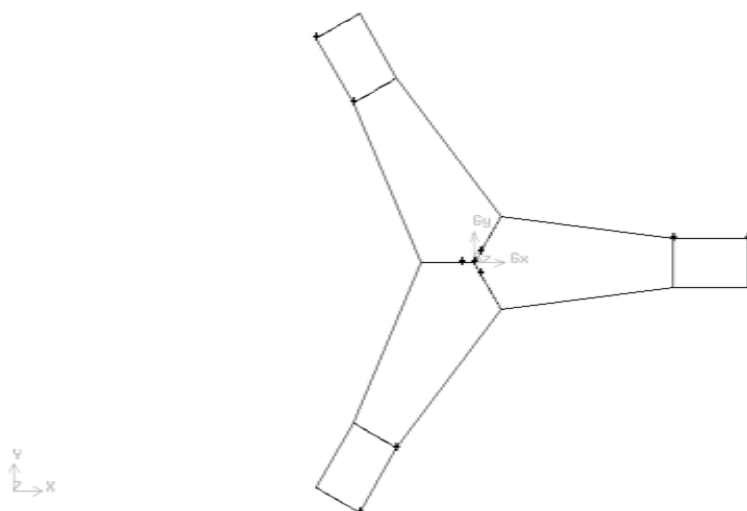
Εικόνα 4.6 Ένας από τους τρεις κατασκευασμένους όγκους.

Για να γίνει το παραπάνω ενώνουμε τους τρεις όγκους αυτούς και δημιουργούμε τρεις επιφάνειες που ουσιαστικά είναι οι κοινές επιφάνειες των όγκων αυτών (Εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7 Κοινές επιφάνειες όγκων.

Με αυτές τις επιφάνειες «κόβουμε» τον όγκο αυτό δημιουργώντας εκ νέου τρεις όγκους με την διάφορα ότι αυτήν την φορά είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Τέλος δημιουργούμε και τρία κυλινδρικά τμήματα αγωγών τα οποία είναι προέκταση των τριών αγωγών (Εικόνα 4.8 και 4.9).



Εικόνα 4.8 Τελική γεωμετρία.

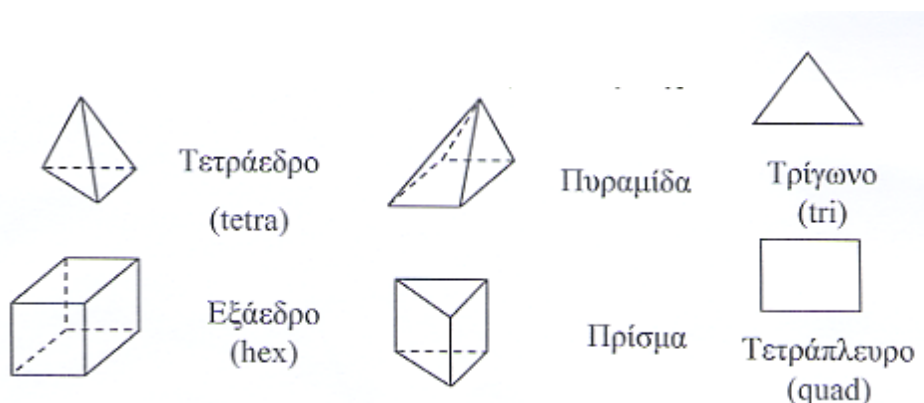


Εικόνα 4.9 Τελική γεωμετρία.

4.2.1 Δημιουργία πλέγματος

Το επόμενο στάδιο μετά την εισαγωγή της γεωμετρίας είναι η δημιουργία πλέγματος, η διαίρεση δηλαδή του όγκου που περικλείεται από το περίγραμμα της γεωμετρίας σε πεπερασμένο πλήθος ογκομετρικών κελιών. Εδώ θα πρέπει να αποφασιστεί τι είδους πλέγμα θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση. Ο κώδικας Gambit δίνει τη δυνατότητα χρήσης εξαεδρικού / τετραπλευρικού ή τετραεδρικού /τριγωνικού πλέγματος για τρισδιάστατη / δισδιάστατη αντίστοιχα ανάλυση (Εικόνα. 4.10). Επιπλέον, επιτρέπει και τη

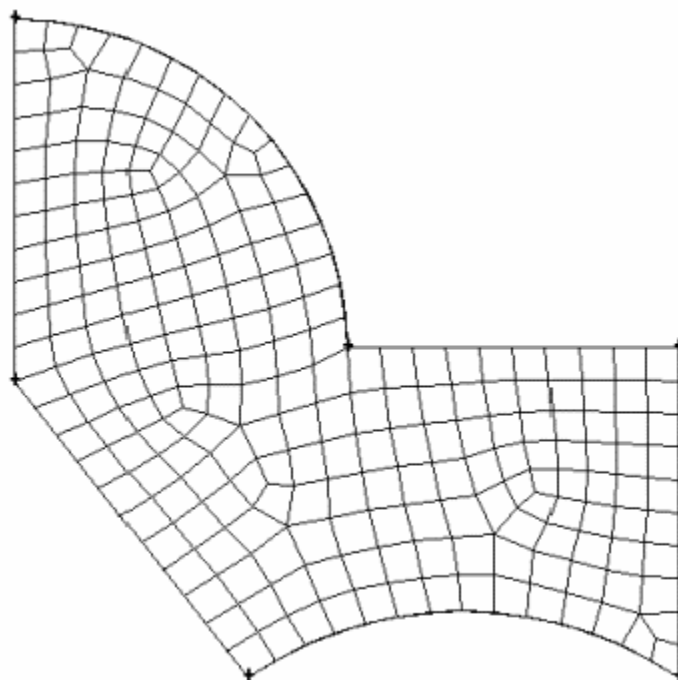
δημιουργία υβριδικού πλέγματος που μπορεί να αποτελείται από συνδυασμό των παραπάνω ανάλογα με τις απαιτήσεις της γεωμετρίας και της φύσης του προβλήματος. Για απλές γεωμετρίες τα τετραπλευρικά /εξαεδρικά πλέγματα δίνουν λύσεις υψηλής ακρίβειας με λιγότερα στοιχεία από ότι τα τριγωνικά / τετραεδρικά πλέγματα ιδιαίτερα αν οι πλεγματικές γραμμές είναι ευθυγραμμισμένες με την ροή. Στην περίπτωση μας θα χρησιμοποιήσουμε εξαεδρικό πλέγμα μιας και η γεωμετρία μας είναι καταρχήν τρισδιάστατη και αρκετά απλή.



Εικόνα 4.10 Γεωμετρία των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος.

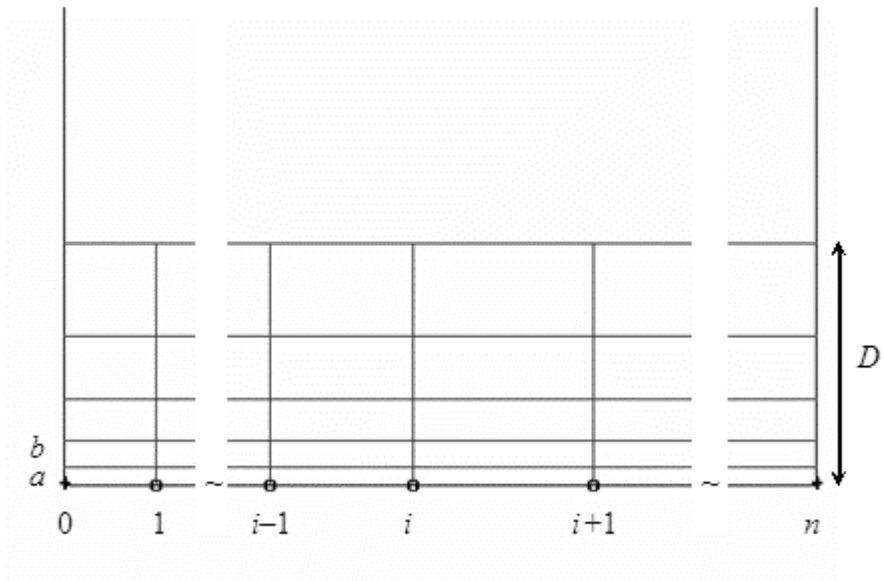
4.2.2 Πλεγματοποίηση των επιφανειών.

Η δημιουργία δομημένου πλέγματος στις επιφάνειες είναι δυνατή με τη χρήση της μεθόδου Quad-Pave. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή το λογισμικό δημιουργίας πλέγματος Gambit κατασκευάζει ένα μη δομημένο πλέγμα πάνω στην επιφάνεια χρησιμοποιώντας τετράπλευρα στοιχεία όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 4.11).

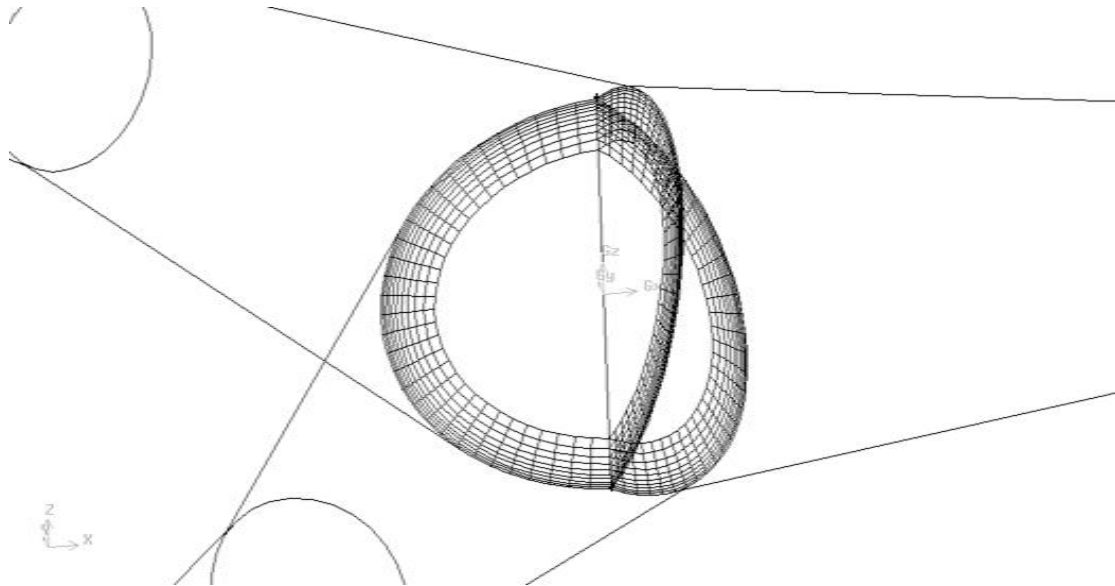


Εικόνα 4.11 Παράδειγμα πλέγματος με χρήση της μεθόδου Quad-Pave.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τις κοινές επιφάνειες των τριών όγκων. Αρχικά θα οριστεί το οριακό στρώμα και στη συνέχεια θα εφαρμοστεί η μέθοδος Quad-Pave για τη δημιουργία του πλέγματος. Η δημιουργία οριακού στρώματος είναι εξαιρετικά χρήσιμη δεδομένου του γεγονότος ότι με αυτή την ικανότητα του Gambit είναι δυνατόν αυτόματα να δημιουργηθεί πύκνωση του πλέγματος κοντά στην περιοχή του τοιχώματος. Το πυκνότερο πλέγμα κοντά στο τοίχωμα είναι επιθυμητό διότι μας ενδιαφέρει η κατά το δυνατόν ακριβέστερη επίλυση του ροϊκού πεδίου στην περιοχή αυτή όπου υπάρχουν μεγάλες κλίσεις ταχυτήτων αλλά και τυχόν ανακυκλοφορίες της ροής και αποκολλήσεις. Για την δημιουργία του οριακού στρώματος χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Uniform που μας δίνει το Gambit (Εικόνα 4.12). Για τον αλγόριθμο αυτό ορίζεται η απόσταση της πρώτης πλεγματικής γραμμής από το τοίχωμα a και ο ρυθμός αύξησης b/a όπου b η απόσταση μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης πλεγματικής γραμμής. Επομένως το ύψος της κάθε πλεγματικής γραμμής ισούται με το ύψος της προηγούμενης πλεγματικής γραμμής επί τον ρυθμό αύξησης. Τέλος ορίζεται ο αριθμός των πλεγματικών γραμμών που θα αποτελούν το οριακό στρώμα. Παρακάτω παρατηρείται η απεικόνιση του οριακού στρώματος στην γεωμετρία (Εικόνα 4.13).

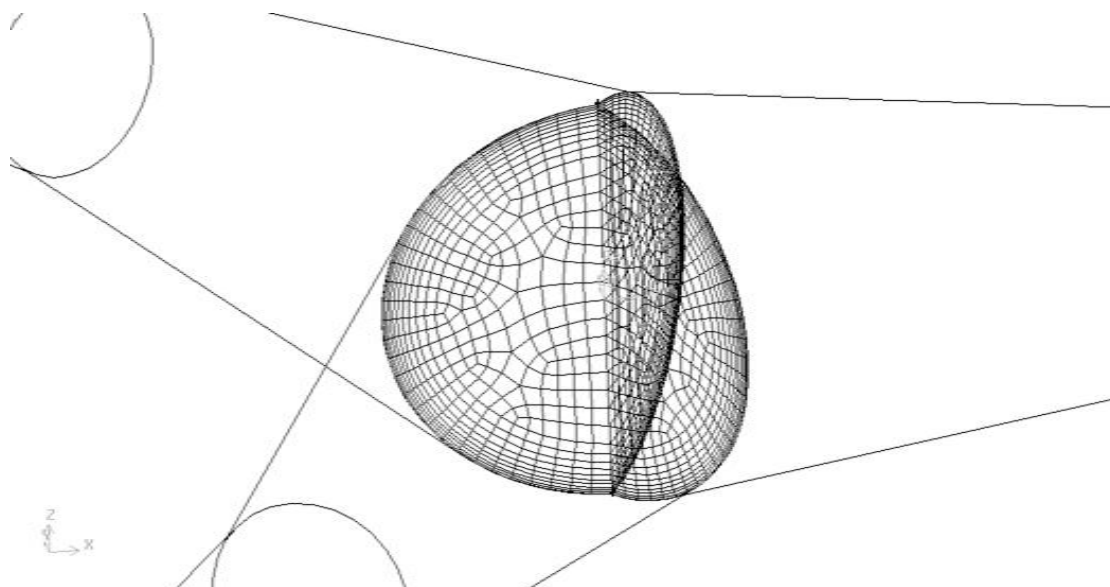


Εικόνα 4.12 Παράδειγμα οριακού στρώματος



Εικόνα 4.13 Οριακό στρώμα.

Το επόμενο στάδιο στην δημιουργία του πλέγματος στις κοινές επιφάνειες είναι η κάλυψη των υπολοίπων τμημάτων των επιφανειών με υπολογιστικά στοιχεία. Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί είναι η Quad-Pave όπου ορίζεται η πύκνωση του πλέγματος (Εικόνα 4.14).

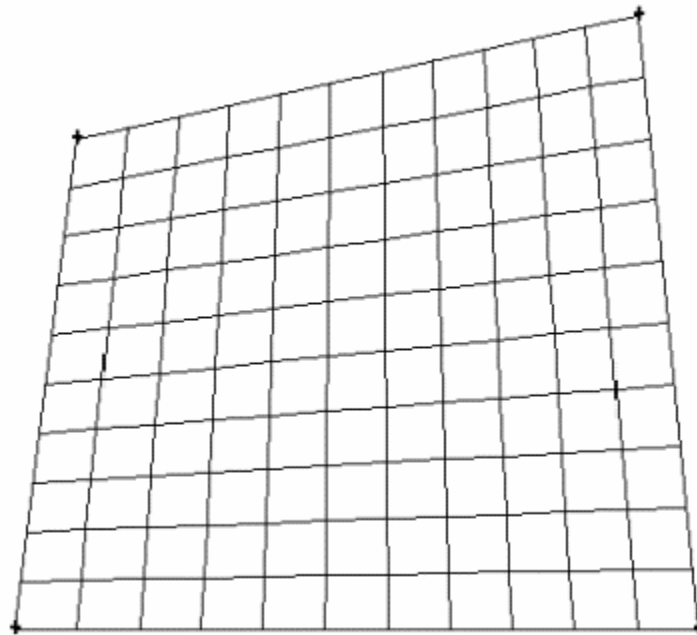


Εικόνα 4.14 Πλεγματοποίηση επιφανειών.

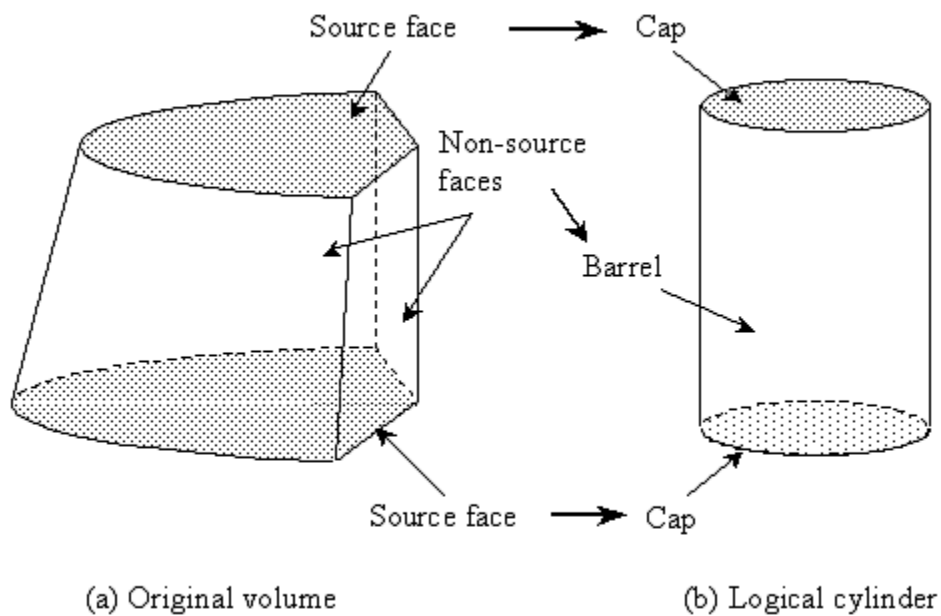
4.2.3 Δημιουργία τρισδιάστατου πλέγματος

Τη δημιουργία πλέγματος στις επιφάνειες που απαρτίζουν τη γεωμετρία ακολουθεί η γεωμετρία του πλέγματος στο χώρο. Για τη δημιουργία του 3D πλέγματος αποτελούμενου από εξάεδρα θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος Cooper ο οποίος περιέχεται ως επιλογή στο Gambit. Ο αλγόριθμος Cooper στηρίζεται στην παραδοχή ότι κάθε γεωμετρία στην οποία εφαρμόζεται ουσιαστικά αποτελείται από έναν ή περισσότερους λογικούς κυλίνδρους οι οποίοι χαρακτηρίζονται από δύο κυκλικές επιφάνειες και μία πλευρική. Οι επιφάνειες της εκάστοτε γεωμετρίας που θα επιλεγούν ως οι κυκλικές επιφάνειες του λογικού κυλίνδρου ονομάζονται «επιφάνειες έναρξης» (source faces). Ο Cooper αλγόριθμος, εφόσον οριστούν οι source faces από τον χρήστη, δημιουργεί Map (Εικόνα 4.15) πλέγμα στην πλευρική επιφάνεια του λογικού κυλίνδρου και αποτυπώνει τη μια επιφάνεια έναρξης στην άλλη προβάλλοντας το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί στην πρώτη επιφάνεια έναρξης σε όλο τον όγκο που περικλείεται από το περίγραμμα της γεωμετρίας (Εικόνα 4.16). Σε κάθε έναν από τους τρεις όγκους που δημιουργήθηκαν

χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Cooper για τη δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος αποτελούμενου από εξάεδρα.

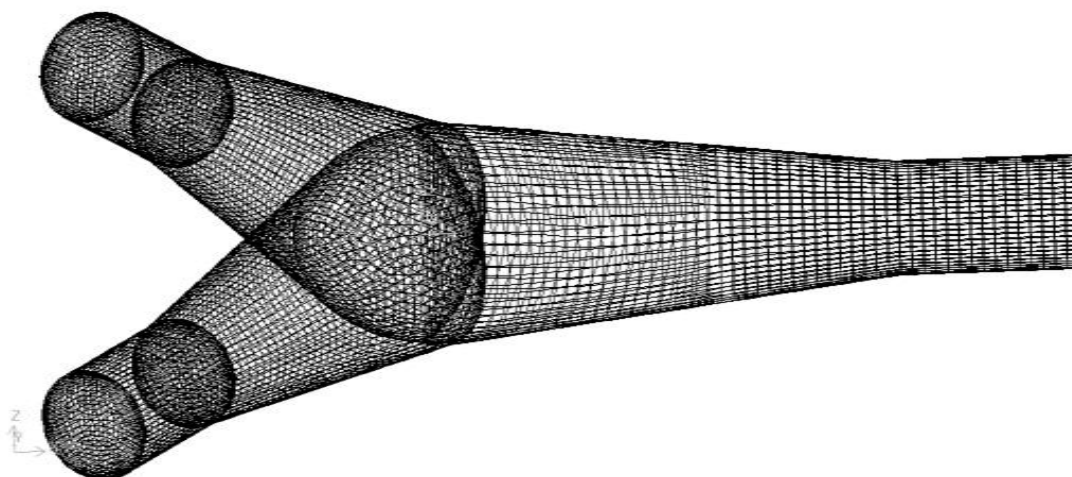


Εικόνα 4.15 Παράδειγμα πλέγματος με χρήση της μεθόδου Quad-Map που χρησιμοποιείται στις πλευρικές επιφάνειες



Εικόνα 4.16 Απεικόνιση της μεθόδου Cooper.

Στην περίπτωση μας ως επιφάνειες έναρξης επιλέγονται οι κοινές επιφάνειες των τριών όγκων και οι απέναντι τους. Τέλος όπως και στην πλεγματοποίηση των επιφανειών έτσι και εδώ ορίζουμε την πύκνωση (volume spacing). Παρακάτω παρατηρείται το τελικό αποτέλεσμα μετά την πλεγματοποίηση όλων των όγκων (Εικόνα 4.17).



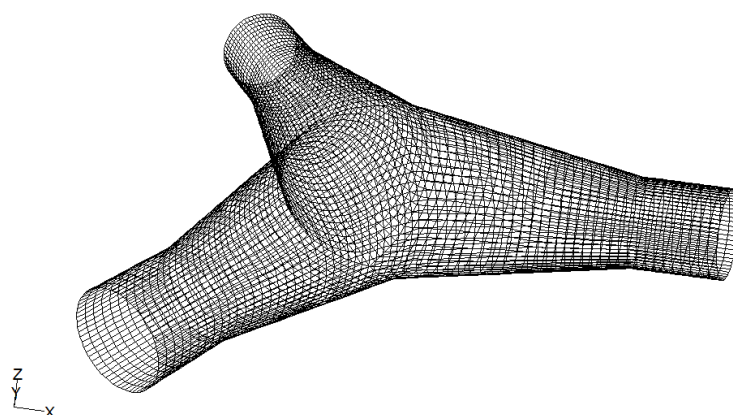
Εικόνα 4.17 Τελικό πλέγμα

4.3 Χαρακτηρισμός επιφανειών

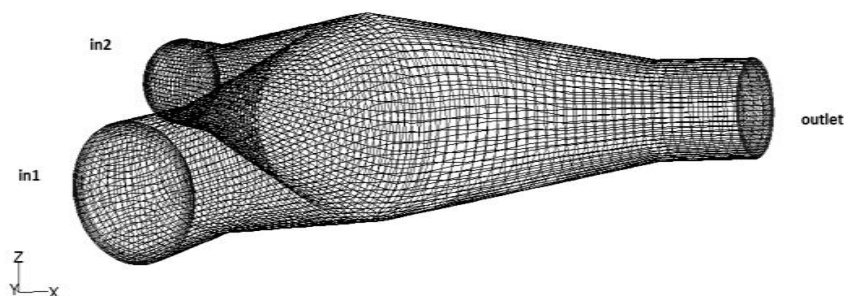
Το τελευταίο στάδιο της κατασκευής της γεωμετρίας και του πλέγματος είναι ο χαρακτηρισμός όλων των επιφανειών ανάλογα με το είδος τους προσδιορίζοντας έτσι τις οριακές συνθήκες του προβλήματος. Έτσι το μοντέλο χωρίζεται σε ζώνες οριακών συνθηκών :

- Επιφάνεια/ες εισόδου και εξόδου. (Ανάλογα με το πρόβλημα ενδέχεται να έχουμε δύο εισόδους και μία έξοδο ή το αντίθετο δηλαδή μία είσοδο και δύο εξόδους) (Εικόνα 4.19).
- Επιφάνειες κελύφους (wall) (Εικόνα 4.18).
- Εσωτερικές επιφάνειες (Ουσιαστικά είναι βοηθητικές επιφάνειες που έχουν δημιουργηθεί και δεν λαμβάνονται υπόψη στις οριακές συνθήκες) (Εικόνα 4.20).

Στο παράδειγμα μας έχουμε δύο εισόδους και μία έξοδο.



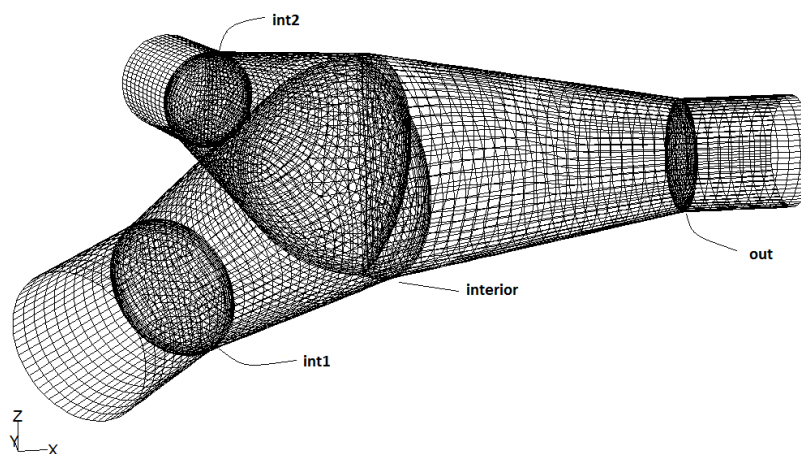
Εικόνα 4.18 Επιφάνειες κελύφους (wall).



Εικόνα 4.19 Επιφάνειες εισόδων και εξόδου (in1,in2,outlet)

Η όλη παραπάνω διαδικασία, δηλαδή η κατασκευή της γεωμετρίας, η πλεγματοποίησή της και ο ορισμός των επιφανειών, γίνεται να αυτοματοποιηθεί και να παραμετροποιηθεί με βάση τις γεωμετρικές παραμέτρους d_{max} , d_{min} , α_1 , α_2 και φ . Για να γίνει αυτό πρέπει να γραφεί κώδικας με τις εντολές του Gambit σε ένα αρχείο journal. Αλλάζοντας τις παραμέτρους μέσα από το αρχείο αυτό και τρέχοντάς το στο Gambit παίρνουμε την επιθυμητή γεωμετρία. Το αρχείο αυτό παρατίθεται στο παράρτημα Α στο τέλος της παρούσας εργασίας. Ο χρόνος που χρειάζεται για

να κατασκευαστεί αυτόματα η γεωμετρία είναι ελάχιστος (μικρότερος από 30').



Εικόνα 4.20 Επιφάνειες εσωτερικού χώρου (interior)

Η ποιότητα του πλέγματος παίζει σημαντικό ρόλο στη ακρίβεια της λύσης αλλά και στην σύγκλιση του προβλήματος. Χαμηλής ποιότητας πλέγμα μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ανακριβείς λύσεις ή και καθυστέρηση στην σύγκλιση. Ένας συνήθης δείκτης που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ποιότητας του πλέγματος είναι ο equiangle skew ο οποίος μετρά την παραμόρφωση των κελιών του πλέγματος μέσω των γωνιών του κάθε κελιού. 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 και $\theta_e=90^\circ$ για εξαεδρικά κελιά. Παίρνει τιμές από 0-1 και υπολογίζεται για κάθε κελί. Τιμές κοντά στο 0 υποδεικνύουν υψηλής ποιότητας πλέγμα ενώ κοντά στο 1 το αντίθετο. Για εξαεδρικά κελιά τιμές <0.85 είναι επιτρεπτές.

Για τις διάφορες γεωμετρίες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία το όριο αυτό δεν ξεπεράστηκε ποτέ και μάλιστα η μέγιστή τιμή που παρουσιάστηκε ήταν <0.7. Γενικά τα χαμηλής ποιότητας κελιά παρουσιάστηκαν στην περιοχή όπου ενώνονται οι τρεις κωνικοί όγκοι κοντά στο τοίχωμα και ιδιαίτερα όταν οι γωνίες α_1 και α_2 γίνονταν μικρές.

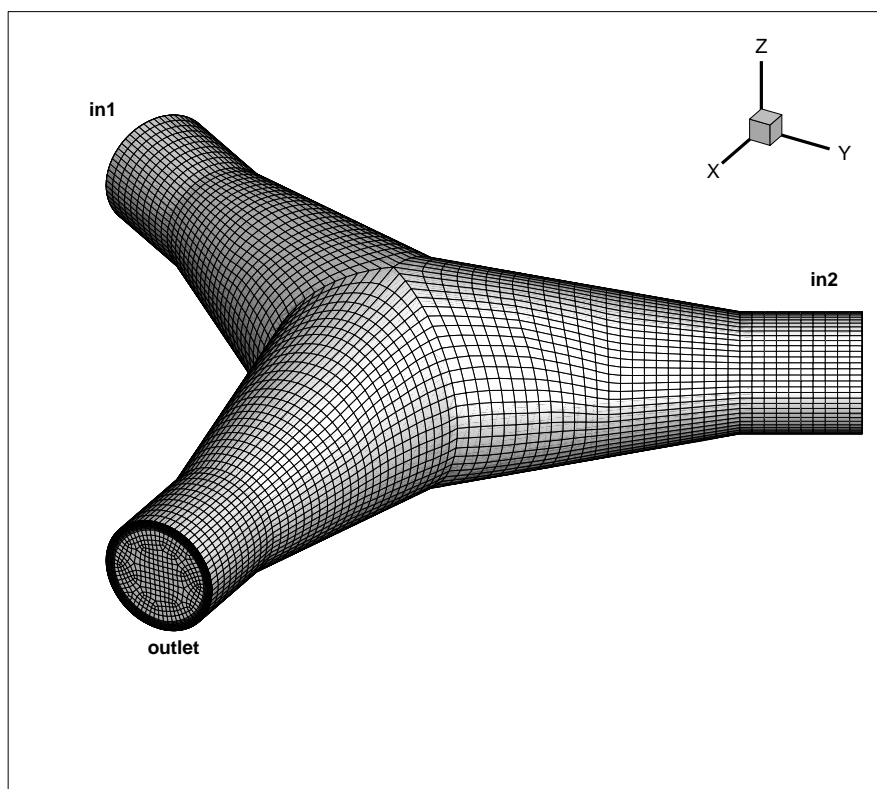
Κεφάλαιο 5^ο - Έλεγχος ανεξαρτησίας πλέγματος

5.1 Εισαγωγή

Κατά την διαδικασία αυτή λύνουμε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα με διάφορα πλέγματα προοδευτικά αυξανόμενου αριθμού κελιών και επιλέγουμε αυτό για το οποίο η λύση δεν αλλάζει σημαντικά με περαιτέρω πύκνωση του. Για την διαδικασία αυτή κατασκευάζουμε την παραπάνω γεωμετρία με τυχαίες διαστάσεις (Εικόνα 5.1) . Οι διαστάσεις που επιλέγονται είναι οι εξής:

- $d_{\max}=2$ m
- $d_{\min}=1$ m
- $\varphi=10^\circ$
- $\alpha_1=120^\circ$
- $\alpha_2=120^\circ$

Η γεωμετρία σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχουμε δύο εισόδους και μία έξοδο. Οι δυο εισοδοί αντιστοιχούν στις επιφάνειες in1 και in2 και η έξοδος στην επιφάνεια outlet.



Εικόνα 5.1 Γεωμετρία για τον έλεγχο ανεξαρτησίας πλέγματος

Δημιουργούνται δύο είδη διαφορετικών πλεγμάτων ένα για χαμηλές ταχύτητες (κάτω από 1 m/s) και ένα για ταχύτητες άνω του ορίου αυτού. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι για να μοντελοποιήσουμε όσο καλύτερα γίνεται την τυρβώδη ροή.

Όπως είναι γνωστό τυρβώδη ροή έχουμε όταν το σύνολο των ποσοτήτων των μεταφορών μάζας, ορμής, ενέργειας παρουσιάζουν περιοδικές και ακανόνιστες διακυμάνσεις στον χώρο και στον χρόνο. Για την σωστή μοντελοποίηση της τύρβης πολύ σημαντικό ρόλο παίζει το πλέγμα. Ένα πλέγμα το οποίο δίνει ακριβή αποτελέσματα για μία στρωτή ροή μπορεί να μην είναι αποδεκτό για τυρβώδης ροές. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.7 για την σωστή λύση του τυρβώδους οριακού στρώματος απαιτείται ιδιαίτερα πυκνό πλέγμα κοντά στα τοιχώματα της γεωμετρίας. Για την αποφυγή αυτού του πυκνού πλέγματος χρησιμοποιείται ένα πλέγμα πιο αραιό με την ταυτόχρονη όμως χρήση των συναρτήσεων τοιχώματος που στον κώδικα Fluent είναι οι Standard Wall Functions. Προϋπόθεση όμως είναι η να υπάρχει συγκεκριμένη απόσταση του πρώτου κελιού από το τοίχωμα. Αυτή η απόσταση εκφράζεται από την ποσότητα $y^+ = \rho u y / \mu$ όπου πρέπει να είναι $30 < y^+ < 300$. Όπως φαίνεται το y^+ επηρεάζεται από την ταχύτητα της ροής. Επειδή θα χρησιμοποιήσουμε στην συνέχεια ταχύτητες που κυμαίνονται από $0.2 \text{ m/s} < u < 5 \text{ m/s}$ είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί ένα πλέγμα που να

καλύπτει την παραπάνω προϋπόθεση, δηλαδή $30 < y^+ < 300$. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούμε δύο είδη πλεγμάτων, ένα για ταχύτητες μικρότερες του 1 m/s και ένα για τις υπόλοιπες. Το μόνο που αλλάζει είναι η απόσταση του πρώτου κελιού από τον τοίχο.

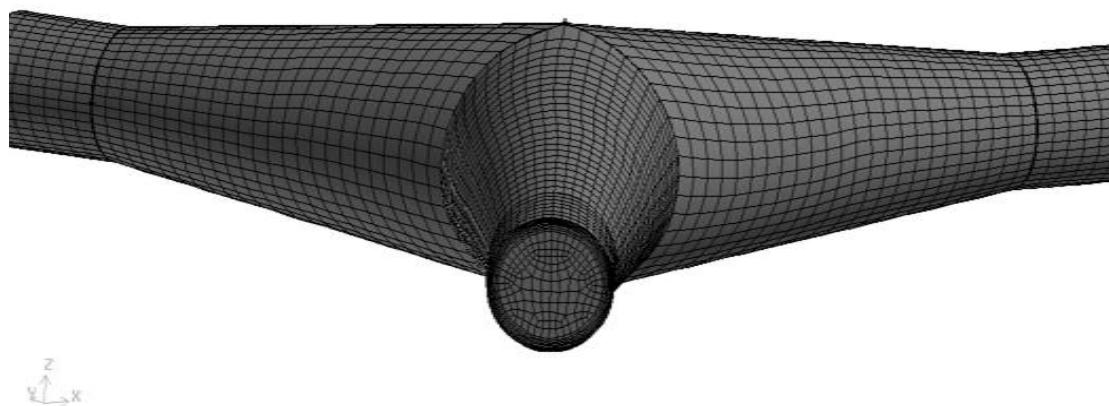
5.2 Πλέγμα για χαμηλές ταχύτητες

Μετά από διάφορες δοκιμές ώστε $30 < y^+ < 300$ επιλέγονται οι παρακάτω τιμές για τις μεταβλητές (First Row, Growth Factor, Rows) που ορίζουν το οριακό στρώμα. Για την προοδευτική αύξηση των αριθμών των κελιών αλλάζουμε τις τιμές στις μεταβλητές Face και Volume spacing. Το πάχος του οριακού στρώματος είναι και για τα τρία πλέγματα 20cm.

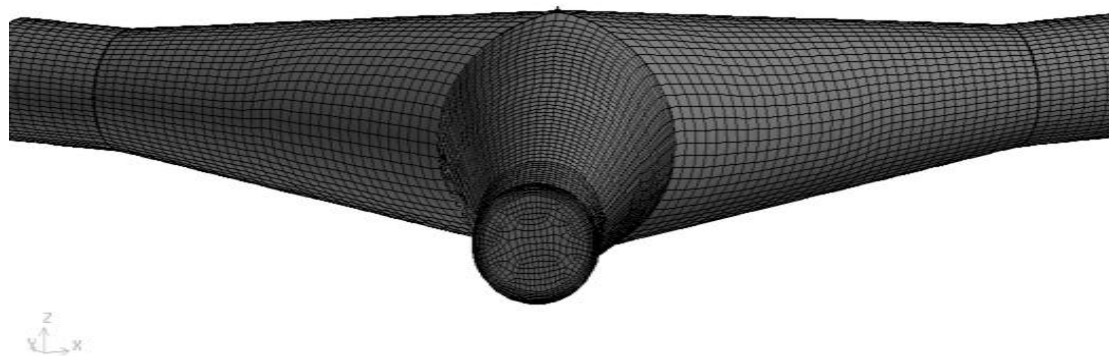
Επιλέγουμε τρεις διαφορετικές πυκνώσεις πλεγμάτων όπως φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 5.1).

Όνομα	A1	A2	A3
First Row	0.01	0.01	0.01
Growth Factor	1.15	1.15	1.15
Rows	10	10	10
Face spacing	0.15	0.1	0.08
Volume spacing	0.15	0.1	0.08
Αριθμός κελιών	43680	94520	190404

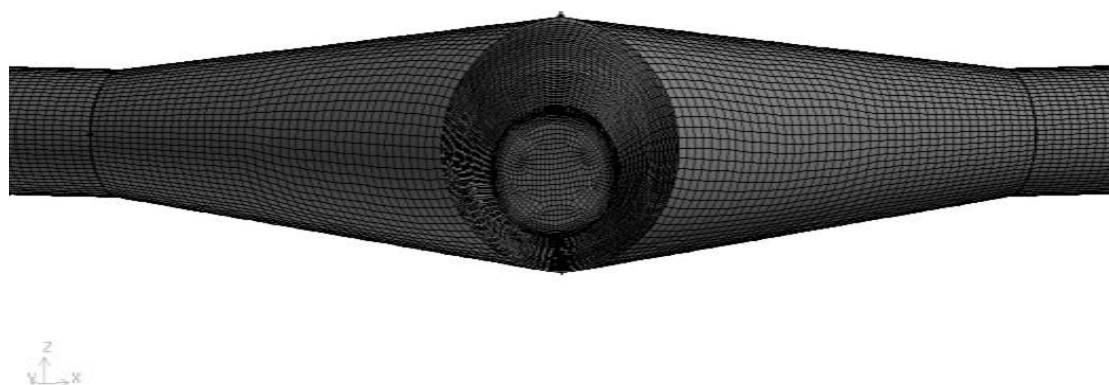
Πίνακας 5.1



Εικόνα 5.2 Πλέγμα A1



Εικόνα 5.3 Πλέγμα A2



Εικόνα 5.4 Πλέγμα A3

Η διαδικασία που ακολουθείται για την επίλυση στο FLUENT είναι η παρακάτω.

5.2.1 Εισαγωγή υπολογιστικού πλέγματος στο Fluent.

Η εισαγωγή του υπολογιστικού πλέγματος στον επιλύτη FLUENT είναι αρκετά απλή και η διαδικασία έγκειται στο «διάβασμα» (Read) του αρχείου .msh που έχει δημιουργηθεί στο Gambit. Ο επιλύτης με το «διάβασμα» του αρχείου λαμβάνει και αυτόματα αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό και το είδος των υπολογιστικών κελιών καθώς και για τις διάφορες συνοριακές επιφάνειες που ήδη έχει ορίσει ο χρήστης στο Gambit (π.χ είσοδος συστήματος, τοίχωμα, έξοδος συστήματος). Όλες αυτές οι πληροφορίες παρατίθενται στο περιβάλλον εργασίας του FLUENT.

5.2.2 Καθορισμός ρευστού και συνθηκών πίεσης.

Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή των μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διαδικασία επίλυσης δηλαδή επιλέγονται οι εξισώσεις που θα επιλυθούν. Στο μοντέλο μας εκτός από τις συνήθεις εξισώσεις της ροής χρησιμοποιούνται και οι εξισώσεις της τυρβώδους ροής. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι το Standard k-ε και οι εξισώσεις κοντά στους τοίχους να είναι οι Standard Wall Functions.

Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός του ρευστού και των συνθηκών πίεσης που λαμβάνονται υπόψη κατά την επίλυση. Στην περίπτωση μας το ρευστό είναι το νερό.

Η πίεση αναφοράς είναι η ατμοσφαιρική δηλαδή $P_{op} = 101325 \text{ Pa}$.

5.2.3 Καθορισμός οριακών συνθηκών

Κατά την εισαγωγή των δεδομένων του υπολογιστικού πλέγματος στο FLUENT, αναγνωρίζονται από τον επιλύτη δύο είσοδοι (in1, in2) , μία έξοδος (out) καθώς και το τοίχωμα (wall) της διακλάδωσης. Για την έναρξη της επίλυσης είναι απαραίτητος ο καθορισμός οριακών συνθηκών στις προαναφερθείσες συνοριακές επιφάνειες ώστε να υπάρχουν επαρκή δεδομένα τα οποία θα αποτελέσουν την αφετηρία της επαναληπτικής διαδικασίας επίλυσης του συστήματος.

Για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών ορίστηκαν τα ακόλουθα:

- Είσοδος 1 (in1): Ο καθορισμός αυτής της οριακής συνθήκης έγινε σύμφωνα με την ταχύτητα εισόδου του ρευστού (velocity inlet). Το μέτρο της ταχύτητας ορίστηκε (velocity magnitude) $v=0.5 \text{ m/s}$. Εκτός από την ταχύτητα του ρευστού πρέπει να οριστούν και οριακές συνθήκες για τις εξισώσεις της τύρβης. Επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν η υδραυλική διάμετρος (Hydraulic Diameter) και η ένταση της τύρβης (Turbulent Intensity). Η υδραυλική διάμετρος είναι σύμφωνα με την γεωμετρία $D_h = d_{\min} = 1 \text{ m}$. Για την ένταση της τύρβης χρησιμοποιείται η σχέση $TI = 0.16 Re^{-0.125}$ όπου Re ο αριθμός Reynolds. Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως $Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}$ όπου μ το ιξώδες, D_h η υδραυλική διάμετρος, v η ταχύτητα και ρ η πυκνότητα. Στην προκειμένη περίπτωση για $v=0.5 \text{ m/s}$ προκύπτει ότι $Re=497607$ και $TI=0.03105=3.105\%$
- Είσοδος 2 (in2): Και εδώ η οριακή συνθήκη γίνεται σύμφωνα με την ταχύτητα εισόδου του ρευστού (velocity inlet). Επιλέγεται $v=0.2 \text{ m/s}$. Η

υδραυλική διάμετρος είναι ίδια με αυτή της εισόδου 1, $D_h=1m$. Έτσι προκύπτει ότι $Re=199042$ και η ένταση της τύρβης $TI=0.03481=3.481\%$.

- Έξοδος (outlet): Η έξοδος του συστήματος καθορίστηκε ως outflow. Η μόνη παράμετρος που συμπληρώνεται είναι η Flow rate weighting που στη περίπτωση μας παίρνει την τιμή 1. Η παράμετρος αυτή μας δείχνει το ποσοστό της παροχής που περνά από την συγκεκριμένη επιφάνεια. Στην περίπτωση μας έχουμε μία έξοδο επομένως όλη η παροχή περνά από την έξοδο outlet.
- Τοίχωμα (Wall): Το τοίχωμα της διακλάδωσης ορίζεται ως σταθερό (stationary wall). Επιλέγεται απόλυτη τραχύτητα για την επιφάνεια του τοίχου ίση με 1mm.

5.2.4 Καθορισμός παραμέτρων επίλυσης

Η επίλυση του ροϊκού πεδίου με λογισμικά Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής όπως είναι το FLUENT καθίσταται δυνατή μέσω επαναληπτικών επιλύσεων των διαφορικών εξισώσεων διατήρησης συνέχειας, ορμής, τυρβώδους κινητικής ενέργειας και τυρβώδους διάχυσης. Στο FLUENT είναι δυνατός ο καθορισμός της μεθόδου διακριτοποίησης των εξισώσεων διατήρησης καθώς και του αλγόριθμου σύζευξης πίεσης και ταχύτητας για την ικανοποίηση της διατήρησης της συνέχειας. Για το υπό μελέτη ροϊκό πεδίο επιλέχθηκαν τα ακόλουθα:

Διακριτοποίηση εξίσωσης διατήρησης Ορμής	Δεύτερης τάξης ανάντι διακριτοποίηση
Διακριτοποίηση εξίσωσης τυρβώδους κινητικής ενέργειας	Δεύτερης τάξης ανάντι διακριτοποίηση
Διακριτοποίηση εξίσωσης τυρβώδους διάχυσης	Δεύτερης τάξης ανάντι διακριτοποίηση
Σύζευξη Πίεσης-Ταχύτητας	Αλγόριθμος SIMPLE

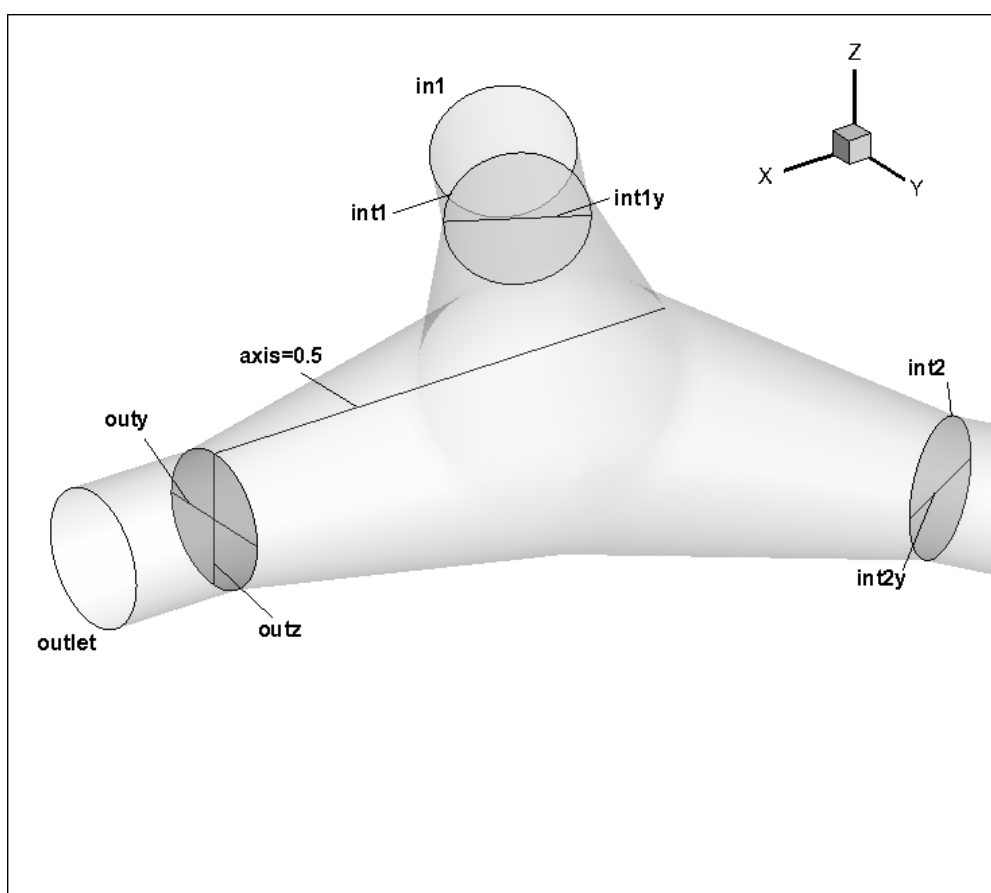
5.2.5 Επίλυση της ροής

Το επόμενο στάδιο μετά από τον καθορισμό του φυσικού συστήματος και την επιλογή των κατάλληλων «σχημάτων» διακριτοποίησης είναι η έναρξη της επίλυσης. Ορίζεται αφετηρία της επαναληπτικής διαδικασίας η οποία για τη συγκεκριμένη επίλυση είναι οι συνθήκες (μέτρο ταχύτητας ροής) που επικρατούν στην είσοδο in1 του συστήματος. Ακολουθεί η έναρξη της επίλυσης. Το ροϊκό πεδίο έχει επιλυθεί όταν έχουν ικανοποιηθεί οι εξισώσεις διατήρησης. Το ποσοτικό και ποιοτικό μέτρο που πληροφορεί τον ερευνητή για την ικανοποίηση των εξισώσεων διατήρησης είναι τα «υπόλοιπα»

(residuals) που προκύπτουν από την επαλήθευση των εξισώσεων. Όταν τα «υπόλοιπα» λάβουν τιμή μικρότερη από ένα καθορισμένο όριο που έχει τεθεί από τον ερευνητή θεωρείται ότι ουσιαστικά ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει. Στην παρούσα επίλυση ως κάτω όριο των «υπολοίπων» θα τεθεί η τιμή 10^{-4} για την εξίσωση συνέχειας και για τις ταχύτητες κατά τους άξονες x,y,z και η τιμή 10^{-3} για τα k και ε. Για μεγαλύτερη ακρίβεια λύσεων θα μπορούσε να τεθεί μικρότερο όριο όμως θα χρειαζόταν περισσότερος υπολογιστικός χρόνος ώστε ο αλγόριθμος να συγκλίνει. Για την παρούσα εργασία θεωρείται ότι τα όρια αυτά είναι ικανοποιητικά για την εξεύρεση της λύσης.

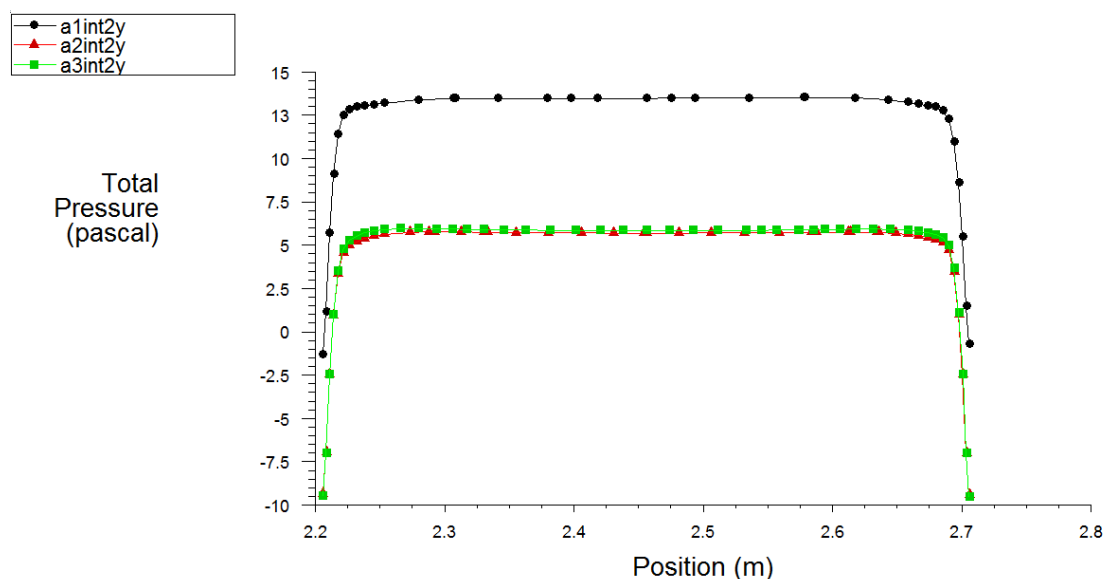
5.2.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Μετά την επίλυση και των τριών παραπάνω πλεγμάτων με τις ίδιες οριακές συνθήκες αλλά με διαφορετική πύκνωση ακολουθεί η εκλογή του πλέγματος εκείνου για το οποίο η λύση δεν αλλάζει με περαιτέρω πύκνωση αυτού. Για αυτόν τον λόγο σχεδιάζουμε σε διάφορες θέσεις της γεωμετρίας τις κατανομές της πίεσης και της ταχύτητας.



Εικόνα 5.5 Διάφορες επιφάνειες

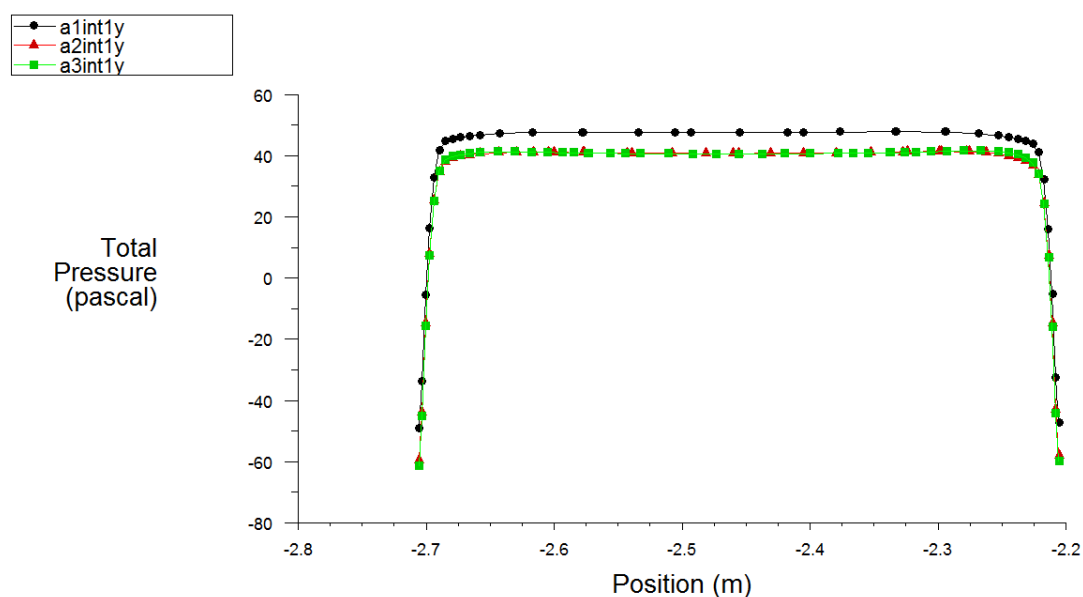
Επομένως στην επιφάνεια int2y (Εικόνα 5.5) σχεδιάζουμε την κατανομή της ολικής πίεσης . Σχεδιάζουμε κατά μήκος της ευθείας αυτής την κατανομή της ολικής πίεσης για τις τρεις περιπτώσεις (Εικόνα 5.6).



Εικόνα 5.6 Κατανομή ολικής πίεσης στην int2y.

Παρατηρείται ότι τα για πλέγματα A2 και A3 οι κατανομές της πίεσης ταιριάζουν απόλυτα ενώ η κατανομή του πλέγματος A1 είναι μετατοπισμένη προς τα επάνω κατά 7 pascal περίπου.

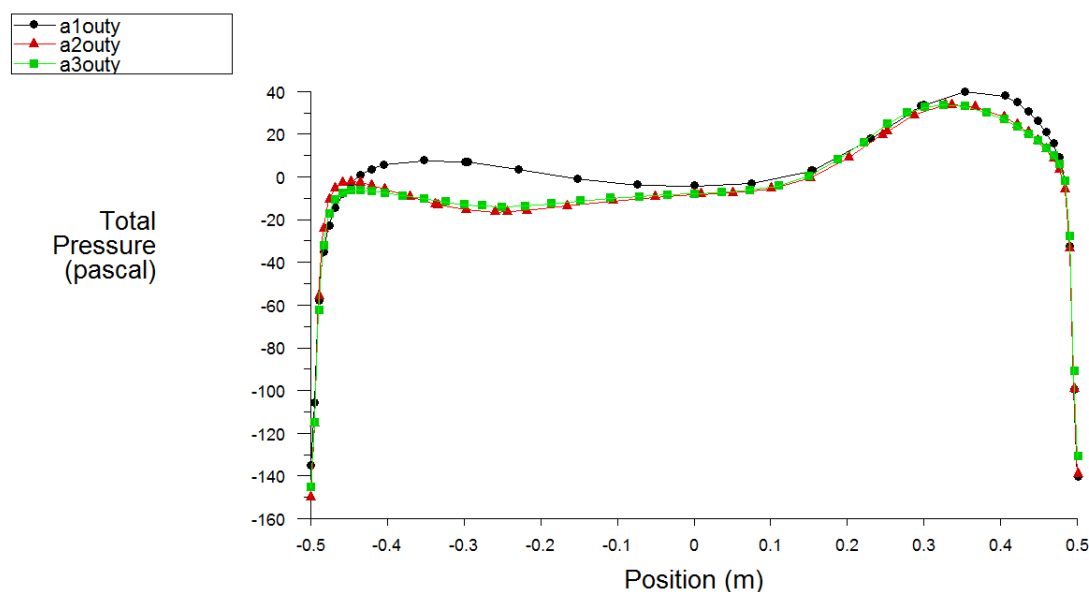
Ομοίως σχεδιάζουμε την κατανομή της ολικης πίεσης στην int1y (Εικόνες 5.5 και 5.7).



Εικόνα 5.7 Κατανομή ολικής πίεσης στην int1y.

Παρατηρείται ότι οι κατανομές των πλεγμάτων A2 και A3 ταιριάζουν απόλυτα ενώ η κατανομή του πλέγματος A1 είναι μετατοπισμένη προς τα επάνω περίπου και εδώ κατά 7 pascal.

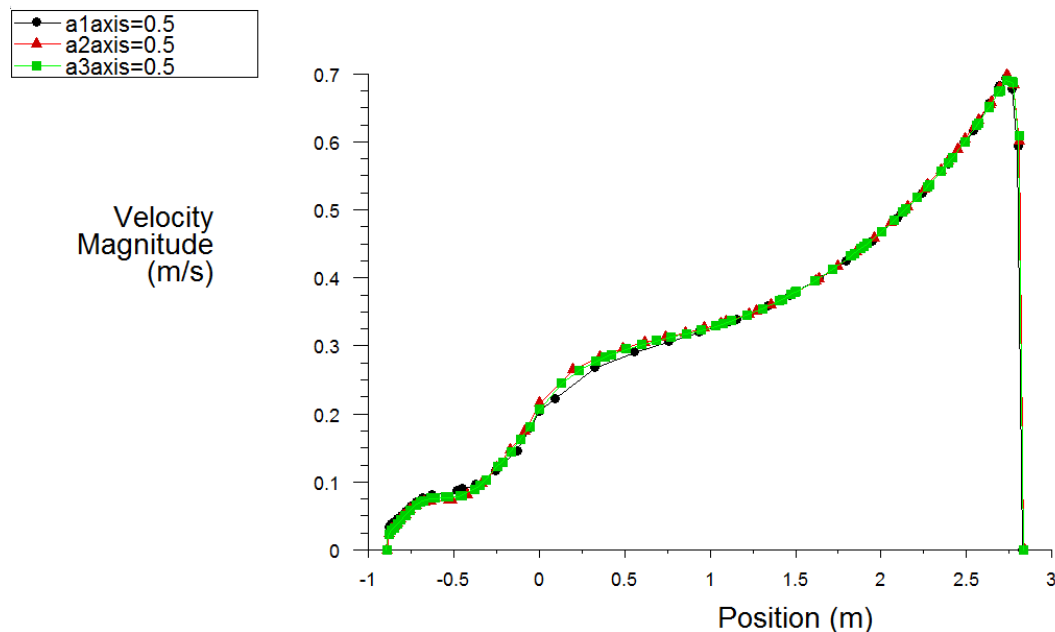
Παρακάτω βλέπουμε την κατανομή της ολικής πίεσης στην έξοδο της διακλάδωσης στο επίπεδο $z=0$ (outy) (Εικόνα 5.5 και 5.8).



Εικόνα 5.8 Κατανομή ολικής πίεσης στην outy.

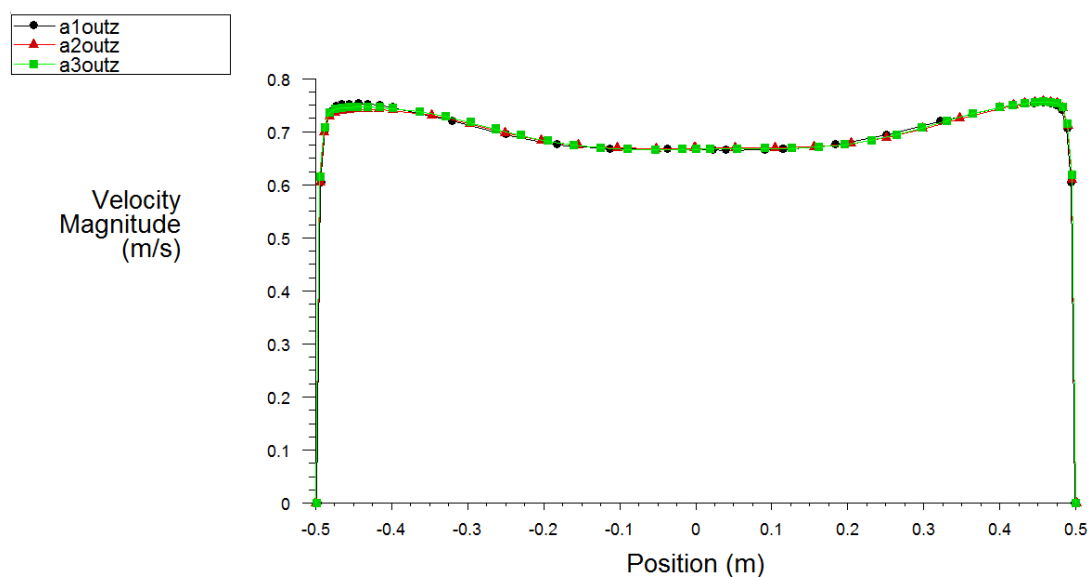
Παρατηρείται ότι οι κατανομές των πλεγμάτων A2 και A3 ταιριάζουν και εδώ απόλυτα. Αντίθετα για την κατανομή του πλέγματος A1 παρατηρείται ότι αυτή ταιριάζει σε ορισμένα σημεία του πλέγματος όπως σε αυτά κοντά στα τοιχώματα.

Επίσης σχεδιάζουμε την κατανομή της ταχύτητας στην τομή των επιπέδων $y=0$ και $z=0.5$ (axis=0.5) (Εικόνα 5.5 και 5.9).



Εικόνα 5.9 Κατανομή ταχύτητας στην axis=0.5.

Τέλος σχεδιάζουμε την κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο της διακλάδωσης στο επίπεδο $y=0$ (outz) (Εικόνα 5.5 και 5.10).



Εικόνα 5.10 Κατανομή ταχύτητας στην outz.

Για τις εικόνες 5.9 και 5.10 παρατηρείται ότι οι κατανομές των ταχυτήτων ταιριάζουν απόλυτα για όλα τα πλέγματα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω παρατηρούμε ότι τα πλέγματα A2 και A3 παρουσιάζουν ίδιες κατανομές. Επομένως επιλέγουμε το πλέγμα A2 ως πλέγμα για τις χαμηλές ταχύτητες μιας και αυτό έχει μικρότερο αριθμό κελιών και θα απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο για την επίλυση της ροής.

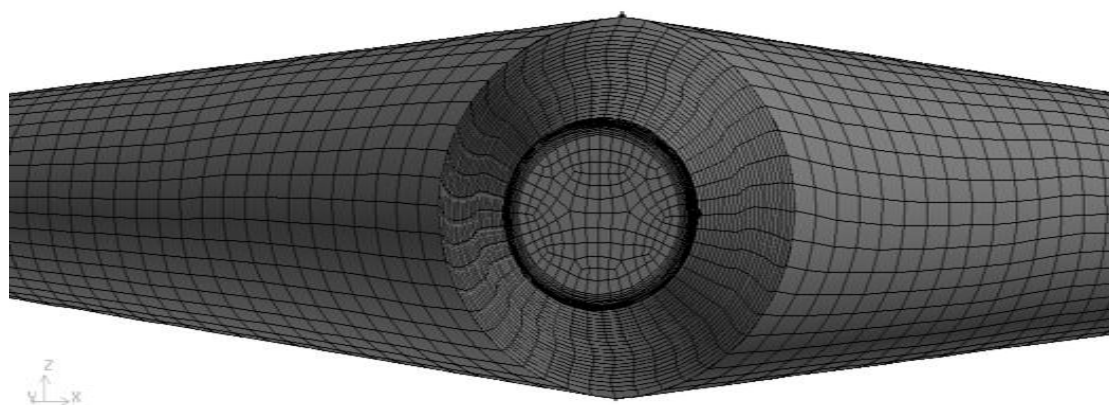
5.3 Πλέγμα για υψηλές ταχύτητες

Και εδώ μετά από διάφορες δοκιμές ώστε $30 < y^+ < 300$ επιλέγονται οι παρακάτω τιμές για τις μεταβλητές (First Row, Growth Factor, Rows) που ορίζουν το οριακό στρώμα. Για την προοδευτική αύξηση των αριθμών των κελιών αλλάζουμε τις τιμές στις μεταβλητές Face και Volume spacing. Το πάχος του οριακού στρώματος είναι και για τα τρία πλέγματα 18 cm.

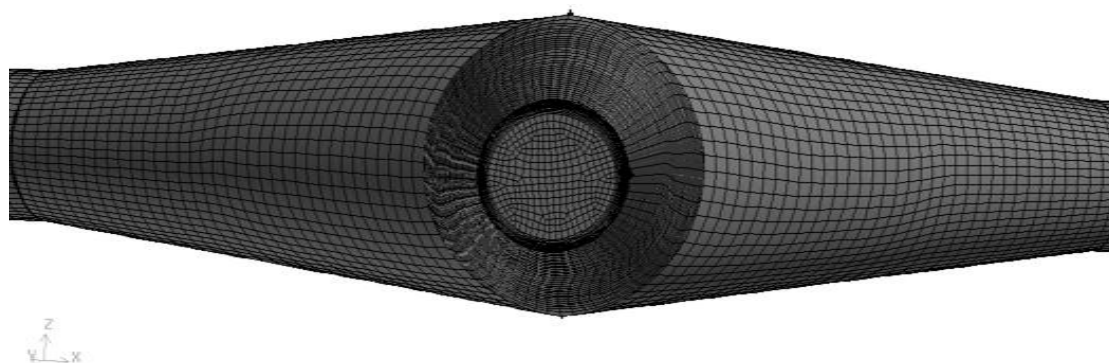
Επιλέγουμε τρεις διαφορετικές πυκνώσεις πλεγμάτων όπως φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 5.2).

Όνομα	B1	B2	B3
First Row	0.003	0.003	0.003
Growth Factor	1.15	1.15	1.15
Rows	16	16	16
Face spacing	0.15	0.1	0.08
Volume spacing	0.15	0.1	0.08
Αριθμός κελιών	62712	138516	264708

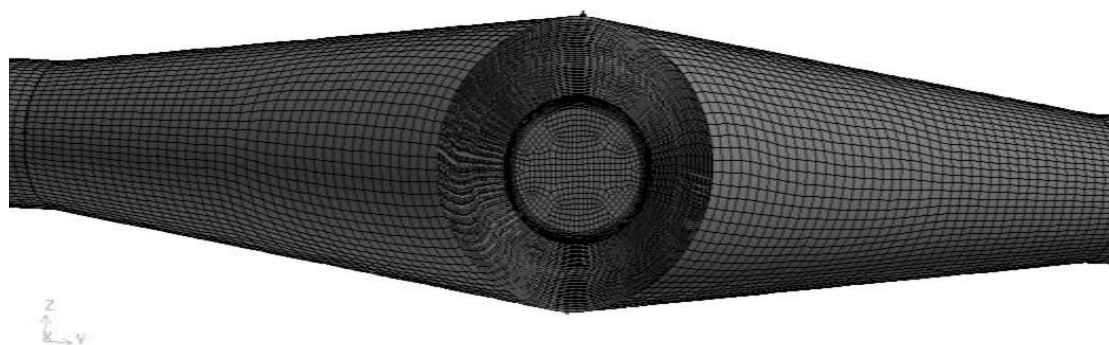
Πίνακας 5.2



Εικόνα 5.11 Πλέγμα B1



Εικόνα 5.12 Πλέγμα B2



Εικόνα 5.13 Πλέγμα B3

5.3.1 Επίλυση της ροής στο Fluent

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με παραπάνω. Το μόνο που αλλάζει είναι οριακές συνθήκες. Για την επιλογή αυτού του πλέγματος θα χρησιμοποιήσουμε δύο εξόδους και μία είσοδο. Αναλυτικά έχουμε:

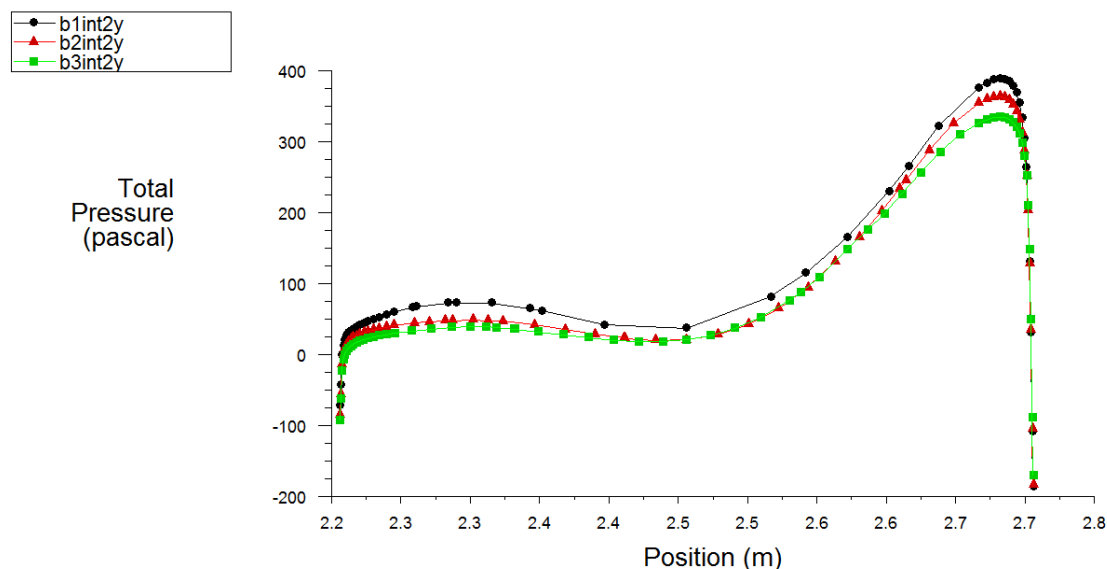
- Είσοδος (in1): Ο καθορισμός αυτής της οριακής συνθήκης έγινε σύμφωνα με την ταχύτητα εισόδου του ρευστού (velocity inlet). Το μέτρο της ταχύτητας ορίστηκε (velocity magnitude) $v=2$ m/s. Η υδραυλική διάμετρος είναι $D_h=1$ m, $Re=1990428$ και η ένταση της τύρβης $Tl=0.03481=3.481\%$.
- Έξοδος 1 (in2): Η έξοδος καθορίζεται ως outflow. Η παράμετρος Flow rate weighting παίρνει την τιμή 0.4. Αυτό σημαίνει ότι το 40% της

παροχής που περνάει από την είσοδο του συστήματος εξέρχεται από αυτήν την έξοδο.

- Έξοδος 2 (outlet): Η έξοδος του συστήματος καθορίστηκε και αυτή ως outflow. Η παράμετρος Flow rate weighting παίρνει την τιμή 0,6.
- Τοίχωμα (Wall): Το τοίχωμα της διακλάδωσης ορίζεται ως σταθερό (stationary wall). Επιλέγεται απόλυτη τραχύτητα για την επιφάνεια του τοίχου ίση με 1mm.

5.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

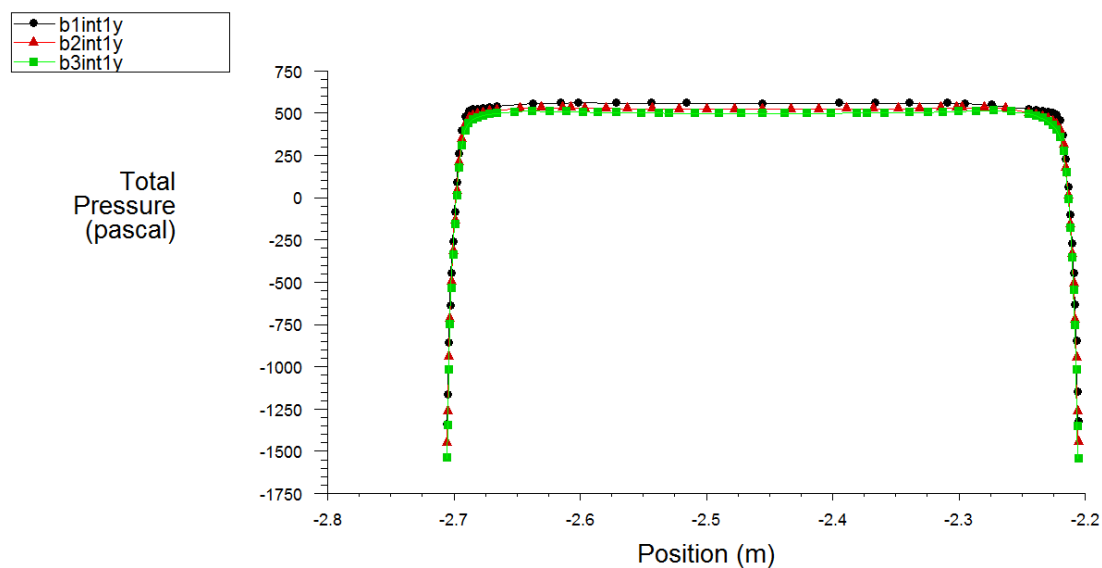
Για αυτά τα πλέγματα σχεδιάζουμε στις ίδιες θέσεις με παραπάνω τις κατανομές της πίεσης και της ταχύτητας. Για την int2y (Εικόνα 5.5) έχουμε την κατανομή της ολικής πίεσης (Εικόνα 5.14).



Εικόνα 5.14 Κατανομή ολικής πίεσης στην int2y

Παρατηρείται ότι οι κατανομές για τα πλέγματα B2 και B3 ταιριάζουν αρκετά μεταξύ τους ενώ αντίθετα η κατανομή του πλέγματος B1 είναι μετατοπισμένη προς τα επάνω.

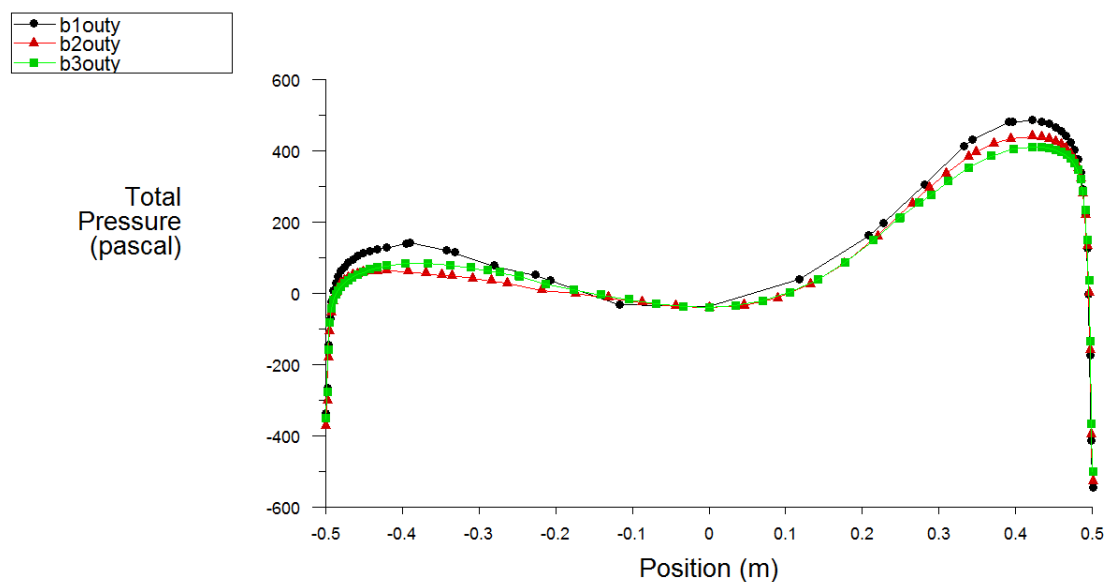
Ομοίως για την int1y (Εικόνα 5.5 και 5.15)



Εικόνα 5.15 Κατανομή ολικής πίεσης στην int1y

Εδώ φαίνεται ότι η κατανομές για όλα τα πλέγματα ταιριάζουν μεταξύ τους και διαφέρουν λίγο μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει διότι η επιφάνεια int1y είναι επιφάνεια κοντά στην είσοδο όπου η ροή δεν αλλάζει ιδιαίτερα μορφή και επομένως δεν απαιτούνται πολλά κελιά.

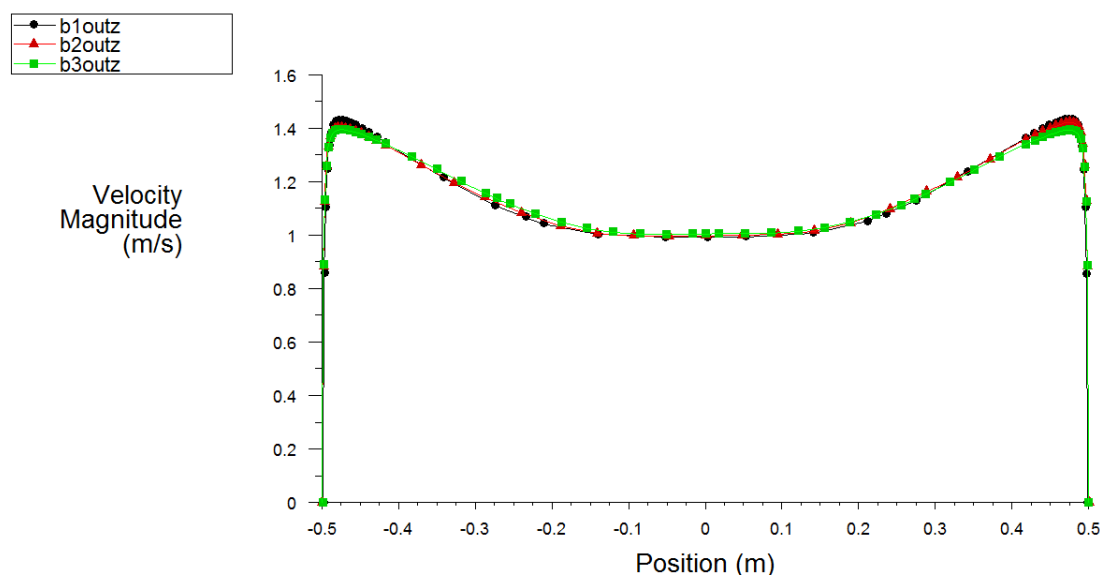
Παρακάτω έχουμε την κατανομή της ολικής πίεσης κατά μήκος της outy (Εικόνα 5.5 και 5.16).



Εικόνα 5.16 Κατανομή ολικής πίεσης στην outy

Παρατηρείται και εδώ ότι οι κατανομές των πλεγμάτων B2 και B3 ταιριάζουν μεταξύ τους σε αρκετά σημεία και ότι η κατανομή του πλέγματος B1 είναι αυτή που διαφέρει αρκετά.

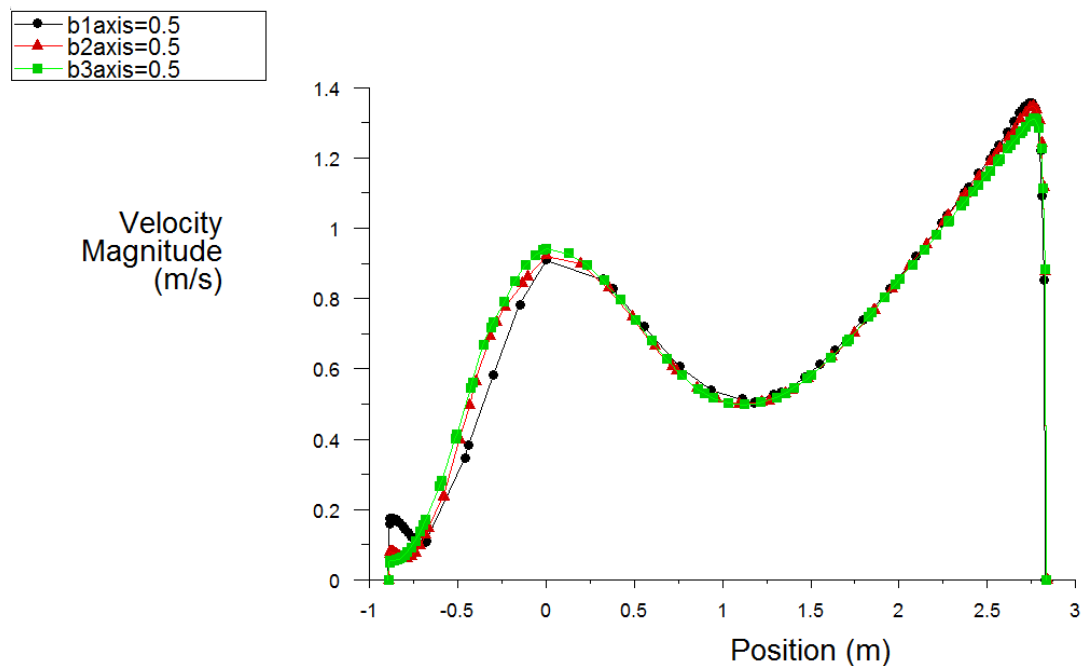
Επίσης σχεδιάζουμε την κατανομή της ταχύτητας στην outz (Εικόνα 5.5 και 5.17).



Εικόνα 5.17 Κατανομή ταχύτητας στην outz

Παρατηρείται ότι όλες οι κατανομές ταιριάζουν μεταξύ τους σχεδόν απόλυτα.

Τέλος σχεδιάζουμε την κατανομή της ταχύτητας κατά μήκος της axis=0.5 (Εικόνα 5.5 και 5.18) όπου παρατηρείται ότι ακριβώς και στις προηγούμενες κατανομές. Δηλαδή τα πλέγματα B2 και B3 να έχουν ίδιες λύσεις και η B1 να είναι αυτή που διαφέρει.



Εικόνα 5.18 Κατανομή ταχύτητας στην axis=0.5

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι τα πλέγματα B2 και B3 έχουν τις ίδιες λύσεις που διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους. Επομένως επιλέγουμε το πλέγμα B2 για πλέγμα υψηλών ταχυτήτων μιας και αυτό έχει λιγότερα κελιά από το B3 και άρα απαιτείται λιγότερος υπολογιστικός χρόνος για την επίλυση της ροής.

Κεφάλαιο 6^ο -Αριθμητική επίλυση ροής

6.1 Εισαγωγή

Για την αριθμητική επίλυση της ροής για συγκεκριμένη χρονοσειρά παροχών θα χρησιμοποιήσουμε δεδομένα τα οποία έχουν προκύψει από τον κώδικα προσομοίωσης λειτουργίας υβριδικού σταθμού που μελετάται για την Λέσβο με ονομαστική ισχύ υδροστροβίλων 15 MW και αντλιοστασίου ισχύος 16,5 MW. Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με τα διάφορα σενάρια λειτουργίας του σταθμού και το ποσοστό του ετήσιου χρόνου για τον οποίον εφαρμόζονται.

		PUMPING - $Q_{max} = 3,04 \text{ m}^3/\text{sec}$			
TURBINING	% of Q_{max}	0	1-30	30-70	70-100
$Q_{max} = 4,28 \text{ m}^3/\text{sec}$	0	15	5	9	15
	1-30	8	7	15	8
	30-70	11	-	-	-
	70-100	7	-	-	-

Πίνακας 6.1

Όπως παρατηρούμε η μέγιστη παροχή κατά την διαδικασία της παραγωγής ισχύος (Turbinning) είναι $Q_{Tmax}=4,28 \text{ m}^3/\text{sec}$ και κατά την διαδικασία της άντλησης (Pumping) είναι $Q_{Pmax}=3,04 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Σενάριο	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q_P (\% Q_{max})$	0	0	0	15	50	85	15	50	85
$Q_T (\% Q_{max})$	15	50	85	0	0	0	15	15	15

Πίνακας 6.2

Διακρίνουμε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας:

- Έχουμε μόνο παραγωγή ισχύος. Στην περίπτωση αυτή έχουμε τρία σενάρια λειτουργίας με διαφορετικές παροχές κάθε φορά. Όλη η παροχή του νερού προέρχεται από την άνω δεξαμενή.
- Έχουμε μόνο άντληση από την κάτω δεξαμενή στην άνω. Και εδώ έχουμε τρία σενάρια λειτουργίας με διαφορετικές παροχές.
- Έχουμε ταυτόχρονη άντληση και παραγωγή ισχύος με την παροχή που είναι απαραίτητη για την παραγωγή ισχύος να είναι μεγαλύτερη από αυτήν της άντλησης. Σε αυτήν την περίπτωση όλη η παροχή που προέρχεται από τις αντλίες πηγαίνει κατευθείαν στους υδροστροβίλους και συμπληρώνεται με νερό από την άνω δεξαμενή. Εδώ διακρίνουμε ένα σενάριο λειτουργίας.
- Τέλος έχουμε ταυτόχρονη άντληση και παραγωγή ισχύος με την παροχή της άντλησης αυτή την φορά να είναι μεγαλύτερη από αυτή της παραγωγής ισχύος. Εδώ τμήμα της παροχής που προέρχεται από τις αντλίες πηγαίνει κατευθείαν στους υδροστροβίλους και το υπόλοιπο οδηγείτε στην άνω δεξαμενή. Αυτή η περίπτωση έχει δύο σενάρια λειτουργίας με διαφορετικές παροχές πάντα.

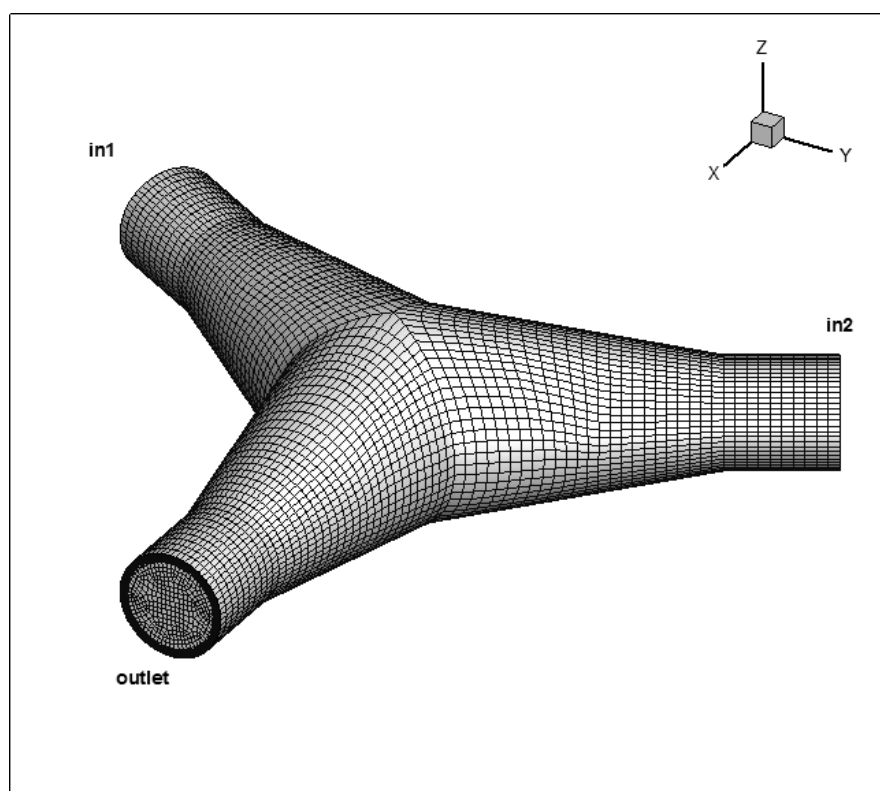
Στην γεωμετρία που έχουμε σχεδιάσει έχουμε τρεις επιφάνειες εισόδου/εξόδου τις in1 , in2 και outlet. Στην επίλυση που θα ακολουθηθεί παρακάτω για όλα τα σενάρια η in1 θα είναι συνδεδεμένη με την άνω δεξαμενή, η in2 με τις αντλίες και η outlet με τους υδροστροβίλους.

6.2 Επίλυση σεναρίων στο Fluent.

Για την επίλυση των παραπάνω σεναρίων θα χρησιμοποιήσουμε τα πλέγματα που επιλέξαμε παραπάνω ανάλογα με τις ταχύτητες που αναπτύσσονται στην διακλάδωση. Για ταχύτητες κάτω από 1m/s θα χρησιμοποιούμε το πλέγμα A2 και για ταχύτητες άνω του ορίου αυτού το πλέγμα B2. Οι παράμετροι επίλυσης της ροής και τα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν είναι ίδια για όλα τα σενάρια και ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο ανεξαρτησίας πλέγματος. Ως κάτω όριο των «υπολοίπων» θα τεθεί για την συνέχεια η τιμή 10^{-4} για την εξίσωση συνέχειας και για τις ταχύτητες κατά τους άξονες x,y,z και η τιμή 10^{-3} για τα k και epsilon. Το μόνο που αλλάζει κάθε φορά είναι οι οριακές συνθήκες στις επιφάνειες in1 , in2 και outlet. Η οριακή συνθήκη για την επιφάνεια wall θα είναι ίδια για όλα τα σενάρια. Δηλαδή το τοίχωμα (wall) της διακλάδωσης ορίζεται ως σταθερό (stationary wall) και επιλέγεται απόλυτη τραχύτητα για την επιφάνεια του τοίχου ίση με 1mm.

Η γεωμετρία που επιλέγεται είναι και αυτή η ίδια με αυτήν που χρησιμοποιήσαμε παραπάνω δηλαδή οι διαστάσεις είναι οι εξής:

- $d_{\max}=2$ m
- $d_{\min}=1$ m
- $\varphi=10^\circ$
- $\alpha_1=120^\circ$
- $\alpha_2=120^\circ$

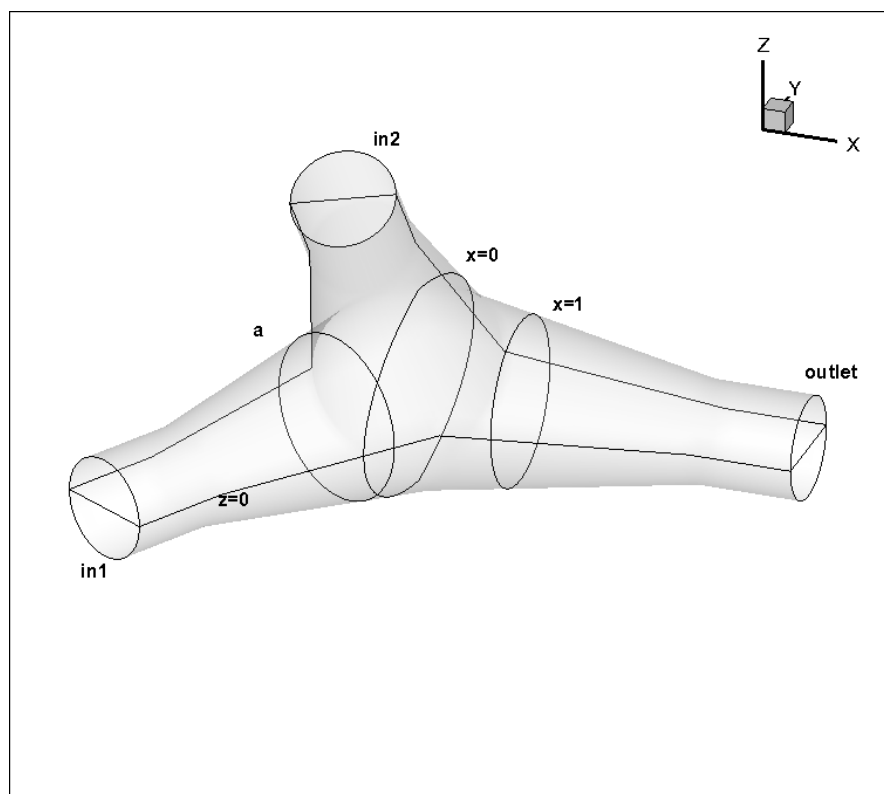


Εικόνα 6.1 Πλέγμα γεωμετρίας.

Για κάθε σενάριο παρατίθενται διαγράμματα που αφορούν την κατανομή της ταχύτητας στην γεωμετρία, τις ισοταχείς καμπύλες, τις κατανομές της ταχύτητας στις εξόδους και τις ισοϋψείς της συνάρτησης διάχυσης της ενέργειας (energy dissipation function) σε λογαριθμική κλίμακα.

$$\Phi = \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]$$

Η συνάρτηση Φ είναι ανάλογη των απωλειών ενέργειας και οι μονάδες της είναι Pascal.



Εικόνα 6.2 Επιφάνειες $z=0$, $x=0$ και $x=1$.

6.2.1 Σενάριο 1ο

Έχουμε μόνο παραγωγή ισχύος από τους υδροστρόβιλους με την παροχή να είναι $Q=0.15Q_{Tmax}=0.15*4.28=0.642 \text{ m}^3/\text{sec}$. Επομένως θα έχουμε μία είσοδο και μία έξοδο. Η τρίτη επιφάνεια εισόδου/εξόδου θα είναι κλειστή. Η διάμετρος στην είσοδο της διακλάδωσης είναι $d_{min}=1\text{m}$. Η ταχύτητα θα είναι $v=Q/A$ όπου $A=\pi d^2/4$. Επομένως για $d=1\text{m}$ η ταχύτητα προκύπτει $v=0.818 \text{ m/s}$. Θα χρησιμοποιήσουμε το πλέγμα A2 με τις εξής οριακές συνθήκες:

- Επιφάνεια in1. Είναι η είσοδος του συστήματος και επομένως καθορίζεται η ταχύτητα του ρευστού ίση με $v=0.818 \text{ m/s}$. Η υδραυλική διάμετρος είναι $D_h=1\text{m}$, ο αριθμός $Re=814085$ και η ένταση της τύρβης $TI=2.919\%$.
- Επιφάνεια in2. Δεν έχουμε ροή διαμέσου της επιφάνειας αυτής και επομένως καθορίζουμε την ταχύτητα του ρευστού ίση με $v=0 \text{ m/s}$. Η υδραυλική διάμετρος είναι $D_h=1\text{m}$ και η ένταση της τύρβης $TI=0\%$.
- Επιφάνεια outlet. Είναι η έξοδος του συστήματος και καθορίζεται ως outflow με Flow rate weighting ίσο με 1 μιας και είναι η μοναδική έξοδος.

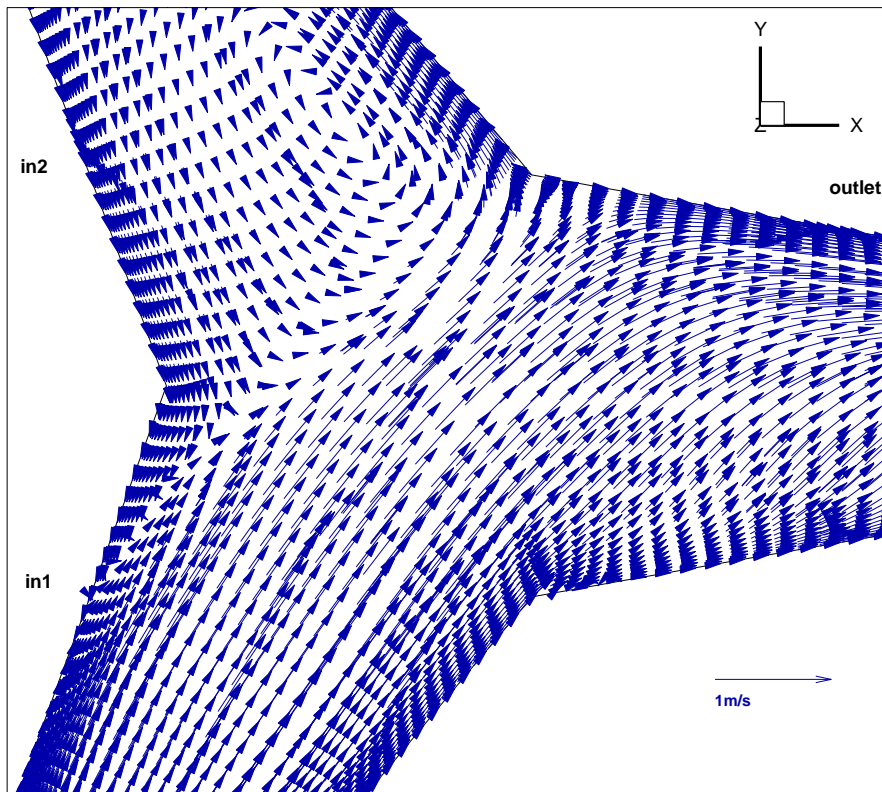
Στις εικόνες 6.3 και 6.4 παρατηρείται ο στροβιλισμός της ροής στο επίπεδο $z=0$ στο τμήμα του αγωγού που οδηγεί προς την επιφάνεια in_2 . Επίσης παρατηρείται σταδιακή επιβράδυνση της ροής κοντά στο τοίχωμα και αποκόλληση αυτής ακριβώς μετά την αλλαγή κατεύθυνσής της. Ακόμα υπάρχει και μία αντίστροφη ροή σε ένα τμήμα της γεωμετρίας (αριστερά της εικόνας).

Η εικόνα 6.5 δείχνει τις ισοϋψείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$ και ουσιαστικά μας δείχνει που έχουμε τις μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας. Παρατηρείται ότι αυτές βρίσκονται κοντά στα τοιχώματα καθώς η ροή αποκολλάται και ιδιαίτερα εκεί που έχουμε αντίστροφη ροή, στην έξοδο της γεωμετρίας και στο τμήμα εκείνο όπου η ροή είναι κάθετη στο τοίχωμα.

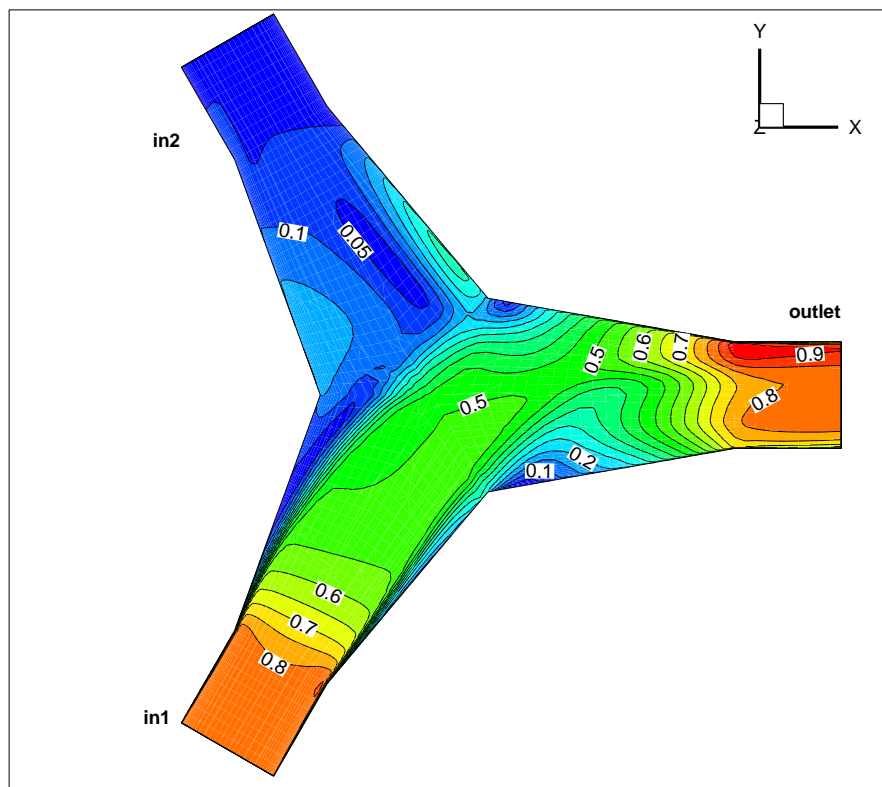
Η εικόνα 6.6 δείχνει τις γραμμές ροής που ξεκινούν από την είσοδο in_1 στο επίπεδο $z=0$ και πως κάποιες από αυτές εγκλωβίζονται στο τμήμα της γεωμετρίας όπου δεν έχουμε ροή και στροβιλίζονται. Επίσης παρατηρείται ότι οι γραμμές ροής μετά την αλλαγή κατεύθυνσης έρχονται κοντά η μία με την άλλη δείχνοντας έτσι ότι η ροή αποκολλάται.

Στις εικόνες 6.7 και 6.9 παρουσιάζονται τα προβαλλόμενα διανύσματα στις επιφάνειες $x=1$ και outlet. Παρατηρείται ένα ζεύγος συμμετρικών στροβίλων που δημιουργείται από την κίνηση του στρώματος του νερού κοντά στο τοίχωμα από την εξωτερική πλευρά (δεξιά όπως βλέπουμε τις εικόνες) προς την εσωτερική πλευρά (αριστερά). Τα κέντρα των στροβίλων αυτών μετακινούνται προς τα αριστερά (εσωτερική πλευρά) καθώς πλησιάζουμε προς την έξοδο outlet. Οι στροβίλοι αυτοί ονομάζονται και στροβίλοι Dean και παρατηρούνται συνήθως στις αλλαγές κατεύθυνσης της ροής.

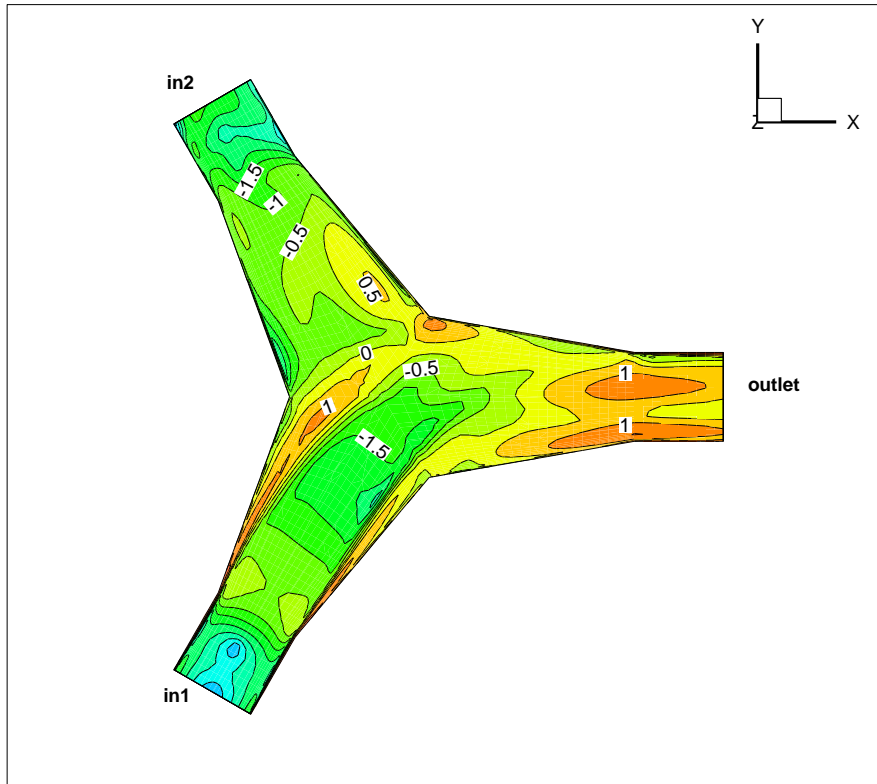
Οι εικόνες 6.8 και 6.10 δείχνουν τις αντίστοιχες ισοταχείς στις παραπάνω επιφάνειες. Οι ταχύτητες αυξάνουν όσο είμαστε κοντά στην έξοδο και αυτό είναι φυσικό μιας και μικραίνει η διατομή. Επίσης παρατηρείται στην 6.10 να αναπτύσσονται κοντά στο τοίχωμα (αριστερά της εικόνας) χαμηλές ταχύτητες. Αυτό οφείλεται στην αποκόλληση της ροής καθώς αυτή αλλάζει πορεία. Τέλος παρατηρείται ότι όσο είμαστε κοντά στο τμήμα όπου ενώνονται οι αγωγοί οι ταχύτητες είναι υψηλές στο κέντρο της διατομής ενώ όσο πλησιάζουμε προς την έξοδο οι υψηλές ταχύτητες παρουσιάζονται κοντά στο τοίχωμα. Όλες οι παραπάνω αλλαγές στη ροή δηλαδή οι αποκολλήσεις, οι στροβιλισμοί και οι δευτερεύουσες ροές προκαλούν απώλειες ενέργειας στην ροή.



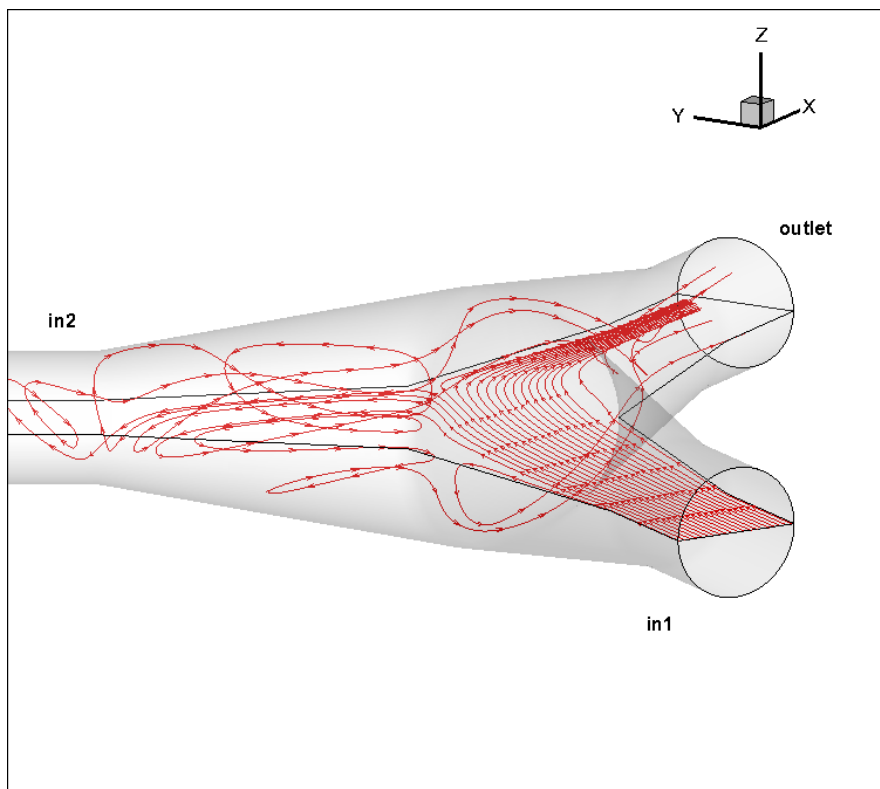
Εικόνα 6.3 Διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$.



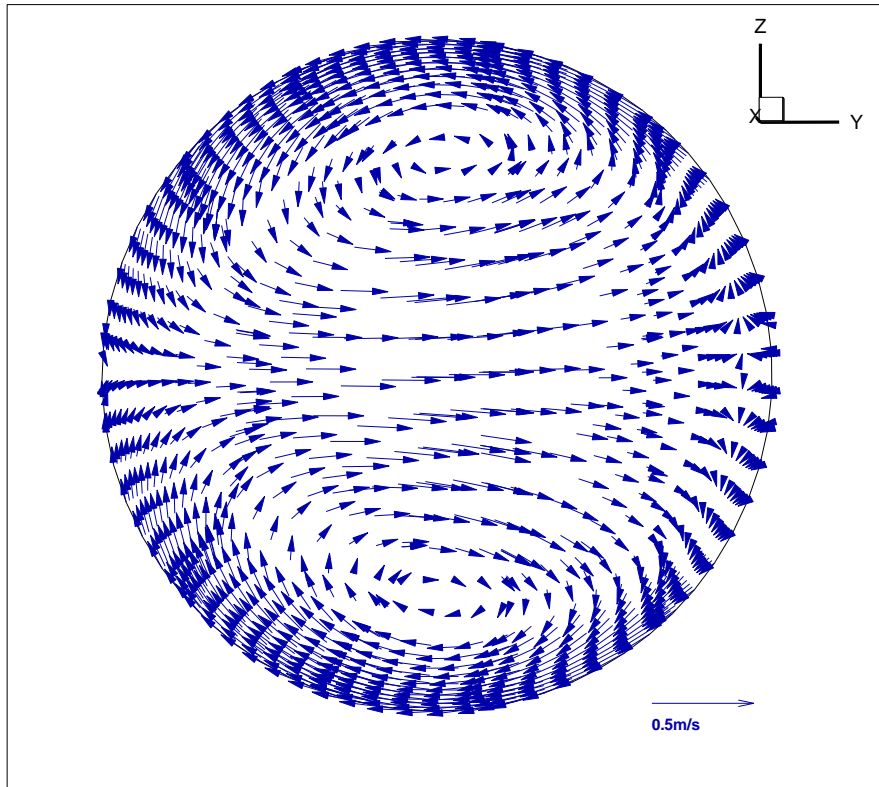
Εικόνα 6.4 Ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$.



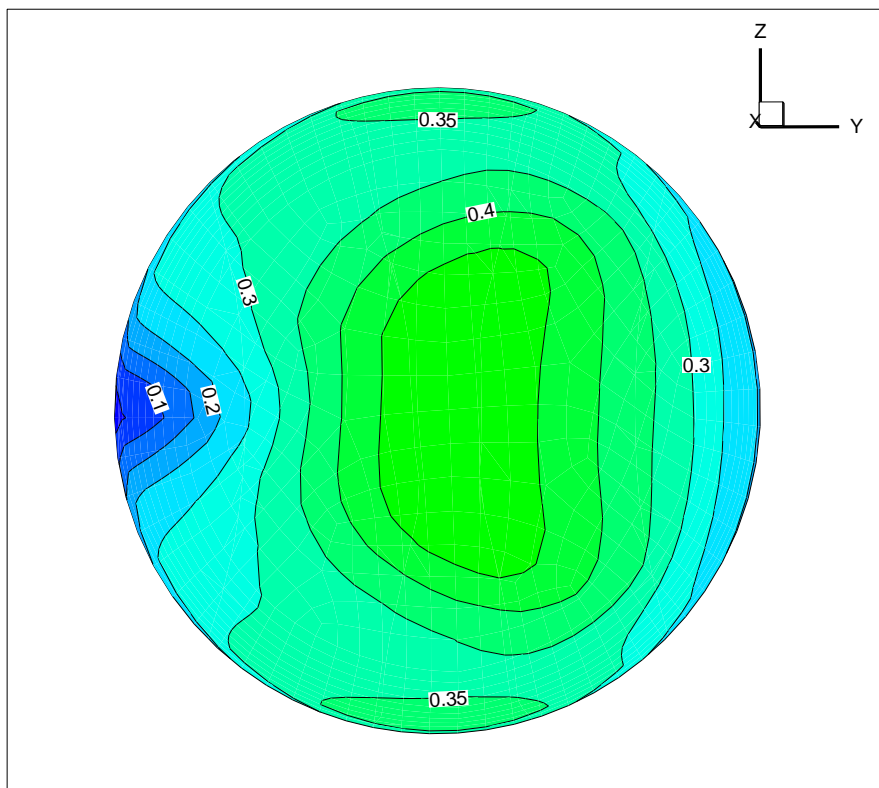
Εικόνα 6.5 Ισοϋψείς της Φ στο επίπεδο $z=0$



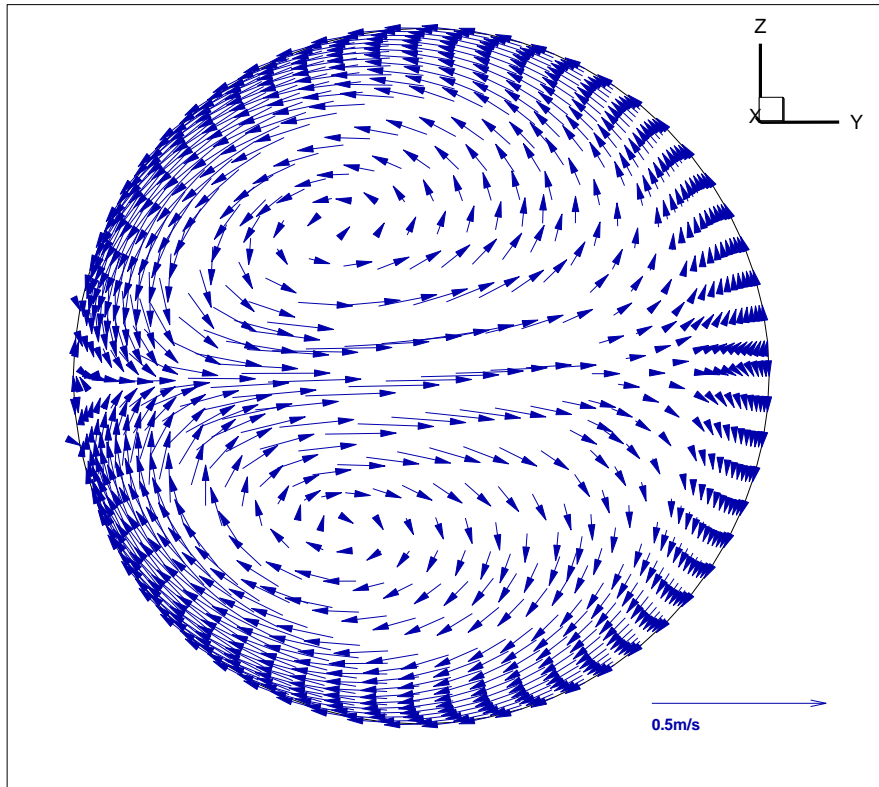
Εικόνα 6.6 Γραμμές ροής



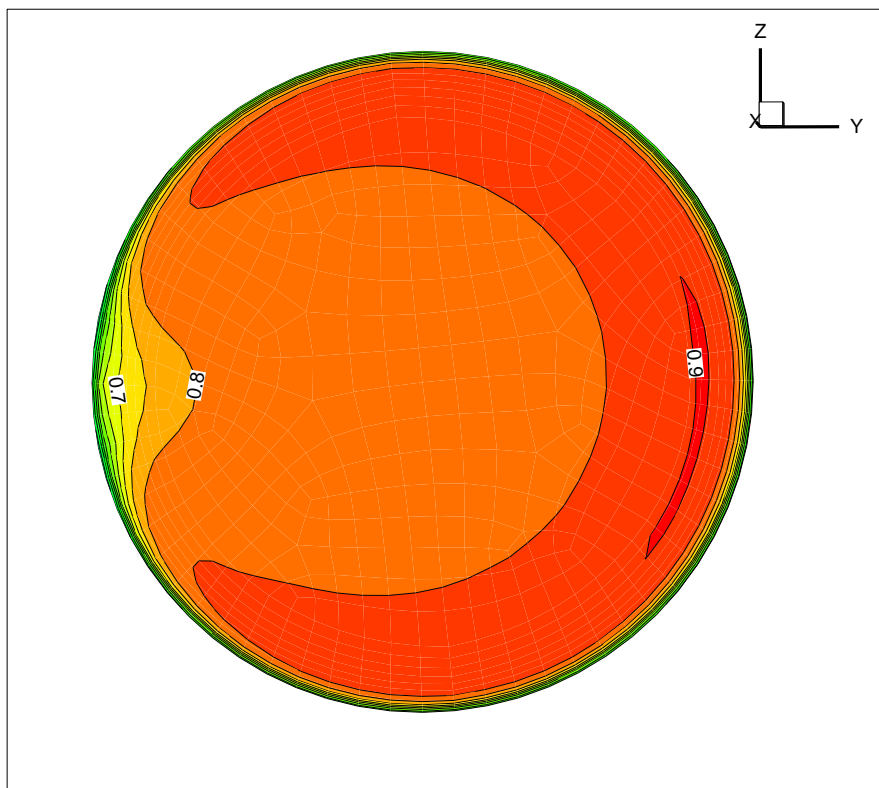
Εικόνα 6.7 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στο επίπεδο $x=1$.



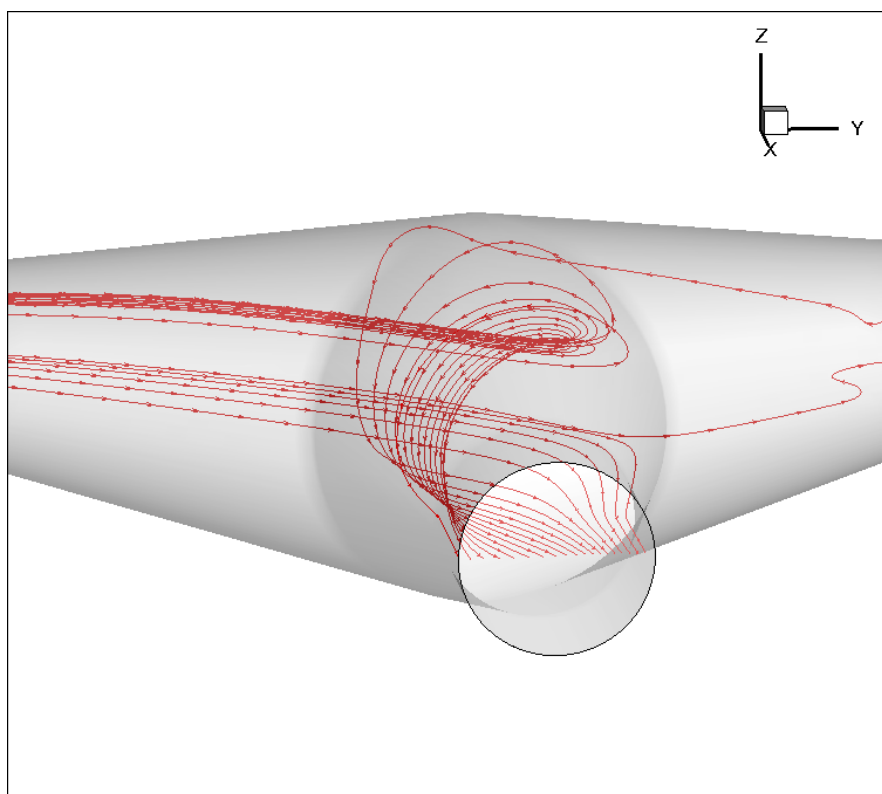
Εικόνα 6.8 Ισοταχείς στην επιφάνεια $x=1$.



Εικόνα 6.9 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στη επιφάνεια outlet.



Εικόνα 6.10 Ισοταχείς στην έξοδο outlet



Εικόνα 6.11 Γραμμές ροής

Στην εικόνα 6.11 παρατηρείται μια σπειροειδής κίνηση του ρευστού η οποία είναι αποτέλεσμα της δευτερεύουσας ροής που περιγράφηκε παραπάνω (ζεύγος στροβίλων) και της κύριας ροής.

6.2.2 Σενάριο 2ο

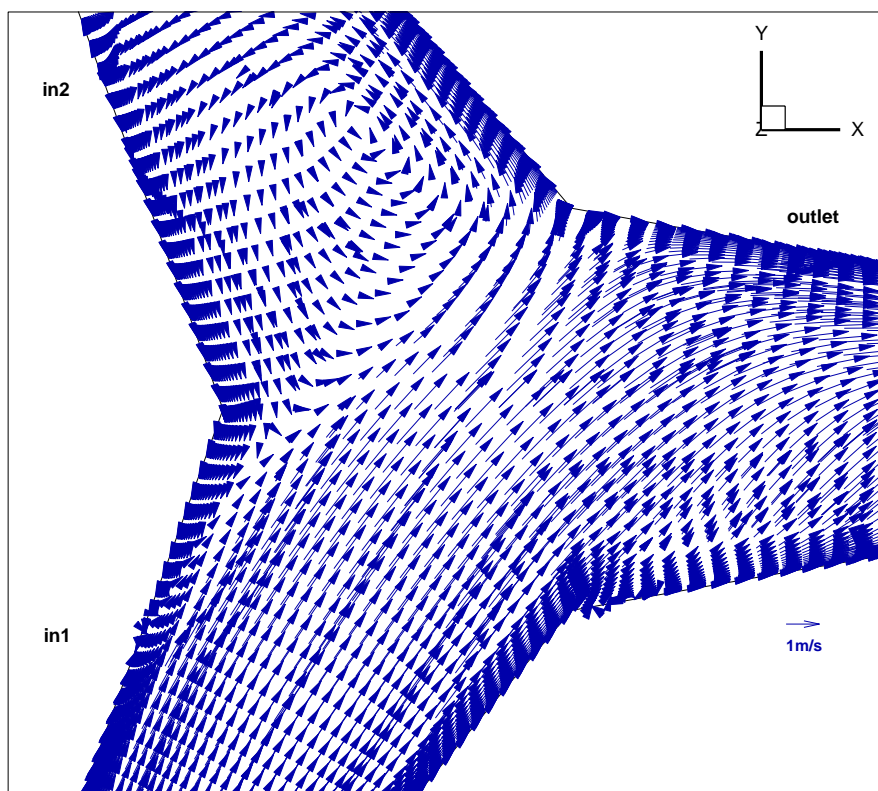
Και εδώ έχουμε μόνο παραγωγή ισχύος από τους υδροστρόβιλους με διαφορετική παροχή. Η παροχή είναι $Q=0.5Q_{Tmax}=0.5*4.28=2.14 \text{ m}^3/\text{s}$ και η ταχύτητα στην είσοδο $v=Q/A=2.726 \text{ m/s}$. Θα χρησιμοποιήσουμε το πλέγμα B2 με τις εξής οριακές συνθήκες:

- Επιφάνεια in1. Είσοδος του συστήματος με ταχύτητα $v=2.726 \text{ m/s}$. Η υδραυλική διάμετρος είναι $D_h=1\text{m}$, ο αριθμός $Re=2712954$ και η ένταση της τύρβης $Tl=2.512\%$.
- Επιφάνεια in2. Ταχύτητα ρευστού $v=0 \text{ m/s}$. Υδραυλική διάμετρος $D_h=1\text{m}$ και ένταση τύρβης $Tl=0\%$.
- Επιφάνεια outlet. Έξοδος του συστήματος με Flow rate weighting ίσο με 1.

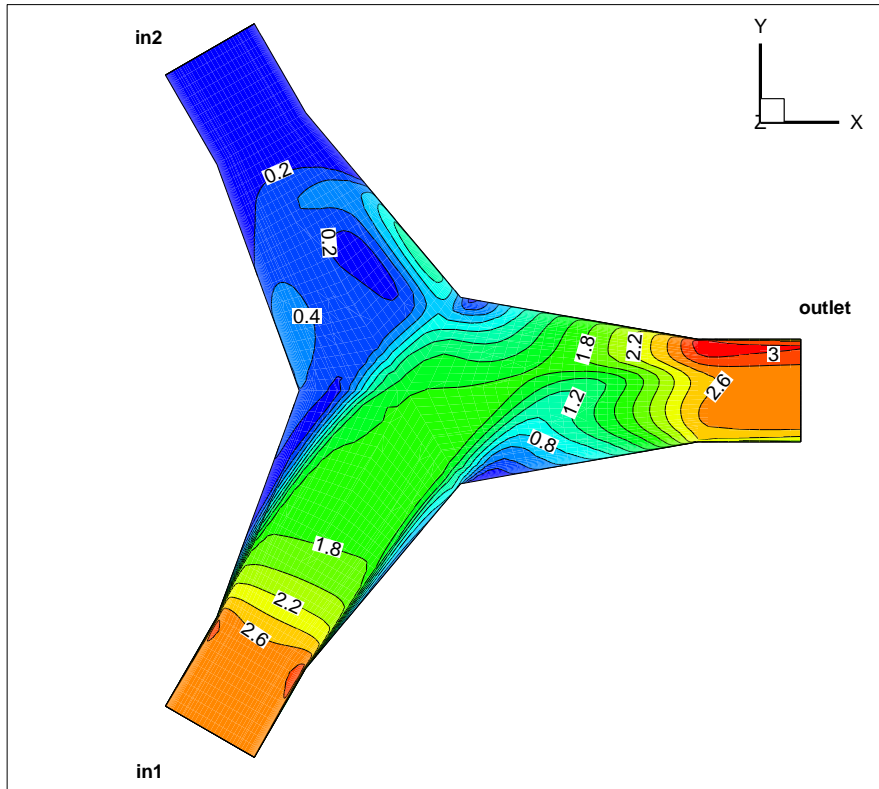
Στις εικόνες 6.12 και 6.13 η ροή αλλάζει ελάχιστα σε σχέση με τις εικόνες 6.3 και 6.4. Αυτό φαίνεται κυρίως στις ισοταχείς καμπύλες και πιο συγκεκριμένα στον στροβιλισμό της ροής και στην αντίστροφη ροή. Το μόνο που αλλάζει είναι όπως αναμένεται οι τιμές της ταχύτητας λόγω του μεγαλύτερου αριθμού Re .

Η εικόνα 6.14 είναι όμοια με αυτήν του σεναρίου 1. Αλλάζουν μόνο οι τιμές της Φ καθώς οι απώλειες αυξάνονται λόγω της μεγαλύτερης παροχής.

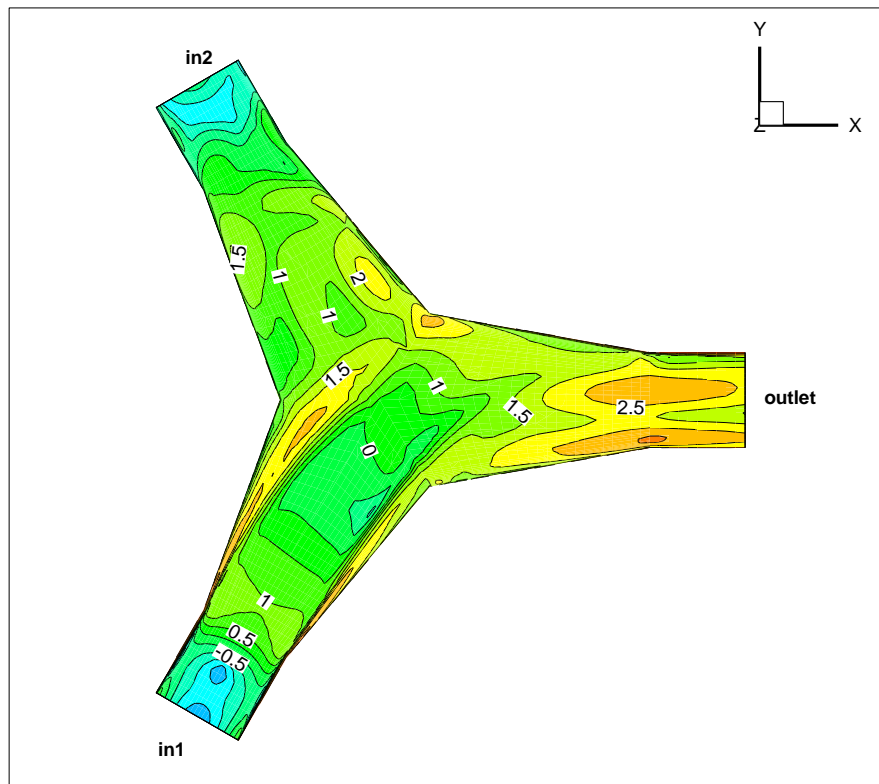
Στις εικόνες 6.15 και 6.17 παρατηρούμε τα διανύσματα της ταχύτητας στις επιφάνειες $x=1$ και outlet και τον στροβιλισμό της ροής καθώς αυτή έχει αλλάξει κατεύθυνση. Οι εικόνες αυτές είναι όμοιες με τις 6.7 και 6.9. Ομοίως και οι 6.16 και 6.18 με τις 6.8 και 6.10 όπου παρατηρείται η ανομοιομορφία στο πεδίο ταχυτήτων. Το μόνο που αλλάζει είναι τα μέτρα των ταχυτήτων και η ένταση του στροβιλισμού της ροής.



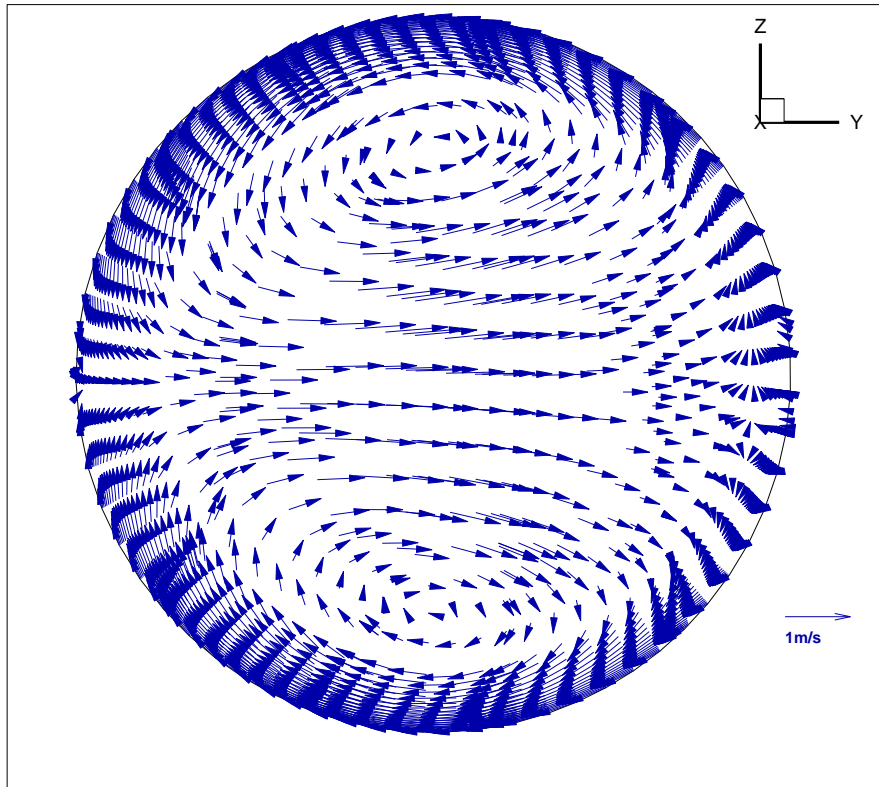
Εικόνα 6.12 Διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$.



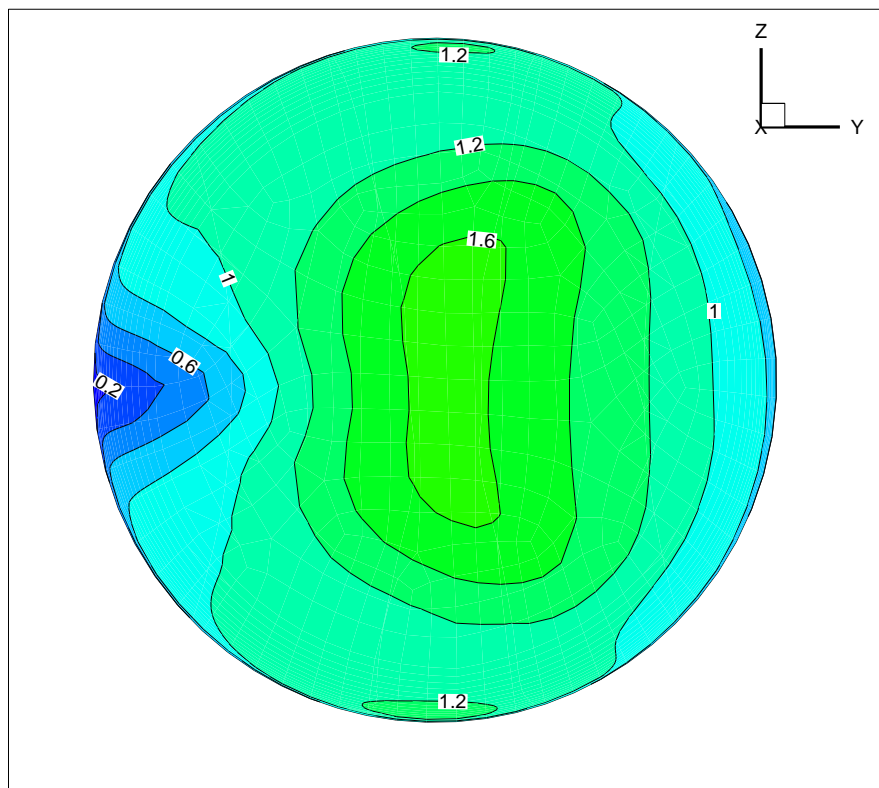
Εικόνα 6.13 Ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$.



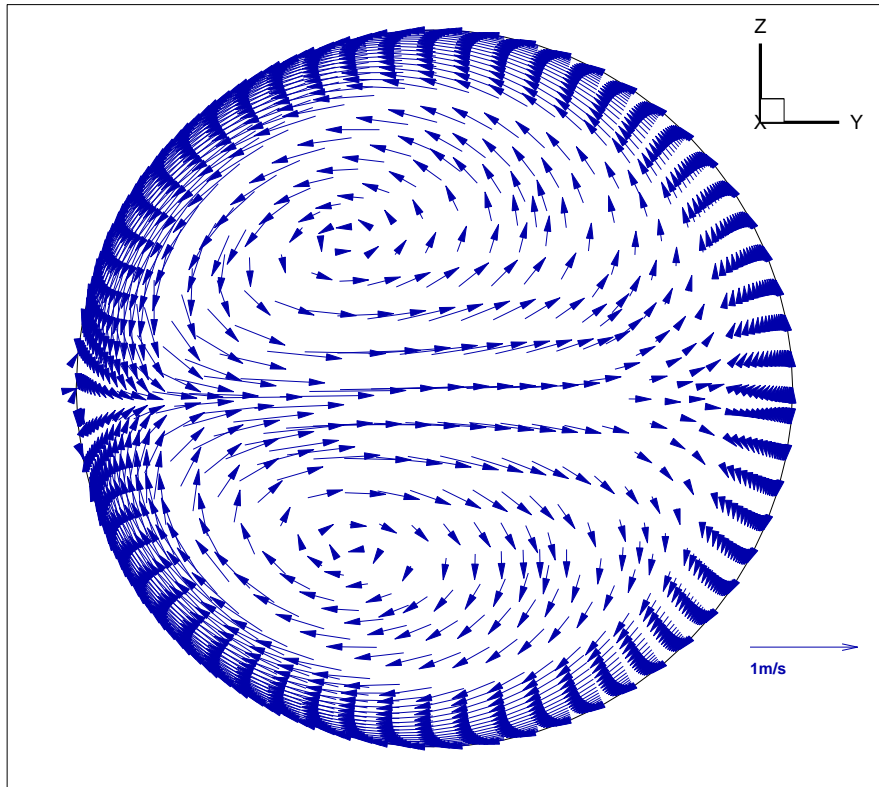
Εικόνα 6.14 Ισοϋψείς της Φ στο επίπεδο $z=0$



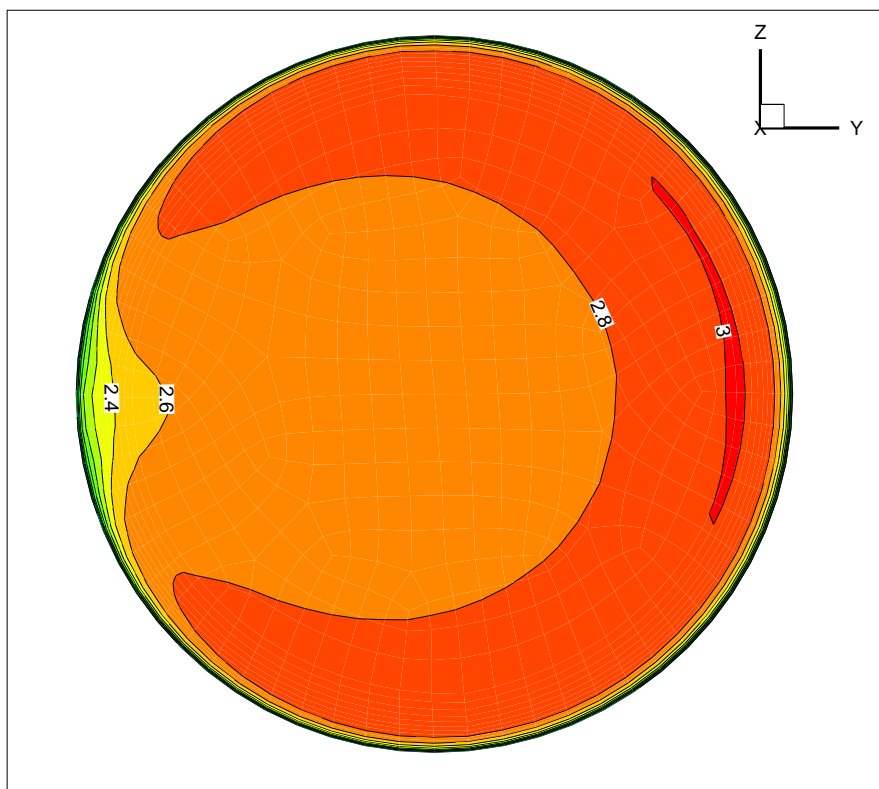
Εικόνα 6.15 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στο επίπεδο $x=1$



Εικόνα 6.16 Ισοταχείς στη επιφάνεια $x=1$



Εικόνα 6.17 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στη επιφάνεια outlet



Εικόνα 6.18 Ισοταχείς στην έξοδο outlet

Σύμφωνα με το παραπάνω αναμένονται οι απώλειες να είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια μιας και οι διατμητικές τάσεις στα τοιχώματα είναι μεγαλύτερες λόγω μεγαλύτερου αριθμού Re και επίσης επειδή οι στροβιλισμοί είναι πιο έντονοι.

6.2.3 Σενάριο 3ο

Το τελευταίο σενάριο με παραγωγή ισχύος από υδροστρόβιλους με ρευστό που προέρχεται μόνο από την άνω δεξαμενή. Η παροχή είναι $Q=0.85Q_{Tmax}=0.5*4.28=3.638 \text{ m}^3/\text{s}$ και η ταχύτητα στην είσοδο $v=Q/A=4.634 \text{ m/s}$. Θα χρησιμοποιήσουμε το πλέγμα B2 με τις εξής οριακές συνθήκες:

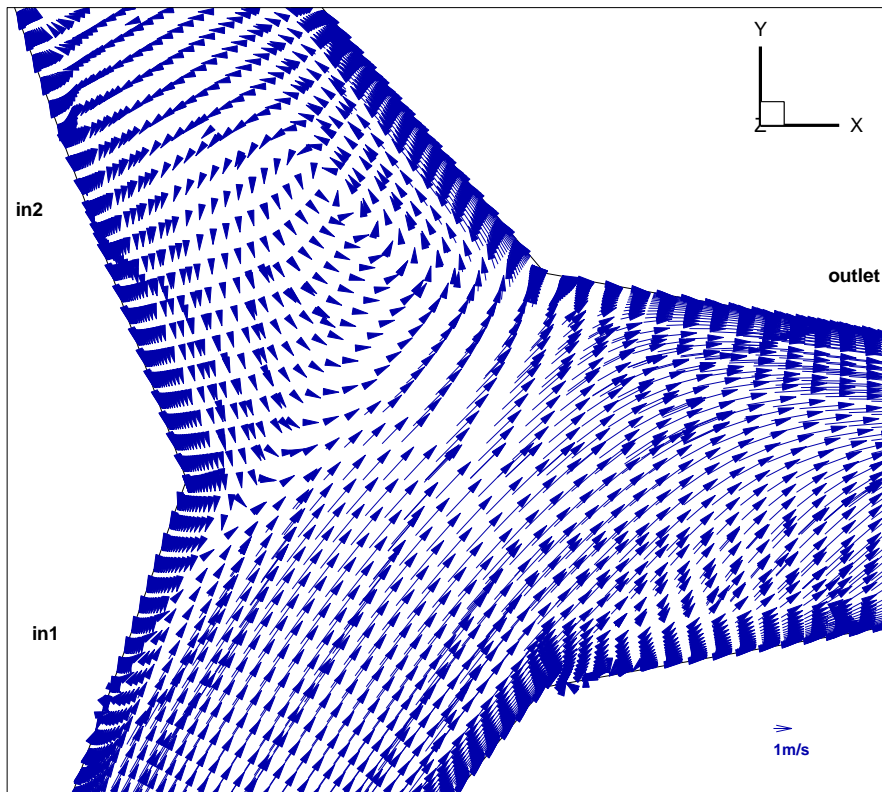
- Επιφάνεια in1. Είσοδος του συστήματος με ταχύτητα $v=4.634 \text{ m/s}$. Υδραυλική διάμετρος $D_h=1\text{m}$, αριθμός $Re=4611823$ και ένταση τύρβης $TI=2.35\%$.
- Επιφάνεια in2. Ταχύτητα ρευστού $v=0 \text{ m/s}$. Υδραυλική διάμετρος $D_h=1\text{m}$ και ένταση τύρβης $TI=0\%$.
- Επιφάνεια outlet. Έξοδος του συστήματος με Flow rate weighting ίσο με 1.

Στις εικόνες 6.19-6.21 παρατηρούμε τα ίδια με αυτά στα προηγούμενα 2 σενάρια στις αντίστοιχες εικόνες. Το μόνο που αλλάζει είναι ότι οι τιμές των ταχυτήτων που αυξάνονται όπως είναι φυσικό μιας και αυξάνεται ο αριθμός Re επομένως και οι απώλειες.

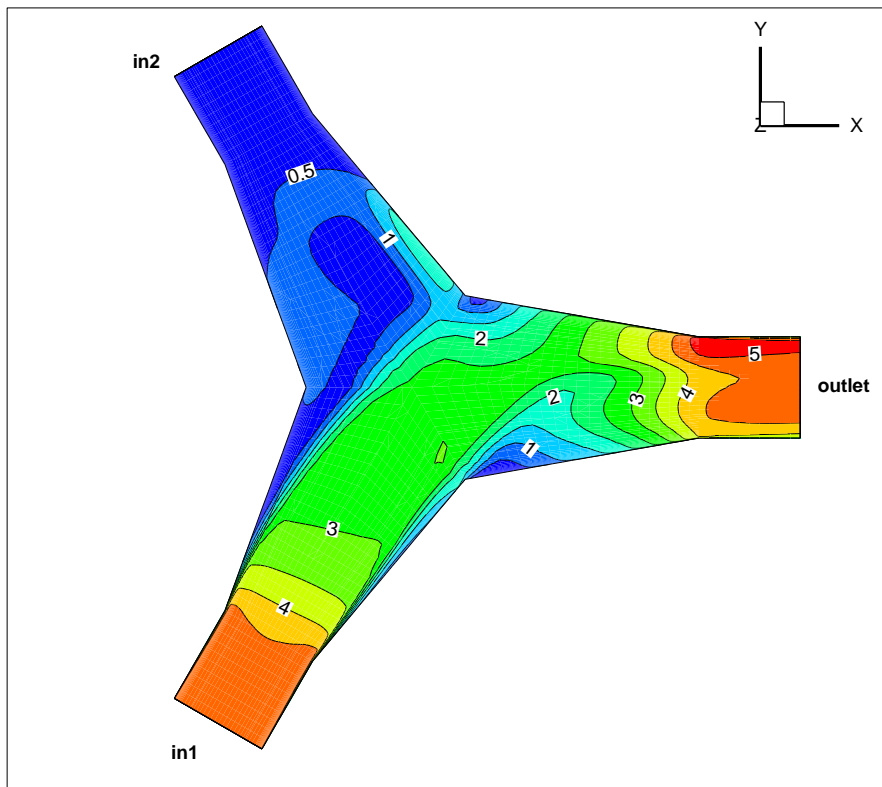
Ομοίως και για τις εικόνες 6.22-6.25 οι οποίες είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες των δύο προηγούμενων σεναρίων. Αυτό που αλλάζει είναι η ένταση των στροβιλισμών.

Οι απώλειες αναμένεται να είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια κυρίως λόγω του μεγαλύτερου αριθμού Re. Αυτό φαίνεται και από τις τιμές των ισοϋψών της Φ που είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο.

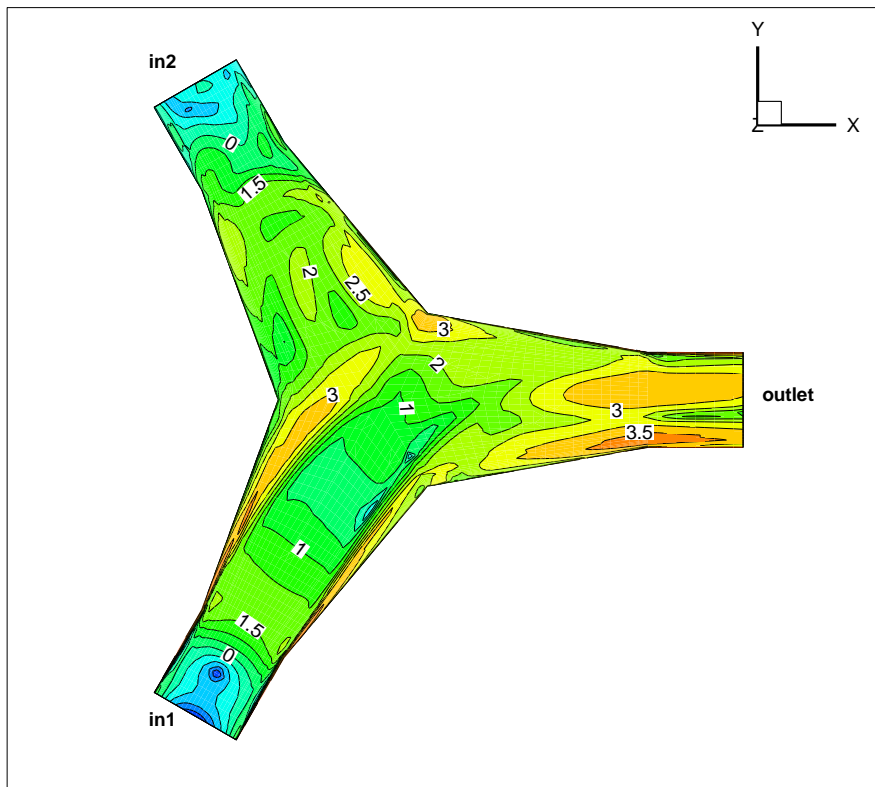
Το γενικότερο συμπέρασμα είναι ότι για αυτά τα τρία σενάρια η ροή είναι παρόμοια μιας και η ροή ακολουθεί την ίδια πορεία, δηλαδή από την είσοδο in1 στην έξοδο outlet, με το μόνο που να αλλάζει να είναι διακινούμενη παροχή και επομένως ο αριθμός Re.



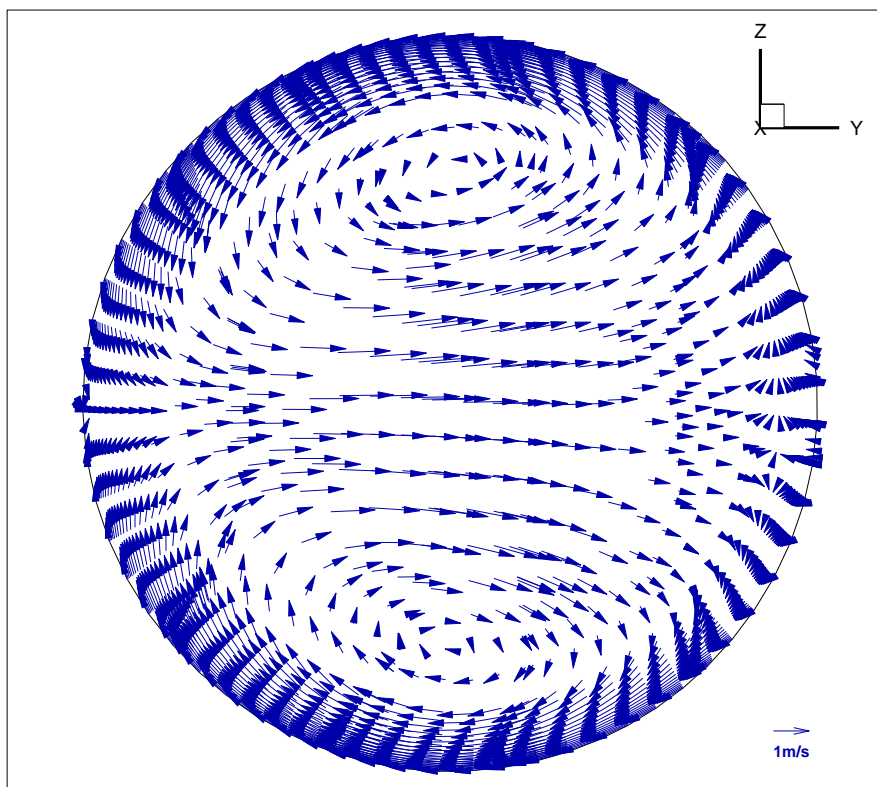
Εικόνα 6.19 Διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$



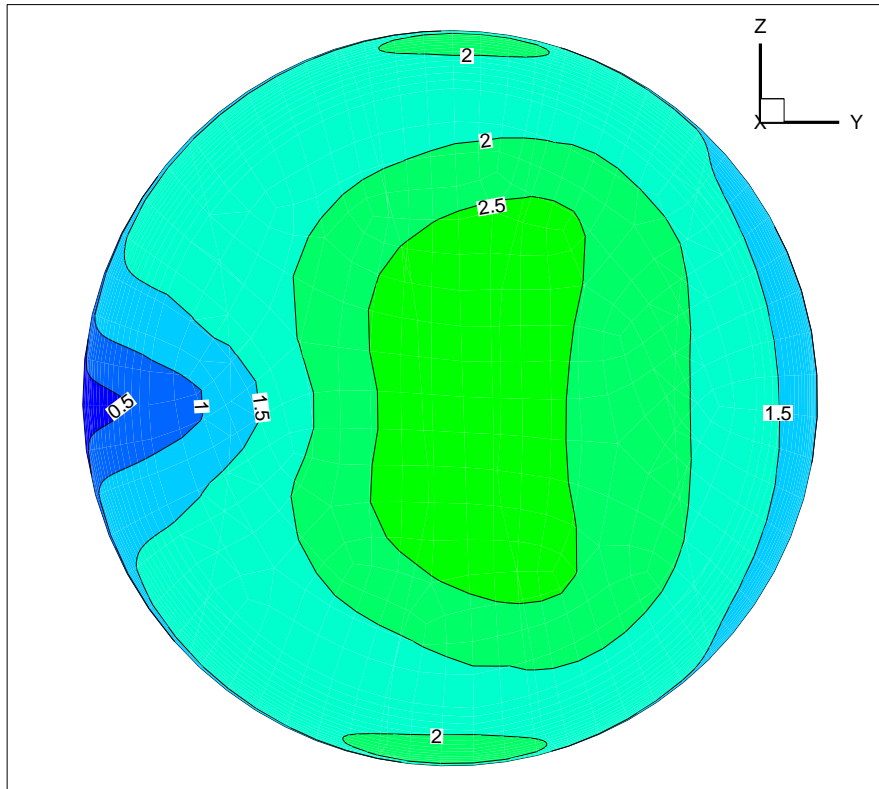
Εικόνα 6.20 Ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$



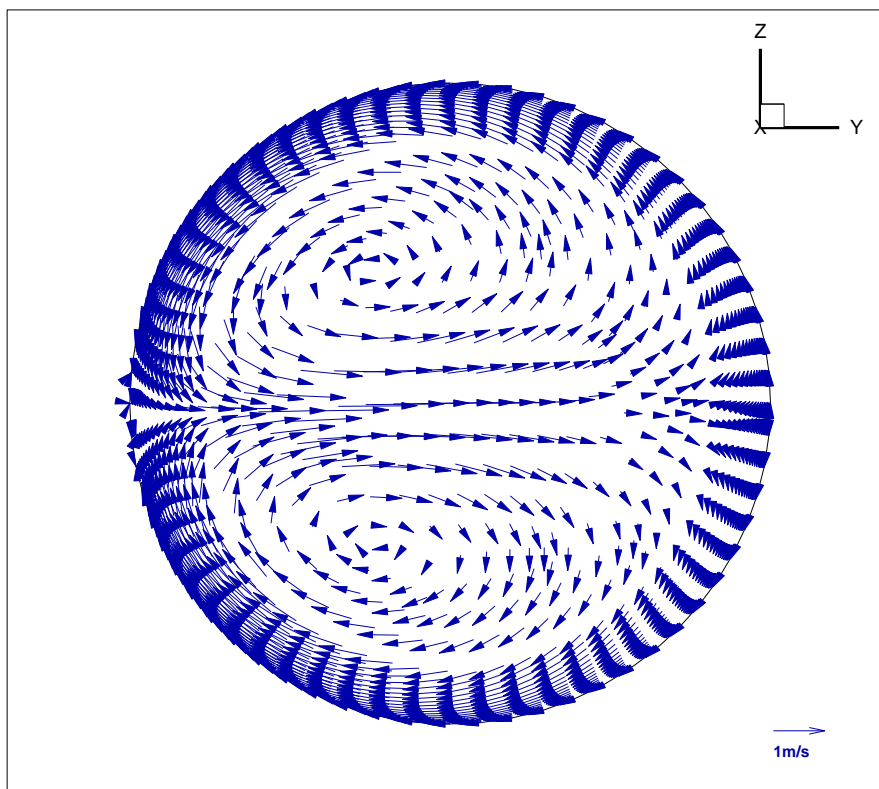
Εικόνα 6.21 Ισοϋψείς της Φ στο επίπεδο $z=0$



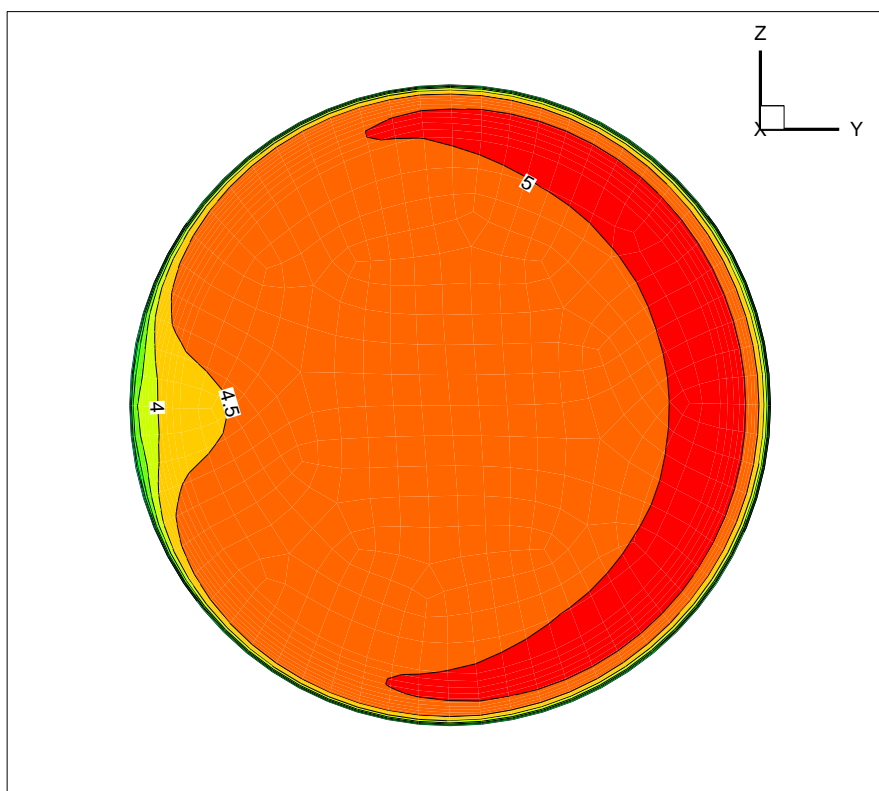
Εικόνα 6.22 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στο επίπεδο $x=1$



Εικόνα 6.23 Ισοταχείς στην επιφάνεια $x=1$



Εικόνα 6.24 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στη επιφάνεια outlet



Εικόνα 6.25 Ισοταχείς στην έξοδο outlet

6.2.4 Σενάριο 4ο

Σε αυτό το σενάριο έχουμε άντληση από την κάτω δεξαμενή στην άνω. Και εδώ θα έχουμε μία είσοδο και μία έξοδο σε διαφορετικές επιφάνειες όμως σε σχέση με τα παραπάνω σενάρια. Η παροχή είναι $Q=0.15Q_{Pmax}=0.15*3.04=0.456 \text{ m}^3/\text{s}$. Η διάμετρος στην είσοδο της διακλάδωσης είναι $d_{min}=1\text{m}$. Η ταχύτητα θα είναι $v=Q/A$ επομένως για $d=1\text{m}$ η ταχύτητα προκύπτει $v=0.581 \text{ m/s}$. Θα χρησιμοποιήσουμε το πλέγμα A2 με τις εξής οριακές συνθήκες:

- Επιφάνεια in1. Είναι η έξοδος του συστήματος και καθορίζεται ως outflow με Flow rate weighting ίσο με 1 μιας και είναι η μοναδική έξοδος.
- Επιφάνεια in2. Είναι η είσοδος του συστήματος και επομένως καθορίζεται η ταχύτητα του ρευστού ίση με $v=0.581 \text{ m/s}$. Η υδραυλική διάμετρος είναι $D_h=1\text{m}$, ο αριθμός $Re=578219$ και ένταση τύρβης $TI=3.047\%$.
- Επιφάνεια outlet. Δεν έχουμε ροή διαμέσου της επιφάνειας αυτής και επομένως καθορίζουμε την ταχύτητα του ρευστού ίση με $v=0 \text{ m/s}$. Η υδραυλική διάμετρος είναι $D_h=1\text{m}$ και η ένταση της τύρβης $TI=0\%$.

Στην εικόνα 6.26 παρατηρούμε τα διανύσματα της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$ και τους στροβιλισμούς που σχηματίζονται στο τμήμα του αγωγού που οδηγεί προς την επιφάνεια outlet. Η ροή είναι παρόμοια με αυτή των προηγούμενων σεναρίων με την διαφορά ότι η είσοδος είναι η in2 και η έξοδος η in1. Στην 6.27 φαίνονται οι ισοταχείς στο επίπεδο $z=0$.

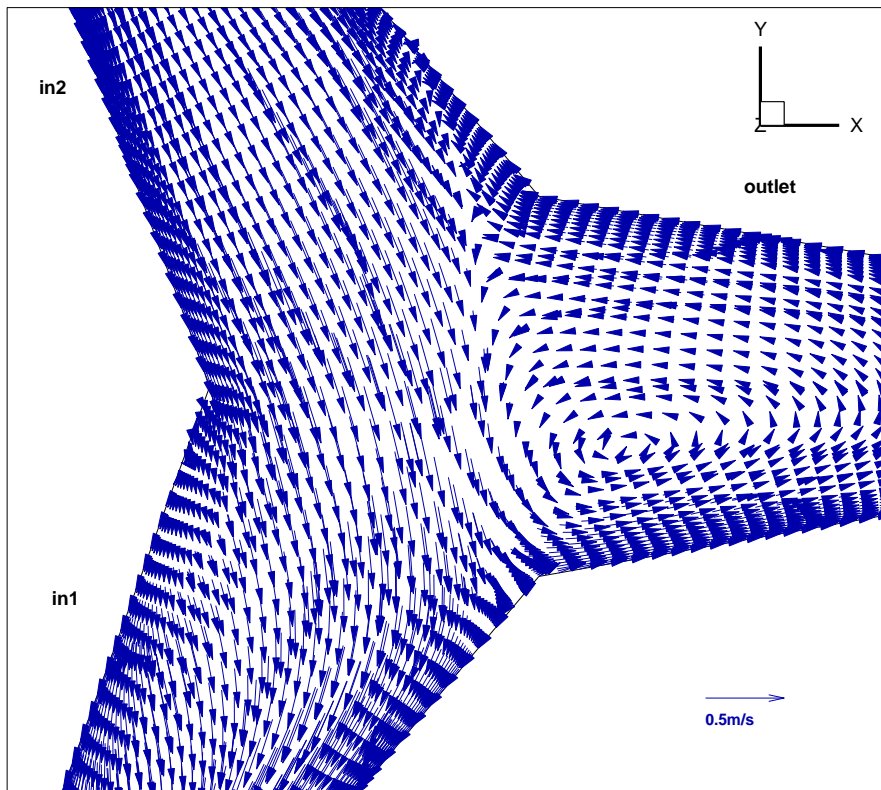
Στην εικόνα 6.28 έχουμε τις ισοϋψείς της Φ που ουσιαστικά δείχνουν το μέγεθος των απωλειών. Παρατηρείται και εδώ, όπως στα προηγούμενα σεναρία, ότι οι μεγαλύτερες απώλειες παρουσιάζονται στην έξοδο της γεωμετρίας, κοντά στο τοίχωμα καθώς η ροή αποκολλάται και επίσης στο τμήμα της γεωμετρίας όπου έχουμε στροβιλισμούς.

Η εικόνα 6.29 δείχνει τις γραμμές ροής που καταλήγουν στην επιφάνεια in1. Παρατηρούμε και εδώ αυτήν την σπειροειδή κίνηση που είχαμε δει στα προηγούμενα σεναρία όπως επίσης και πως κάποιες γραμμές ροής στροβιλίζονται στο τμήμα του αγωγού που οδηγεί προς την επιφάνεια outlet.

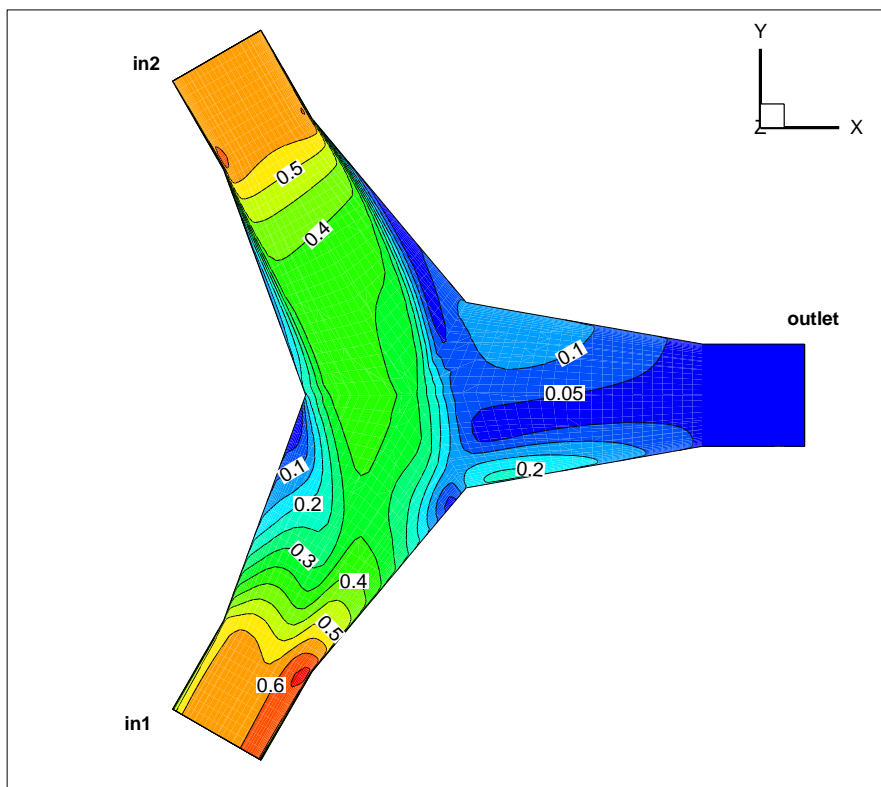
Στις εικόνες 6.30 και 6.32 παρατηρούμε το ζεύγος στροβίλων που δημιουργείται κατά την αλλαγή κατεύθυνσης της ροής για την επιφάνεια a και για την έξοδο in1. Παρατηρούμε και εδώ όπως και στα προηγούμενα σεναρία ότι οι στροβιλισμοί αυτοί μετακινούνται προς το τοίχωμα καθώς πλησιάζουμε στην έξοδο. Η ένταση των στροβίλων αυτών είναι μικρότερη σε σχέση με τα προηγούμενα σεναρία λόγω του μικρού αριθμού Re.

Στις εικόνες 6.31 και 6.33 έχουμε για τις αντίστοιχες επιφάνειες τις ισοταχείς. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ανομοιομορφία στο πεδίο ταχυτήτων ιδιαίτερα στην έξοδο όπου οι υψηλές ταχύτητες παρουσιάζονται κοντά στο τοίχωμα.

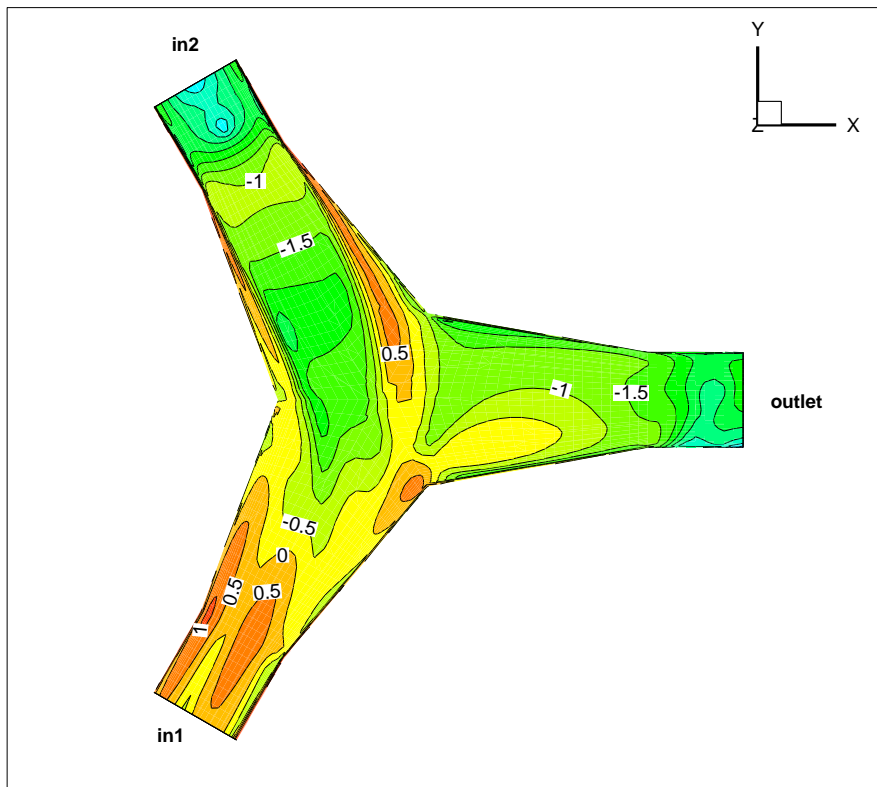
Οι απώλειες αναμένονται να είναι μικρότερες σε σχέση με τα προηγούμενα σεναρία λόγω του μικρότερου αριθμού Re.



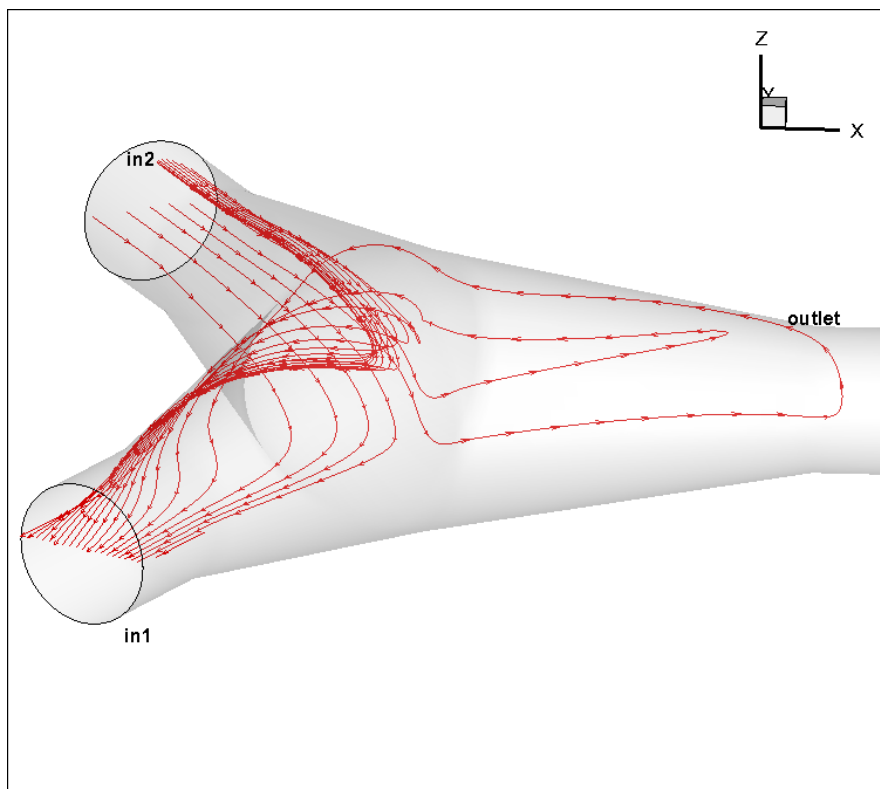
Εικόνα 6.26 Διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$.



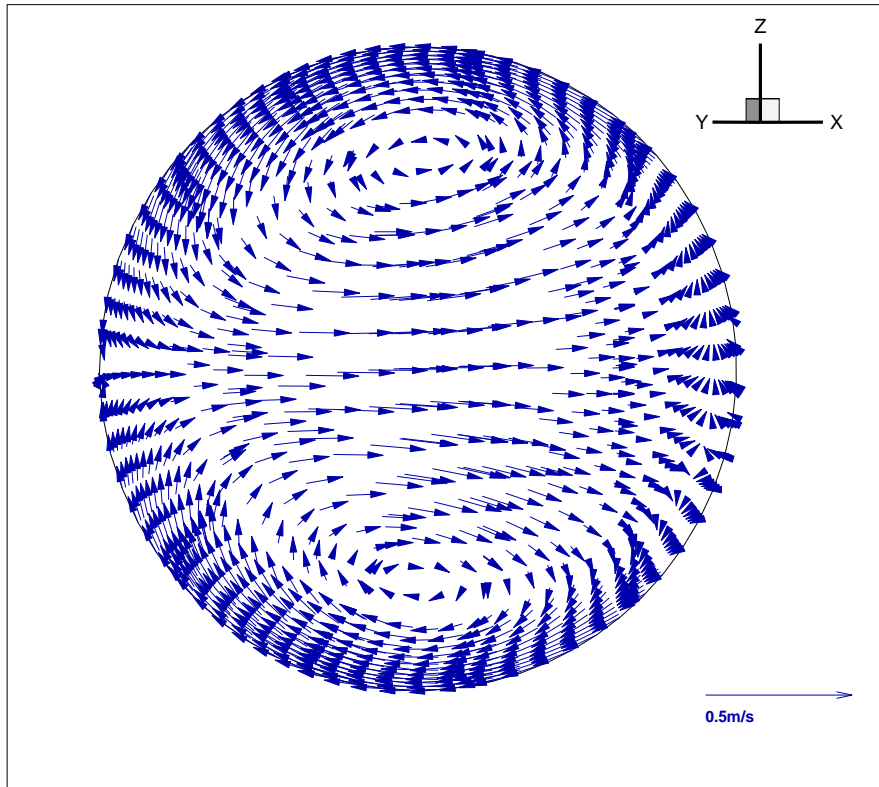
Εικόνα 6.27 Ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$.



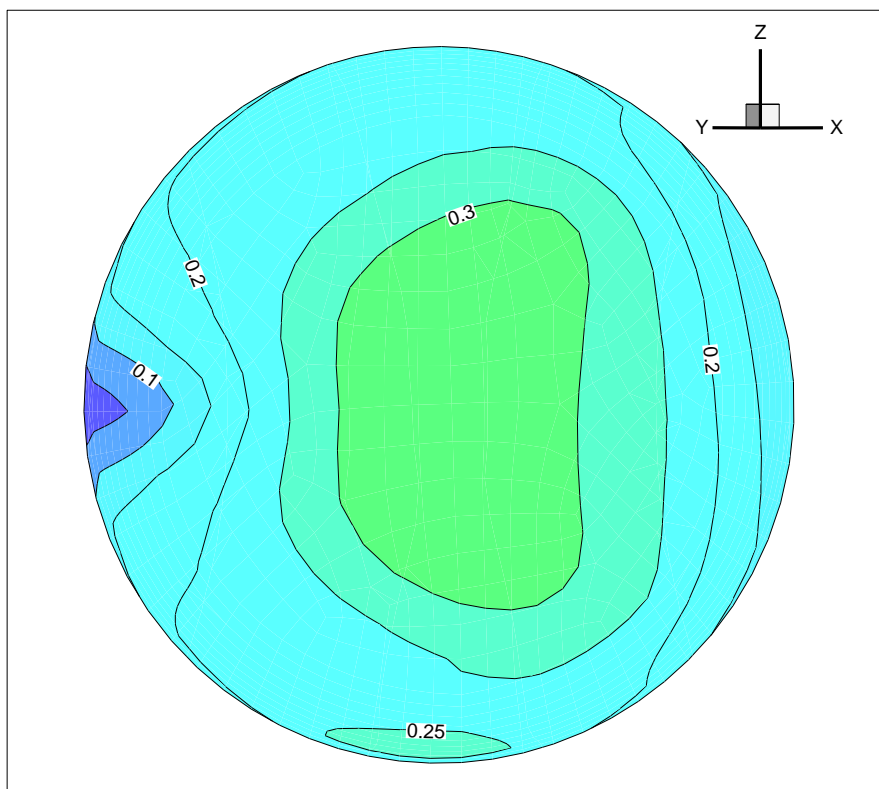
Εικόνα 6.28 Ισοϋψείς της Φ στο επίπεδο $z=0$



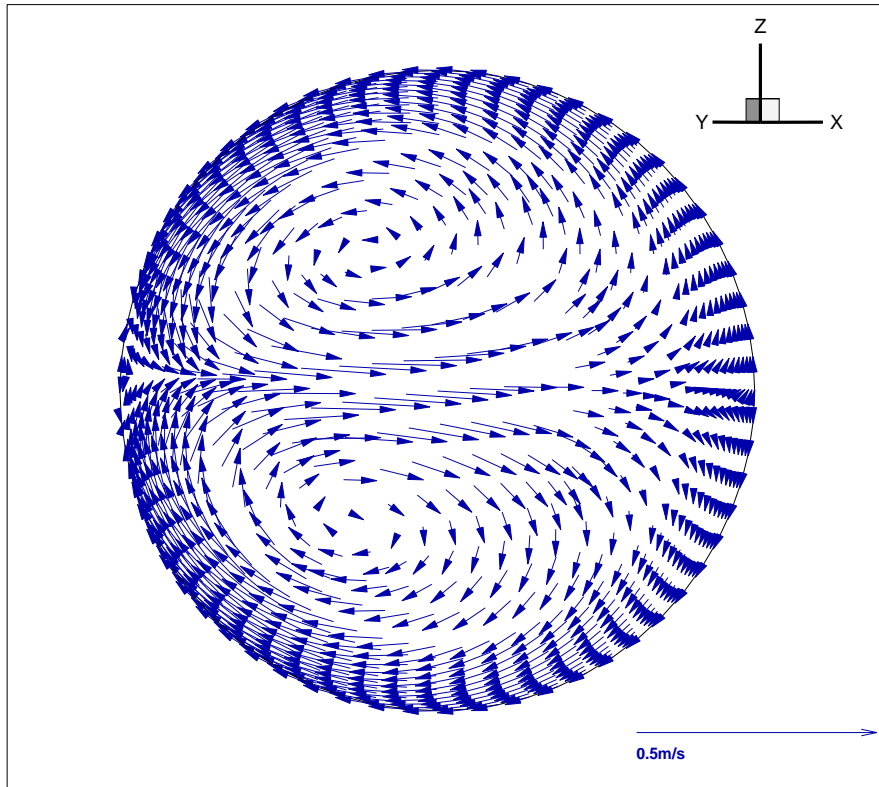
Εικόνα 6.29 Γραμμές ροής.



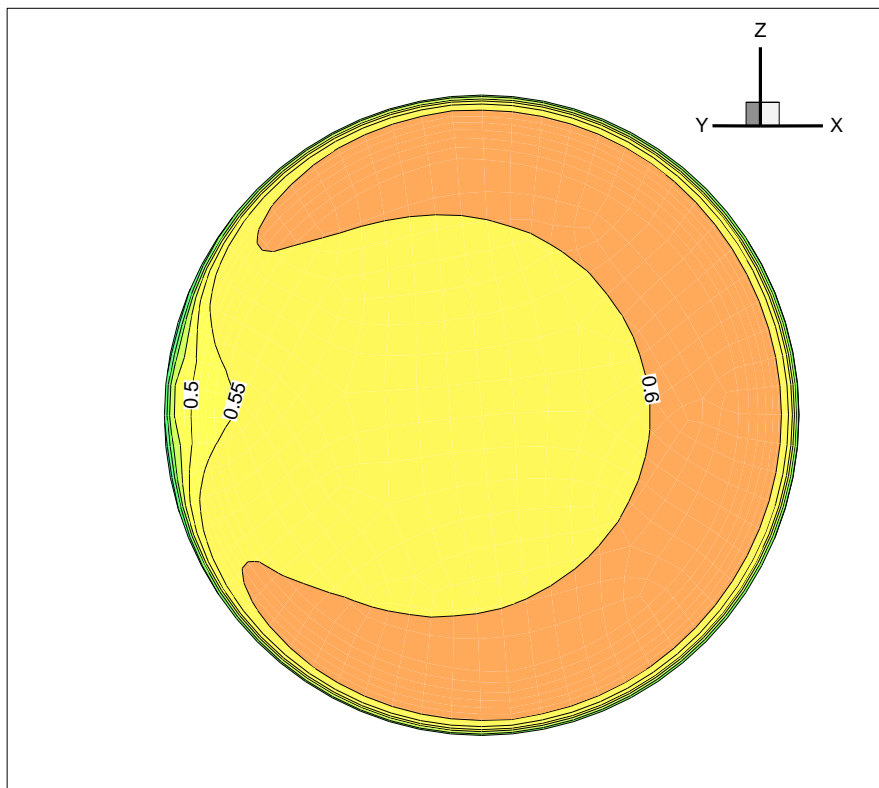
Εικόνα 6.30 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στην επιφάνεια α



Εικόνα 6.31 Ισοταχείς στην επιφάνεια α



Εικόνα 6.32 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στην στην έξοδο in1



Εικόνα 6.33 Ισοταχείς στην έξοδο in1

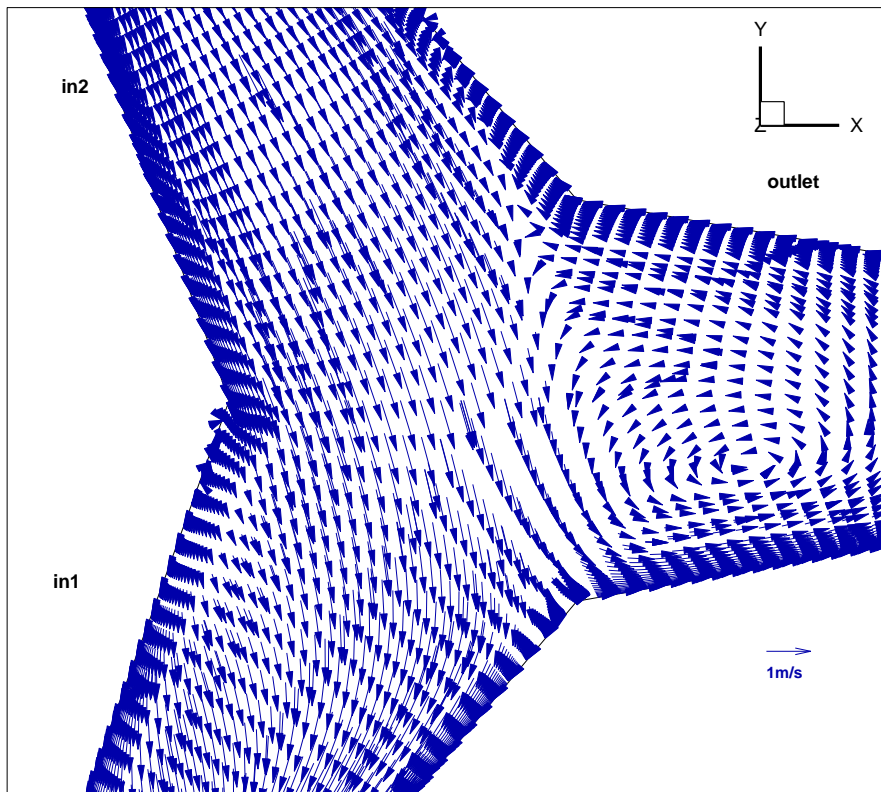
6.2.5 Σενάριο 5ο

Εδώ έχουμε μόνο άντληση όπως και στο προηγούμενο σενάριο με διαφορετική παροχή. Η παροχή είναι $Q=0.5Q_{Pmax}=0.5*3.04=1.52 \text{ m}^3/\text{s}$ και η ταχύτητα στην είσοδο $v=Q/A=1.936 \text{ m/s}$. Θα χρησιμοποιήσουμε το πλέγμα B2 με τις εξής οριακές συνθήκες:

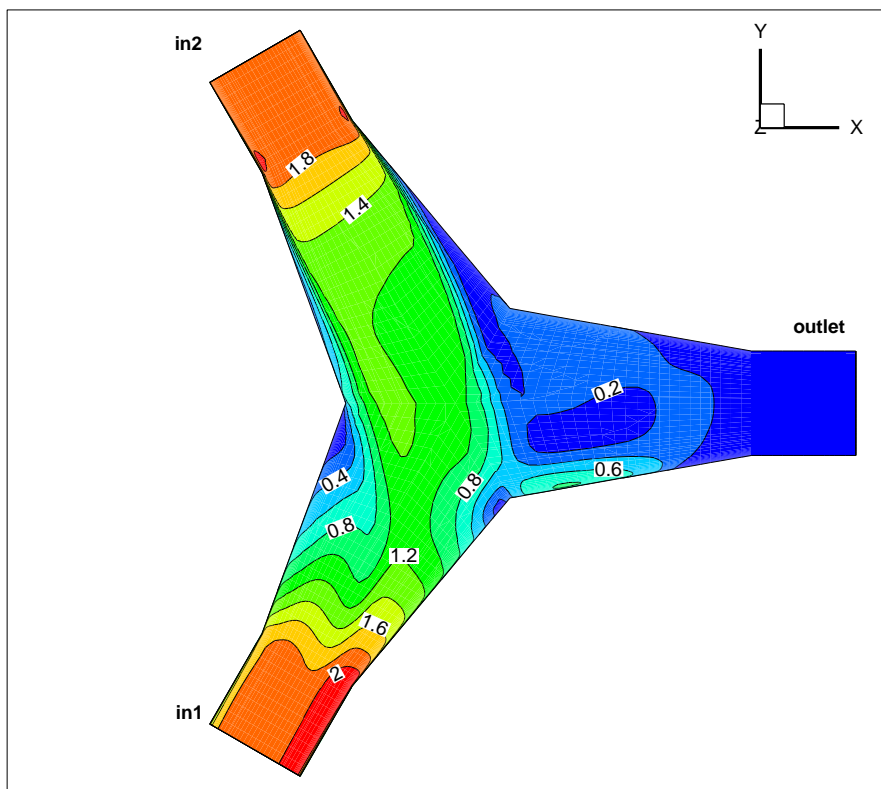
- Επιφάνεια in1. Είναι η έξοδος του συστήματος και καθορίζεται ως outflow με Flow rate weighting ίσο με 1 μιας και είναι η μοναδική έξοδος.
- Επιφάνεια in2. Είσοδος του συστήματος με ταχύτητα $v=1.936 \text{ m/s}$. Υδραυλική διάμετρος $D_h=1 \text{ m}$, ο αριθμός $Re=1926734$ και η ένταση της τύρβης $TI=2.621\%$.
- Επιφάνεια outlet. Δεν έχουμε ροή διαμέσου της επιφάνειας αυτής και επομένως καθορίζουμε την ταχύτητα του ρευστού ίση με $v=0 \text{ m/s}$. Η υδραυλική διάμετρος είναι $D_h=1 \text{ m}$ και η ένταση της τύρβης $TI=0\%$.

Και σε αυτό το σενάριο η ροή είναι παρόμοια με τα προηγούμενα όπως παρατηρούμε από τις εικόνες 6.34-6.36. Το μόνο που αλλάζει είναι οι τιμές των ταχυτήτων μιας και έχουμε άλλες οριακές συνθήκες. Σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο παρατηρούνται μεγαλύτερες ταχύτητες γιατί έχουμε μεγαλύτερο αριθμό Re και επομένως μεγαλύτερες απώλειες.

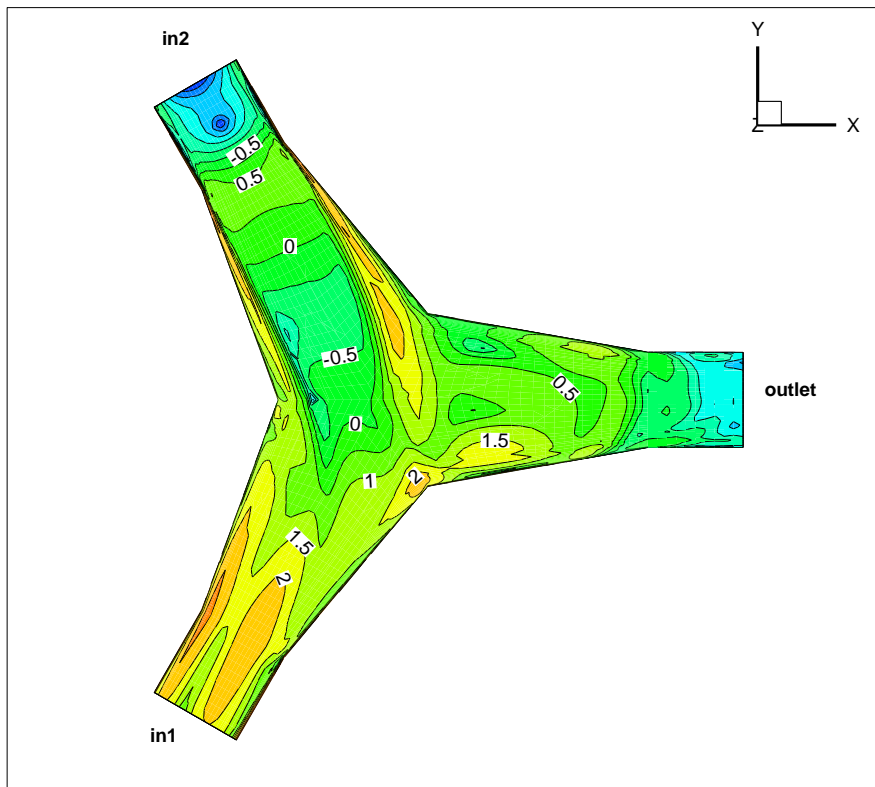
Οι εικόνες 6.37-6.40 είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες των προηγούμενων σεναρίων. Και εδώ παρατηρείται ανομοιομορφία στο πεδίο ταχυτήτων αλλά και οι στρόβιλοι Dean. Οι απώλειες αναμένονται να είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο και οφείλονται όπως και στα προηγούμενα στις διαμηθικές τάσεις, στις αποκολλήσεις της ροής και στην σπειροειδή κίνηση του ρευστού. Αυτό φαίνεται και από τις τιμές των ισούψων της Φ που είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο.



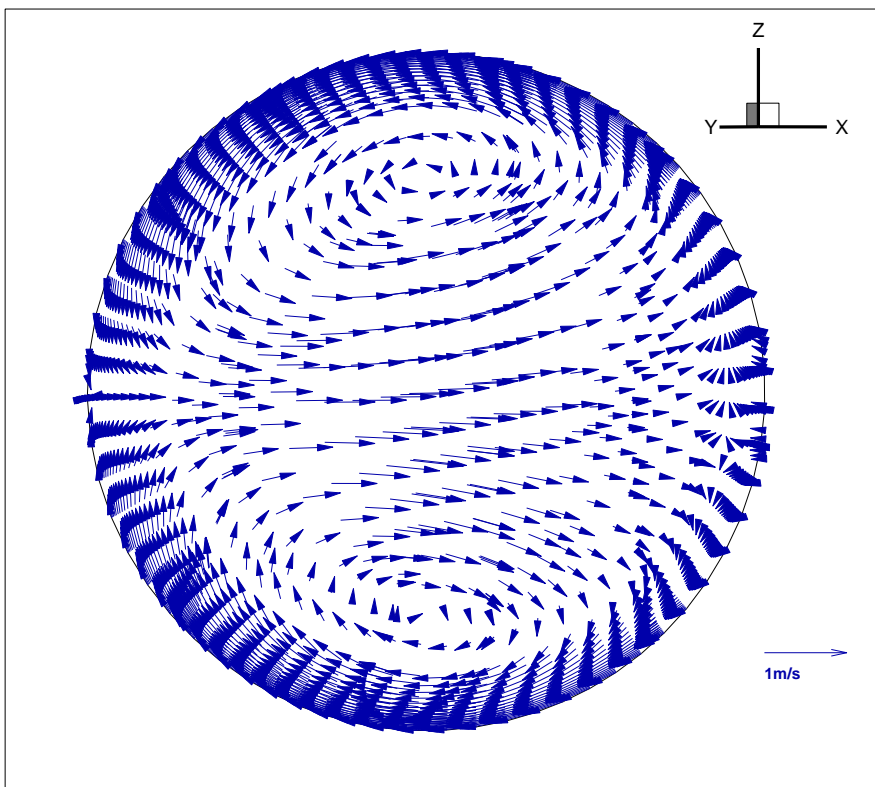
Εικόνα 6.34 Διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$.



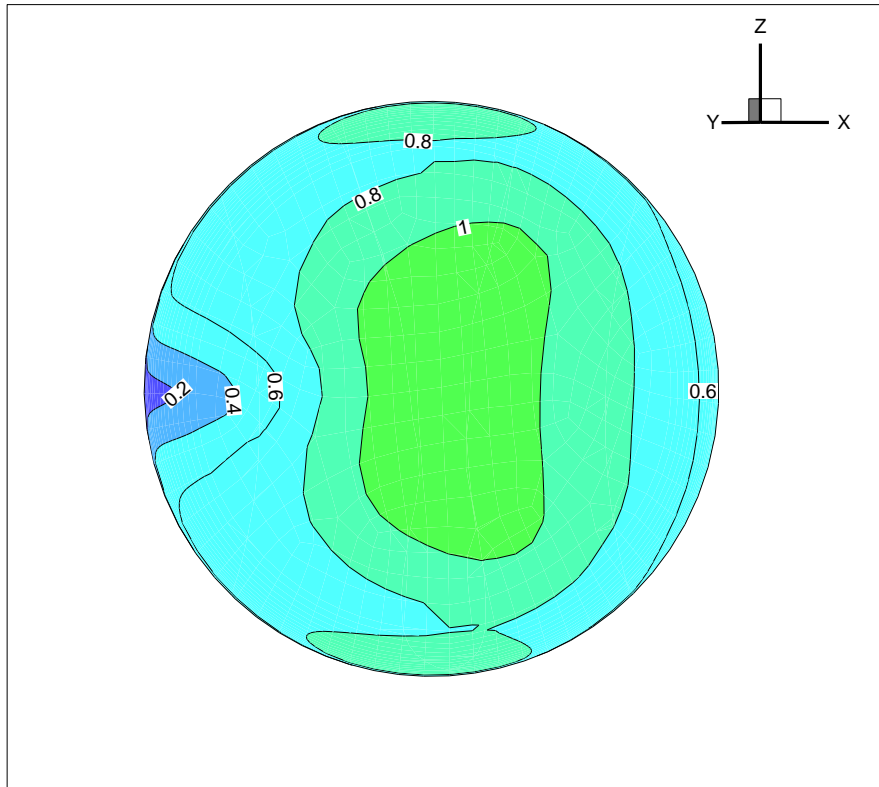
Εικόνα 6.35 Ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$.



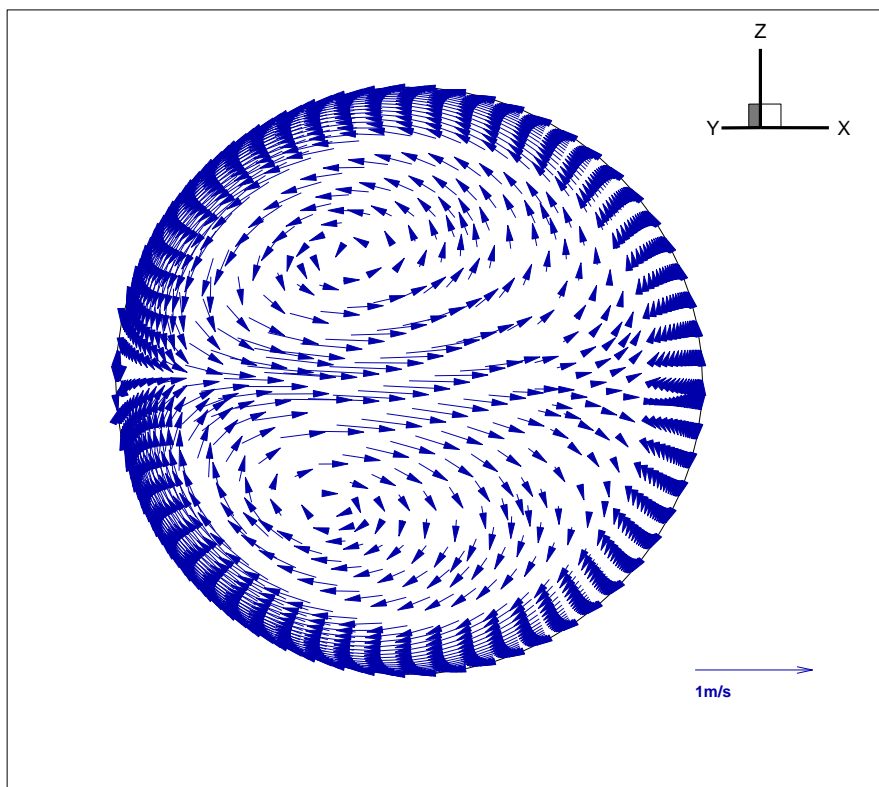
Εικόνα 6.36 Ισοϋψείς της Φ στο επίπεδο $z=0$



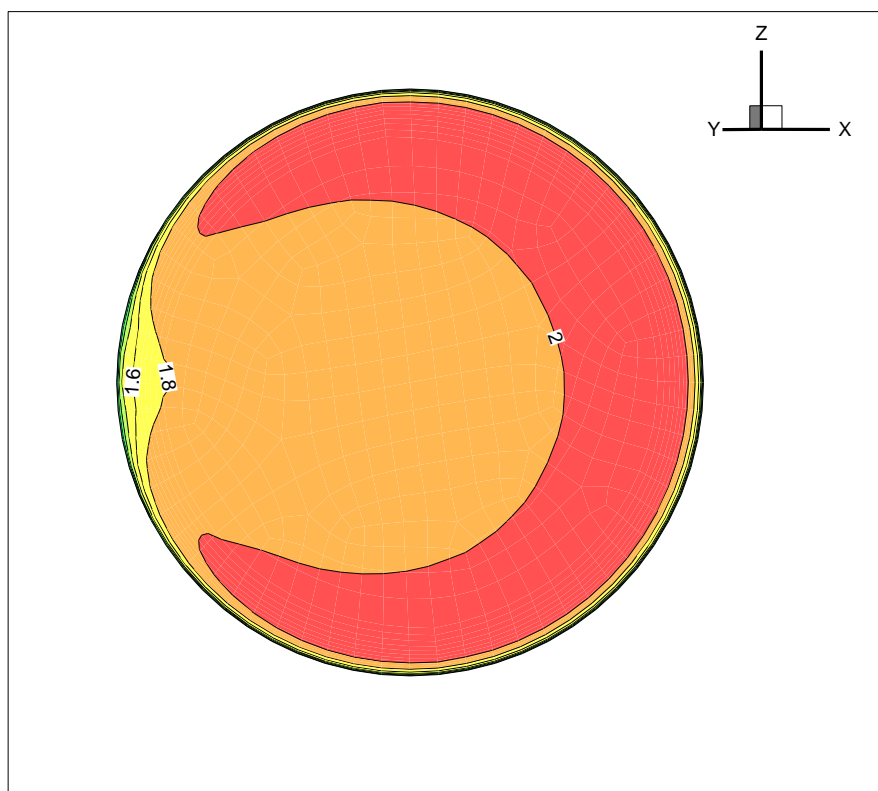
Εικόνα 6.37 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στη επιφάνεια α



Εικόνα 6.38 Ισοταχείς στην επιφάνεια a



Εικόνα 6.39 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στην έξοδο in1



Εικόνα 6.40 Ισοταχείς στην έξοδο in1

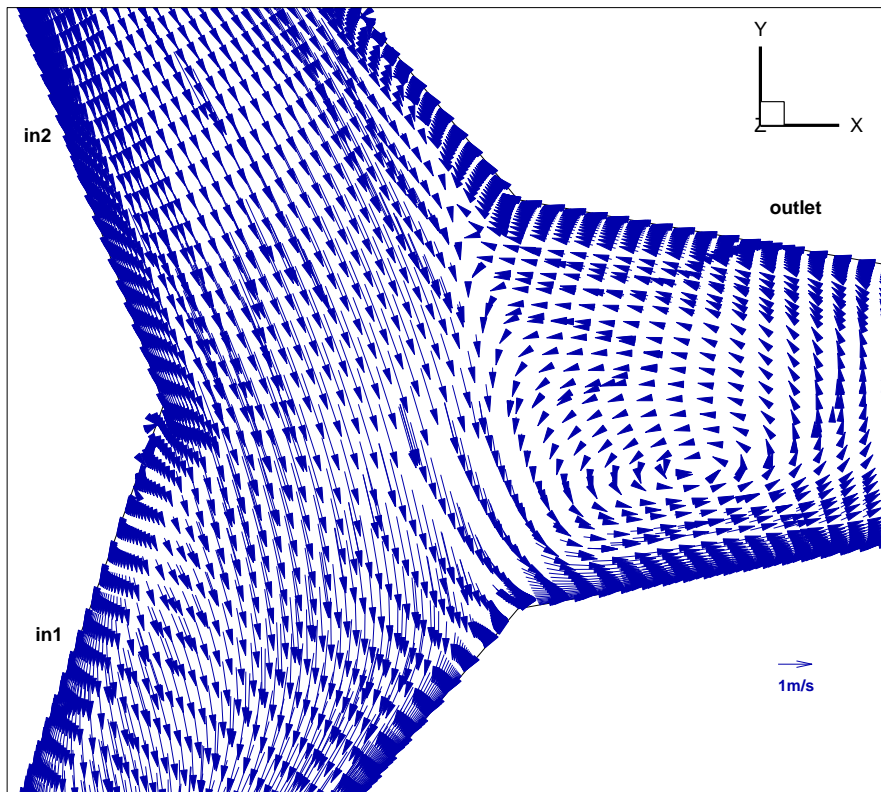
6.2.6 Σενάριο 6ο

Αποτελεί το τελευταίο σενάριο της περίπτωσης που έχουμε μόνο άντληση. Η παροχή είναι $Q=0.5Q_{Pmax}=0.85*3.04=2.584 \text{ m}^3/\text{s}$ και η ταχύτητα στην είσοδο $v=Q/A=3.292 \text{ m/s}$. Θα χρησιμοποιήσουμε το πλέγμα B2 με τις εξής οριακές συνθήκες:

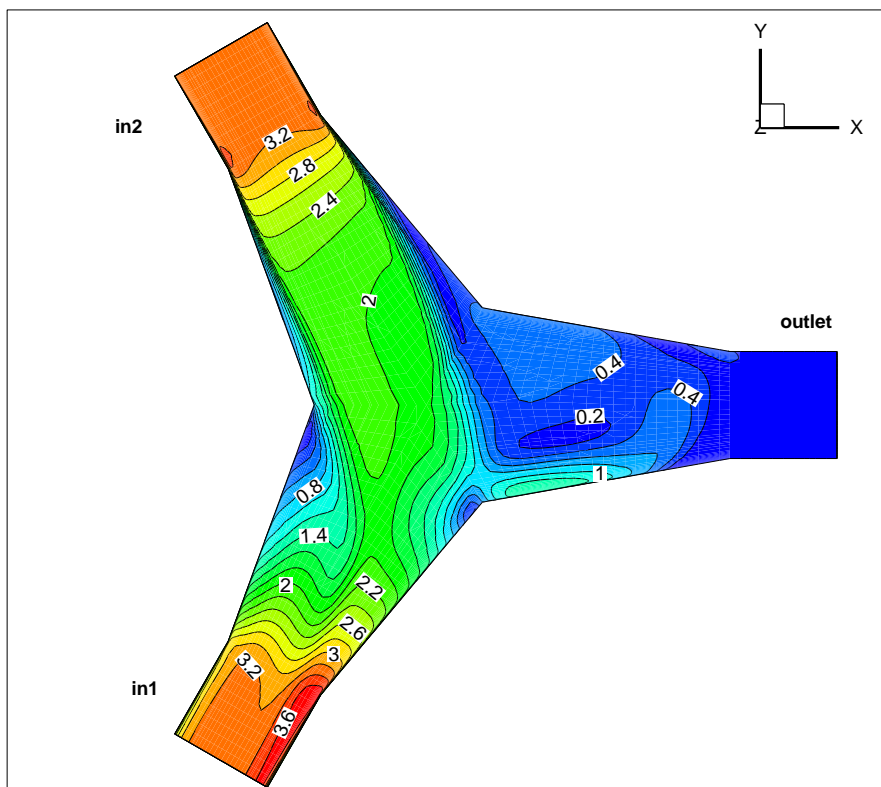
- Επιφάνεια in1. Έξοδος του συστήματος με Flow rate weighting ίσο με 1.
- Επιφάνεια in2. Είσοδος του συστήματος με ταχύτητα $v=3.292\text{m/s}$. Υδραυλική διάμετρος $D_h=1\text{m}$, ο αριθμός $Re=3276246$ και η ένταση της τύρβης $TI=2.453\%$.
- Επιφάνεια outlet. Ταχύτητα ρευστού $v=0 \text{ m/s}$. Υδραυλική διάμετρος $D_h=1\text{m}$ και η ένταση της τύρβης $TI=0\%$.

Παρατηρούμε στις εικόνες 6.41-6.43 ότι και σε αυτό το σενάριο η ροή είναι παρόμοια με τα προηγούμενα. Το μόνο που αλλάζει είναι οι τιμές των ταχυτήτων οι οποίες αυξάνονται σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο αφού αυξάνει ο αριθμός Re και επομένως και οι απώλειες.

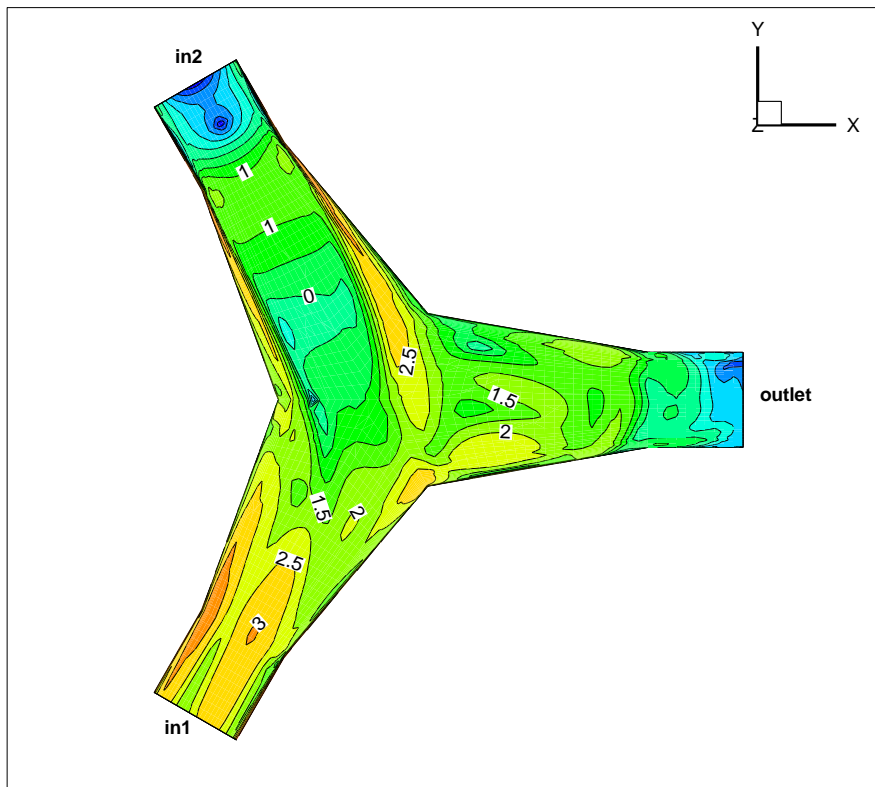
Οι εικόνες 6.44 - 6.47 είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες των σεναρίων 4 και 5.



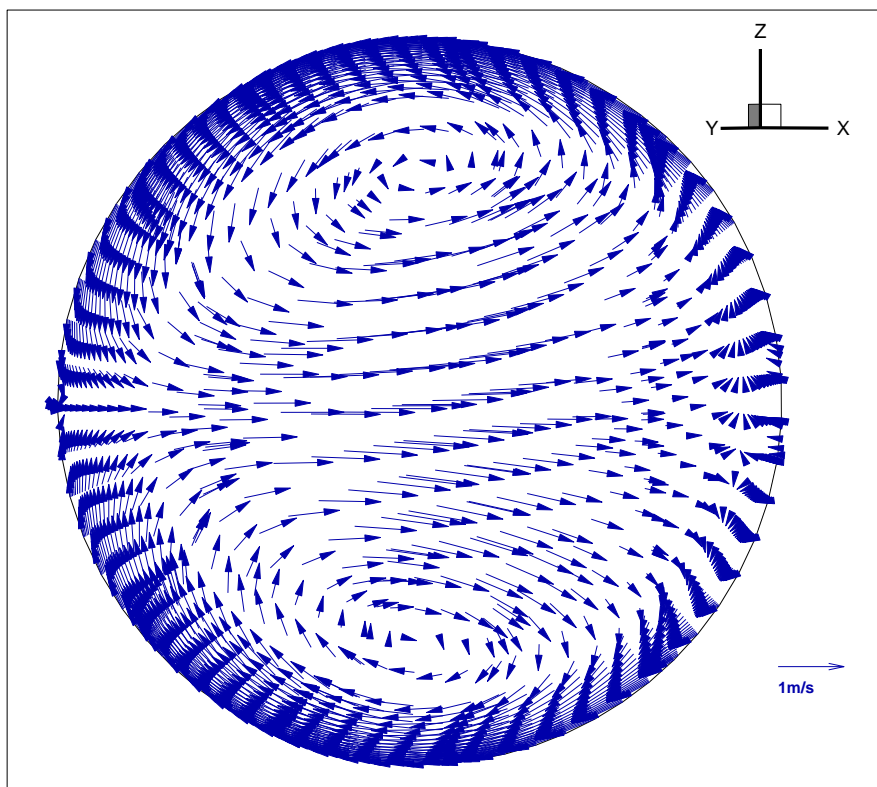
Εικόνα 6.41 Διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$.



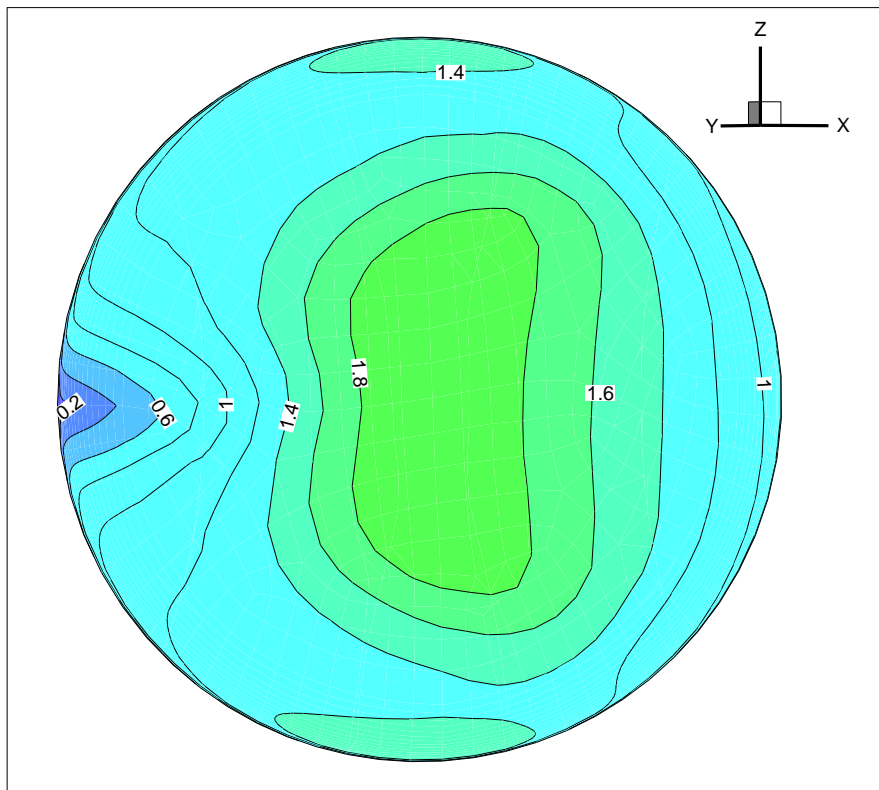
Εικόνα 6.42 Ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$.



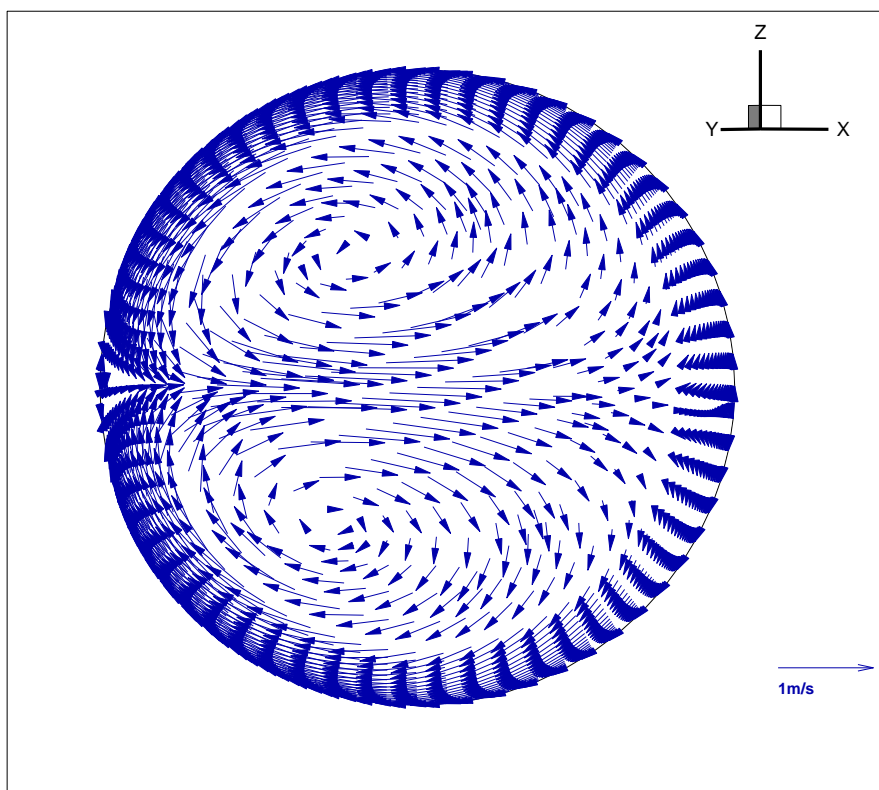
Εικόνα 6.43 Ισοϋψείς της Φ στο επίπεδο $z=0$



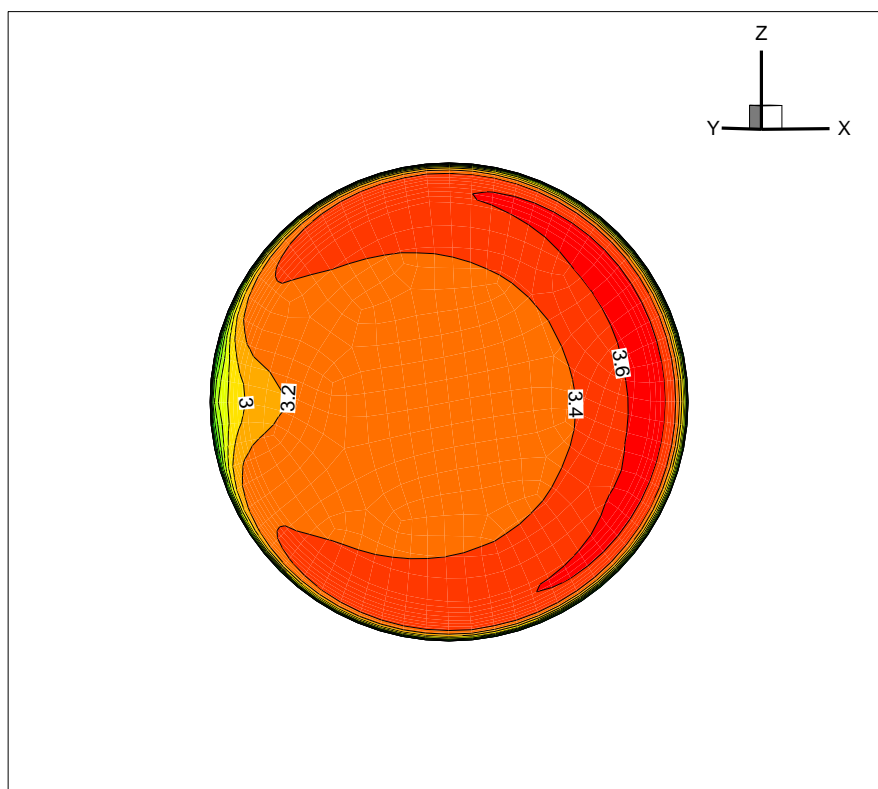
Εικόνα 6.44 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στην επιφάνεια a



Εικόνα 6.45 Ισοταχείς στην επιφάνεια a



Εικόνα 6.46 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στη επιφάνεια in1



Εικόνα 6.47 Ισοταχείς στην έξοδο in1

Όπως και για τα τρία πρώτα σενάρια έτσι και εδώ τα σενάρια 4, 5 και 6 έχουν παρόμοια ροή με το μόνο που αλλάζει να είναι η διακινούμενη παροχή. Οι απώλειες αναμένεται να είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τα δύο παρόμοια σενάρια όπως είναι φυσικό λόγω του μεγαλύτερου αριθμού Re. Αυτό φαίνεται και από τις τιμές των ισοϋψών της Φ που είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο.

6.2.7 Σενάριο 7ο

Σε αυτό το σενάριο έχουμε ταυτόχρονη λειτουργία και των υδροστροβίλων και των αντλιών. Η παροχή που απαιτείται για την παραγωγή ισχύος είναι $Q_T=0.15Q_{Tmax}=0.15*4.28=0.642 \text{ m}^3/\text{s}$ και η παροχή των αντλιών είναι $Q_P=0.15Q_{Pmax}=0.15*3.04=0.456 \text{ m}^3/\text{s}$. Παρατηρούμε ότι η παροχή για την παραγωγή ισχύος είναι μεγαλύτερη από αυτήν που δίνουν οι αντλίες. Επομένως απαιτείται μια πρόσθετη παροχή $Q=Q_T-Q_P=0.642-0.456=0.186 \text{ m}^3/\text{s}$ που προέρχεται από την άνω δεξαμενή. Επομένως το σύστημα μας θα έχει δύο εισόδους και μία έξοδο. Η μέση ταχύτητα στην έξοδο αναμένεται να είναι $v=Q_T/A=0.818 \text{ m/s}$. Άρα θα χρησιμοποιήσουμε το πλέγμα A2 με τις εξής οριακές συνθήκες:

- Επιφάνεια in1. Είσοδος 1 του συστήματος με ταχύτητα $v=(Q_T-Q_P)/A=0.237$ m/s. Υδραυλική διάμετρος $D_h=1$ m, ο αριθμός $Re=235866$ και η ένταση της τύρβης $TI=3.408\%$.
- Επιφάνεια in2. Είσοδος 2 του συστήματος με ταχύτητα ρευστού $v=Q_P/A=0.581$ m/s. Υδραυλική διάμετρος $D_h=1$ m, ο αριθμός $Re=578220$ και η ένταση της τύρβης $TI=3.047\%$.
- Επιφάνεια outlet. Έξοδος του συστήματος με Flow rate weighting ίσο με 1.

Οι εικόνες 6.48 και 6.49 δείχνουν την ανάμιξη των δύο ροών στο επίπεδο $z=0$. Παρατηρείται ότι η ροή με την μεγαλύτερη ταχύτητα (in2) αποκολλάται αφότου στρίψει σε ένα τμήμα της γεωμετρίας. Η ροή χαμηλής ταχύτητας (in1) βλέπουμε ότι αναγκάζεται να συγκρουστεί με την πρώτη και να περνά μόνο από δεξιά όπως βλέπουμε τις εικόνες. Επίσης ένα τμήμα της δεύτερης ροής πηγαίνει αντίθετα με την πρώτη.

Η εικόνα 6.50 δείχνει τις ισοϋψείς της Φ . Τα συμπεράσματα είναι τα ίδια με τα προηγούμενα σενάρια. Μεγάλες απώλειες παρατηρούνται στην έξοδο της γεωμετρίας και στα τμήματα κοντά στα τοιχώματα όπου έχουμε αποκόλληση της ροής.

Στην εικόνα 6.51 βλέπουμε την ανάμιξη των ροών αλλά στο επίπεδο $x=0$. Παρατηρείται ότι η ροή με την χαμηλότερη ταχύτητα αναγκάζεται να οδηγηθεί άνω και κάτω της ροής με την μεγαλύτερη ταχύτητα δημιουργώντας δύο στροβίλους.

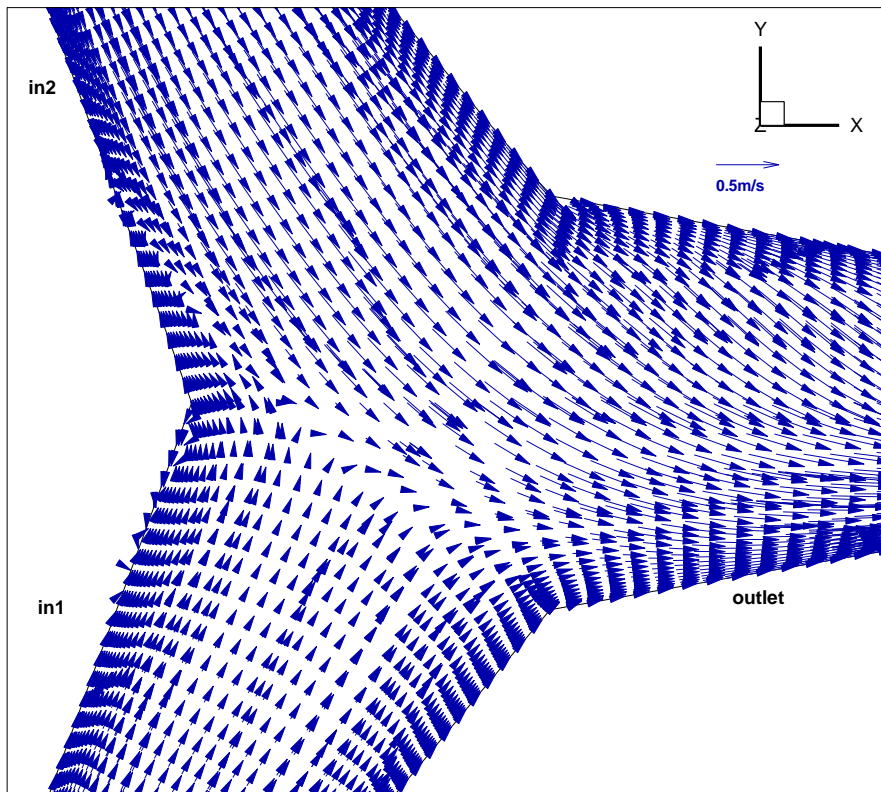
Οι εικόνες 6.53 και 6.55 δείχνουν τον στροβιλισμό της ροής που είχαμε και στα προηγούμενα σενάρια στις επιφάνειες $x=1$ και outlet. Παρατηρούμε ότι το ζεύγος στροβίλων όσο πλησιάζουμε προς την έξοδο πλησιάζει προς το τοίχωμα της γεωμετρίας.

Στις εικόνες 6.54 και 6.56 έχουμε τις ισοταχείς για τις επιφάνειες $x=1$ και outlet. Παρατηρείται και εδώ η ανομοιομορφία στο πεδίο ταχυτήτων κυρίως στην έξοδο όπως και στα προηγούμενα σενάρια.

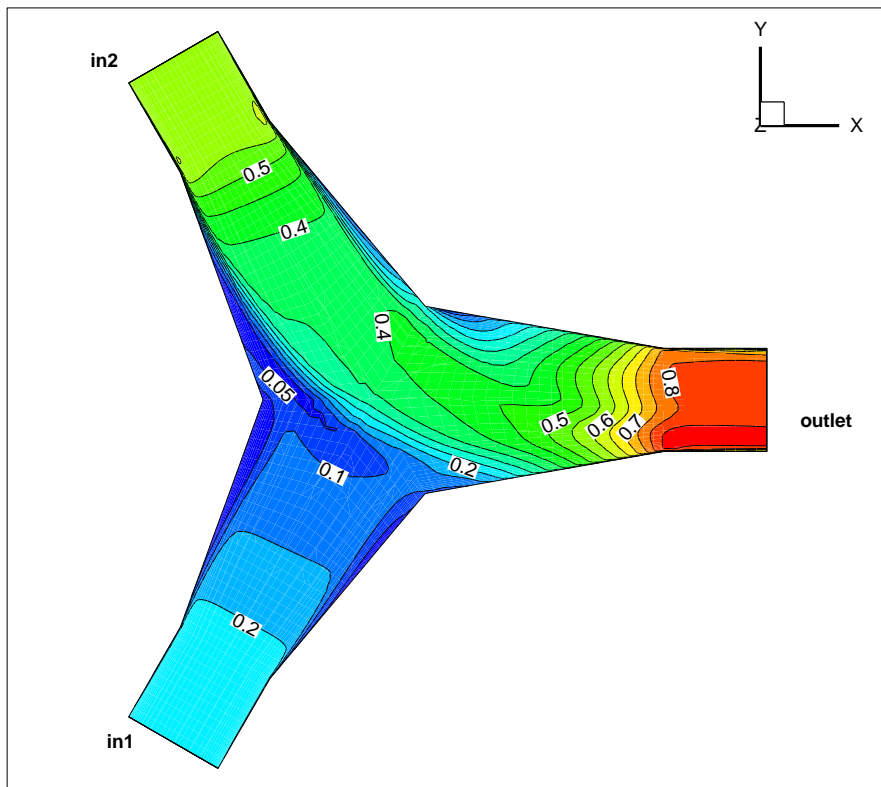
Η εικόνα 6.57 μας δείχνει πώς η ροή χαμηλής ταχύτητας (in1) στο επίπεδο $z=0$ αναγκάζεται να περάσει από ένα μικρό τμήμα της γεωμετρίας και πως ένα τμήμα της έχει αντίστροφη κατεύθυνση με την ροή υψηλής ταχύτητας (in2).

Στην εικόνα 6.58 παρατηρούμε πως η ροή από την είσοδο in1 αναγκάζεται να οδηγηθεί άνω και κάτω της ροής από την είσοδο in2 αγκαλιάζοντας την ουσιαστικά. Επίσης παρατηρούμε και την συστροφή της ροής (σπειροειδής κίνηση) στην έξοδο όπως και στα προηγούμενα σενάρια.

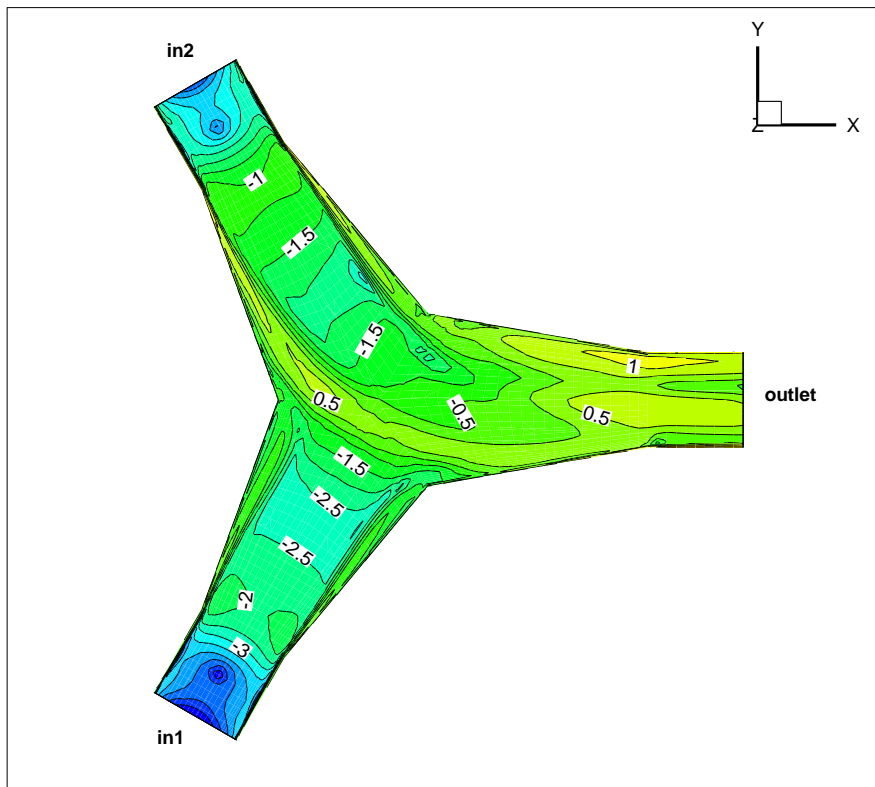
Οι απώλειες αναμένονται να είναι μικρές κυρίως λόγω των μικρών ταχυτήτων που αναπτύσσονται.



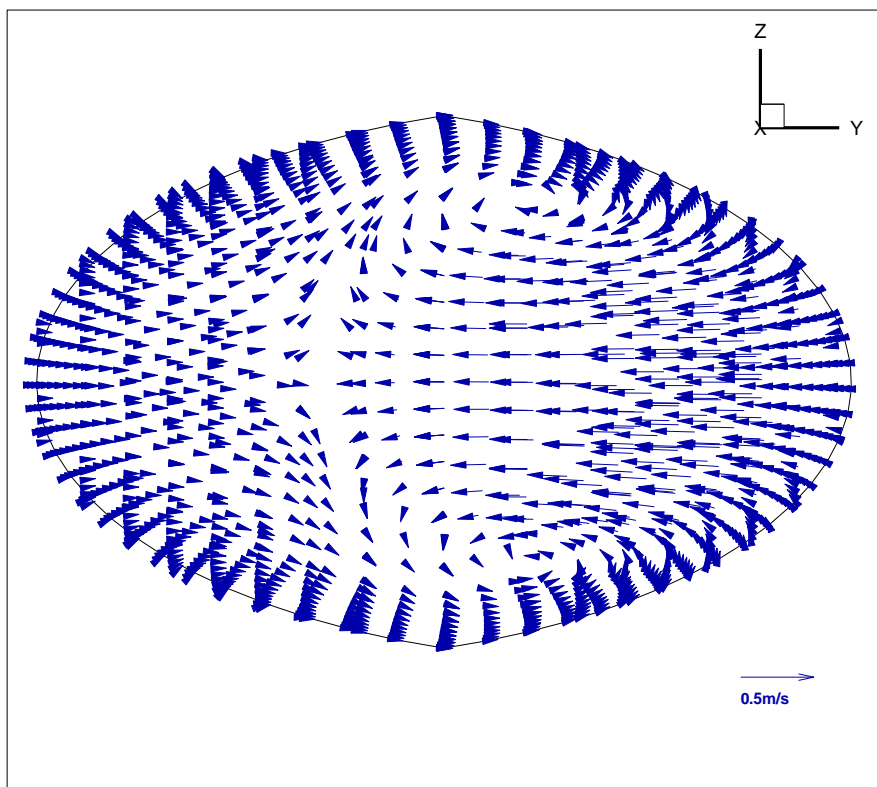
Εικόνα 6.48 Διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$.



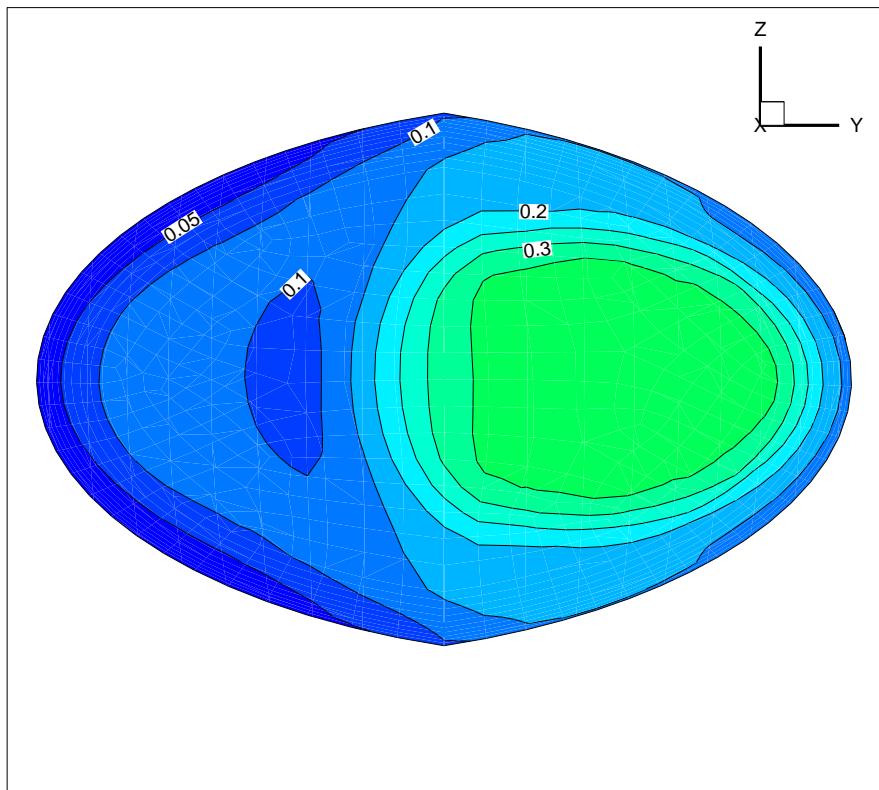
Εικόνα 6.49 Ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$.



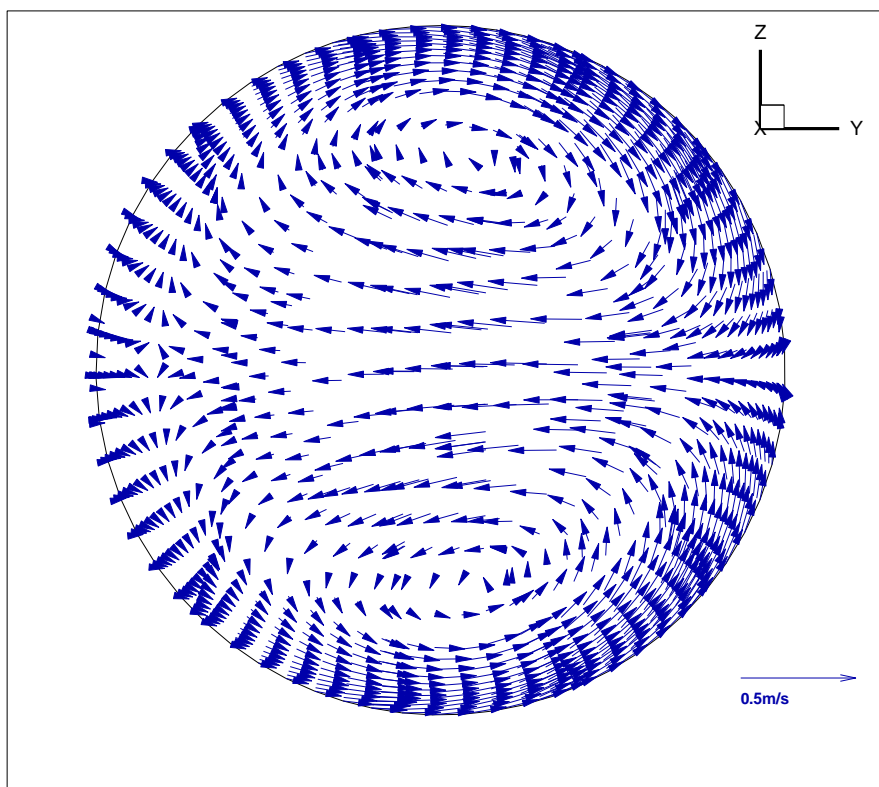
Εικόνα 6.50 Ισοϋψείς της Φ στο επίπεδο $z=0$



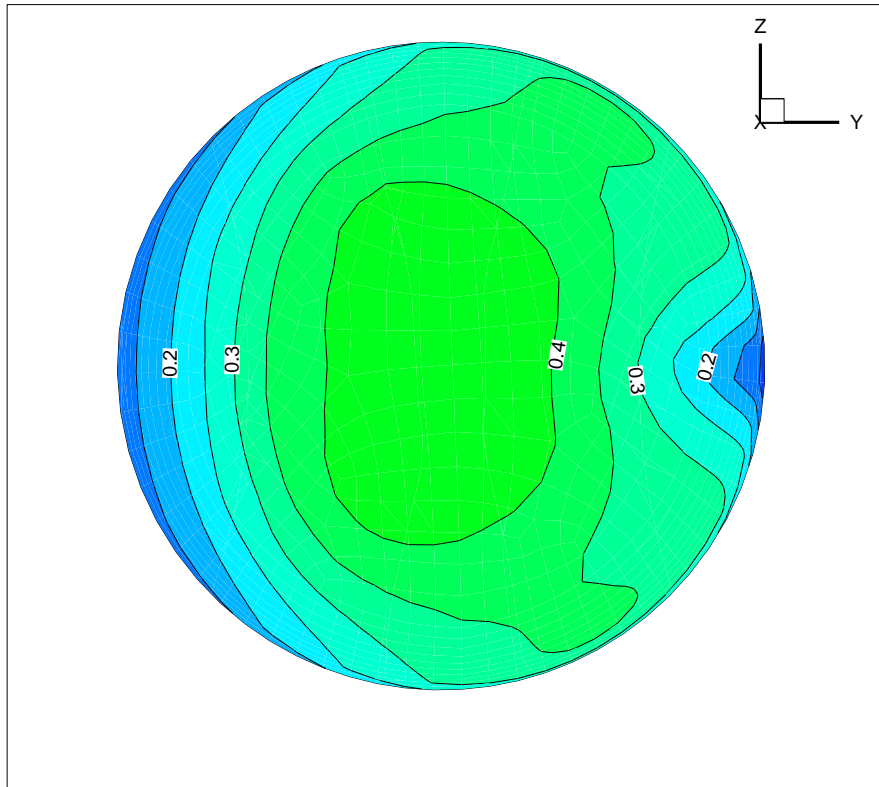
Εικόνα 6.51 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στο επίπεδο $x=0$.



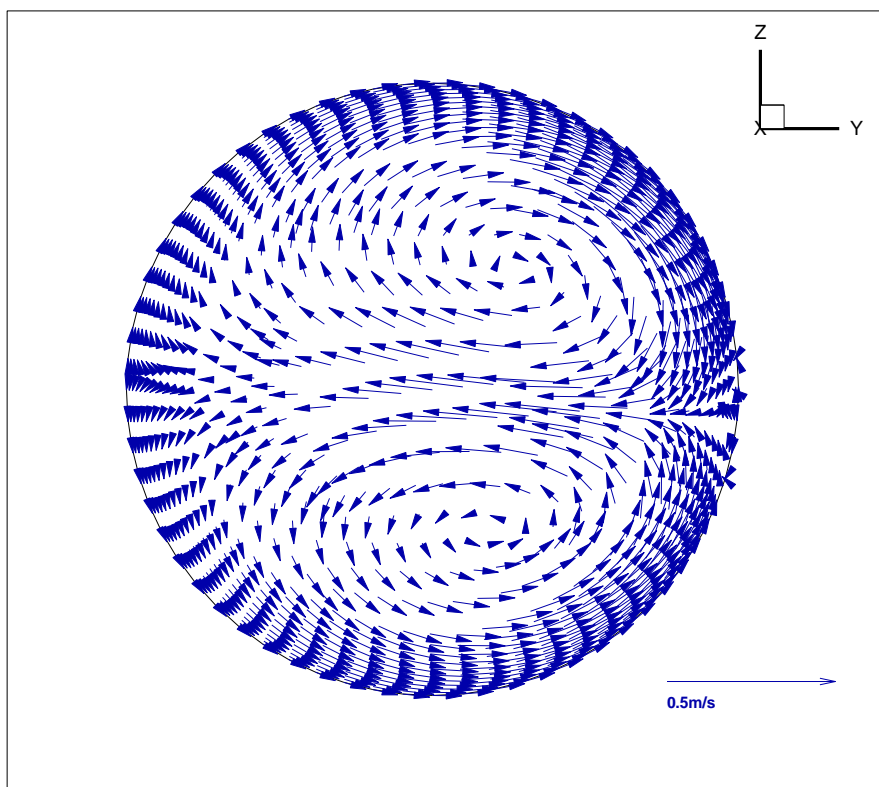
Εικόνα 6.52 Ισοταχείς στην επιφάνεια $x=0$



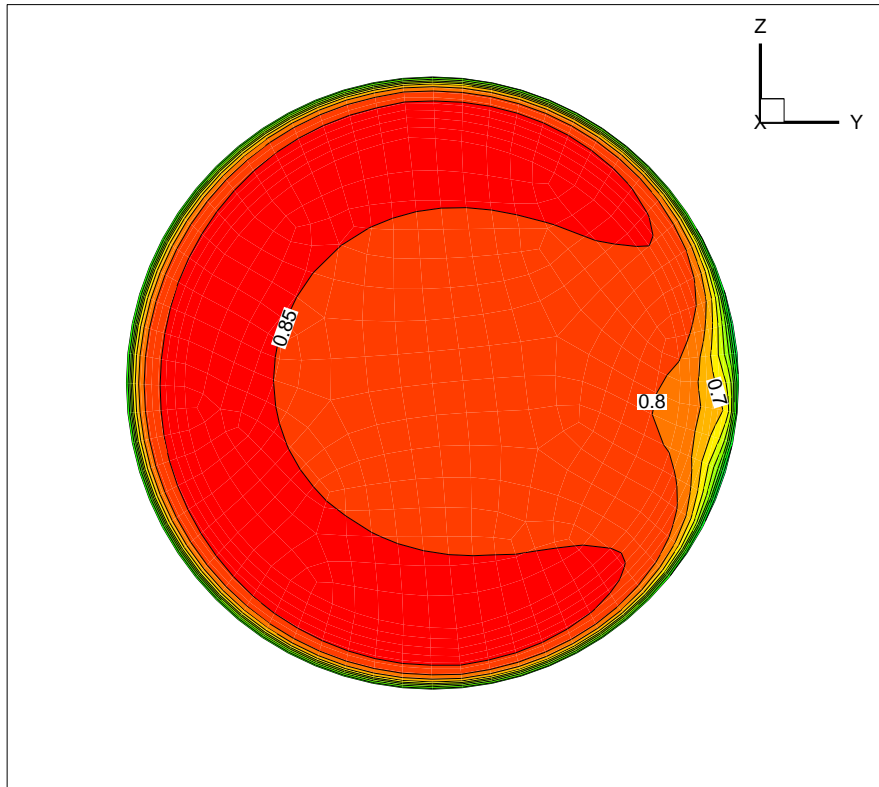
Εικόνα 6.53 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στο επίπεδο $x=1$.



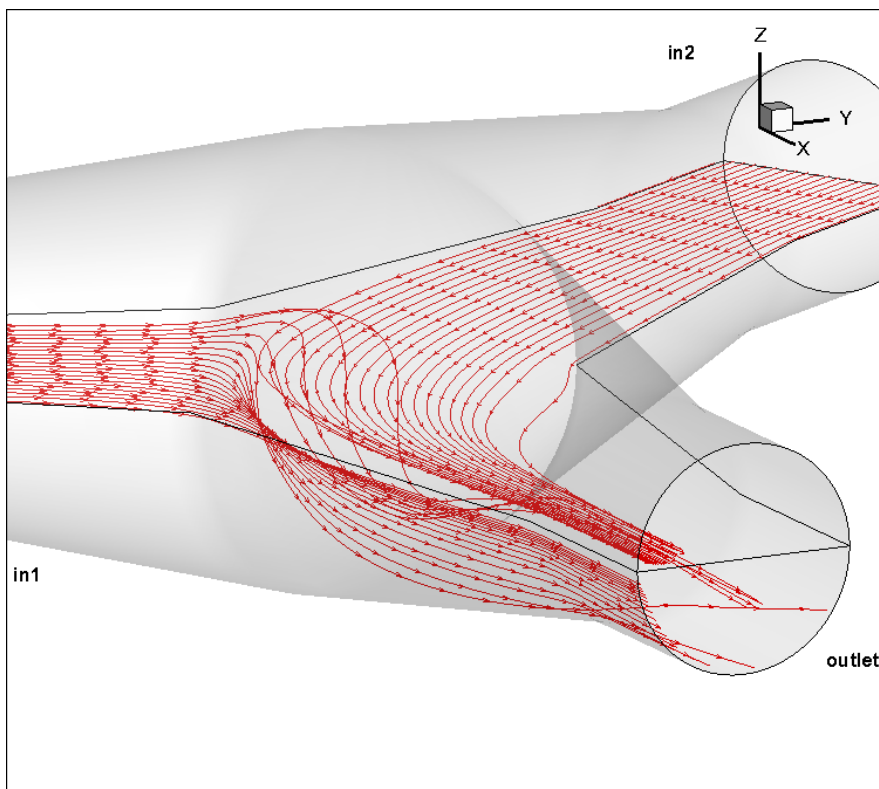
Εικόνα 6.54 Ισοταχείς στην επιφάνεια $x=1$



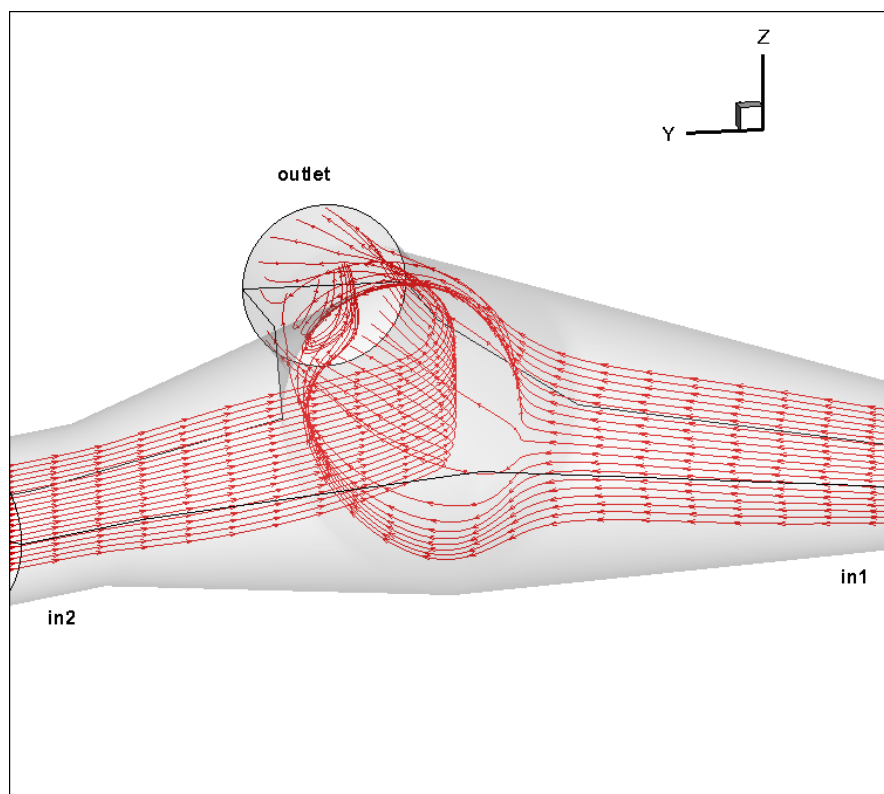
Εικόνα 6.55 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στη επιφάνεια outlet.



Εικόνα 6.56 Ισοταχείς στην έξοδο outlet



Εικόνα 6.57 Γραμμές ροής



Εικόνα 6.58 Γραμμές ροής

6.2.8 Σενάριο 8ο

Και σε αυτό το σενάριο έχουμε ταυτόχρονη λειτουργία υδροστροβίλων και αντλιών. Η παροχή για την παραγωγή ισχύος παραμένει η ίδια με παραπάνω $Q_T=0.15Q_{Tmax}=0.642 \text{ m}^3/\text{s}$ ενώ η παροχή των αντλιών είναι $Q_P=0.5Q_{Pmax}=0.5*3.04=1.52 \text{ m}^3/\text{s}$. Αντίθετα με το σενάριο 7 εδώ η παροχή των αντλιών είναι μεγαλύτερη από αυτήν που απαιτείται για την παραγωγή ισχύος. Επομένως δεν απαιτείται πρόσθετη παροχή από την άνω δεξαμενή αλλά αντίθετα η πλεονάζουσα παροχή $Q=Q_P-Q_T=0.878 \text{ m}^3/\text{s}$ από τις αντλίες κατευθύνεται προς αυτήν. Το σύστημα θα έχει μία είσοδο και δύο εξόδους. Η μέγιστη μέση ταχύτητα παρατηρείται στην είσοδο του συστήματος και είναι $v=Q_P/A=1.936 \text{ m/s}$. Για την επίλυση της ροής θα χρησιμοποιήσουμε το πλέγμα B2 με τις εξής οριακές συνθήκες:

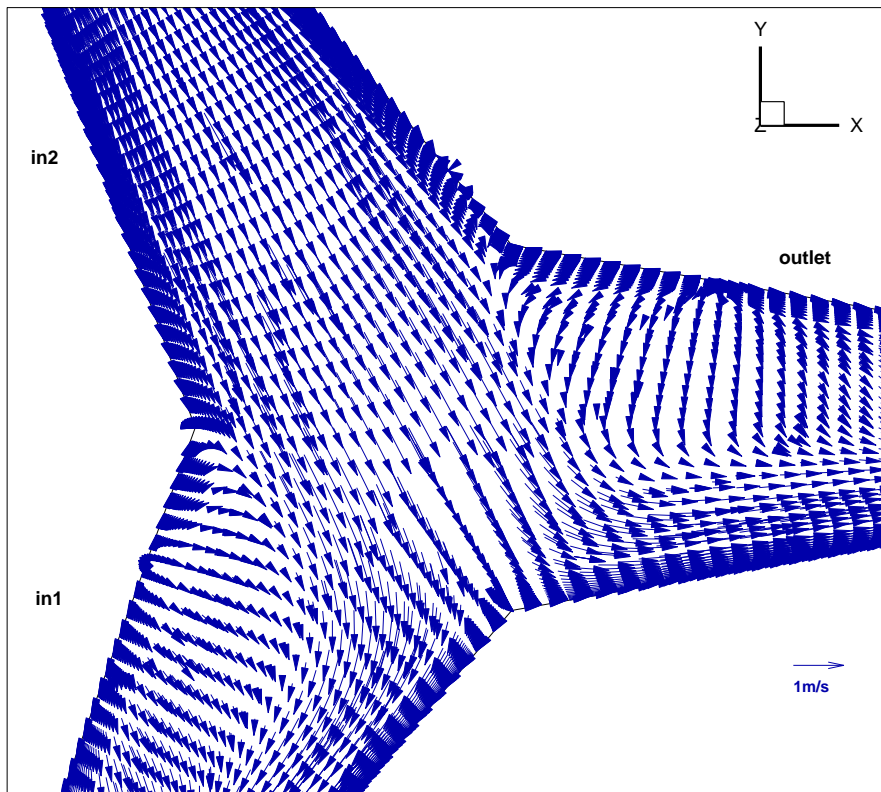
- Επιφάνεια in1. Έξοδος 1 του συστήματος με Flow rate weighting ίσο με $(Q_P-Q_T)/Q_P=0.878/1.52=0.578$
- Επιφάνεια in2. Είσοδος του συστήματος με ταχύτητα ρευστού $v=Q_P/A=1.936 \text{ m/s}$. Υδραυλική διάμετρος $D_h=1\text{m}$, ο αριθμός $Re=1926734$ και η ένταση της τύρβης $TI=2.621\%$.
- Επιφάνεια outlet. Έξοδος 2 του συστήματος με Flow rate weighting ίσο με $(1-0.578)=0.422$.

Οι εικόνες 6.59 και 6.60 μας δείχνουν τον διαχωρισμό της ροής στο επίπεδο $z=0$. Παρατηρείται σύμφωνα με τις συνοριακές συνθήκες περισσότερη ροή να αναπτύσσεται προς την έξοδο $in1$ (αριστερά της εικόνας). Επίσης καθώς η ροή διαχωρίζεται παρατηρείται ροή παράλληλη με τις επιφάνειες $x=1$ και $x=a$ σε κάποια τμήματα του αγωγού. Αυτό οφείλεται στην αποκόλληση της ροής η οποία σε αυτό το σενάριο είναι αρκετά μεγάλη. Αυτό φαίνεται καλύτερα στις εικόνες 6.62, 6.63, 6.64 και 6.65 όπου έχουμε τα προβαλλόμενα διανύσματα και τις ισοταχείς για τις παραπάνω επιφάνειες.

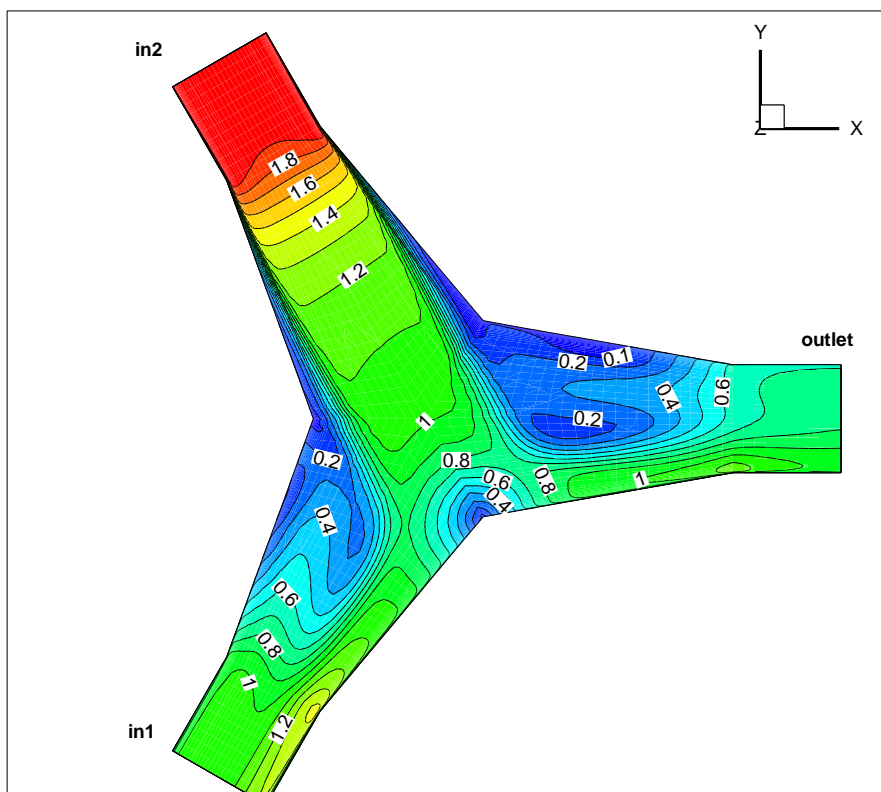
Στην 6.61 έχουμε τις ισοΰψεις της Φ . Απώλειες μεγάλες παρατηρούνται στις δύο εξόδους, στα τμήματα κοντά στα τοιχώματα όπου έχουμε αποκόλληση της ροής και τέλος στο τμήμα εκείνο όπου η ροή είναι κάθετη στο τοίχωμα.

Τέλος στις εικόνες 6.66, 6.67, 6.68 και 6.69 έχουμε τα προβαλλόμενα διανύσματα και τις ισοταχείς στις δύο εξόδους. Παρατηρείται όπως είναι φυσικό να αναπτύσσονται μεγαλύτερες ταχύτητες στην έξοδο $in1$ αφού από εκεί περνάει μεγαλύτερη παροχή. Και σε αυτό το σενάριο παρατηρούνται στροβιλισμοί στις εξόδους με τις μεγαλύτερες ταχύτητες να βρίσκονται κοντά στο τοίχωμα.

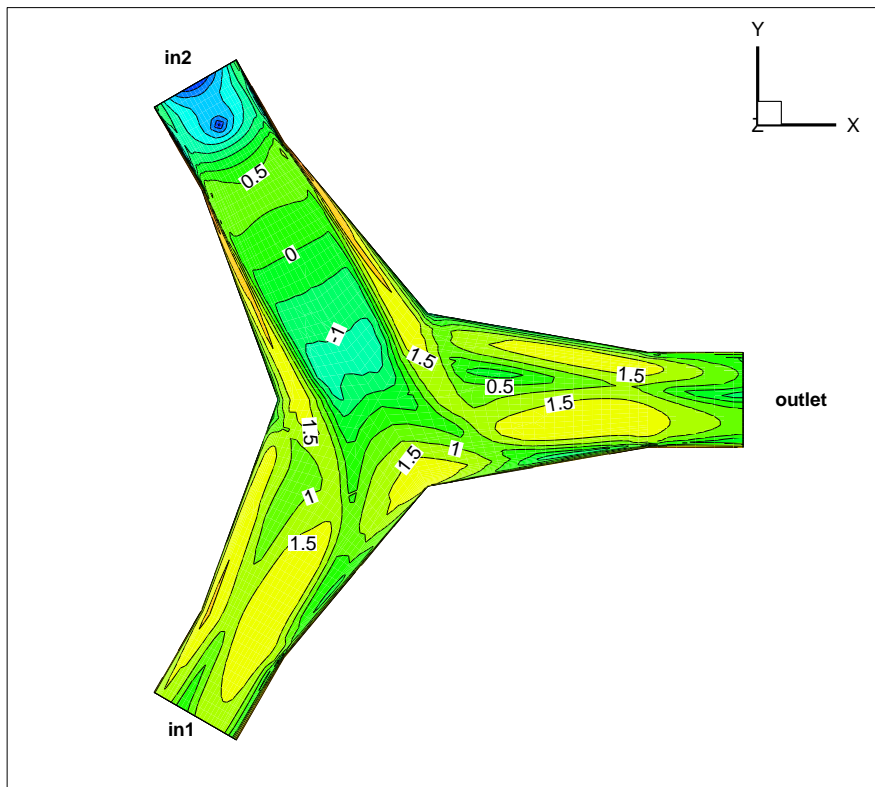
Όσον αφορά τις απώλειες αυτές αναμένεται να είναι σίγουρα μεγαλύτερες από το προηγούμενο σενάριο αφού έχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες να αναπτύσσονται σε αυτό το σενάριο.



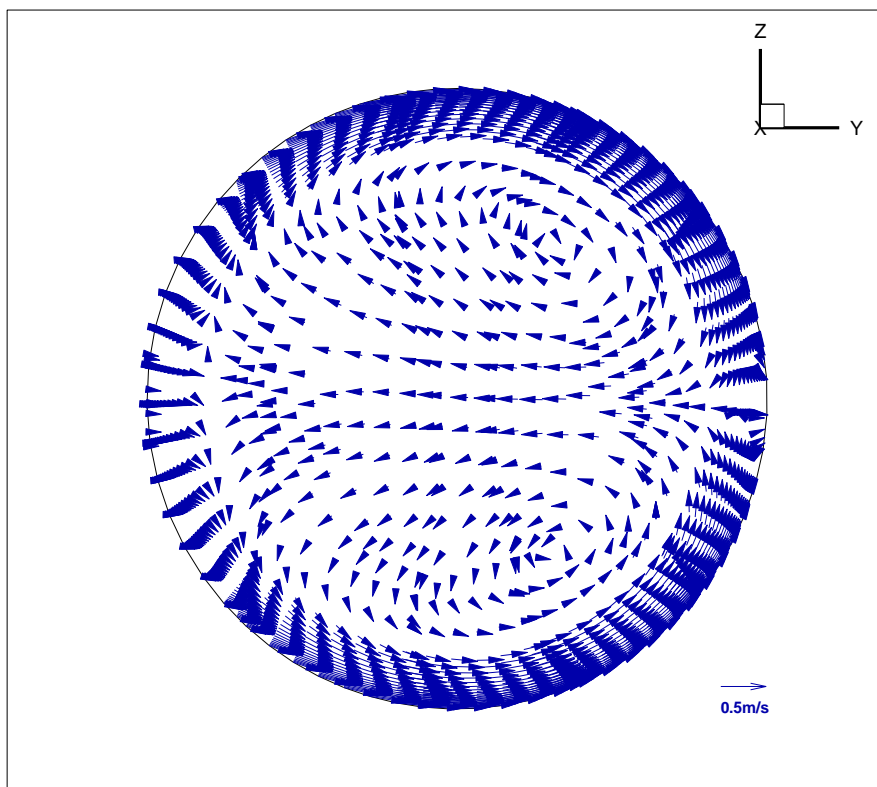
Εικόνα 6.59 Διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$.



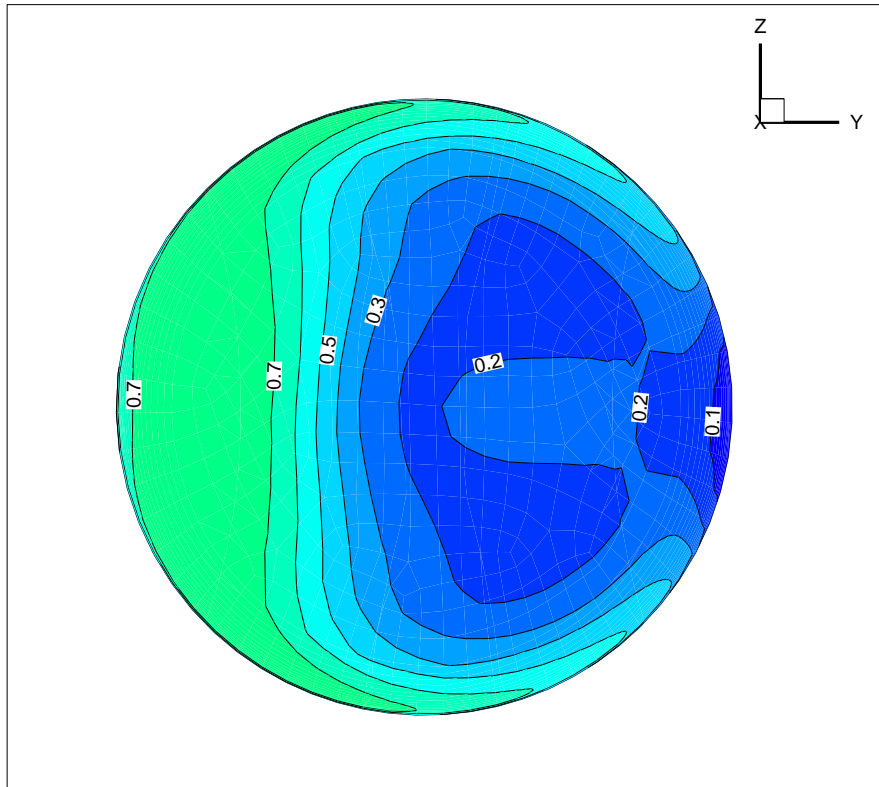
Εικόνα 6.60 Ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$.



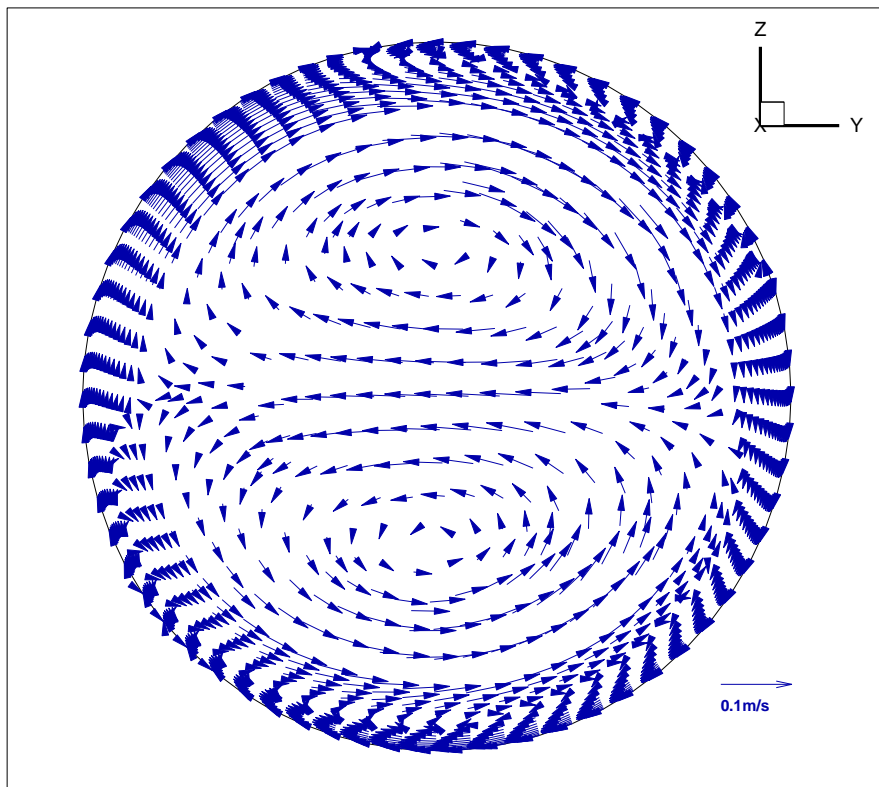
Εικόνα 6.61 Ισοϋψείς της Φ στο επίπεδο $z=0$



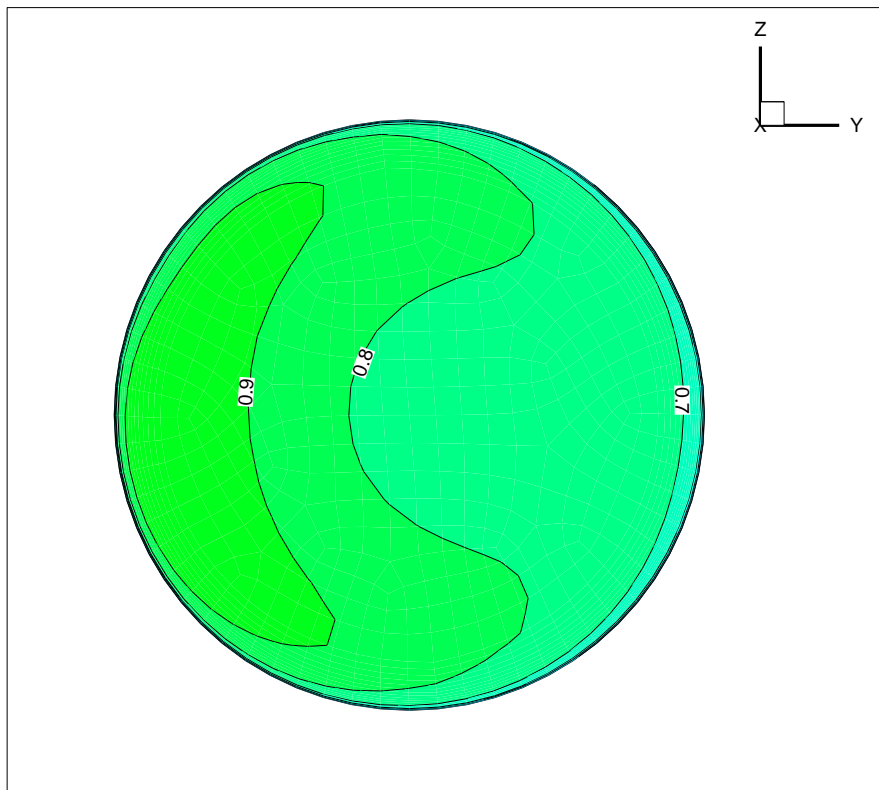
Εικόνα 6.62 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στο επίπεδο $x=1$



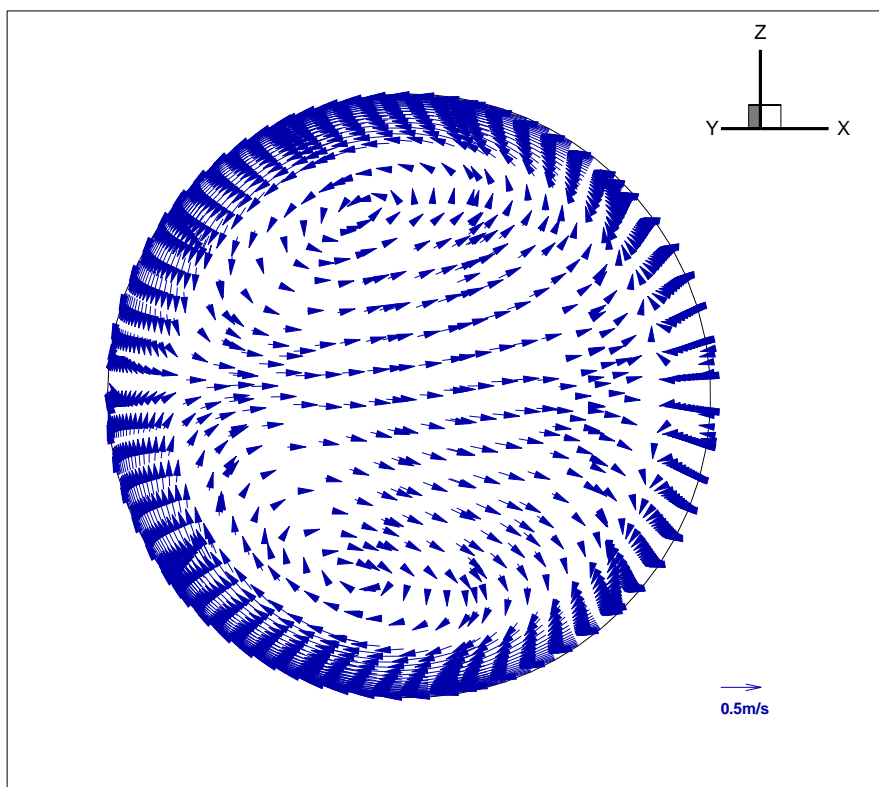
Εικόνα 6.63 Ισοταχείς στην επιφάνεια $x=1$



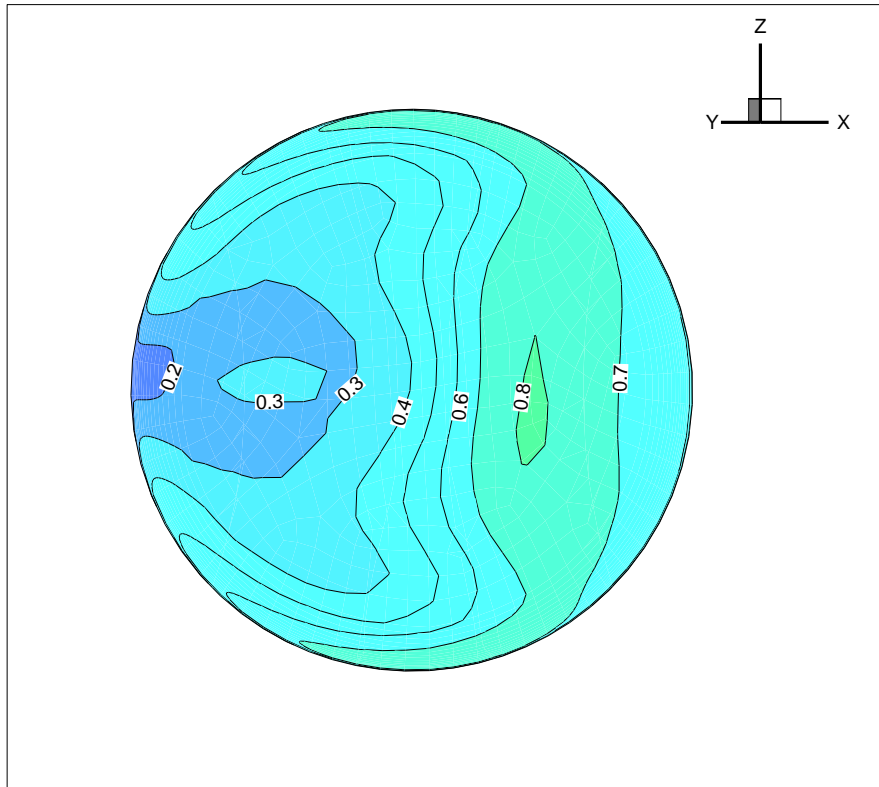
Εικόνα 6.64 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στη επιφάνεια outlet.



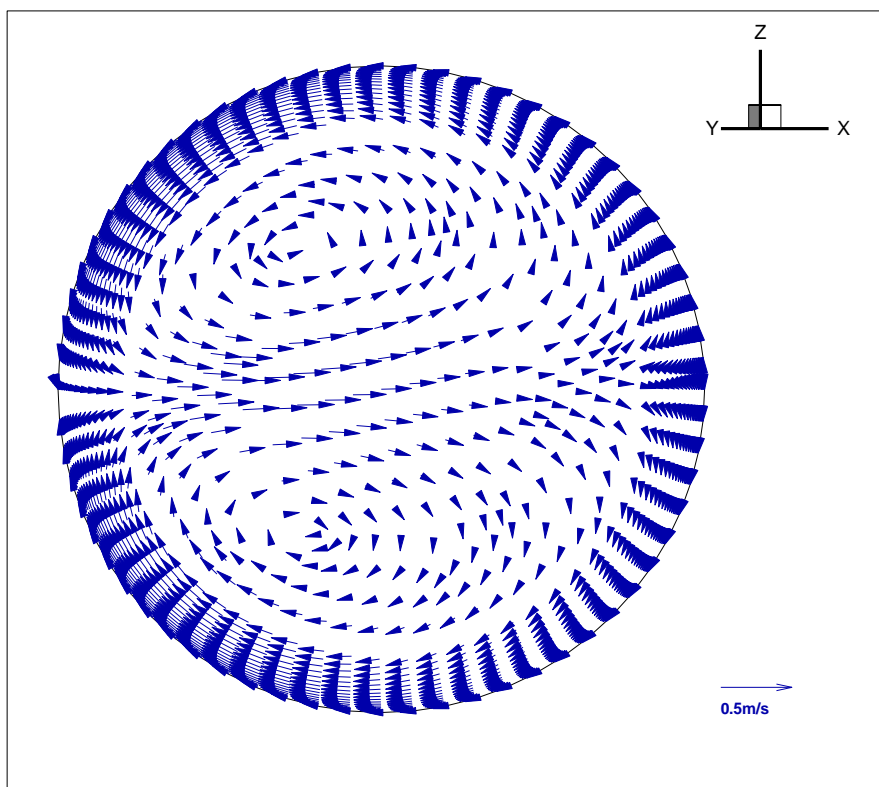
Εικόνα 6.65 Ισοταχείς στην έξοδο outlet



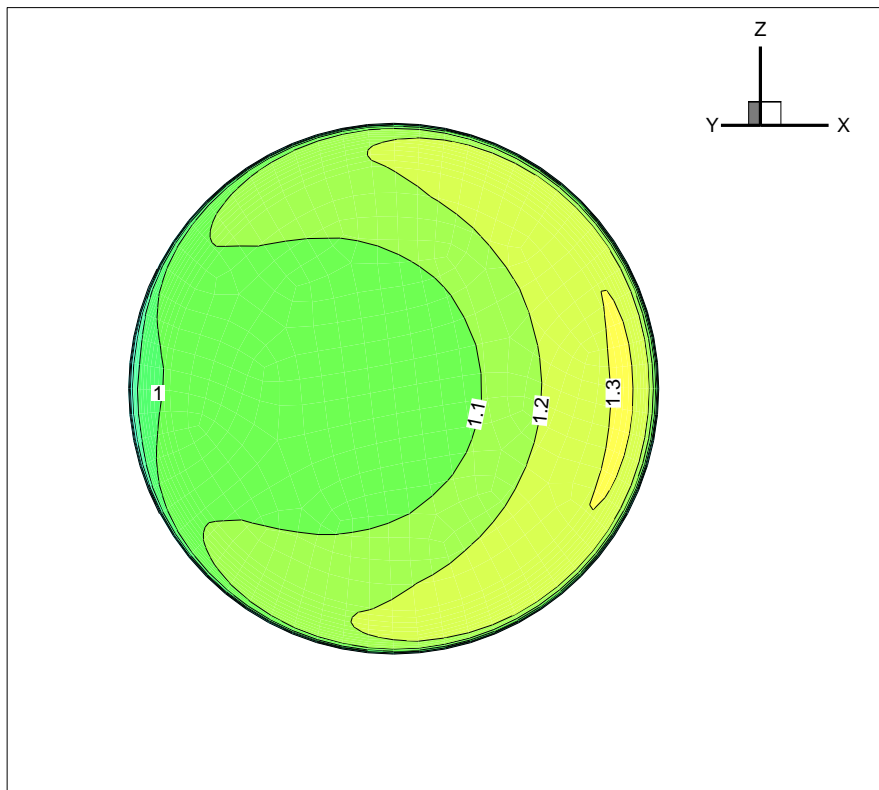
Εικόνα 6.66 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στο επίπεδο
a



Εικόνα 6.67 Ισοταχείς στην επιφάνεια α

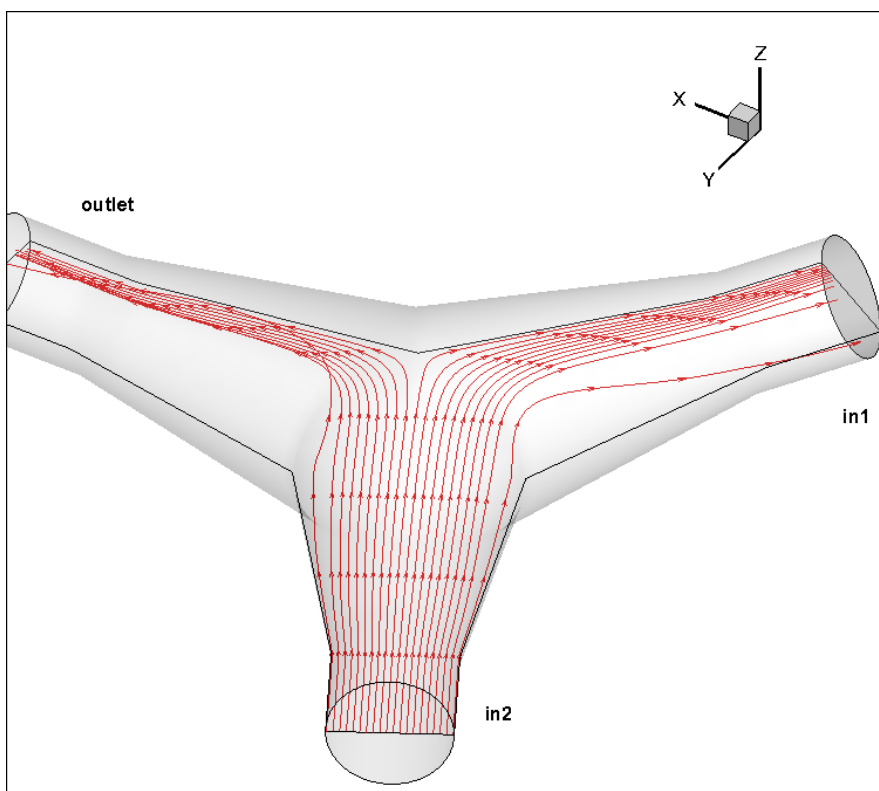


Εικόνα 6.68 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στη επιφάνεια in1.

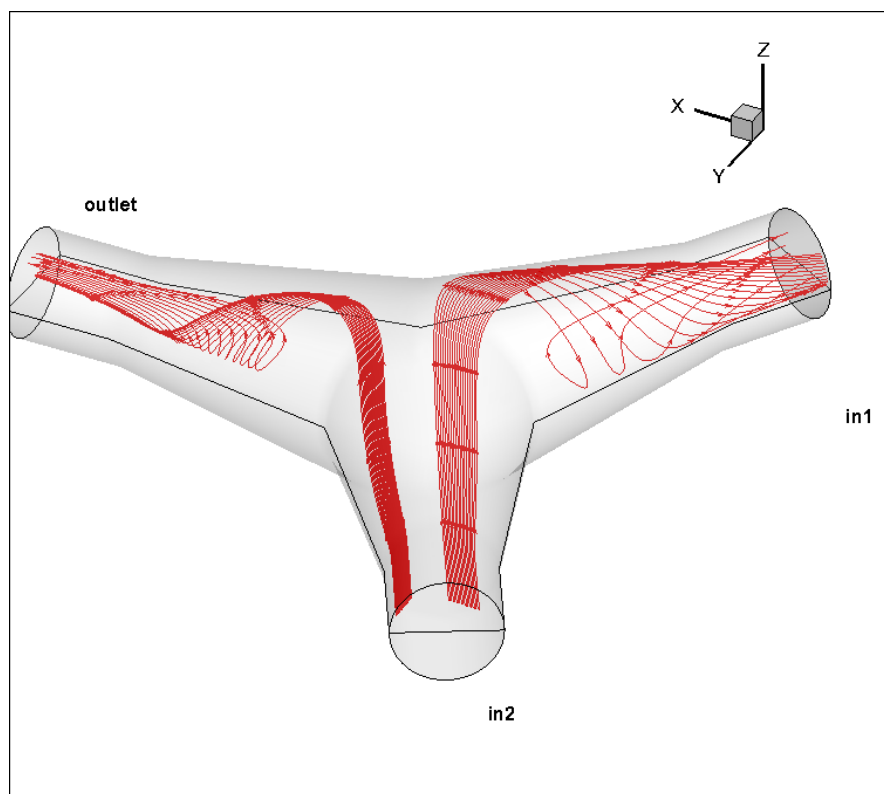


Εικόνα 6.69 Ισοταχείς στην επιφάνεια in1

Στις εικόνες 6.70 και 6.71 παρατηρούμε πως διαχωρίζεται η ροή στο επίπεδο $z=0$ και πως δημιουργείται παράλληλη ροή στον αγωγό.



Εικόνα 6.70 Γραμμές ροής.



Εικόνα 6.71 Γραμμές ροής.

6.2.9 Σενάριο 9ο

Το τελευταίο σενάριο που είναι παρόμοιο με το σενάριο 8. Το μόνο που αλλάζει είναι η παροχή των αντλιών που είναι $Q_P=0.85Q_{Pmax}=0.85*3.04=2.584$ m³/s. Η παροχή για την παραγωγή ισχύος παραμένει η ίδια και ίση με $Q_T=0.15Q_{Tmax}=0.642$ m³/s. Η μέγιστη μέση ταχύτητα παρατηρείται στην είσοδο του συστήματος και είναι $v=Q_P/A=3.292$ m/s. Για την επίλυση της ροής θα χρησιμοποιήσουμε το πλέγμα b2 με τις εξής οριακές συνθήκες:

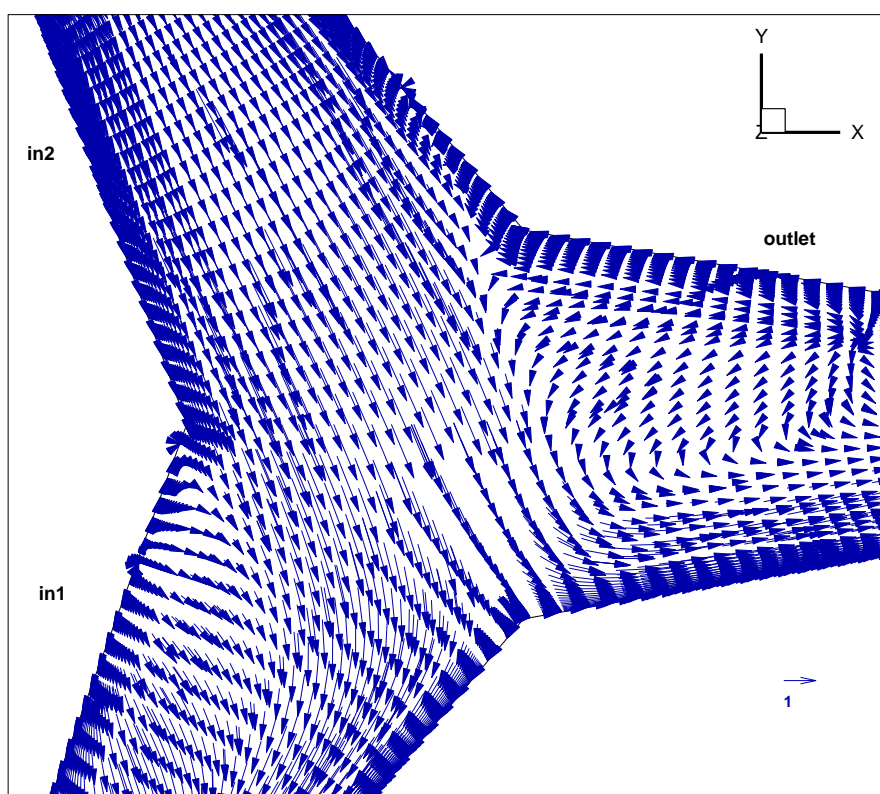
- Επιφάνεια in1. Έξοδος 1 του συστήματος με Flow rate weighting ίσο με $(Q_P-Q_T)/Q_P=2.65/2.584=0.752$
- Επιφάνεια in2. Είσοδος του συστήματος με ταχύτητα ρευστού $v=Q_P/A=3.292$ m/s. Υδραυλική διάμετρος $D=1$ m, ο αριθμός $Re=3276245$ και η ένταση της τύρβης $TI=2.453\%$.
- Επιφάνεια outlet. Έξοδος 2 του συστήματος με Flow rate weighting ίσο με $(1-0.752)=0.248$.

Στις εικόνες 6.72-6.74 βλέπουμε και εδώ τον διαχωρισμό της ροής στο επίπεδο $z=0$. Η διαφορά με το προηγούμενο σενάριο είναι ότι αναπτύσσονται μεγαλύτερες ταχύτητες στην έξοδο in1 όπως είναι αναμενόμενο μιας και

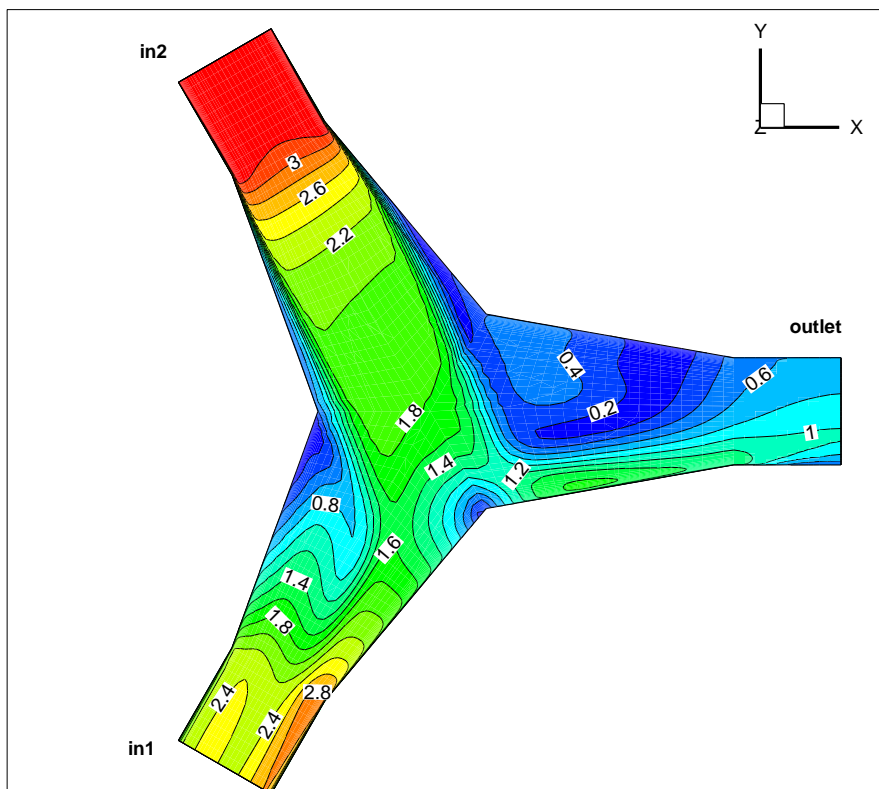
έχουμε μεγαλύτερη παροχή προς την άνω δεξαμενή. Επίσης το τμήμα του αγωγού όπου έχουμε παράλληλη ροή είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο και επιπρόσθετα έχουμε και αντίστροφη ροή σε ένα τμήμα της γεωμετρίας.

Στις εικόνες 6.75-6.82 παρατηρούμε τα προβαλλόμενα διανύσματα ταχύτητας και τις ισοταχείς για τις δύο εξόδους, in1 και outlet, και για τις επιφάνειες a και $x=1$. Παρατηρούμε ότι οι στροβιλισμοί είναι πιο έντονοι σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο και αυτό οφείλεται στην αύξηση της διακινούμενης παροχής ιδιαίτερα προς την έξοδο in1. Επίσης βλέπουμε ότι η κατανομή των ταχυτήτων στην έξοδο in1 είναι πιο ανομοιόμορφη σε σχέση πάντα με το προηγούμενο σενάριο.

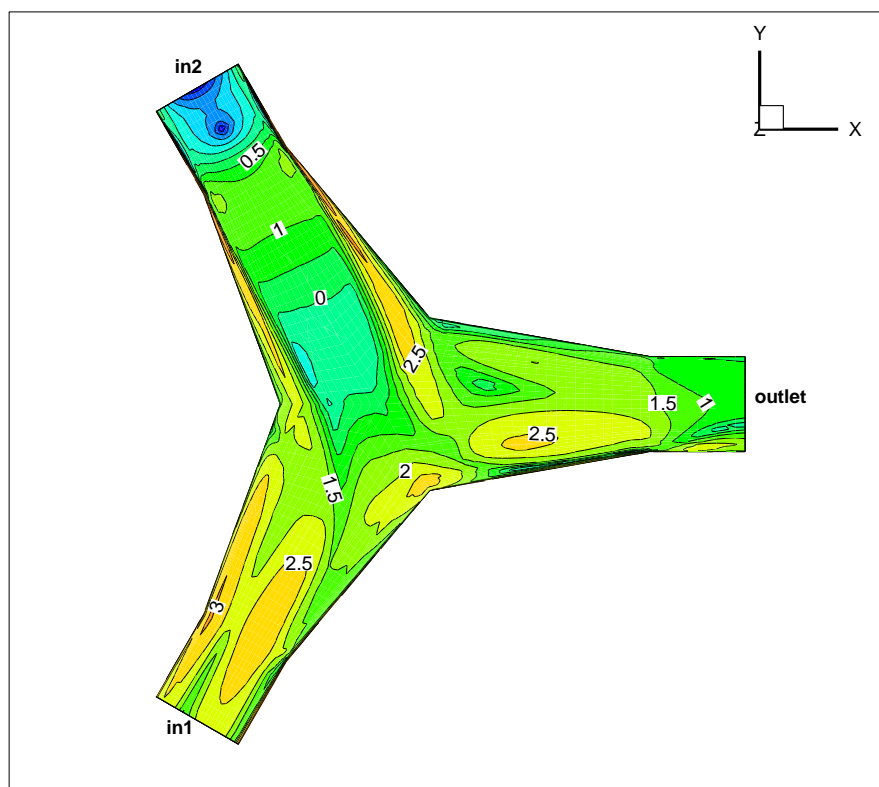
Οι απώλειες αναμένονται να είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο λόγω των μεγαλύτερων ταχυτήτων που αναπτύσσονται εδώ αλλά και λόγω της μεγαλύτερης έντασης των στροβιλισμών. Αυτό φαίνεται και από τις τιμές της Φ που είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο



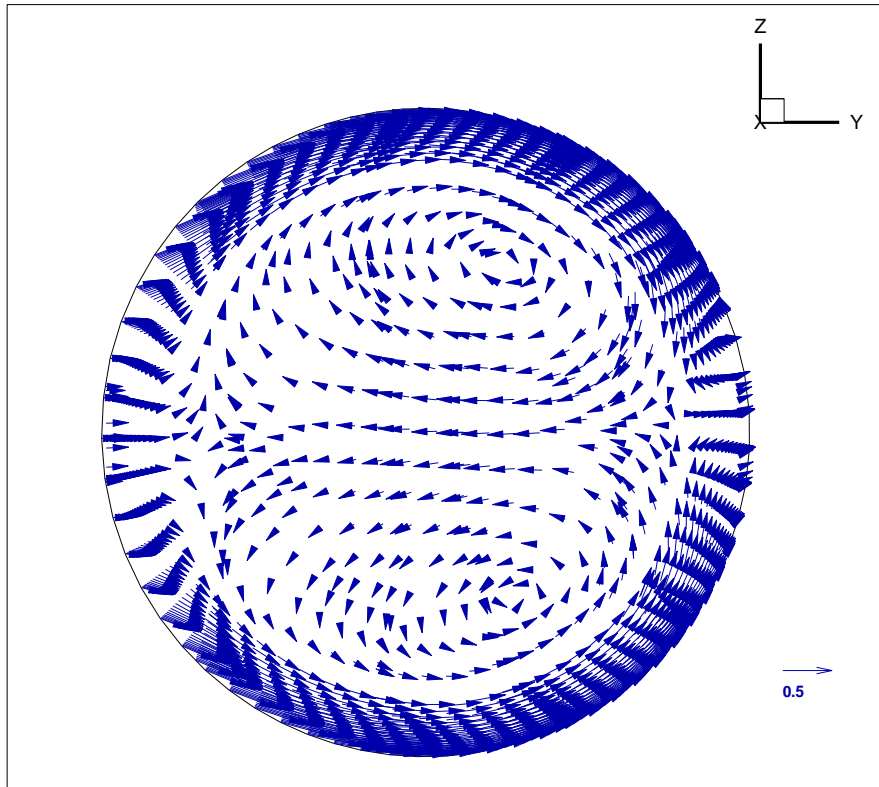
Εικόνα 6.72 Διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$.



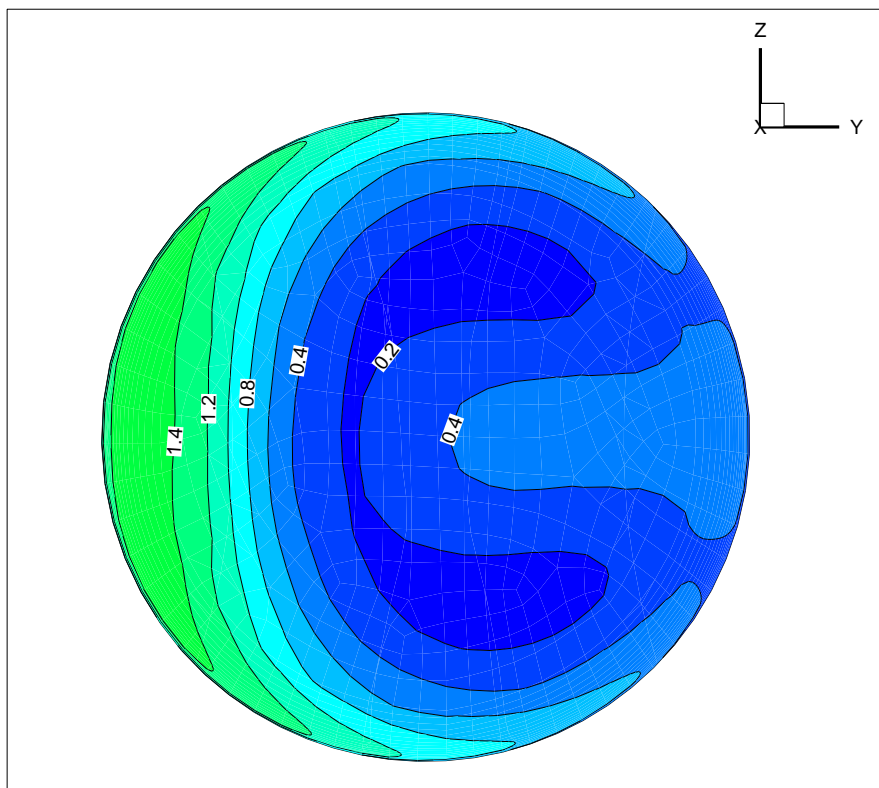
Εικόνα 6.73 Ισοταχείς καμπύλες στο επίπεδο $z=0$.



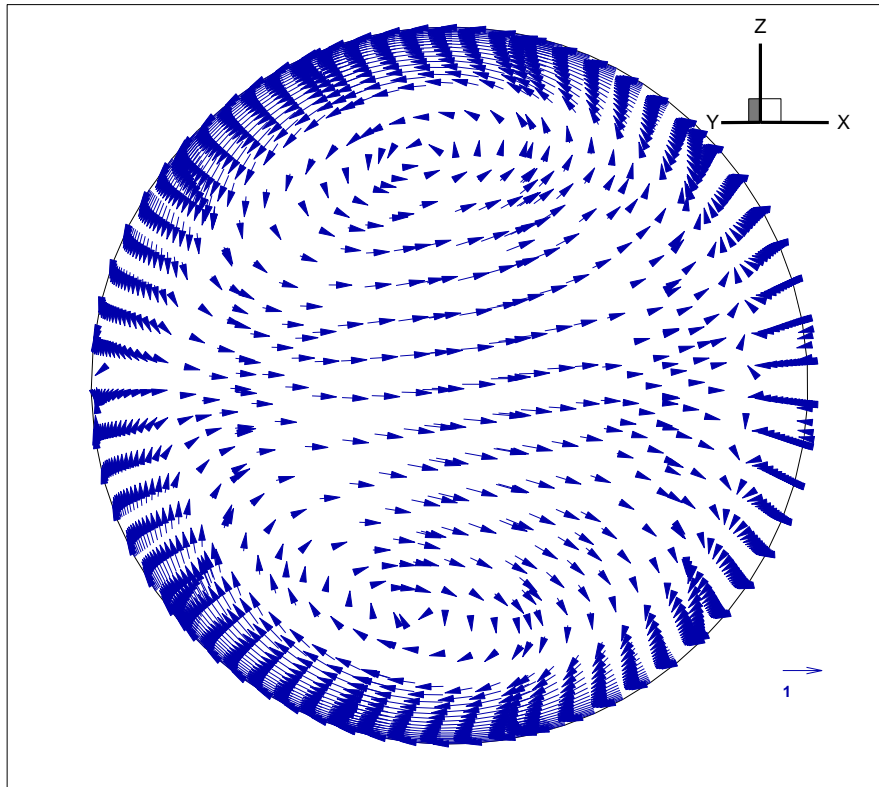
Εικόνα 6.74 Ισοϋψείς της Φ στο επίπεδο $z=0$



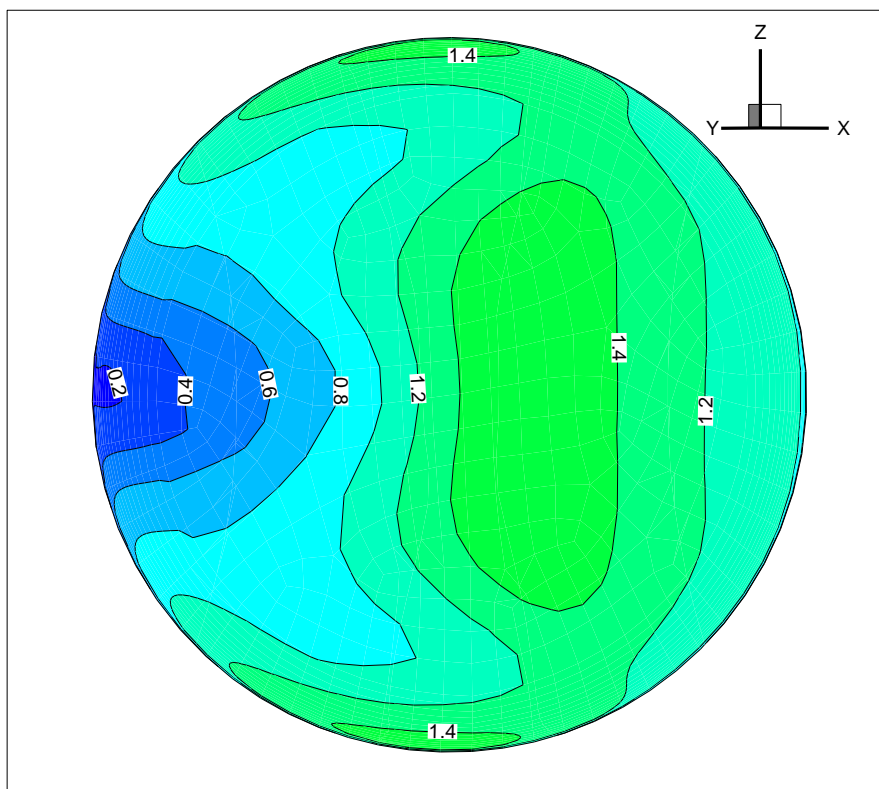
Εικόνα 6.75 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στο επίπεδο $x=1$



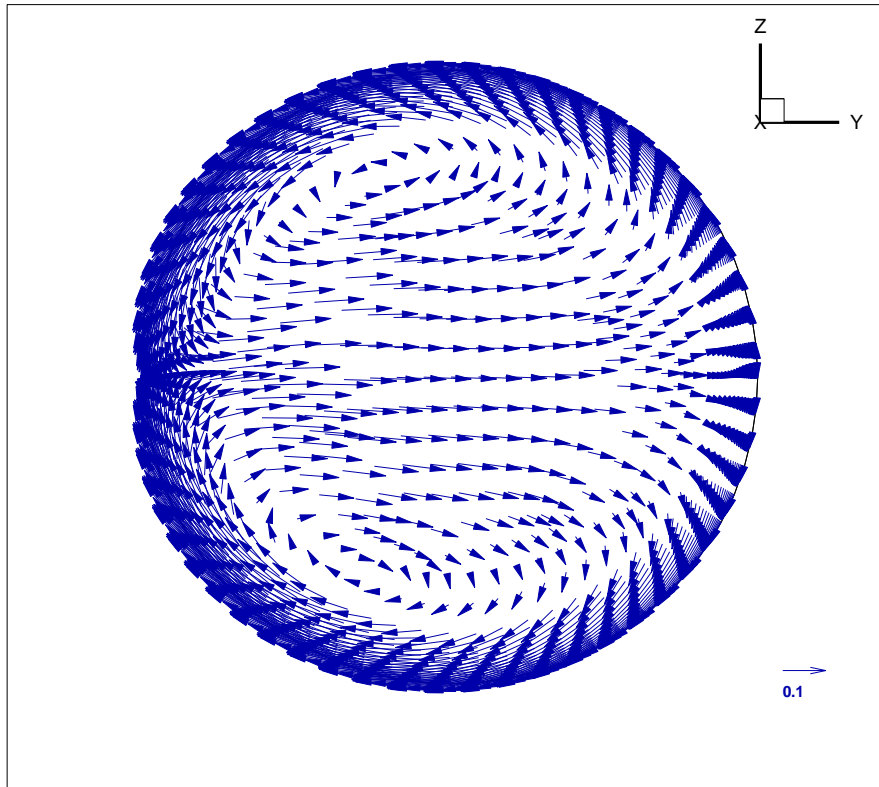
Εικόνα 6.76 Ισοταχείς στην επιφάνεια in_1



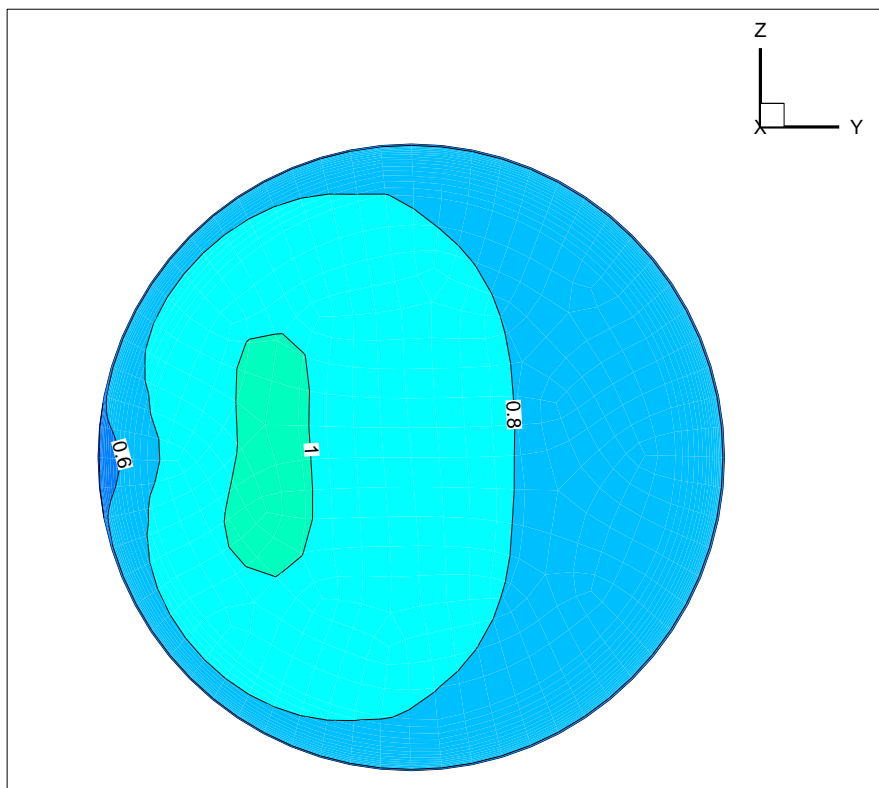
Εικόνα 6.77 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στο επίπεδο $x=a$



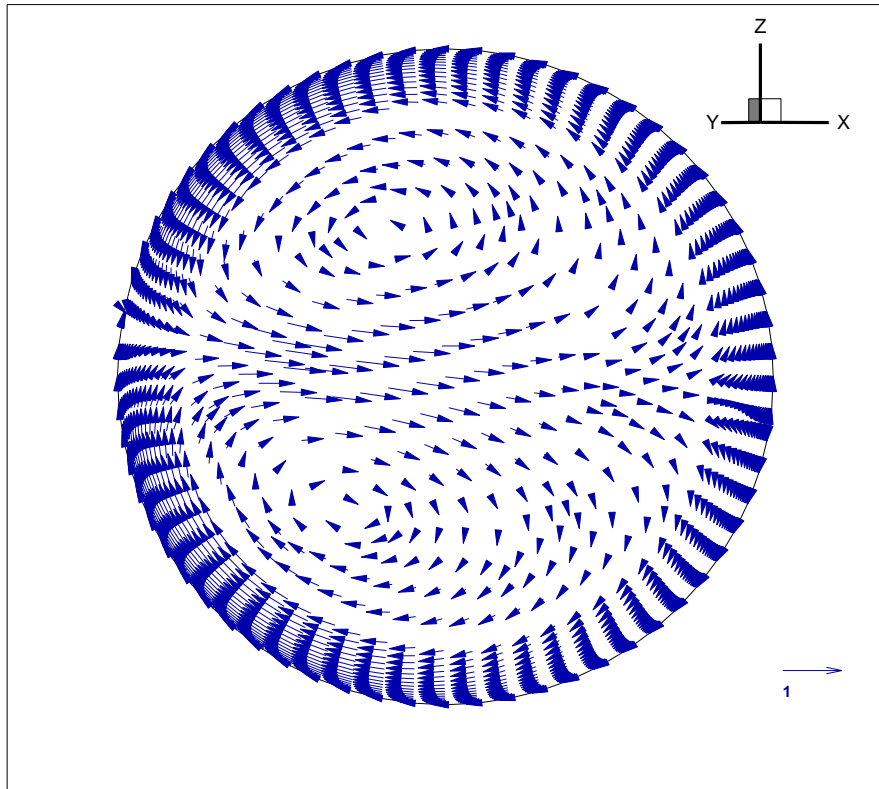
Εικόνα 6.78 Ισοταχείς στην επιφάνεια $x=a$



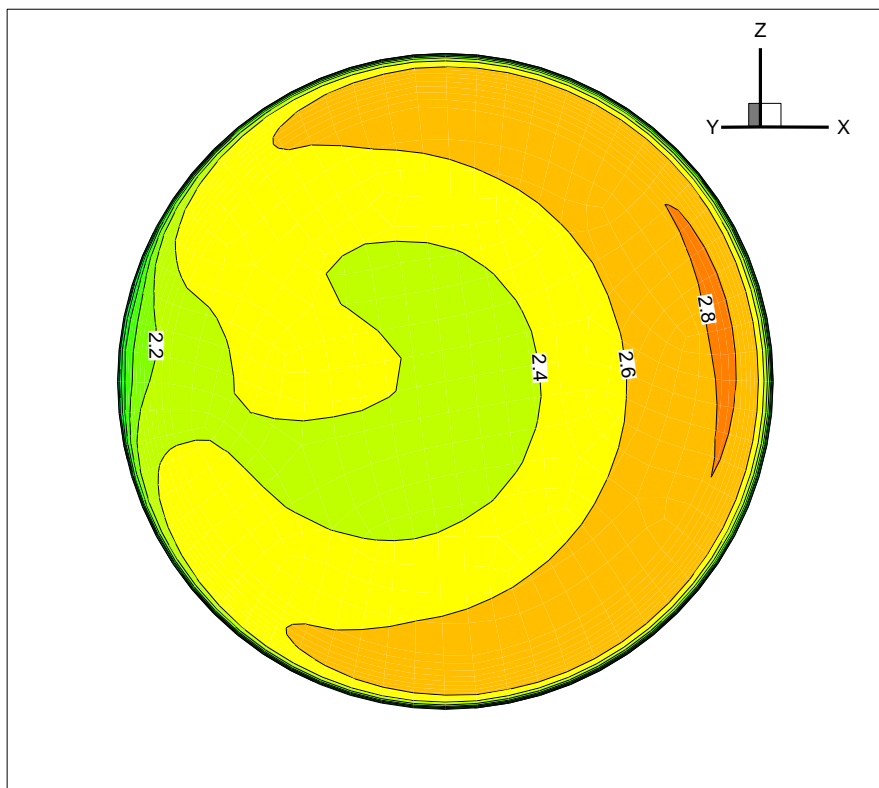
Εικόνα 6.79 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στη επιφάνεια outlet.



Εικόνα 6.80 Ισοταχείς στην επιφάνεια outlet



Εικόνα 6.81 Διανύσματα ταχύτητας που έχουν προβληθεί στη επιφάνεια in1



Εικόνα 6.82 Ισοταχείς στην έξοδο in1

6.3 Υπολογισμός ενεργειακών απωλειών

Για τον υπολογισμό των ενεργειακών απωλειών θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση της ενέργειας. Η συνολική ενέργεια στην είσοδο του συστήματος ισούται με την συνολική ενέργεια στην έξοδο συν τις απώλειες ενέργειας. Δηλαδή $E_{in}=E_{out} + E_{loss}$

Επομένως $E_{loss} = E_{in} - E_{out}$.

Η συνολική ενέργεια στην είσοδο του συστήματος ανά μονάδα χρόνου είναι το έργο της πίεσης στην μονάδα του χρόνου και η κινητική ενέργεια = $P_{in}Q_{in} + \rho v_{in}^2 Q_{in}/2 = P_{tin}Q_{in}$

Η συνολική ενέργεια στην έξοδο του συστήματος ανά μονάδα χρόνου είναι το έργο της πίεσης στην μονάδα του χρόνου και η κινητική ενέργεια = $P_{out}Q_{out} + \rho v_{out}^2 Q_{out}/2 = P_{tout}Q_{out}$

Όπου P_{in} και P_{out} οι στατικές πιέσεις σε είσοδο και έξοδο αντίστοιχα, Q_{in} Q_{out} οι παροχές σε m³/s και P_{tin} P_{tout} οι ολικές πιέσεις.

Για κάθε σενάριο υπολογίζουμε την ολική πίεση στις επιφάνειες int1 , int2 και out. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω του Fluent από το μενού Report/Surface Integrals/Mass-Weighted Average. Το Fluent χρησιμοποιεί την σχέση

$$\frac{\int P\rho|\vec{u} \cdot d\vec{A}|}{\int \rho|\vec{u} \cdot d\vec{A}|} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i\rho_i|\vec{u}_i \cdot \vec{A}_i|}{\sum_{i=1}^n \rho_i|\vec{u}_i \cdot \vec{A}_i|}$$

Όπου P_i , ρ_i , u_i και A_i οι τιμές της ολικής πίεσης, της πυκνότητας, της ταχύτητας και της επιφάνειας κάθε κελιού i .

Σενάριο 1^ο

Επιφάνεια	Ολική πίεση P (Pascal)	Παροχή Q (m ³ /s)
Int1	100,17	0,642
Int2	24,32	0
Out	31,98	0,642

Στο σενάριο αυτό έχουμε μία είσοδο και μία έξοδο.

Σύμφωνα με την εξίσωση έχουμε: $E_{loss} = Q_{int1}P_{int1} + Q_{int2}P_{int2} - Q_{out}P_{out} = 100,17 \cdot 0,642 + 24,32 \cdot 0 - 31,98 \cdot 0,642 = 43,78 \text{ J/s}$

Σενάριο 2^ο

Επιφάνεια	Ολική πίεση P (Pascal)	Παροχή Q (m3/s)
Int1	1135,21	2,14
Int2	274,95	0
Out	390,31	2,14

Στο σενάριο αυτό έχουμε μία είσοδο και μία έξοδο.

Σύμφωνα με την εξίσωση έχουμε: $E_{loss} = Q_{int1}P_{int1} + Q_{int2}P_{int2} - Q_{out}P_{out} = 1594,09 \text{ J/s}$

Σενάριο 3^ο

Επιφάνεια	Ολική πίεση P (Pascal)	Παροχή Q (m3/s)
Int1	3298,62	3,638
Int2	806,52	0
Out	1138,29	3,638

Στο σενάριο αυτό έχουμε μία είσοδο και μία έξοδο.

Σύμφωνα με την εξίσωση έχουμε: $E_{loss} = Q_{int1}P_{int1} + Q_{int2}P_{int2} - Q_{out}P_{out} = 7859,28 \text{ J/s}$

Σενάριο 4^ο

Επιφάνεια	Ολική πίεση P (Pascal)	Παροχή Q (m3/s)
Int1	17,3333	0,456
Int2	49,55	0,456
Out	11,19	0

Στο σενάριο αυτό έχουμε μία είσοδο και μία έξοδο.

Σύμφωνα με την εξίσωση έχουμε: $E_{loss} = Q_{int2}P_{int2} + Q_{out}P_{out} - Q_{int1}P_{int1} = 14,69 \text{ J/s}$

Σενάριο 5^ο

Επιφάνεια	Ολική πίεση P (Pascal)	Παροχή Q (m ³ /s)
Int1	181,63	1,52
Int2	550,49	1,52
Out	130,87	0

Στο σενάριο αυτό έχουμε μία είσοδο και μία έξοδο.

Σύμφωνα με την εξίσωση έχουμε: $E_{loss} = Q_{int2}P_{int2} + Q_{out}P_{out} - Q_{int1}P_{int1} = 560,67 J/s$

Σενάριο 6^ο

Επιφάνεια	Ολική πίεση P (Pascal)	Παροχή Q (m ³ /s)
Int1	531,84	2,584
Int2	1603,01	2,584
Out	382,65	0

Στο σενάριο αυτό έχουμε μία είσοδο και μία έξοδο.

Σύμφωνα με την εξίσωση έχουμε: $E_{loss} = Q_{int2}P_{int2} + Q_{out}P_{out} - Q_{int1}P_{int1} = 2767,90 J/s$

Σενάριο 7^ο

Επιφάνεια	Ολική πίεση P (Pascal)	Παροχή Q (m ³ /s)
Int1	13,44	0,186
Int2	55,04	0,456
Out	8,74	0,642

Στο σενάριο αυτό έχουμε 2 εισόδους και μία έξοδο.

Σύμφωνα με την εξίσωση έχουμε: $E_{loss} = Q_{int1}P_{int1} + Q_{int2}P_{int2} - Q_{out}P_{out} = 21,99 J/s$

Σενάριο 8^ο

Επιφάνεια	Ολική πίεση P (Pascal)	Παροχή Q (m ³ /s)
Int1	134,76	0,878
Int2	411,8	1,52
Out	132,1	0,642

Στο σενάριο αυτό έχουμε μία είσοδο και δύο εξόδους.

Σύμφωνα με την εξίσωση έχουμε: $E_{loss} = Q_{int2}P_{int2} - Q_{int1}P_{int1} - Q_{out}P_{out} = 422.81 J/s$

Σενάριο 9^ο

Επιφάνεια	Ολική πίεση P (Pascal)	Παροχή Q (m ³ /s)
Int1	433,34	1,942
Int2	1323,02	2,584
Out	434,34	0,642

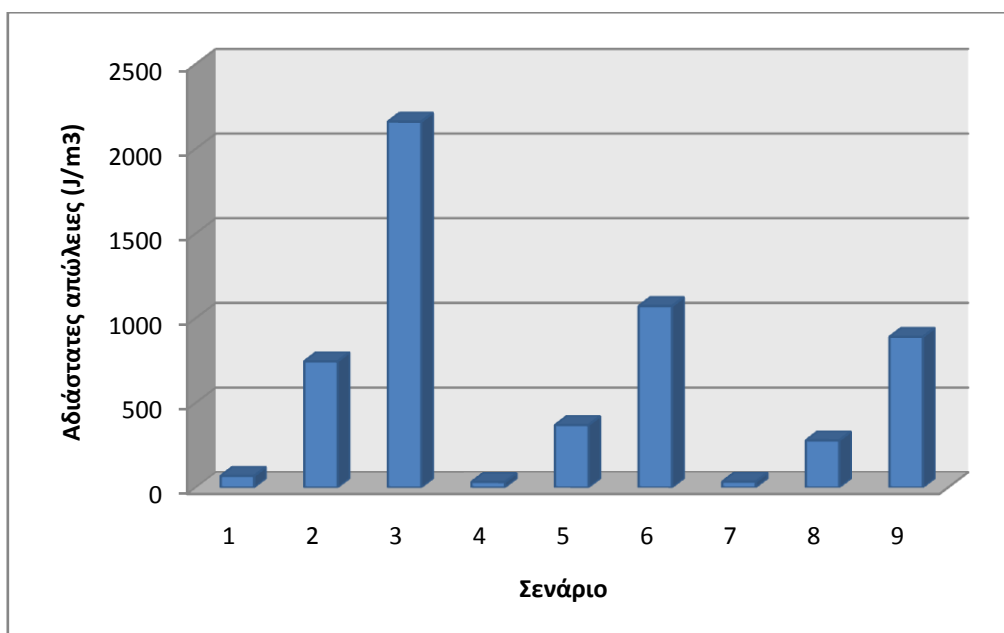
Στο σενάριο αυτό έχουμε μία είσοδο και δύο εξόδους.

Σύμφωνα με την εξίσωση έχουμε: $E_{loss} = Q_{int2}P_{int2} - Q_{int1}P_{int1} - Q_{out}P_{out} = 2298,29 J/s$

Για να βρούμε τις συνολικές απώλειες κατά την διάρκεια ενός έτους πρέπει αν αναλογιστούμε και το ποσοστό για το οποίο εφαρμόζονται σε αυτό. Ένα έτος αποτελείται από $365 \cdot 24 \cdot 3600 = 31536000$ sec. Επομένως σύμφωνα με τον πίνακα 6.1 έχουμε:

Σενάριο	Ποσοστό ετήσιας λειτουργίας (%)	Απώλειες (J/s)	Ετήσιες απώλειες (J)
1	8	43,78	110446590
2	11	1594,09	5529820571
3	7	7859,28	17349518978
4	5	14,69	23164477
5	9	560,67	1591308074
6	15	2767,90	13093289676
7	7	21,99	48536742
8	15	422,81	2000053423
9	8	2298,29	5798312701
Σύνολο (GJ)			45,54

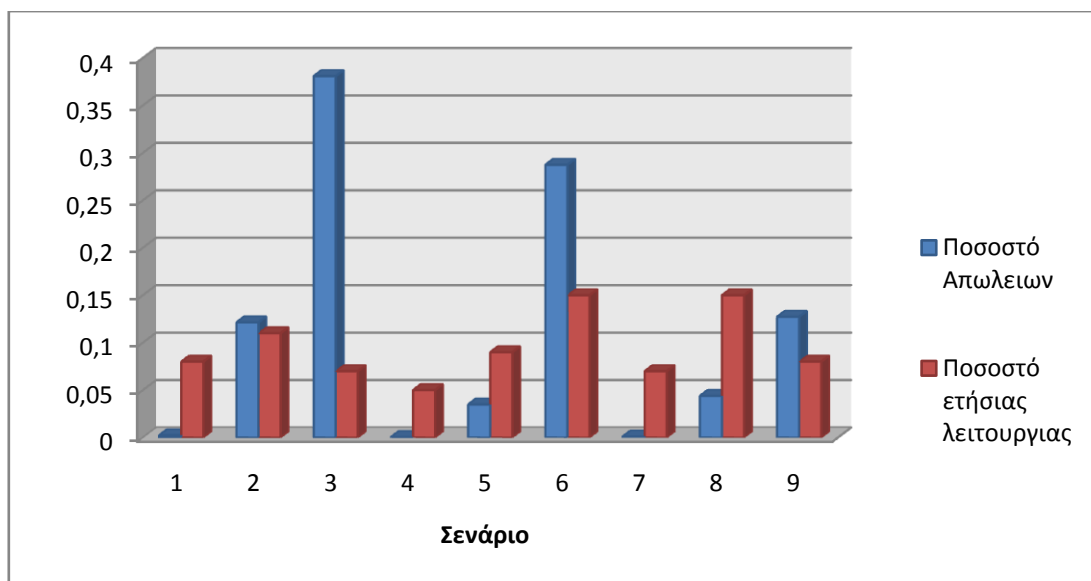
Πίνακας 6.3



Διάγραμμα 6.1 Αδιάσπαστες απώλειες ανά σενάριο

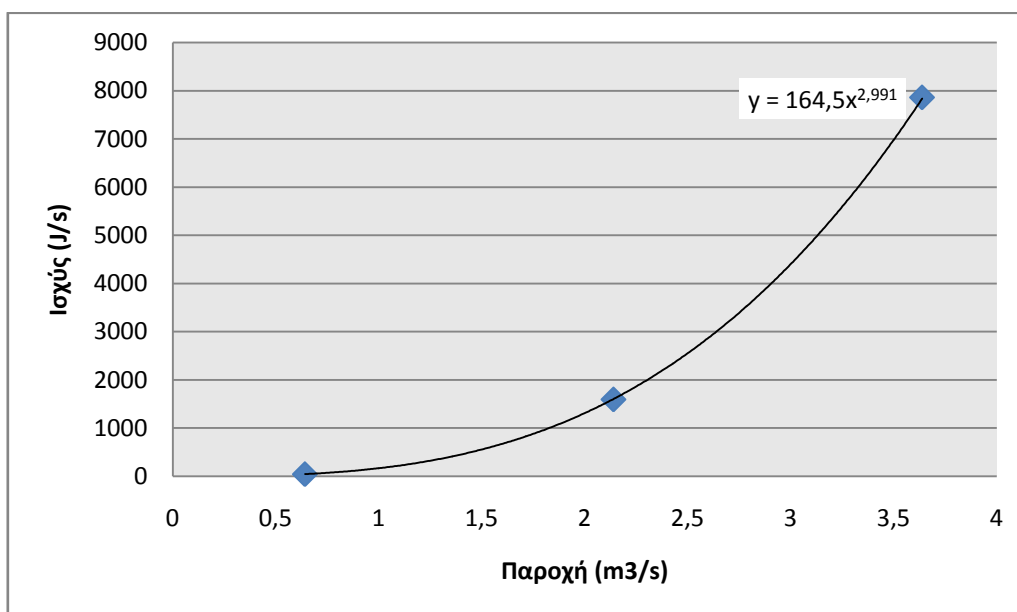
Σενάριο	Ποσοστό στις ετήσιες συνολικές απώλειες (%)
1	0,2
2	12,14
3	38,09
4	0,05
5	3,49
6	28,75
7	0,11
8	4,39
9	12,73

Πίνακας 6.4



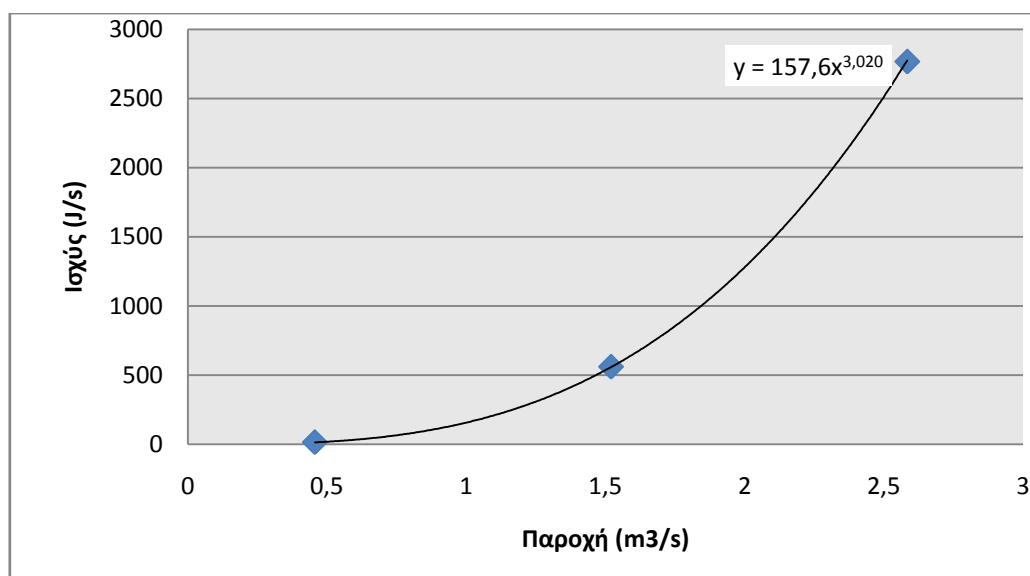
Διάγραμμα 6.2 Ποσοστό ετήσιων απωλειών ανά σενάριο

Παρακάτω βλέπουμε πως μεταβάλλονται οι απώλειες ανά μονάδα χρόνου σε σχέση με την παροχή για τα σενάρια 1 , 2 , 3.



Διάγραμμα 6.3 Απώλειες ανά μονάδα χρόνου ανά παροχή

Ομοίως και για τα σενάρια 4 , 5 , 6.



Διάγραμμα 6.4 Απώλειες ανά μονάδα χρόνου ανά παροχή

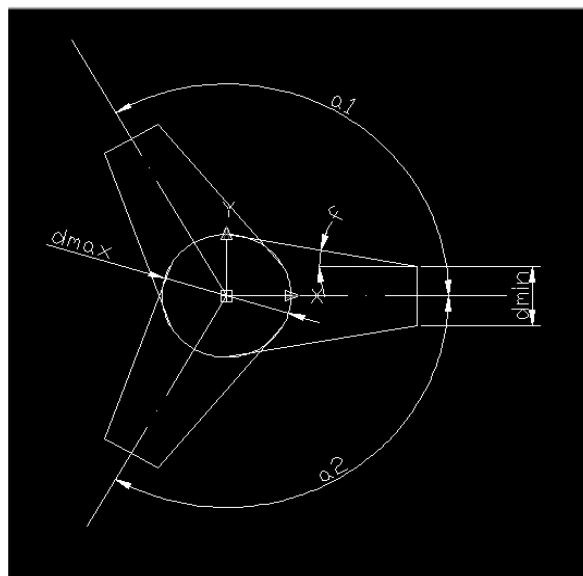
Από την θεωρία γνωρίζουμε ότι οι απώλειες πίεσης είναι ανάλογες του τετραγώνου της παροχής. Δηλαδή $\delta P \sim Q^2$. Επομένως οι απώλειες ισχύος είναι $\delta N = Q \delta P \sim Q^3$. Άρα όπως αναμενόταν παρατηρούμε και στα διαγράμματα 6.3 και 6.4 ότι απώλειες ανά μονάδα χρόνου είναι ανάλογες του κύβου της παροχής.

Σύμφωνα με τον πίνακα 6.2 τις μεγαλύτερες ετήσιες απώλειες σε Joule έχουν τα σενάρια 2, 3, 6 και 9 τα οποία σύμφωνα με το διάγραμμα 6.2 έχουν συνεισφορά στις συνολικές ετήσιες απώλειες άνω του 10% το κάθε ένα. Αντίθετα τα σενάρια με τις μικρότερες απώλειες είναι τα 1, 4 και 7. Την μεγαλύτερη συνεισφορά έχει το σενάριο 3 με 38% αν και το ποσοστό ετήσιας λειτουργίας του είναι αρκετά μικρό (7%). Αυτό μας δείχνει ότι για το σενάριο αυτό έχουμε τις μεγαλύτερες απώλειες. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο διάγραμμα 6.1 όπου παρουσιάζονται οι αδιάστατες απώλειες (Απώλειες (J/s) / Παροχή εισόδου (m³/s)). Σύμφωνα με αυτό τις μεγαλύτερες απώλειες ανά μονάδα παροχής έχουν τα σενάρια 3 και 6 με αυτές του σεναρίου 3 να είναι περίπου διπλάσιες από αυτές του 6. Αυτό συμβαίνει διότι στα σενάρια αυτά αναπτύσσονται μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με τα υπόλοιπα και επίσης επειδή για τα σενάρια αυτά υπάρχει ένα μεγάλο τμήμα της γεωμετρίας το οποίο μένει ανενεργό, δηλαδή δεν υπάρχει ροή ρευστού παρά μόνο αναπτύσσονται στροβιλισμοί. Επομένως για να στροβιλιστεί αυτή η μάζα του ρευστού που είναι αρκετά μεγάλη απαιτείται κάποια ενέργεια, η οποία αντικατοπτρίζεται στις απώλειες. Αυτό φαίνεται καλύτερα και στις εικόνες με τις ισοϋψείς της Φ .

Κεφάλαιο 7^ο -Παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης των γεωμετρικών παραμέτρων σχεδίασης της διάταξης στις συνολικές απώλειες.

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης των γεωμετρικών παραμέτρων σχεδίασης της διάταξης στις συνολικές ενεργειακές απώλειες. Οι παράμετροι της γεωμετρίας με τις οποίες θα ασχοληθούμε είναι η διάμετρος d_{max} , η γωνία φ και κατά κύριο λόγο οι γωνίες α_1 και α_2 . Για κάθε περίπτωση που θα αναλυθεί παρακάτω θα ακολουθήσουμε την διαδικασία του κεφαλαίου 6. Δηλαδή θα επιλύσουμε στο Fluent και τα εννέα σενάρια με τις ίδιες οριακές συνθήκες και θα υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες για ετήσια λειτουργία. Το μόνο που αλλάζει θα είναι η γεωμετρία δηλαδή το πλέγμα.



Εικόνα 7.1 Γεωμετρία διάταξης

7.2 Παραμετρική διερεύνηση με παράμετρο την διάμετρο d_{max} .

Επιλέγουμε να κρατήσουμε σταθερές τις τιμές στις γωνίες α_1, α_2 και φ και την διάμετρο d_{min} και να αλλάζουμε την διάμετρο d_{max} . Αρχικά επιλέγεται η γεωμετρία που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 6 και με βάση αυτήν θα αναλυθούν δύο περιπτώσεις, μία με d_{max} μεγαλύτερη από αυτήν της γεωμετρίας του προηγούμενου κεφαλαίου και μία μικρότερη. Στο προηγούμενο κεφάλαιο $d_{max}=2m$, επομένως οι δυο περιπτώσεις θα είναι για $d_{max}=1,5m$ και $d_{max}=2,5m$.

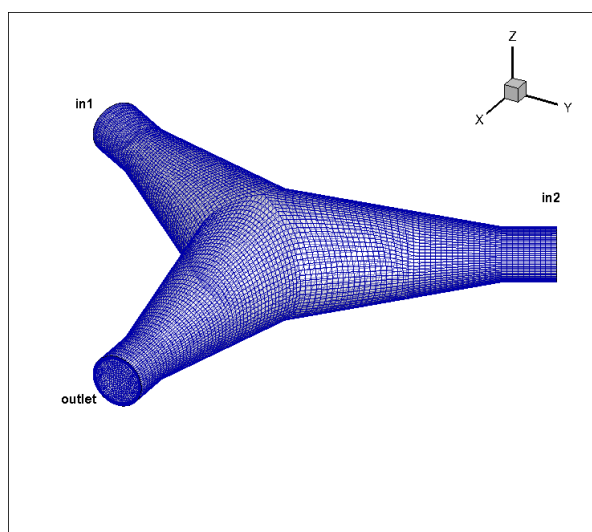
7.2.1 Περίπτωση με $d_{max}=2.5m$

Στην περίπτωση αυτή θα διατηρήσουμε σταθερές τις γωνίες $\alpha_1, \alpha_2, \varphi$ και η μόνη παράμετρος θα είναι η διάμετρος d_{max} .

Για την πρώτη περίπτωση οι διαστάσεις της γεωμετρίας μας θα είναι οι εξής:

- $d_{max}=2,5 m$
- $d_{min}=1 m$
- $\varphi=10^\circ$
- $\alpha_1=120^\circ$
- $\alpha_2=120^\circ$

Η γεωμετρία με το πλέγμα της φαίνεται στην εικόνα 7.2

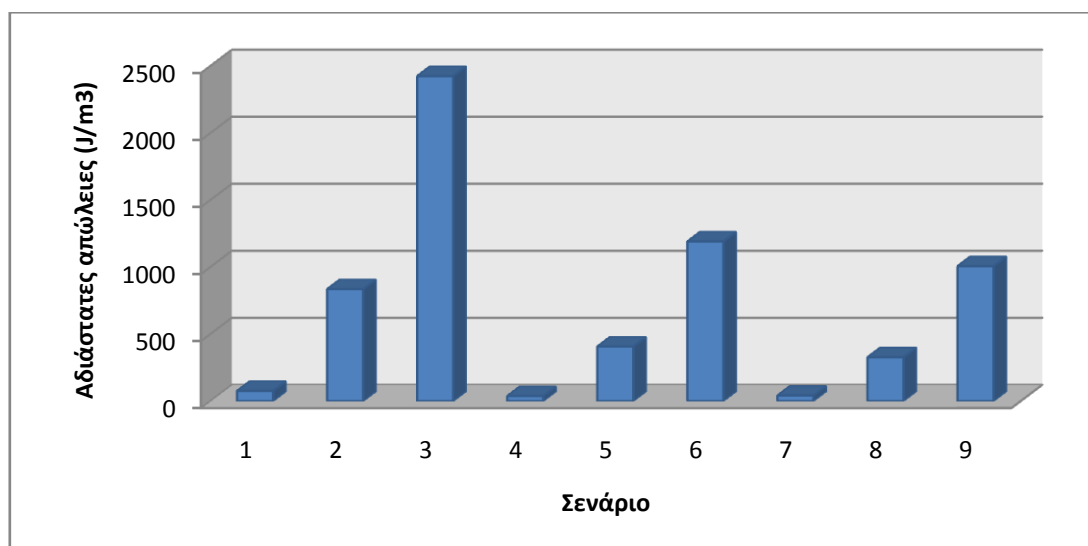


Εικόνα 7.2 Πλέγμα γεωμετρίας.

Επιλύοντας όλα τα σενάρια καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα

Σενάριο	Ποσοστό ετήσιας λειτουργίας (%)	Απώλειες (J/s)	Ετήσιες απώλειες (J)
1	8	48,89	123355511
2	11	1787,84	6201950997
3	7	8824,08	19479328976
4	5	17,11	269884851
5	9	618,58	1755676229
6	15	3078,53	14562659012
7	7	26,48	58465417
8	15	497,15	2351737376
9	8	2602,35	6565403094
Σύνολο (GJ)			51,13

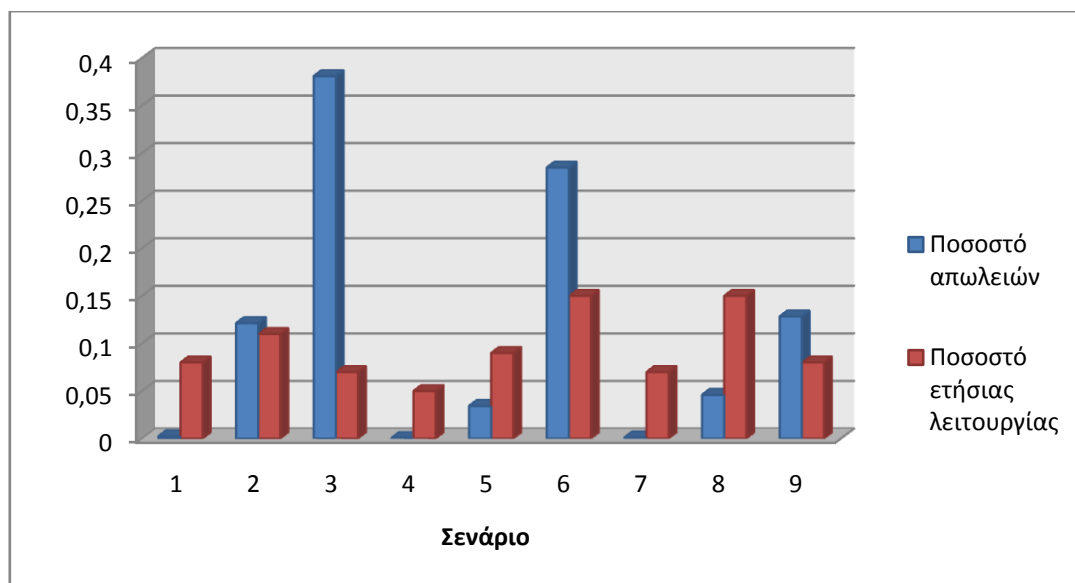
Πίνακας 7.1



Διάγραμμα 7.1 Αδιάστατες απώλειες ανά σενάριο

Σενάριο	Ποσοστό στις ετήσιες συνολικές απώλειες (%)
1	0,2
2	12,13
3	38,10
4	0,05
5	3,43
6	28,48
7	0,11
8	4,60
9	12,84

Πίνακας 7.2



Διάγραμμα 7.2 Ποσοστό συνολικών απωλειών ανά σενάριο

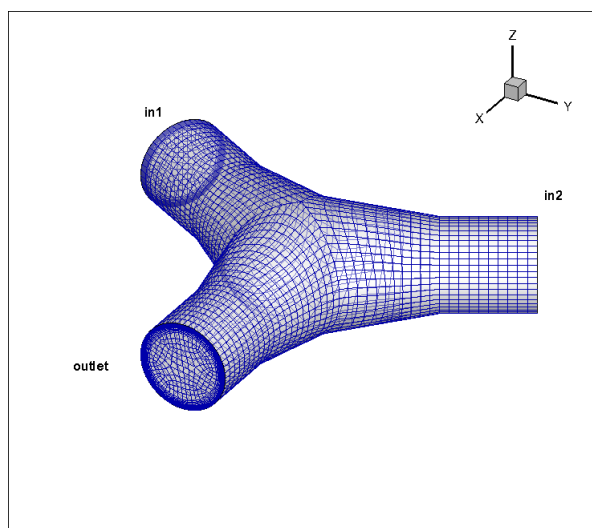
Σύμφωνα με τον πίνακα 7.1 τα σενάρια με τις μεγαλύτερες απώλειες είναι τα 2, 3, 6 και 9, τα οποία σύμφωνα με το διάγραμμα 7.2 έχουν συνεισφορά στις συνολικές ετήσιες απώλειες άνω του 10% το κάθε ένα και αυτά με τις μικρότερες τα 1, 4 και 7. Τα παραπάνω φαίνονται καλύτερα στο διάγραμμα 7.1 με τις αδιάστατες απώλειες ανά σενάριο. Περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων ακολουθεί παρακάτω στο κεφάλαιο 7.2.3.

7.2.2 Περίπτωση με $d_{\max}=1.5$ m.

Στην δεύτερη περίπτωση διαλέγουμε μικρότερη d_{\max} και επομένως έχουμε:

- $d_{\max}=1,5$ m
- $d_{\min}=1$ m
- $\varphi=10^\circ$
- $\alpha_1=120^\circ$
- $\alpha_2=120^\circ$

Η παραπάνω γεωμετρία φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 7.3)

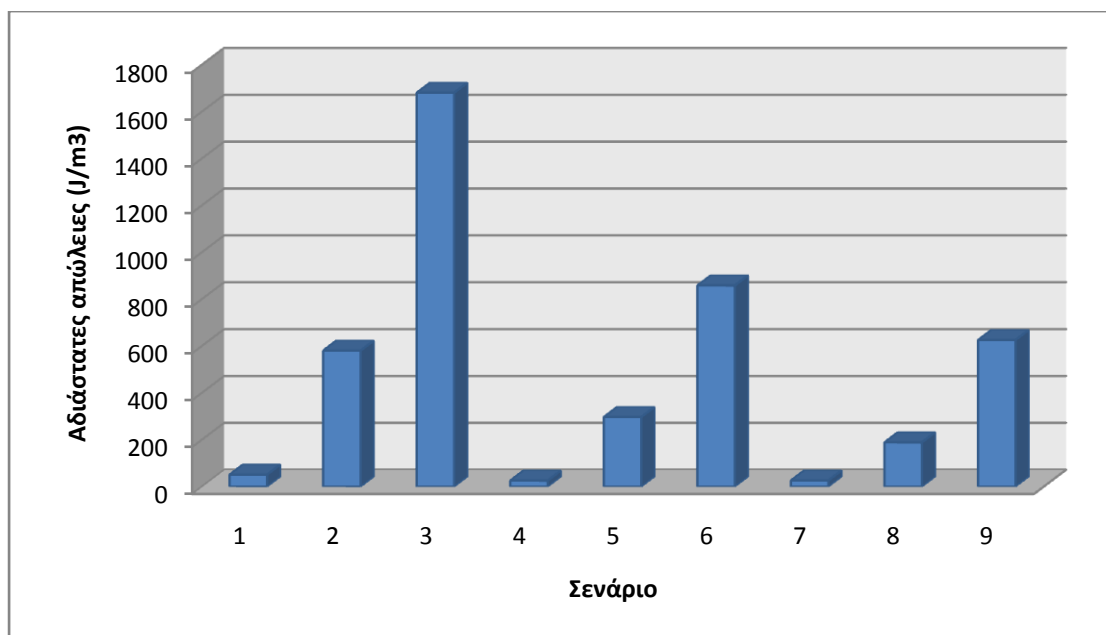


Εικόνα 7.3 Πλέγμα γεωμετρίας.

Μετά την επίλυση των σεναρίων έχουμε

Σενάριο	Ποσοστό ετήσιας λειτουργίας (%)	Απώλειες (J/s)	Ετήσιες απώλειες (J)
1	8	33,02	83316800
2	11	1243,15	4312428605
3	7	6116,28	13501806805
4	5	11,91	187773633
5	9	451,91	1282632444
6	15	2218,7	10495338102
7	7	17,12	37802235
8	15	287,69	1360904292
9	8	1617,5	4080757694
Σύνολο (GJ)			35,17

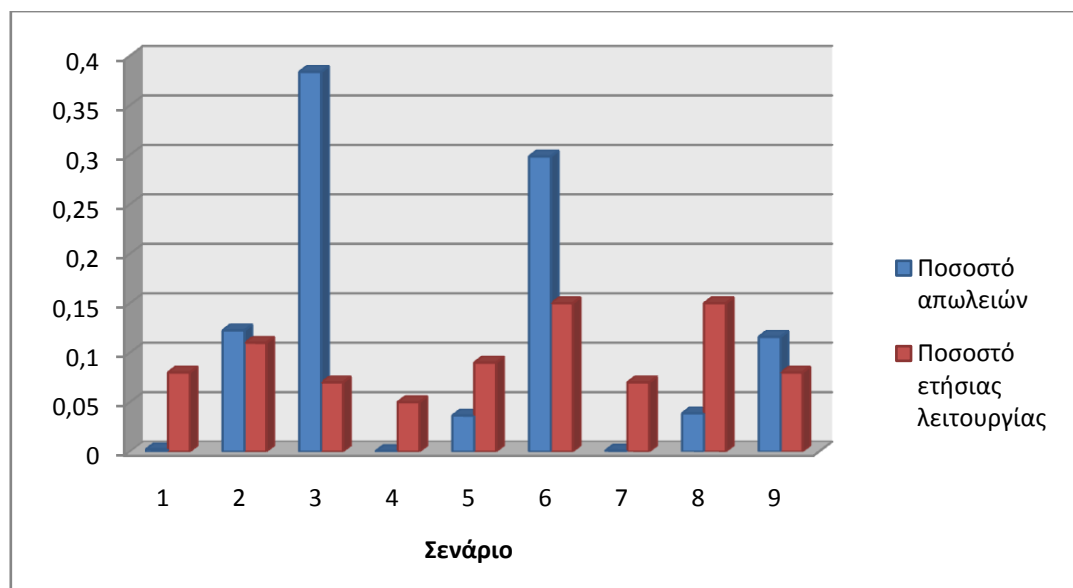
Πίνακας 7.3



Διάγραμμα 7.3 Αδιάσπαστες απώλειες ανά σενάριο

Σενάριο	Ποσοστό στις ετήσιες συνολικές απώλειες (%)
1	0,2
2	12,26
3	38,39
4	0,05
5	3,65
6	29,84
7	0,11
8	3,87
9	11,60

Πίνακας 7.4

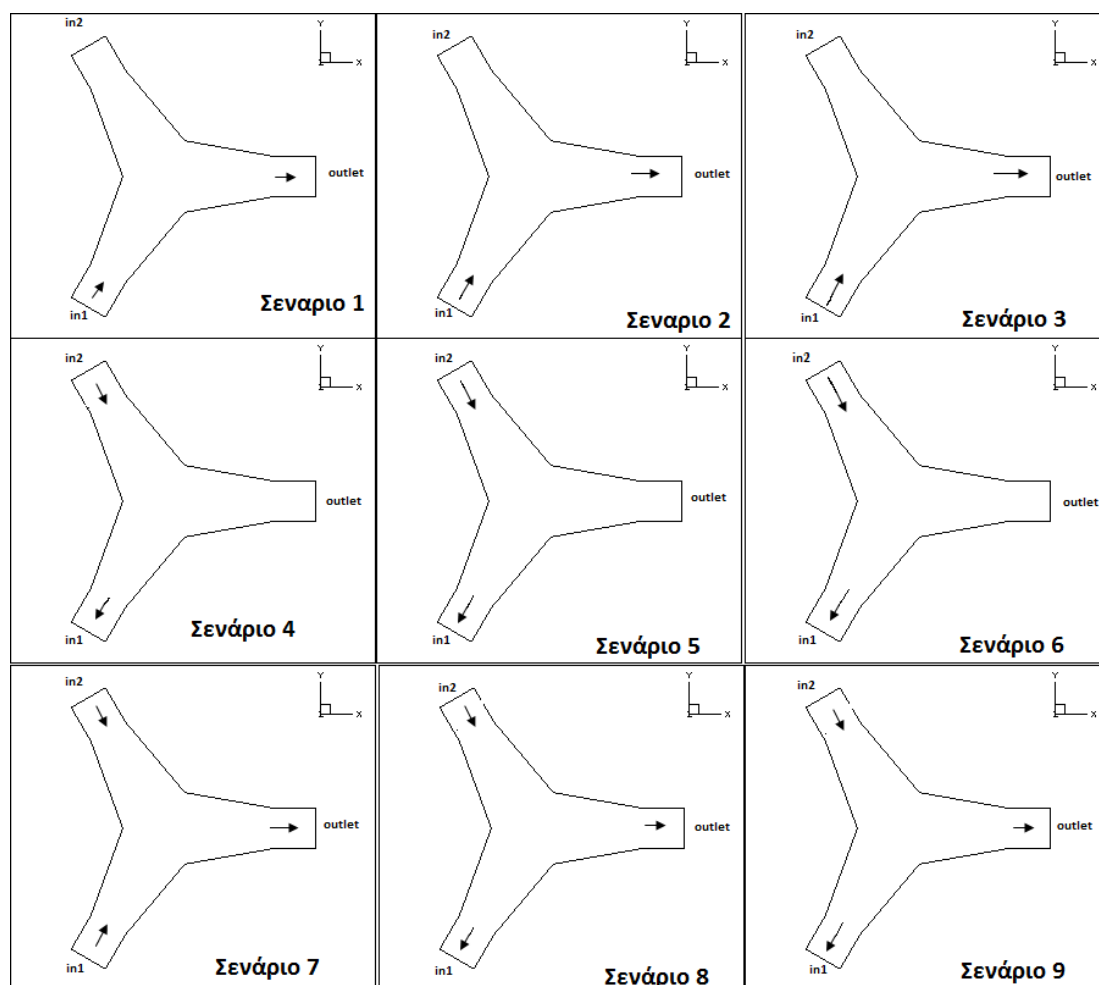


Διάγραμμα 7.4 Ποσοστό συνολικών απωλειών ανά σενάριο

Σύμφωνα με τον πίνακα 7.3 τα σενάρια με τις μεγαλύτερες απώλειες είναι τα 2, 3, 6 και 9, τα οποία σύμφωνα με το διάγραμμα 7.4 έχουν συνεισφορά στις συνολικές ετήσιες απώλειες άνω του 10% το κάθε ένα και αυτά με τις μικρότερες τα 1, 4 και 7. Τα παραπάνω φαίνονται καλύτερα στο διάγραμμα 7.3 με τις αδιάστατες απώλειες ανά σενάριο. Περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων ακολουθεί παρακάτω στο κεφάλαιο 7.2.3.

7.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις περιπτώσεις με $d_{max}=1,5\text{ m}$, $d_{max}=2\text{ m}$ και $d_{max}=2,5\text{ m}$.

Σύμφωνα με τις δύο παραπάνω περιπτώσεις και με αυτήν που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παρακάτω εικόνες. Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο όμοια σενάρια μεταξύ τους είναι τα 1, 2 και 3, τα 4, 5 και 6 και τέλος το 8 με το 9. Επίσης όμοια σενάρια είναι και το 3 με το 6 μιας και η γωνία αλλαγής κατεύθυνσης παραμένει η ίδια. Επομένως επιλέγονται να παρουσιαστούν εικόνες από τα σενάρια 3, 7 και 9. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα διάφορα σενάρια με τις εισόδους και τις εξόδους τους (Εικόνα 7.4).



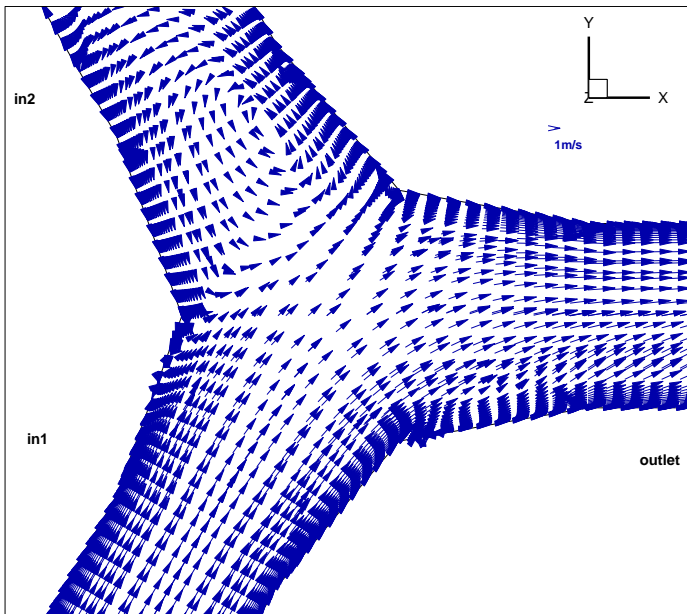
Εικόνα 7.4 Είσοδοι και έξοδοι σεναρίων

Στις εικόνες 7.5-7.7 παρατηρείται για το σενάριο 3 τις διαφορές στην κατανομή των ταχυτήτων στο επίπεδο $z=0$ για τα διαφορετικά d_{max} . Παρατηρείται ότι για μεγάλα d_{max} έχουμε μεγαλύτερες αποκολλήσεις της ροής καθώς αυτή αλλάζει πορεία αλλά και περισσότερο χώρο ώστε να αναπτυχθούν οι στροβιλισμοί τη ροής τόσο στο τμήμα του αγωγού όπου δεν έχουμε ροή αλλά και σε αυτό που έχουμε με την συστροφή της ροής.

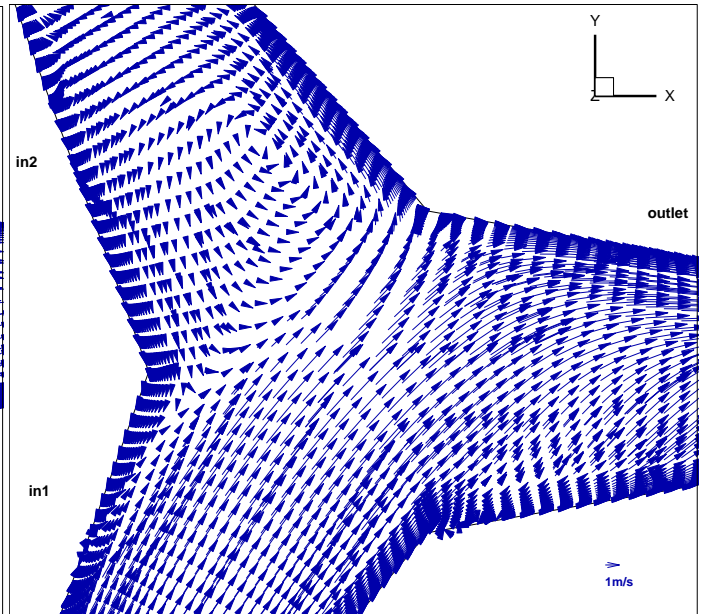
Οι εικόνες 7.8-7.10 δείχνουν τις διαφορές στις απώλειες για το σενάριο 3 για τα διάφορα d_{max} . Παρατηρείται ότι δεν παρουσιάζεται κάποια μεγάλη διαφορά παρά μόνο ότι μεγαλώνουν οι περιοχές όπου έχουμε μεγάλες τιμές της Φ .

Οι εικόνες 7.11-7.13 δείχνουν τα προβαλλόμενα διανύσματα στην έξοδο outlet και τους στροβίλους Dean που έχουν δημιουργηθεί. Παρατηρείται ότι για $d_{max}=1.5$ m αυτοί βρίσκονται πιο κοντά στο τοίχωμα λόγω ίσως του μικρού μήκους της γεωμετρίας.

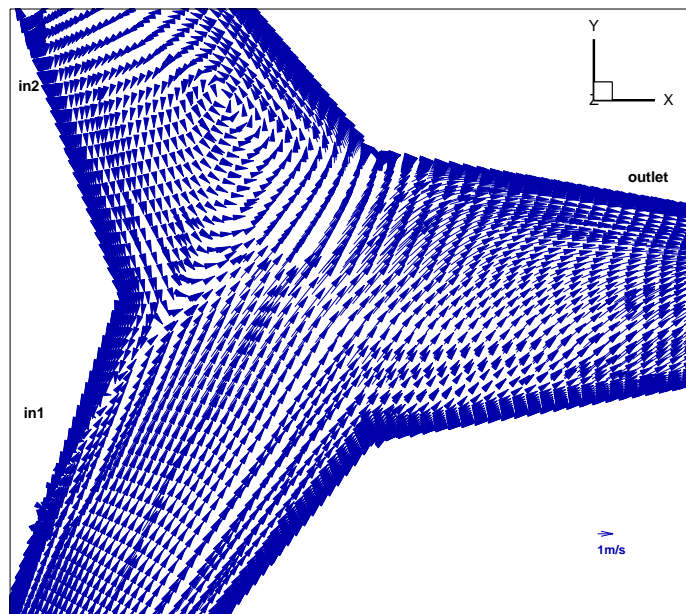
Τέλος όσο μεγαλώνει το d_{max} η κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο outlet γίνεται πιο ομοιόμορφη και με μικρότερες ταχύτητες. Αυτό φαίνεται καλύτερα στις εικόνες 7.14-7.16 όπου έχουμε τις ισοταχείς στην έξοδο outlet.



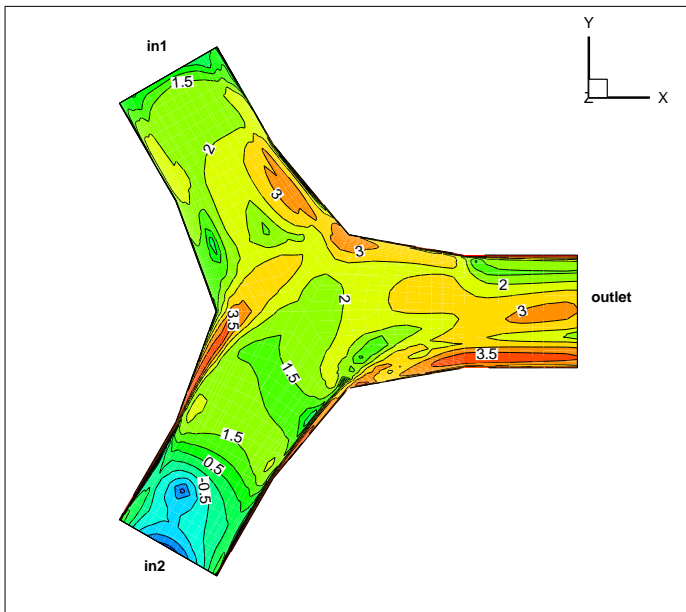
Εικόνα 7.5 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 3, $d_{max}=1,5$ m)



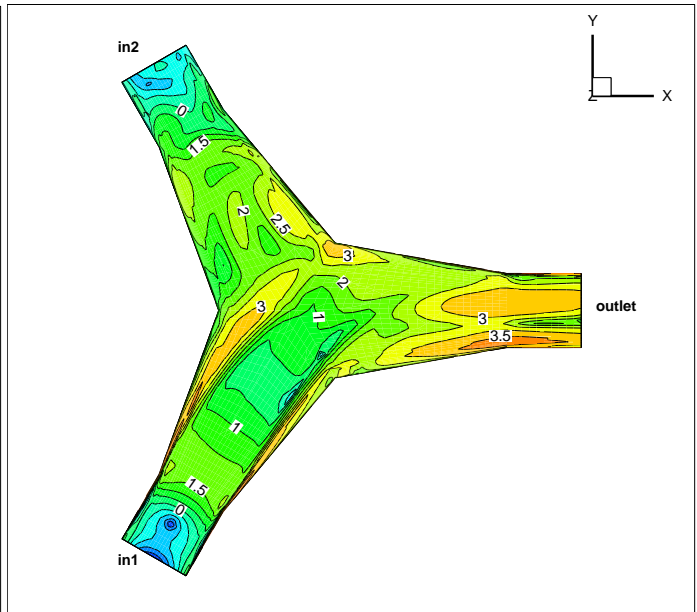
Εικόνα 7.6 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 3, $d_{max}=2$ m)



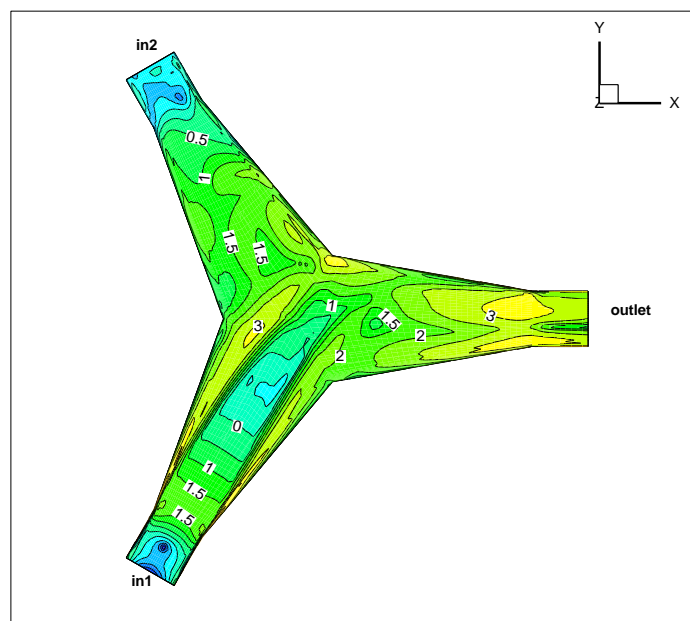
Εικόνα 7.7 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 3, $d_{max}=2,5$ m)



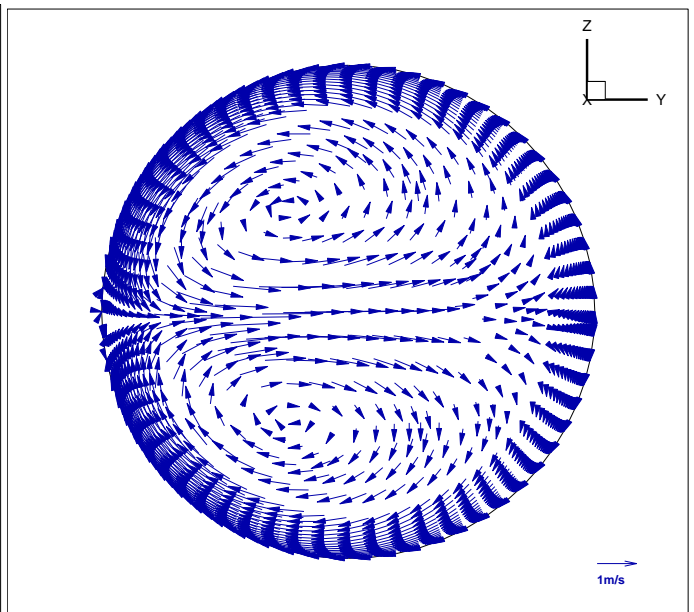
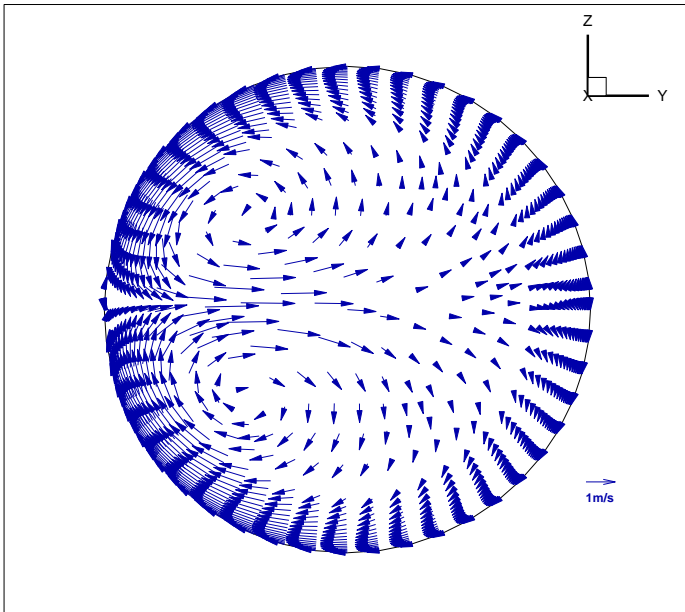
Εικόνα 7.8 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 3, $d_{max}=1,5$ m)



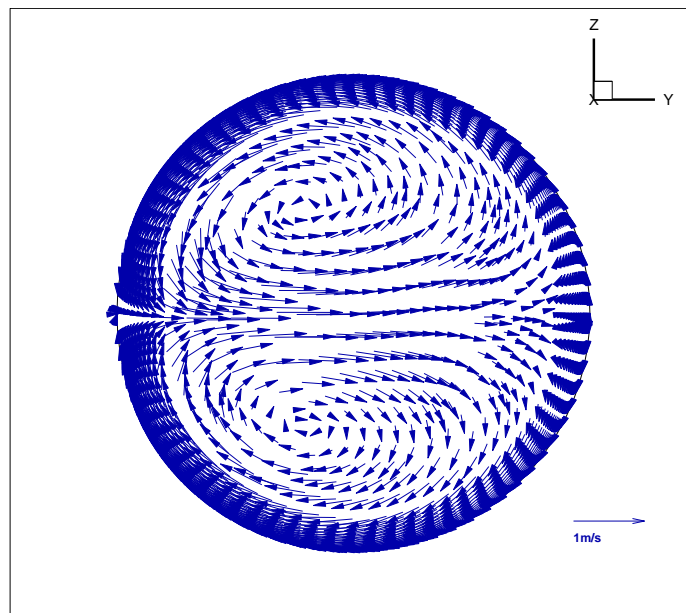
Εικόνα 7.9 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 3, $d_{max}=2$ m)



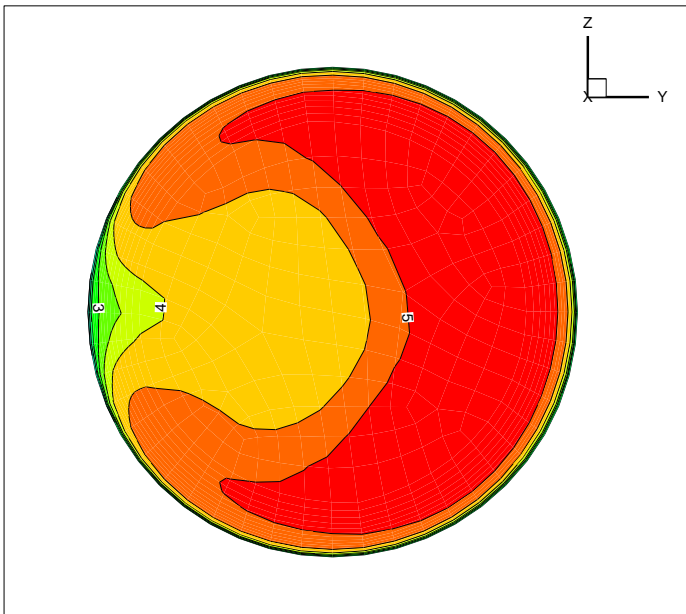
Εικόνα 7.10 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 3, $d_{max}=2,5$ m)



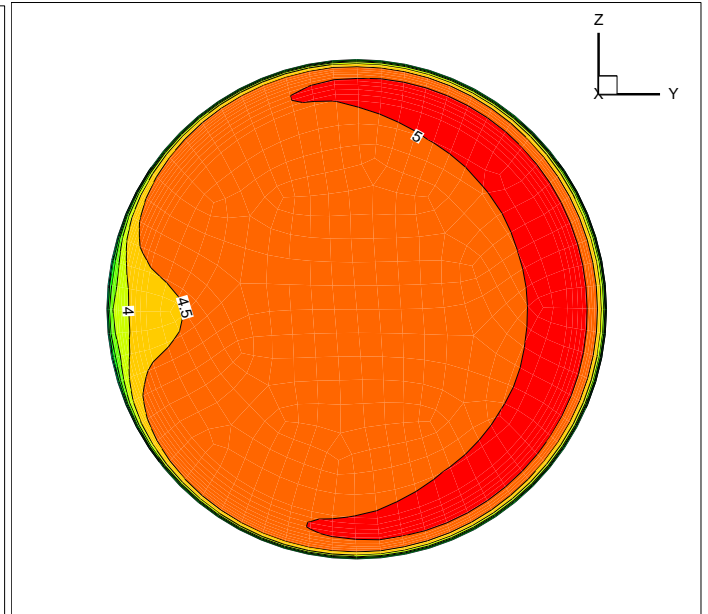
Εικόνα 7.11 Διανύσματα στην έξοδο outlet (σενάριο 3, $d_{max}=1,5$ m) Εικόνα 7.12 Διανύσματα στην έξοδο outlet (σενάριο 3, $d_{max}=2$ m)



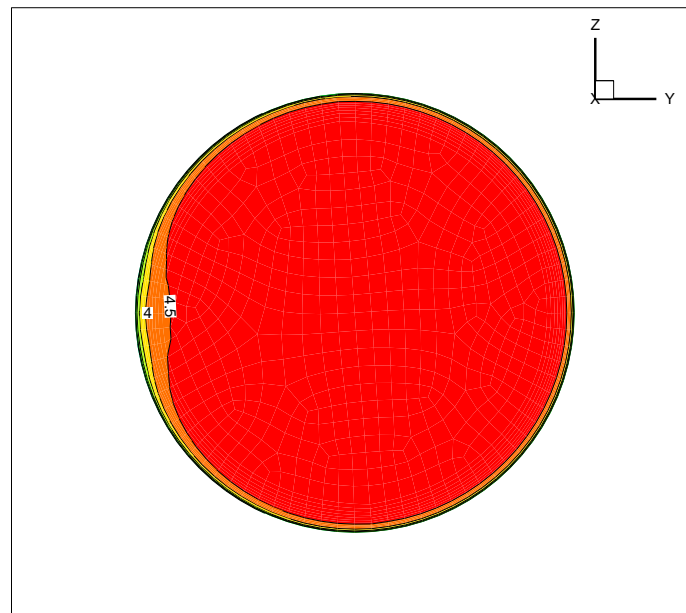
Εικόνα 7.13 Διανύσματα στην έξοδο outlet (σενάριο 3, $d_{max}=2,5$ m)



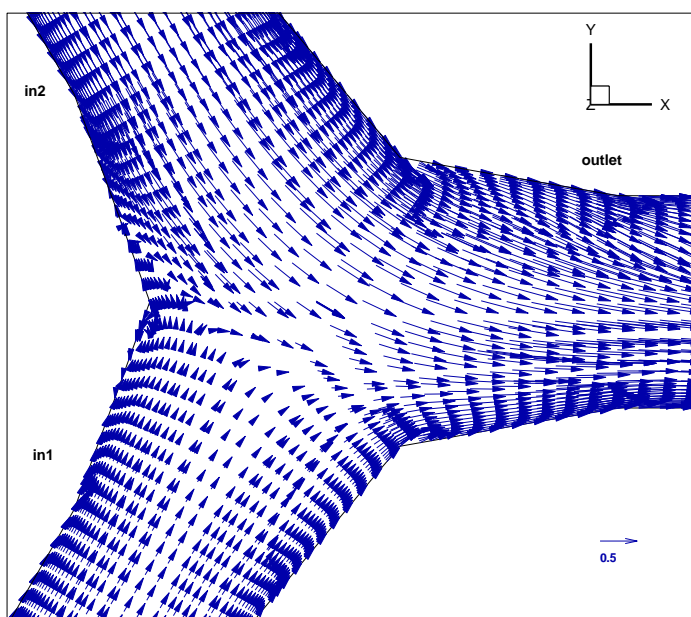
Εικόνα 7.14 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 3, $d_{max}=1,5m$)



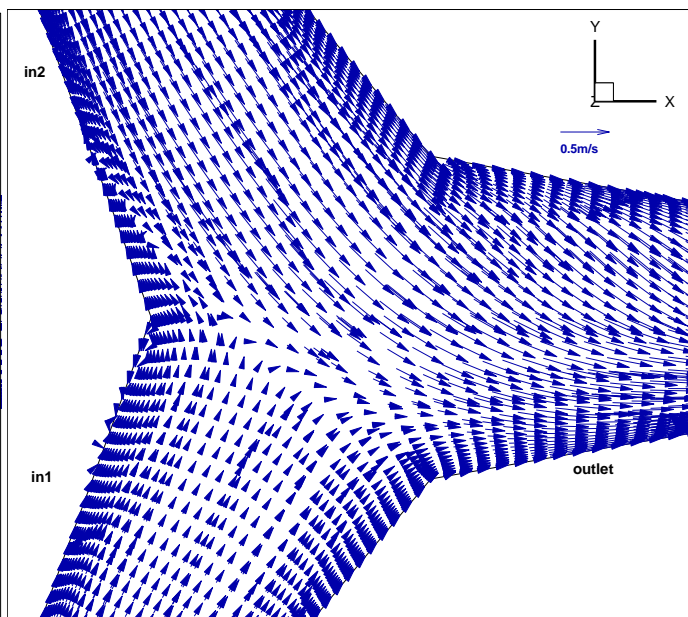
Εικόνα 7.15 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 3, $d_{max}=2m$)



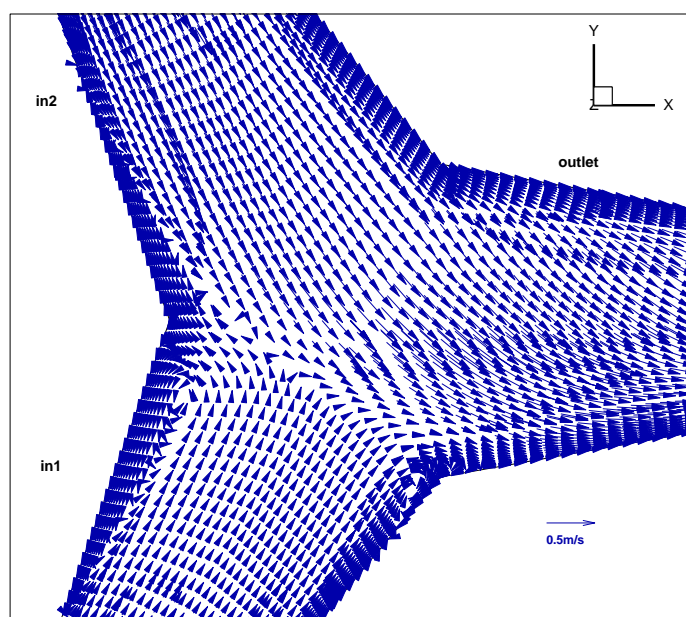
Εικόνα 7.16 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 3, $d_{max}=2,5m$)



Εικόνα 7.17 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 7, $d_{max}=1,5$ m)

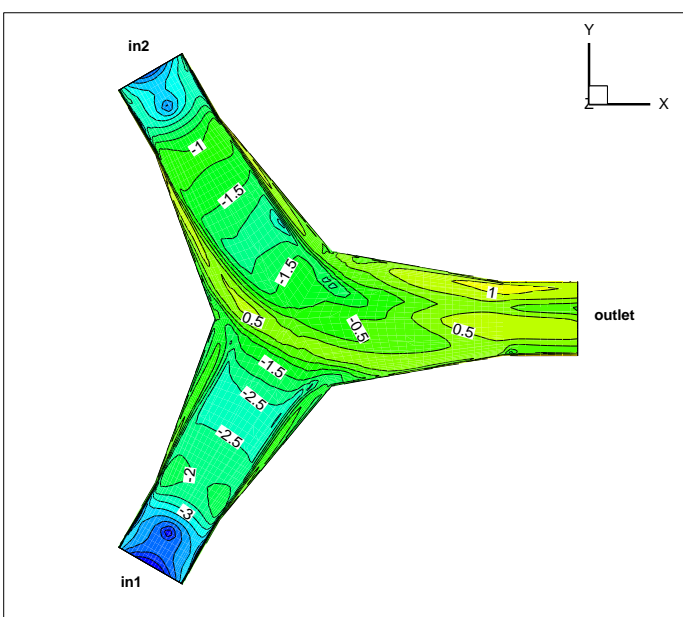
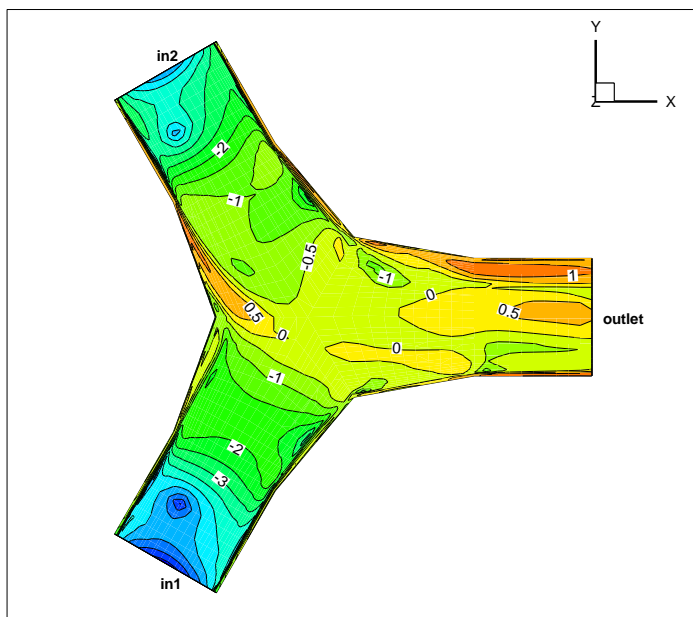


Εικόνα 7.18 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 7, $d_{max}=2$ m)



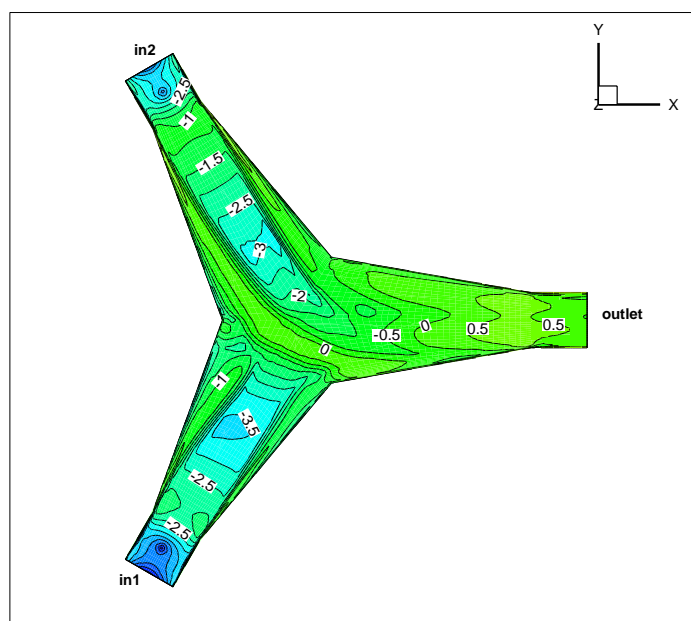
Εικόνα 7.19 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 7, $d_{max}=2.5$ m)

Στις εικόνες 7.17-7.19 έχουμε και εδώ για το σενάριο 7 την κατανομή της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$ για τα διάφορα d_{max} . Και εδώ παρατηρούμε ότι οι αποκόλληση της ροής είναι μεγαλύτερη για τα μεγάλα d_{max} και επίσης ότι η ροή που έρχεται από την είσοδο in1 (χαμηλής ταχύτητας) έχει περισσότερο χώρο να αναμιχθεί με την ροή που προέρχεται από την είσοδο in2 (υψηλής ταχύτητας).



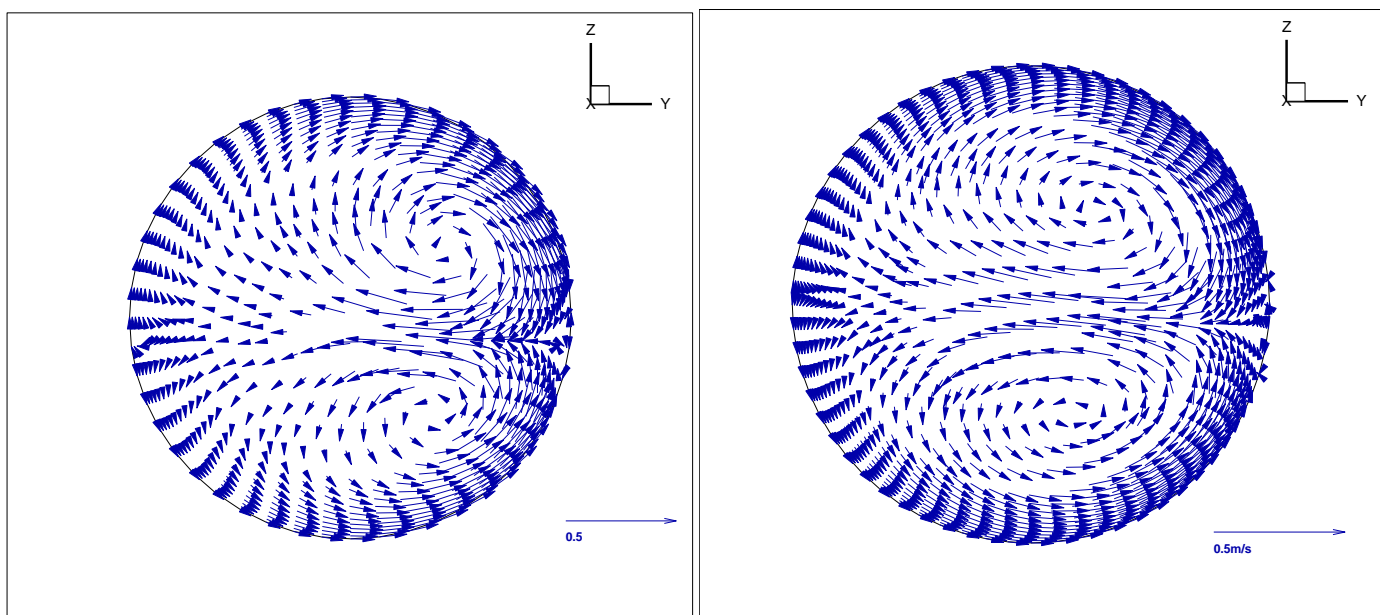
Εικόνα 7.20 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 7, $d_{max}=1,5$ m)

Εικόνα 7.21 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 7, $d_{max}=2$ m)

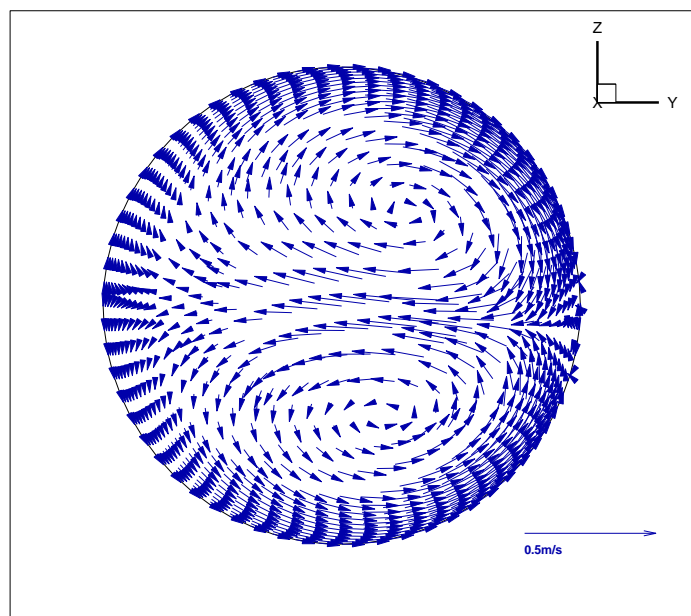


Εικόνα 7.22 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 7, $d_{max}=2,5$ m)

Οι εικόνες 7.20-7.22 δείχνουν για τα διάφορα d_{max} τις ισοϋψείς της Φ . Παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει το d_{max} τόσο μεγαλώνουν και οι περιοχές όπου έχουμε υψηλές τιμές της Φ .

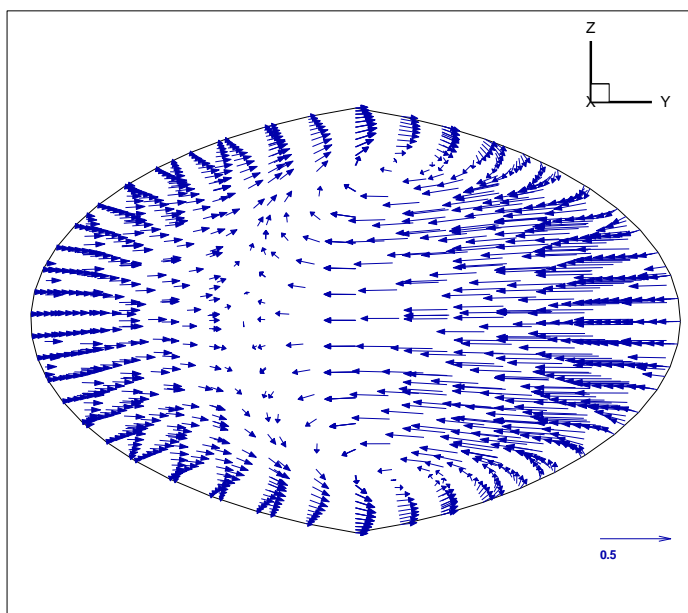


Εικόνα 7.23 Διανύσματα στην έξοδο outlet (σενάριο 7, $d_{max}=1.5$ m) Εικόνα 7.24 Διανύσματα στην έξοδο outlet (σενάριο 7, $d_{max}=2$ m)

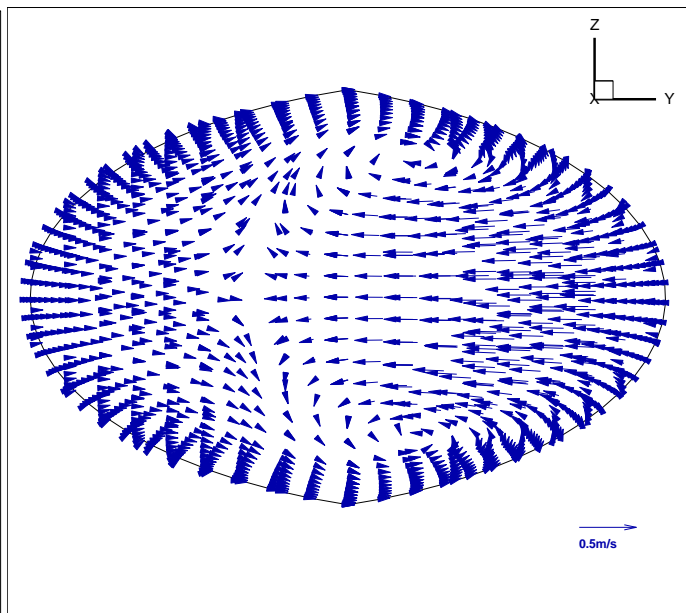


Εικόνα 7.25 Διανύσματα στην έξοδο outlet (σενάριο 7, $d_{max}=2.5$ m)

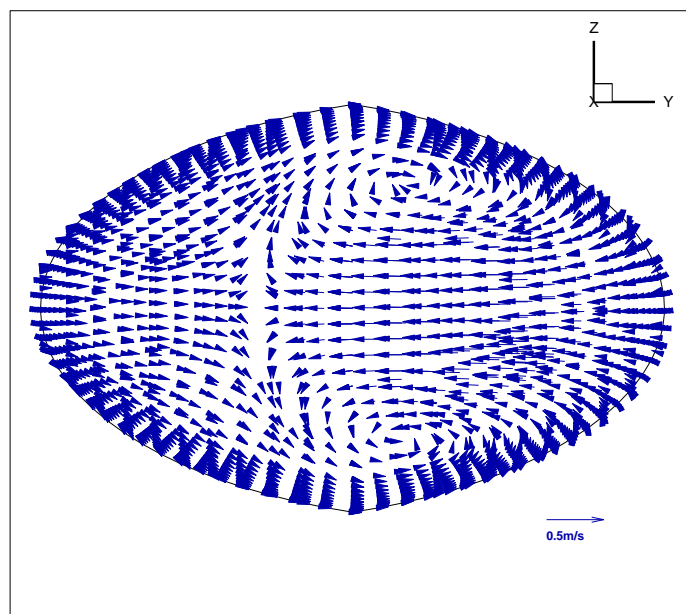
Οι εικόνες 7.23-7.25 δείχνουν τα προβαλλόμενα διανύσματα στην έξοδο outlet όπου φαίνονται οι στροβιλισμοί της ροής. Δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη μεταβολή για τα διάφορα d_{max} .



Εικόνα 7.26 Διανύσματα ταχύτητας $x=0$ ($d_{max}=1,5$ m)

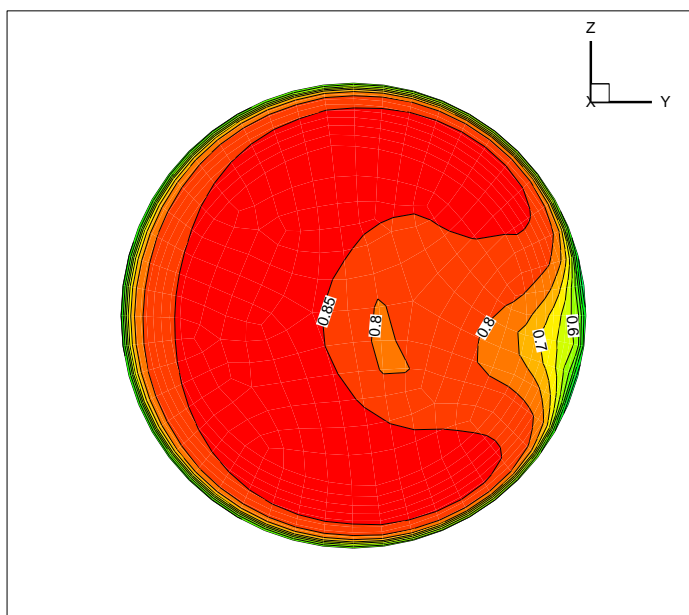


Εικόνα 7.27 Διανύσματα ταχύτητας $x=0$ ($d_{max}=2$ m)

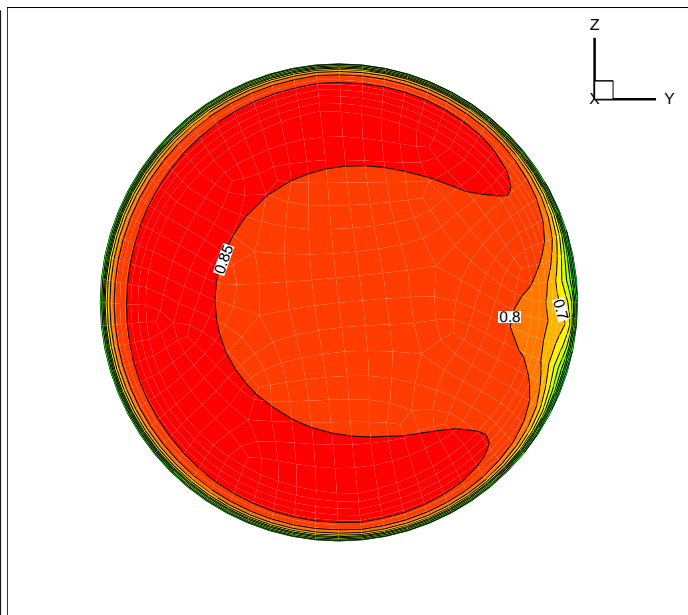


Εικόνα 7.28 Διανύσματα ταχύτητας $x=0$ ($d_{max}=2,5$ m)

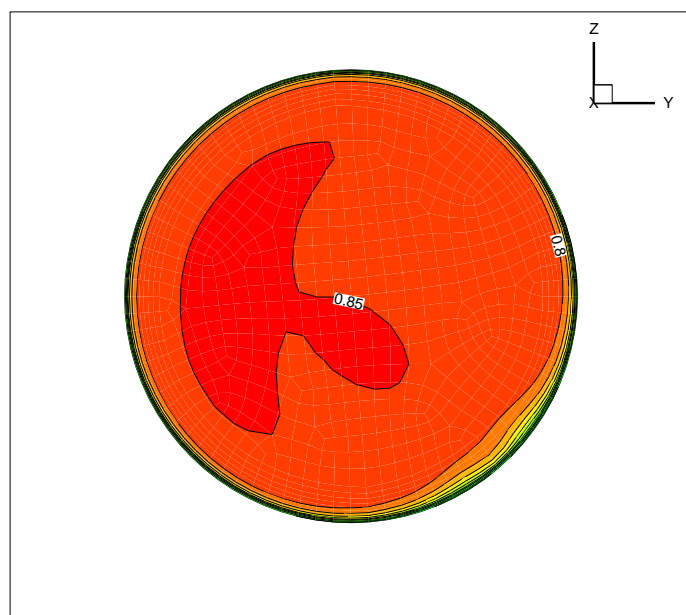
Στις εικόνες 7.26-7.28 έχουμε τα προβαλλόμενα διανύσματα της ταχύτητας στο επίπεδο $x=0$ για το σενάριο 7 για καθένα από τα διάφορα d_{max} . Παρατηρούμε σε κάθε εικόνα την ανάμιξη των δύο ροών και πως αυτή της χαμηλής ροής αναγκάζεται να κινηθεί στο πάνω και στο κάτω τμήμα της γεωμετρίας δημιουργώντας δύο συμμετρικούς στροβιλισμούς. Διακρίνουμε ότι όσο μεγαλώνει το d_{max} τόσο μεγαλώνουν οι στροβιλισμοί καθώς υπάρχει περισσότερος χώρος ώστε αυτοί να αναπτυχθούν..



Εικόνα 7.29 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 7, $d_{max}=1,5m$)

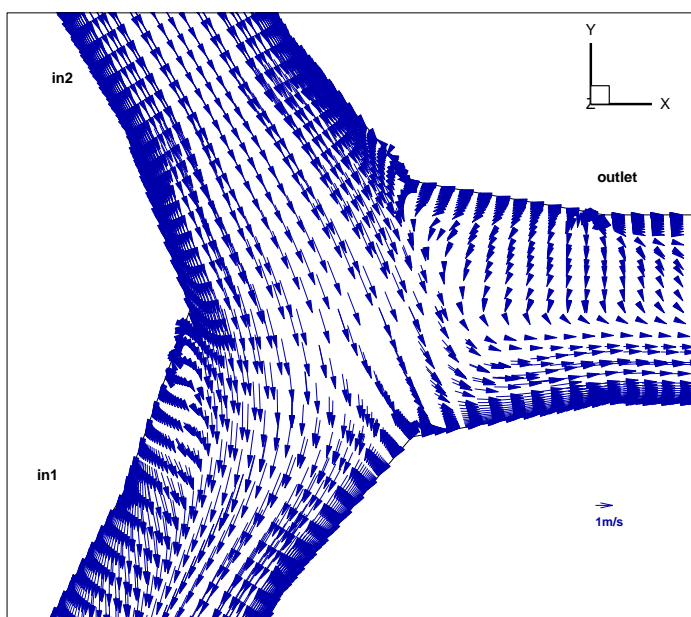


Εικόνα 7.30 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 7, $d_{max}=2m$)

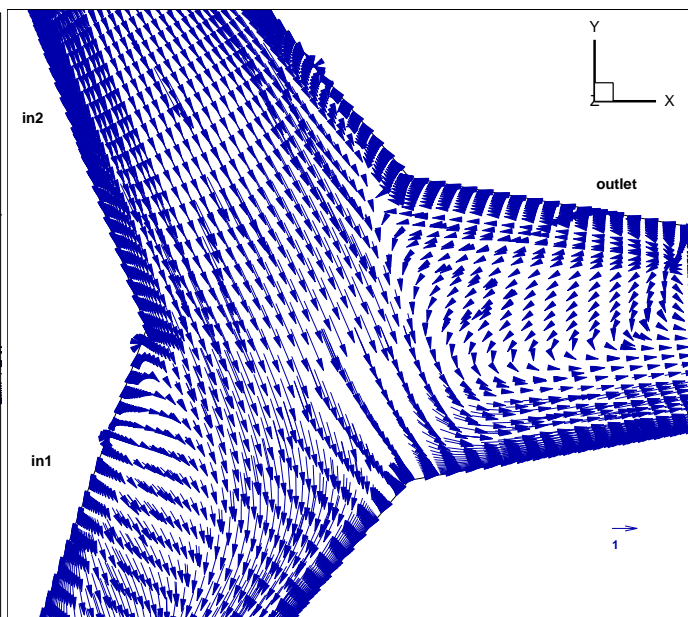


Εικόνα 7.31 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 7, $d_{max}=2,5m$)

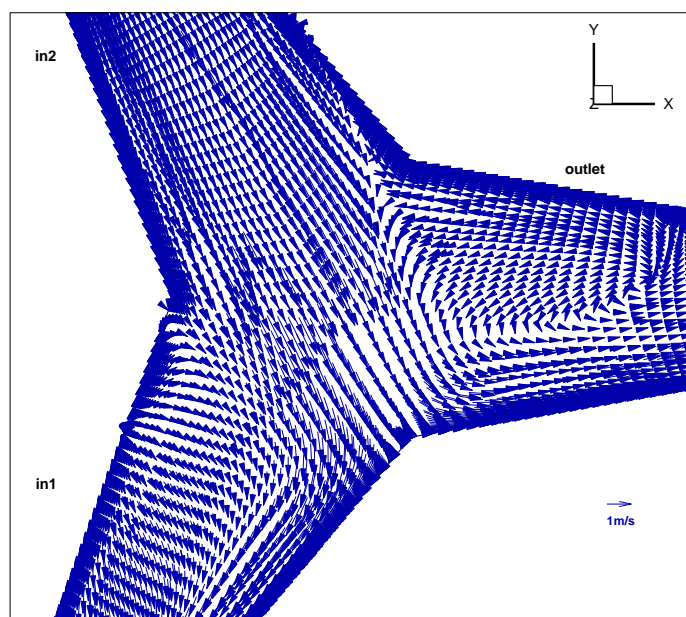
Στις εικόνες 7.29-7.31 έχουμε την κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο outlet. Και εδώ παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει το d_{max} τόσο η ροή γίνεται πιο ομοιόμορφη στην έξοδο και αναπτύσσονται μικρότερες ταχύτητες σε μεγαλύτερα τμήματα της εξόδου



Εικόνα 7.32 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 9, $d_{max}=1,5$ m)

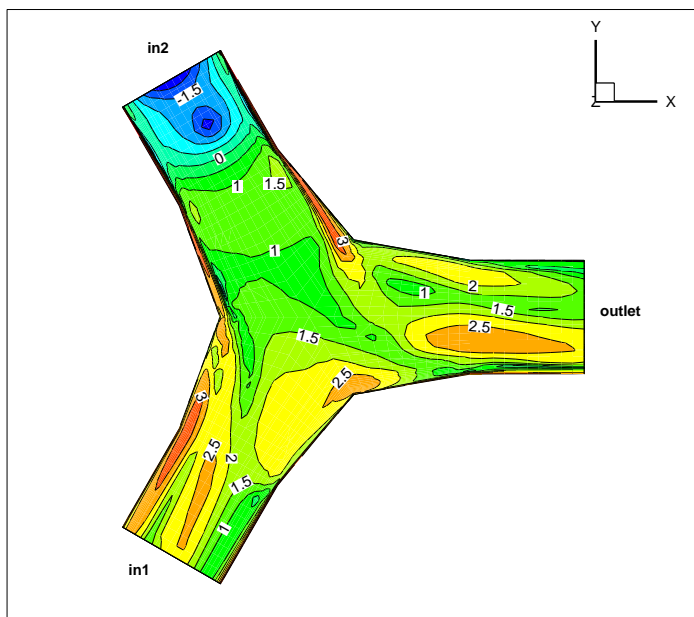


Εικόνα 7.33 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 9, $d_{max}=2$ m)

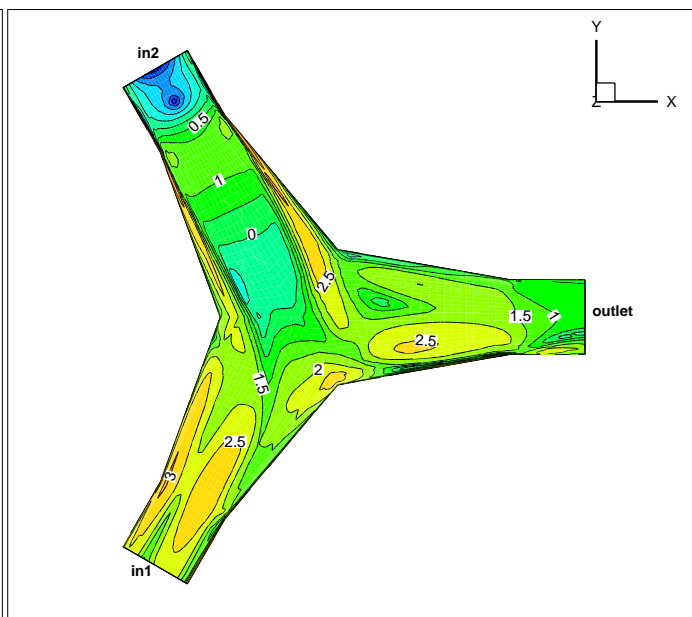


Εικόνα 7.34 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 9, $d_{max}=2,5$ m)

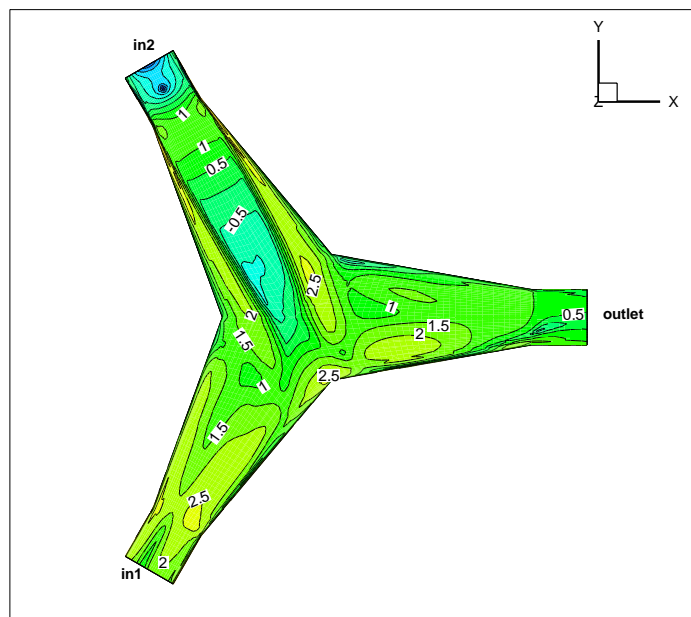
Στις εικόνες 7.32-7.34 έχουμε την κατανομή της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$ για το σενάριο 9 για τα διάφορα d_{max} . Και εδώ παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο δηλαδή ότι όσο αυξάνεται το d_{max} αυξάνεται και η αποκόλληση της ροής καθώς αυτή την φορά η ροή διαχωρίζεται. Επίσης το τμήμα όπου έχουμε αντίστροφη ροή μεγαλώνει όσο μεγαλώνει το d_{max} .



Εικόνα 7.35 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 9, $d_{max}=1,5$ m)

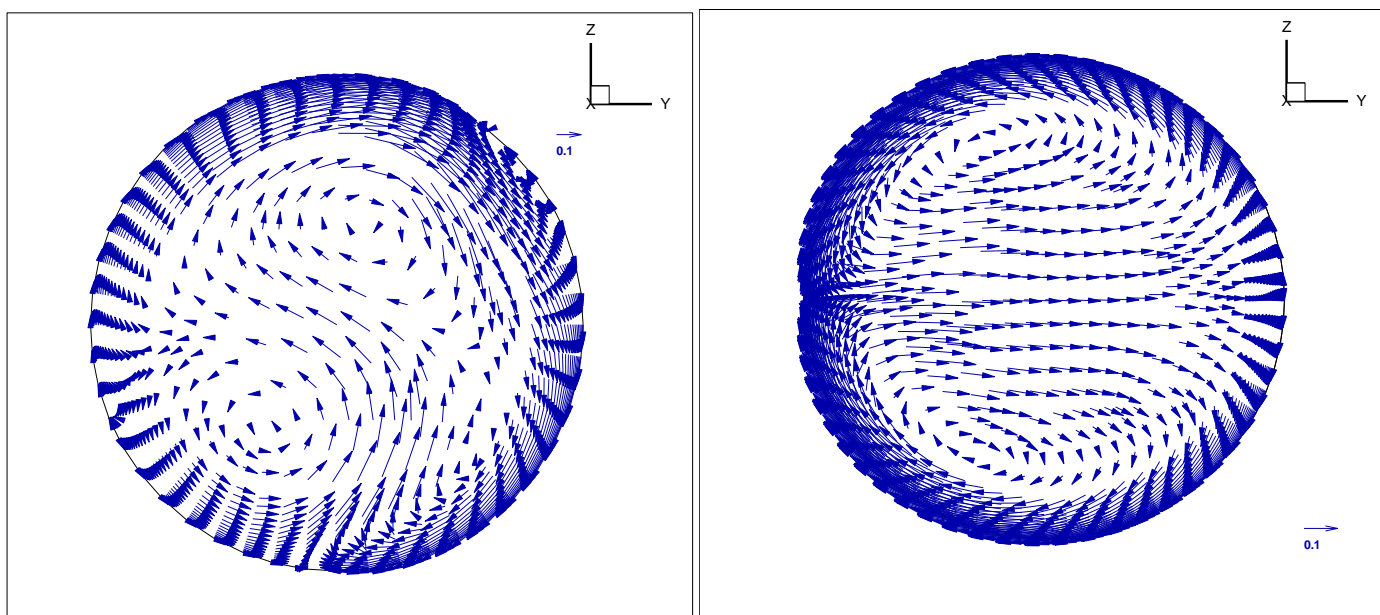


Εικόνα 7.36 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 9, $d_{max}=2$ m)

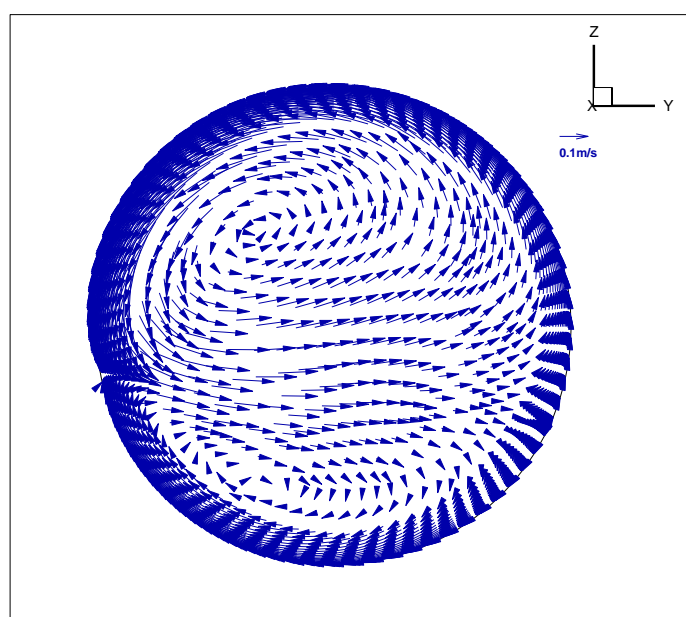


Εικόνα 7.37 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 9, $d_{max}=2,5$ m)

Οι εικόνες 7.35-7.37 δείχνουν τις διαφορές στις απώλειες για το σενάριο 9 για τα διάφορα d_{max} . Παρατηρείται ότι δεν παρουσιάζεται κάποια μεγάλη διαφορά παρά μόνο ότι μεγαλώνουν οι περιοχές όπου έχουμε μεγάλες τιμές της Φ .

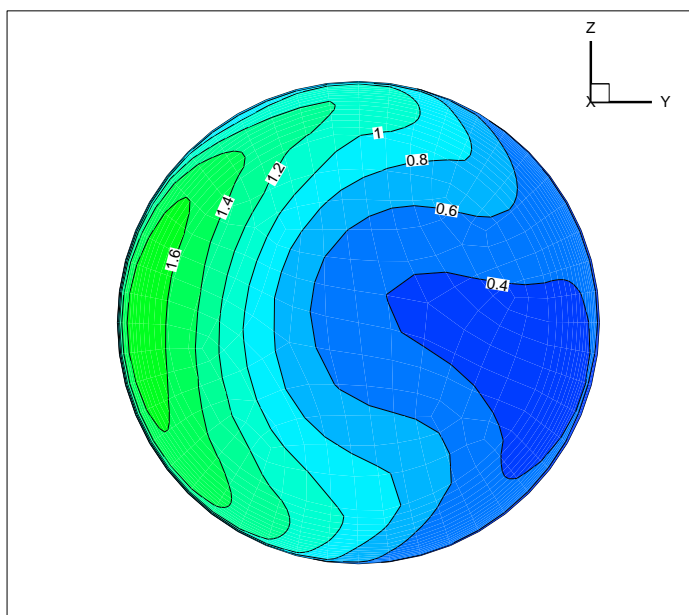


Εικόνα 7.38 Διανύσματα στην έξοδο outlet (σενάριο 9, $d_{max}=1,5$ m) Εικόνα 7.39 Διανύσματα στην έξοδο outlet (σενάριο 9, $d_{max}=2$ m)

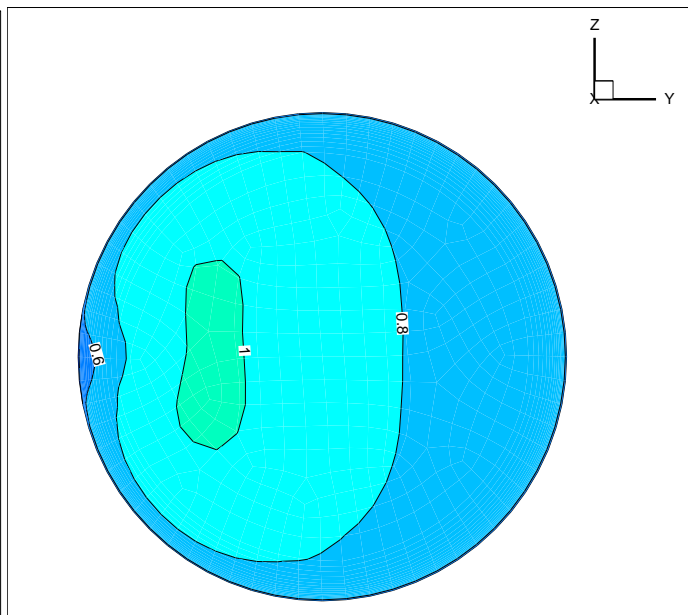


Εικόνα 7.40 Διανύσματα στην έξοδο outlet (σενάριο 9, $d_{max}=2,5$ m)

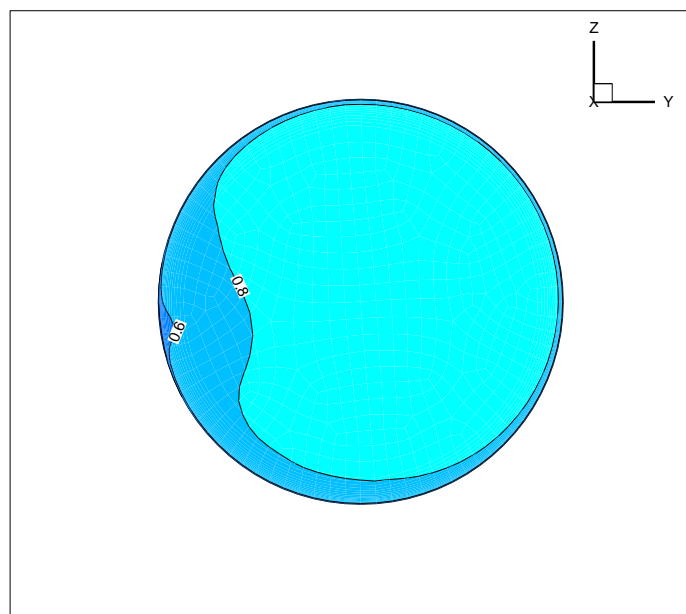
Στις εικόνες 7.38-7.40 έχουμε τα προβαλλόμενα διανύσματα ταχύτητας στην έξοδο outlet για τα διάφορα d_{max} . Παρατηρούνται οι στρόβιλοι Dean που δημιουργούνται κατά την αλλαγή κατεύθυνσης της ροής.



Εικόνα 7.41 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 9, $d_{max}=1,5m$)

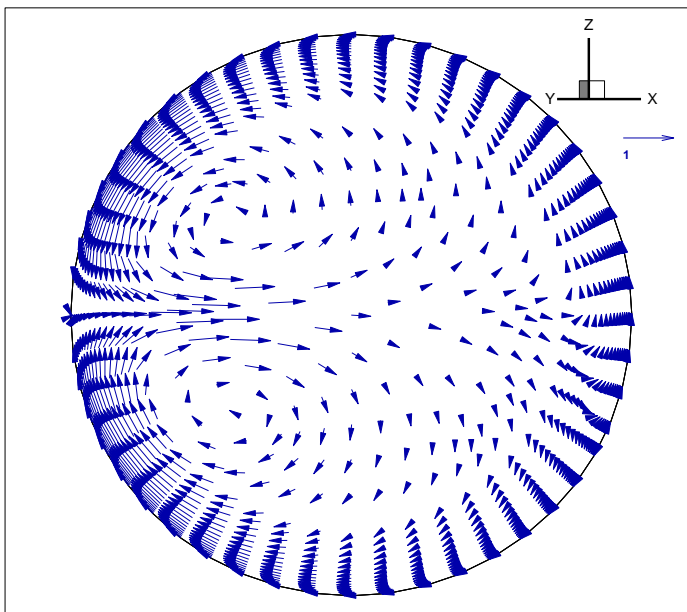


Εικόνα 7.42 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 9, $d_{max}=2m$)

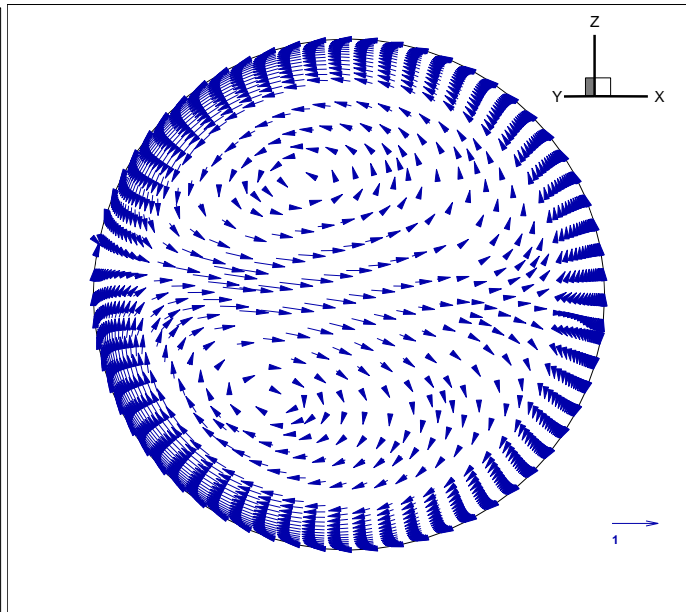


Εικόνα 7.43 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 9, $d_{max}=2,5m$)

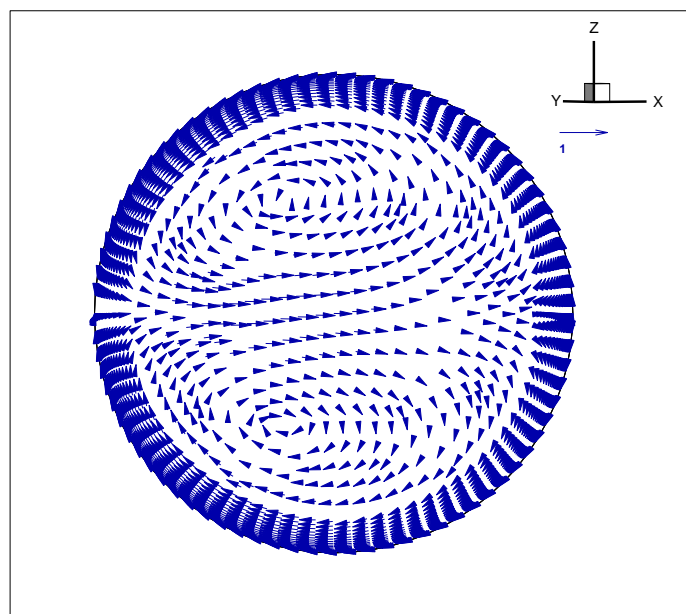
Στις εικόνες 7.41-7.43 παρατηρούμε την κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο outlet για τα διάφορα d_{max} . Όπως και στα προηγούμενα σενάρια ισχύει και εδώ το ίδιο δηλαδή η κατανομή των ταχυτήτων γίνεται πιο ομοιόμορφη όσο μεγαλώνει το d_{max} .



Εικόνα 7.44 Διανύσματα στην έξοδο in1 (σενάριο 9, $d_{max}=1,5$ m)

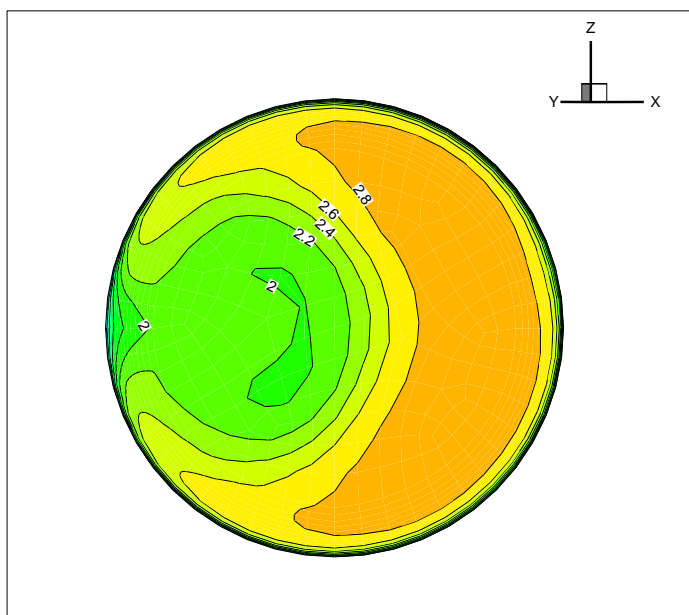


Εικόνα 7.45 Διανύσματα στην έξοδο in1 (σενάριο 9, $d_{max}=2$ m)

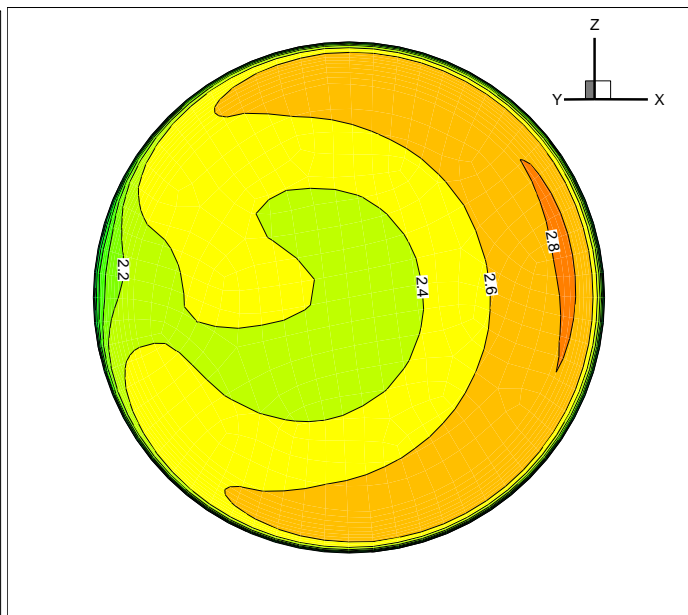


Εικόνα 7.46 Διανύσματα στην έξοδο in1 (σενάριο 9, $d_{max}=2,5$ m)

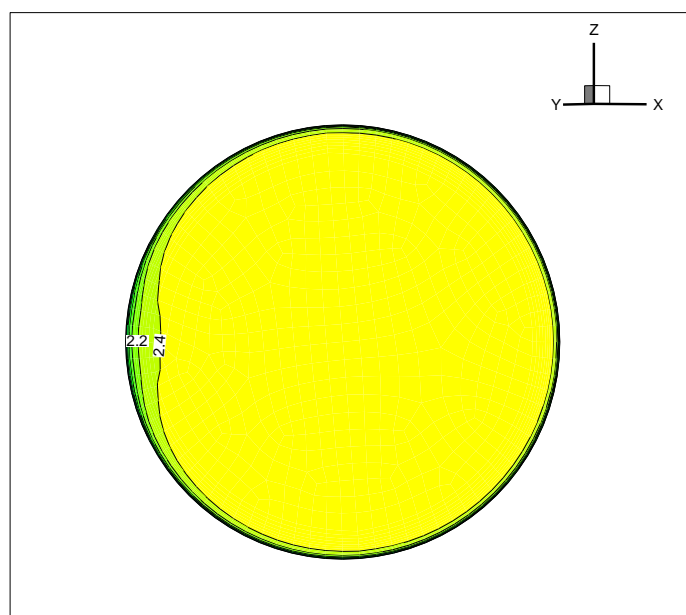
Στις εικόνες 7.44-7.46 έχουμε τα προβαλλόμενα διανύσματα ταχύτητας στην έξοδο in1 για τα διάφορα d_{max} .



Εικόνα 7.47 Ισοταχείς στην έξοδο in1 (σενάριο 9, $d_{max}=1,5m$)



Εικόνα 7.48 Ισοταχείς στην έξοδο in1 (σενάριο 9, $d_{max}=2m$)

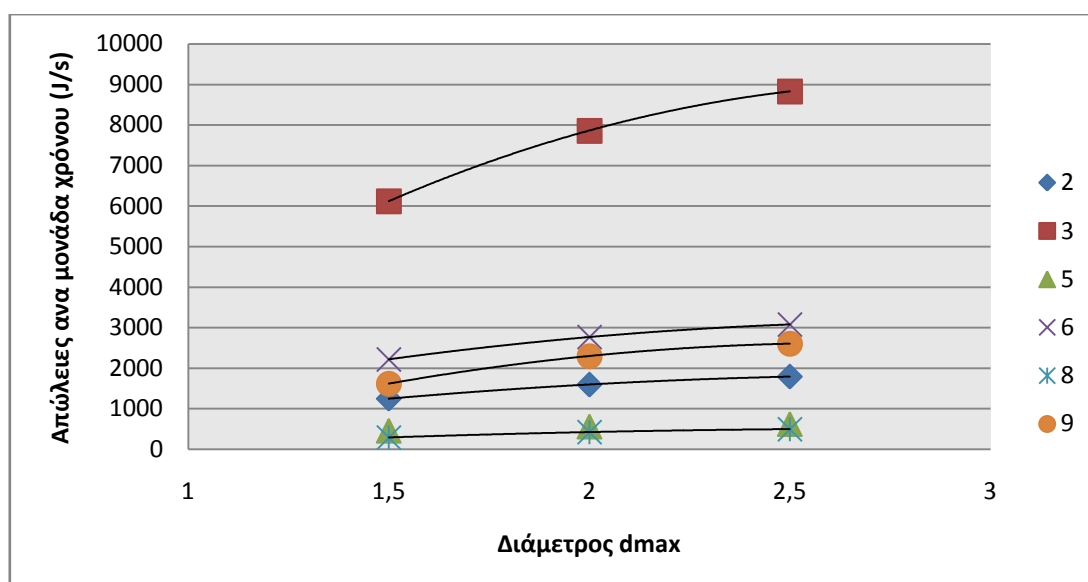


Εικόνα 7.49 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 9, $d_{max}=2,5m$)

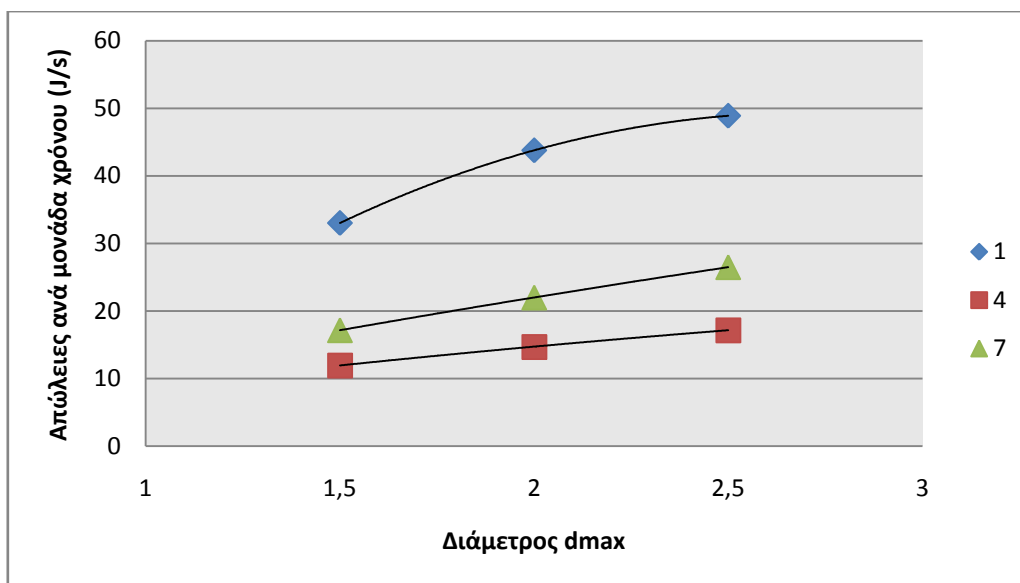
Στις εικόνες 7.47-7.49 παρατηρούμε την κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο in1 για τα διάφορα d_{max} . Όπως και στα προηγούμενα σενάρια ισχύει και εδώ το ίδιο δηλαδή η κατανομή των ταχυτήτων γίνεται πιο ομοιόμορφη όσο μεγαλώνει το d_{max} .

Σύμφωνα με τους πίνακες 7.1, 6.2 οι συνολικές απώλειες για $d_{max} = 2,5$ m είναι μεγαλύτερες από ότι για $d_{max} = 2$ m. Επίσης σύμφωνα με τους πίνακες 7.2 και 6.3 οι συνολικές απώλειες για $d_{max}=1.5$ m είναι μικρότερες από ότι για $d_{max}=2$ m. Τα παραπάνω φαίνονται και στο παρακάτω διάγραμμα (7.7). Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι αυτός που περιγράφηκε παραπάνω για τις διάφορες εικόνες. Δηλαδή για μεγάλα d_{max} παρατηρούνται μεγαλύτερες αποκολλήσεις της ροής και μεγαλύτεροι στροβιλισμοί όπου αυτοί αναπτύσσονται έχοντας ως αποτέλεσμα την δημιουργία περισσότερων δευτερευόντων ροών και επομένως μεγαλύτερων απωλειών. Επίσης με δεδομένη την γωνία φ όσο μεγαλώνει το d_{max} μεγαλώνει και το συνολικό μήκος της γεωμετρίας και επομένως και οι γραμμικές απώλειες αν και η μέση ταχύτητα της ροής ελαττώνεται.

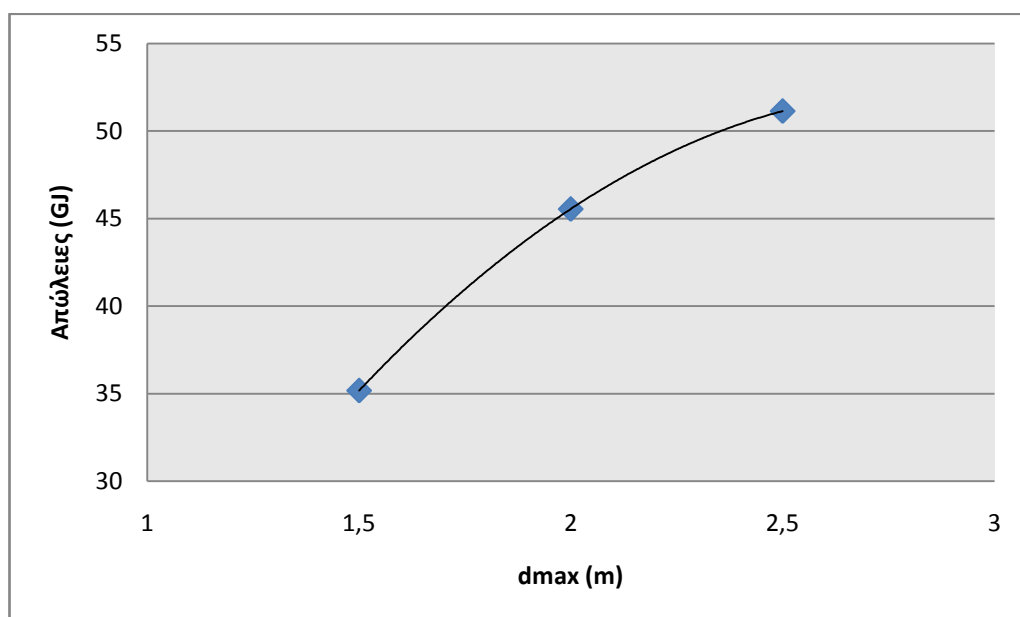
Τέλος παρατηρούμε ότι οι απώλειες ανά μονάδα χρόνου αυξήθηκαν για όλα τα σενάρια (Διαγράμματα 7.5 και 7.6)



Διάγραμμα 7.5 Μεταβολή ισχύος απωλειών συναρτήσει της d_{max} για διάφορα σενάρια



Διάγραμμα 7.6 Μεταβολή ισχύος απωλειών συναρτήσει της d_{max} για διάφορα σενάρια



Διάγραμμα 7.7 Μεταβολή συνολικών απωλειών συναρτήσει d_{max}

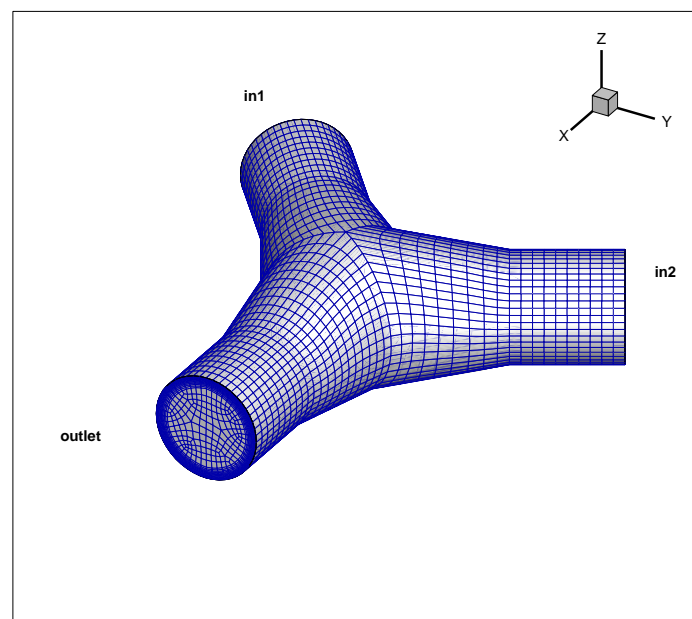
7.3 Παραμετρική διερεύνηση με παράμετρο τις γωνία α_2 .

Εδώ θα κρατήσουμε σταθερή την διάμετρο d_{max} , την γωνία φ και την γωνία α_1 ενώ θα αλλάζουμε τις τιμές στην γωνία α_2 . Θα επιλέξουμε τυχαία δύο τιμές της α_2 μία μεγαλύτερη από 120° και μία μικρότερη.

7.3.1 Περίπτωση με $\alpha_2=140^\circ$.

Αρχικά σχεδιάζουμε την γεωμετρία με τις εξής διαστάσεις:

- $d_{max}=1,5$ m
- $d_{min}=1$ m
- $\varphi=10^\circ$
- $\alpha_1=120^\circ$
- $\alpha_2=140^\circ$

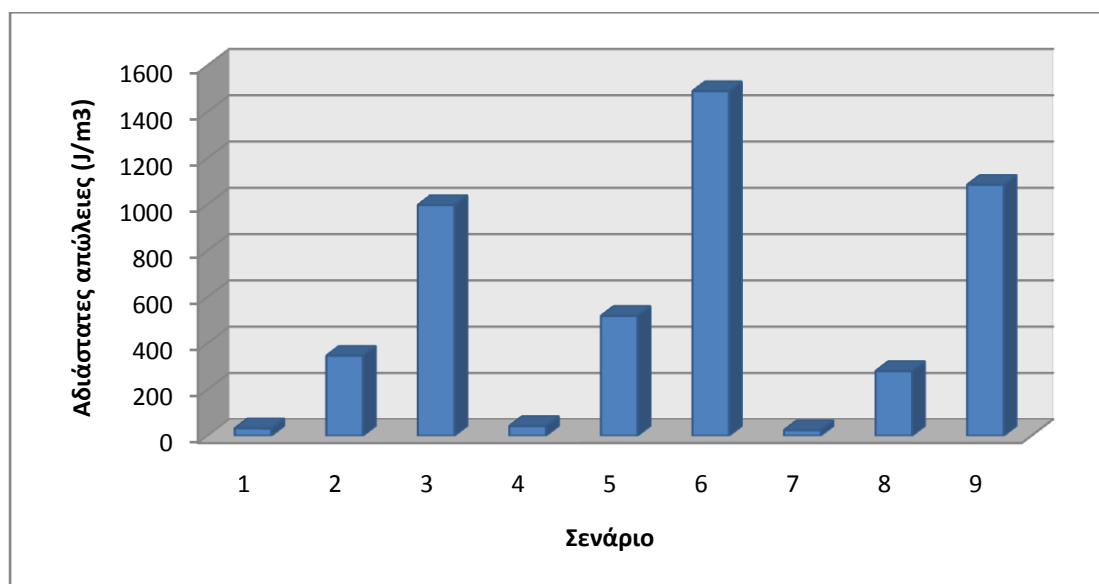


Εικόνα 7.50 Πλέγμα γεωμετρίας.

Μετά την επίλυση έχουμε

Σενάριο	Ποσοστό ετήσιας λειτουργίας (%)	Απώλειες (J/s)	Ετήσιες απώλειες (J)
1	8	20,87	52639891
2	11	740,70	2569447571
3	7	3628,98	8011040985
4	5	19,40	30594335
5	9	788,09	2236787426
6	15	3848,20	18203507115
7	7	15,70	34658903
8	15	425,74	2013939323
9	8	2802,57	7070545935
Σύνολο (GJ)			40,22

Πίνακας 7.5

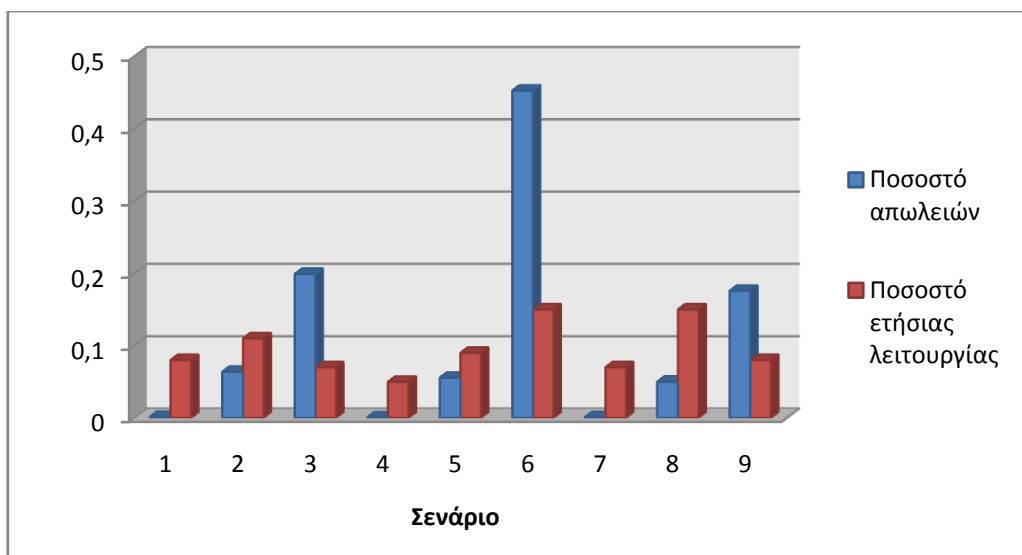


Διάγραμμα 7.8 Αδιάστατες απώλειες ανά σενάριο

Σενάριο	Ποσοστό στις ετήσιες συνολικές απώλειες (%)
1	0,13
2	6,39
3	19,91
4	0,07
5	5,56
6	45,25
7	0,08
8	5,01
9	17,58

Πίνακας 7.6

Οι μεγαλύτερες απώλειες παρατηρούνται για το σενάριο 6 σύμφωνα με τον πίνακα 7.5 και το διάγραμμα 7.8 και αποτελούν το 45% των συνολικών απωλειών. Περισσότερη ανάλυση των αποτελεσμάτων ακολουθεί στο κεφάλαιο 7.2.3.

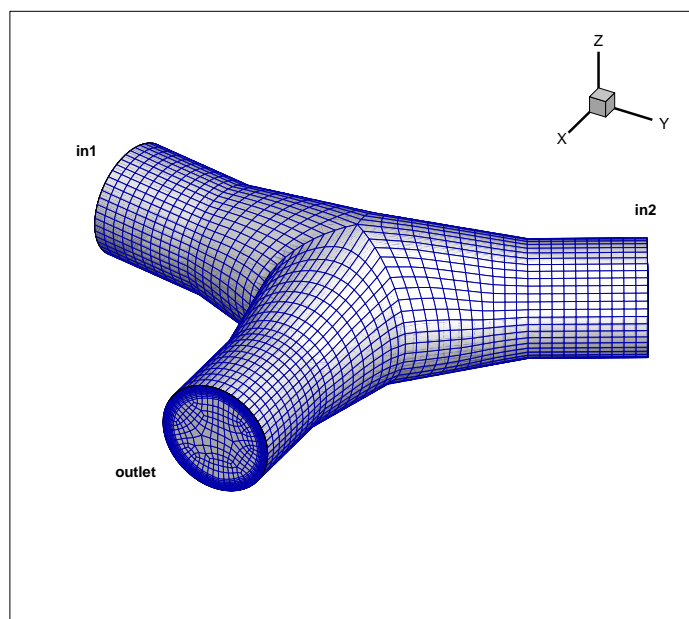


Διάγραμμα 7.9 Ποσοστό συνολικών απωλειών ανά σενάριο

7.3.2 Περίπτωση με $\alpha_2=100^\circ$

Στην επόμενη περίπτωση θα κρατήσουμε πάλι σταθερή την α_1 και θα μειώσουμε την α_2 . Έτσι θα έχουμε:

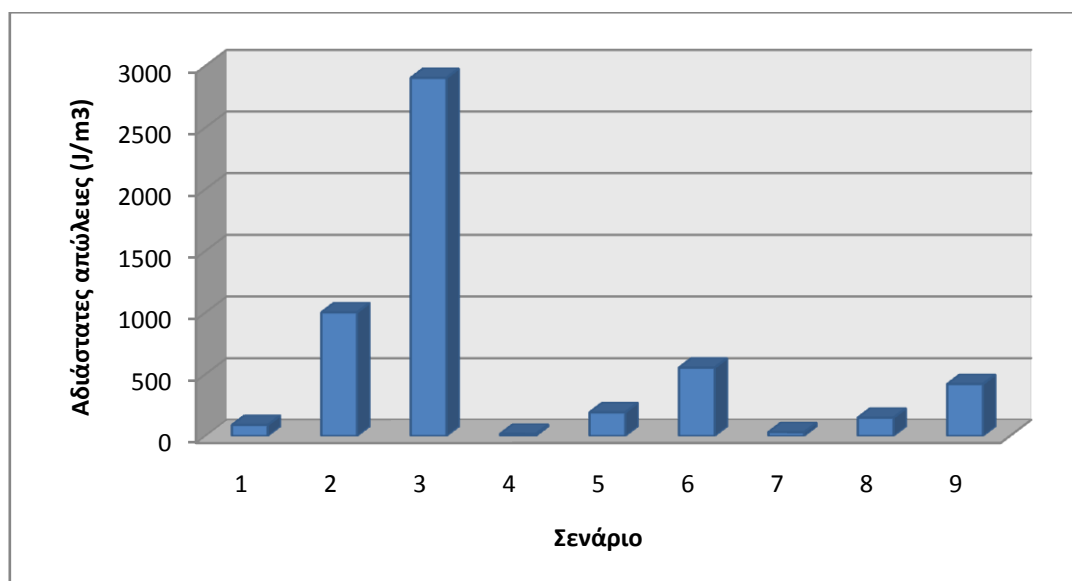
- $d_{\max}=1,5$ m
- $d_{\min}=1$ m
- $\varphi=10^\circ$
- $\alpha_1=120^\circ$
- $\alpha_2=100^\circ$



Εικόνα 7.51 Πλέγμα γεωμετρίας.

Σενάριο	Ποσοστό ετήσιας λειτουργίας (%)	Απώλειες (J/s)	Ετήσιες απώλειες (J)
1	8	57,51	145091737
2	11	2145,54	7442801458
3	7	10565,33	23323186288
4	5	7,84	12359968
5	9	292,04	828872798
6	15	1433,19	6779560841
7	7	19,87	43874063
8	15	226,10	1069529438
9	8	1088,60	2746414989
Σύνολο (GJ)			42,39

Πίνακας 7.7

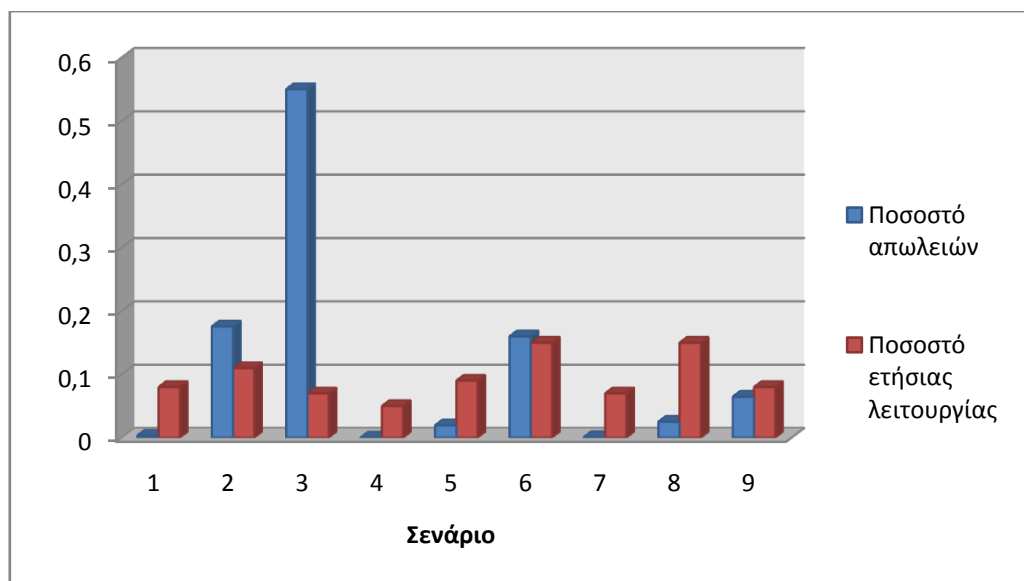


Διάγραμμα 7.10 Ετήσιες απώλειες ανά σενάριο

Σενάριο	Ποσοστό στις ετήσιες συνολικές απώλειες (%)
1	0,34
2	17,56
3	55,01
4	0,03
5	1,95
6	15,99
7	0,10
8	2,52
9	6,48

Πίνακας 7.8

Οι μεγαλύτερες απώλειες παρατηρούνται για το σενάριο 3 σύμφωνα με τον πίνακα 7.7 και το διάγραμμα 7.10 και αποτελούν το 55% των συνολικών απωλειών. Περισσότερη ανάλυση των αποτελεσμάτων ακολουθεί στο κεφάλαιο 7.2.3.

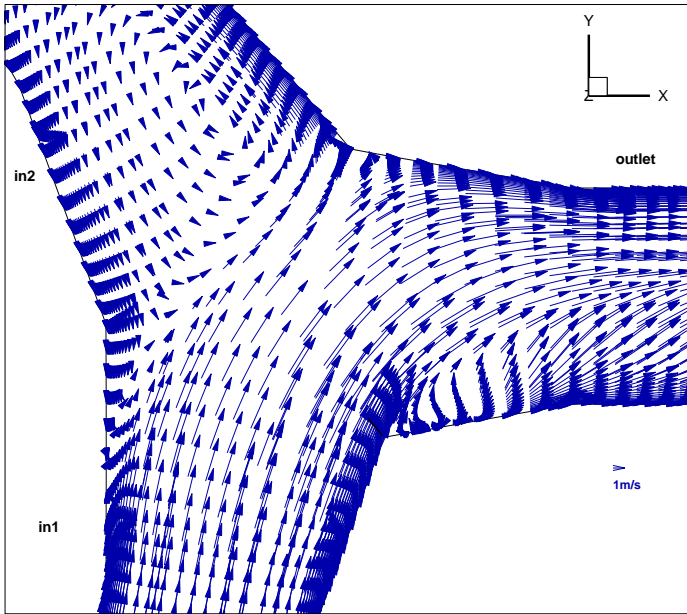


Διάγραμμα 7.11 Ποσοστό συνολικών απωλειών ανά σενάριο

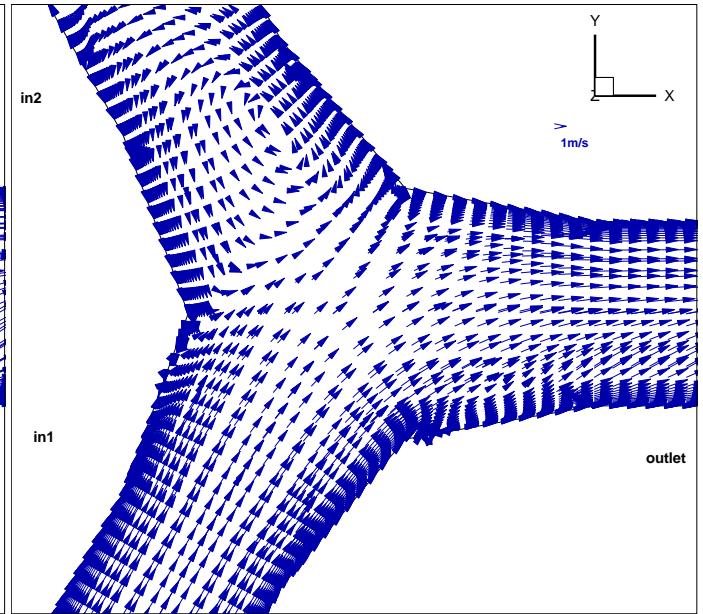
7.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για $\alpha_2=100^\circ$, $\alpha_2=120^\circ$ και $\alpha_2=140^\circ$.

Σύμφωνα με τις δύο παραπάνω περιπτώσεις και με την 6.1.2 παρουσιάζονται οι παρακάτω εικόνες.

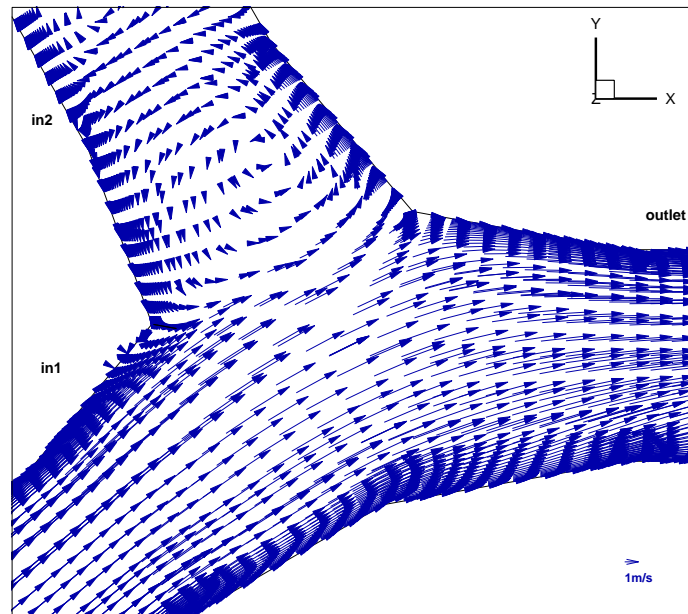
Οι εικόνες 7.52-7.54 μας δείχνουν την κατανομή της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$ για τα διάφορες γωνίες α_2 για το σενάριο 3. Παρατηρούμε ότι καθώς μεγαλώνει η γωνία α_2 η αποκόλληση της ροής καθώς αυτή αλλάζει πορεία γίνεται μικρότερη. Επίσης και για τις τρεις περιπτώσεις δημιουργούνται στροβιλισμοί στο κομμάτι της γεωμετρίας όπου δεν υπάρχει ροή. Παρατηρείται ότι η ροή γίνεται περισσότερο ανομοιόμορφη στην έξοδο outlet όσο μικραίνει η γωνία α_2 και τέλος ότι οι ταχύτητες που αναπτύσσονται στο τμήμα του αγωγού όπου οδηγεί στην επιφάνεια $in2$ είναι μικρότερες όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία α_2 . Αυτό συμβαίνει γιατί όλο και μικρότερο κομμάτι της ροής από την είσοδο εγκλωβίζεται στο παραπάνω τμήμα της γεωμετρίας.



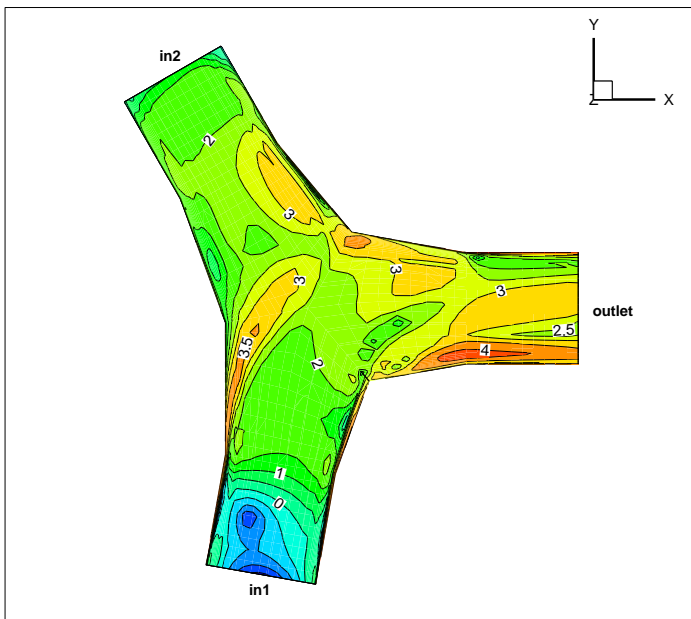
Εικόνα 7.52 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 3, $\alpha_2=100^\circ$)



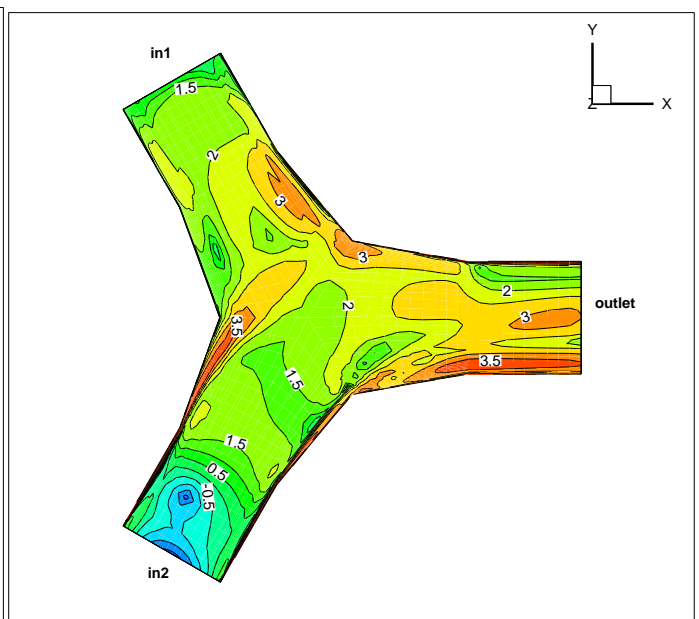
Εικόνα 7.53 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 3, $\alpha_2=120^\circ$)



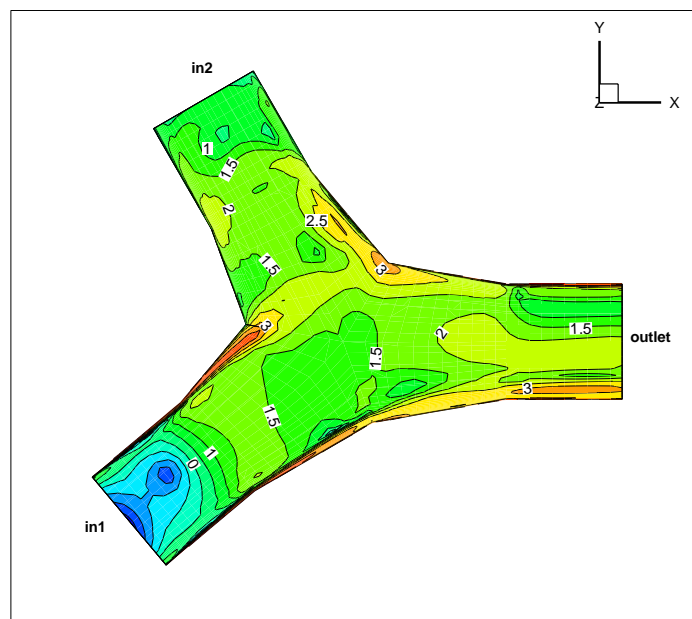
Εικόνα 7.54 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 3, $\alpha_2=140^\circ$)



Εικόνα 7.55 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 3, $\alpha_2=100^\circ$)

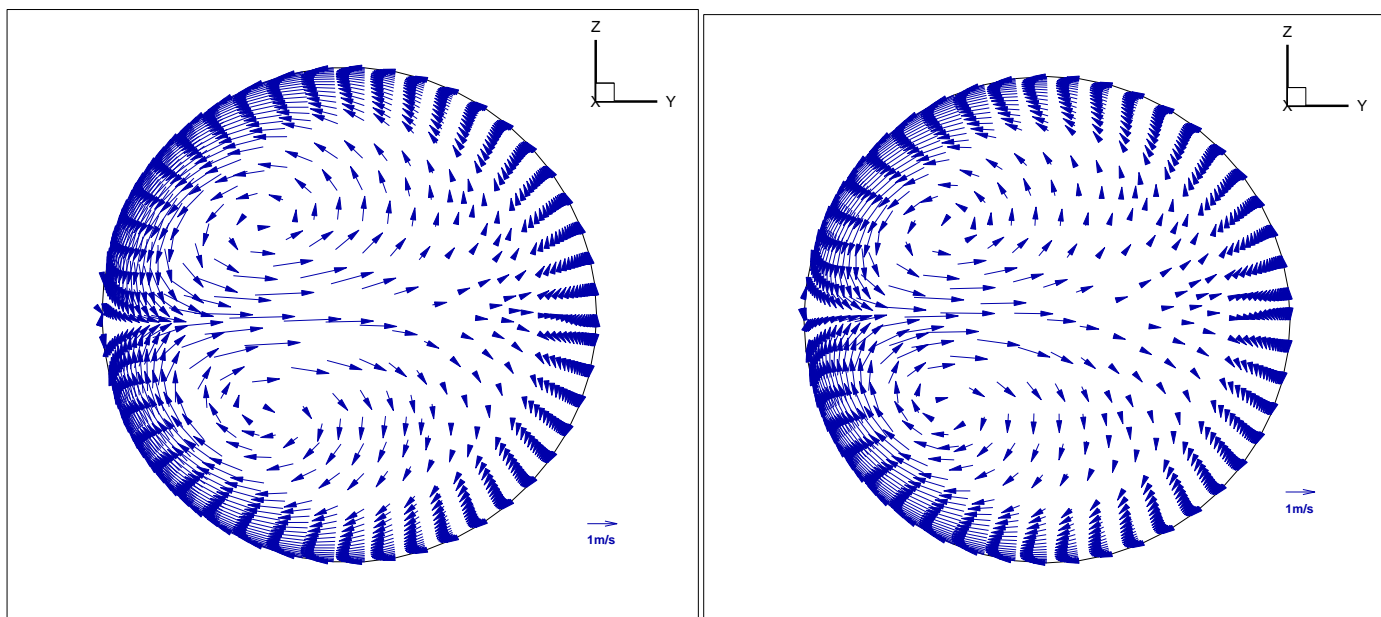


Εικόνα 7.56 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 3, $\alpha_2=120^\circ$)

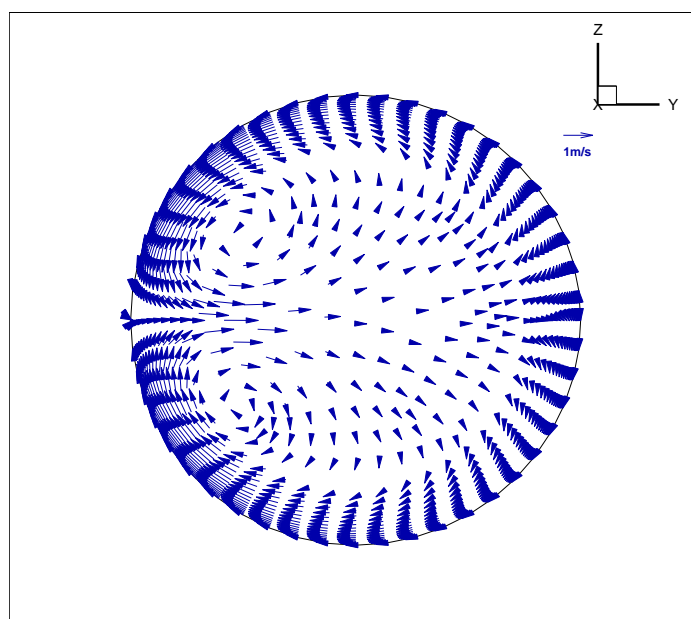


Εικόνα 7.57 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 3, $\alpha_2=140^\circ$)

Στις εικόνες 7.55-7.57 παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η γωνία α_2 τόσο μειώνονται οι απώλειες στην έξοδο για το σενάριο 3. Επίσης και στα άλλα τμήματα της γεωμετρίας όπου έχουμε απώλειες παρατηρείται το ίδιο.

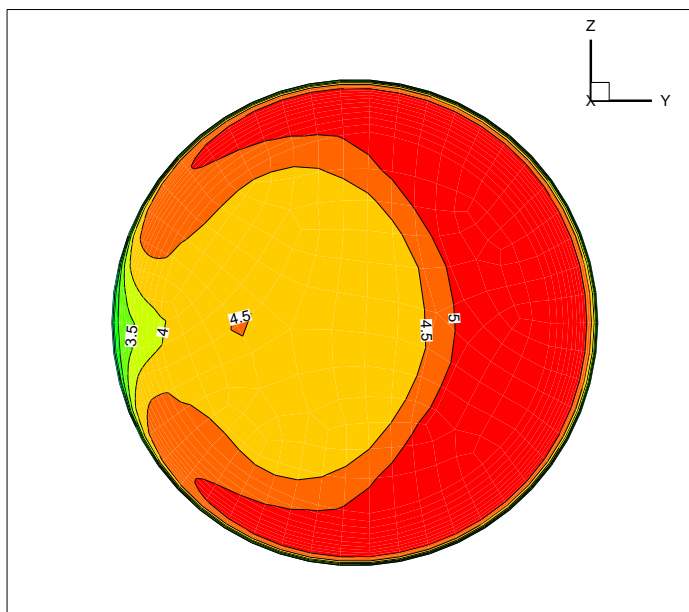


Εικόνα 7.58 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 3, $\alpha_2=100^\circ$) Εικόνα 7.59 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 3, $\alpha_2=120^\circ$)

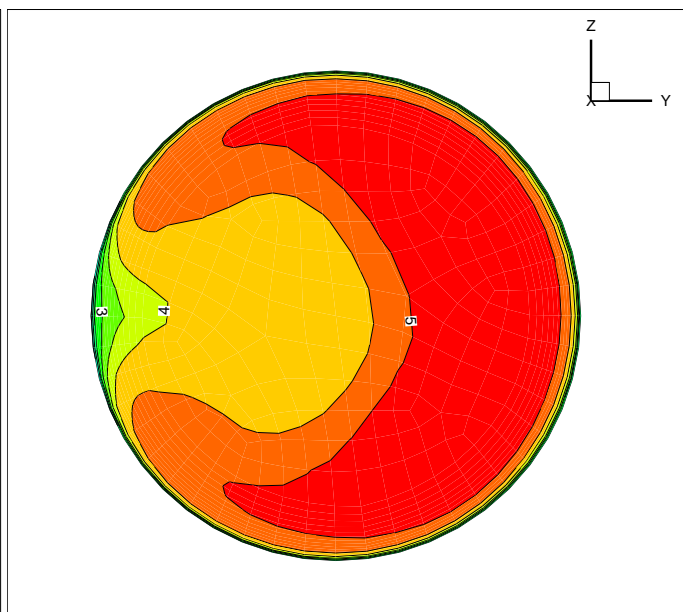


Εικόνα 7.60 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 3, $\alpha_2=140^\circ$)

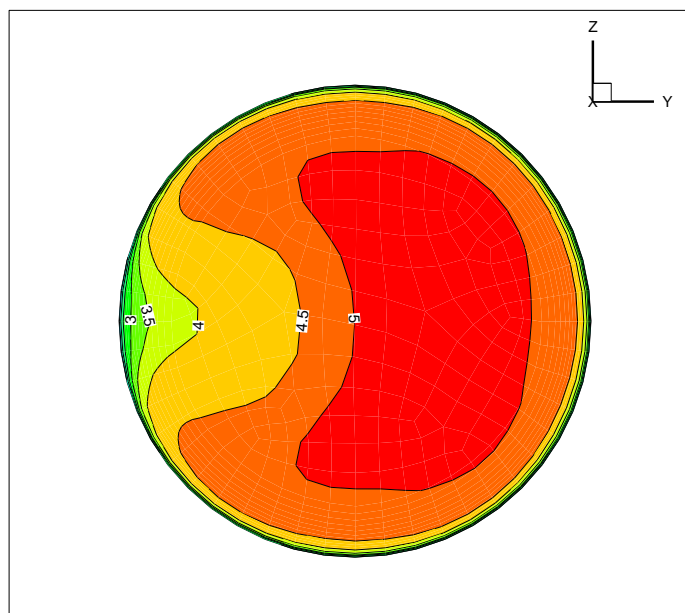
Στις εικόνες 7.58-7.60 παρατηρούνται οι διαφορές στους στροβίλους στην έξοδο outlet για το σενάριο 3 και πώς η έντασή τους μειώνεται καθώς η γωνία α_2 αυξάνει.



Εικόνα 7.61 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 3, $\alpha_2=100^\circ$)



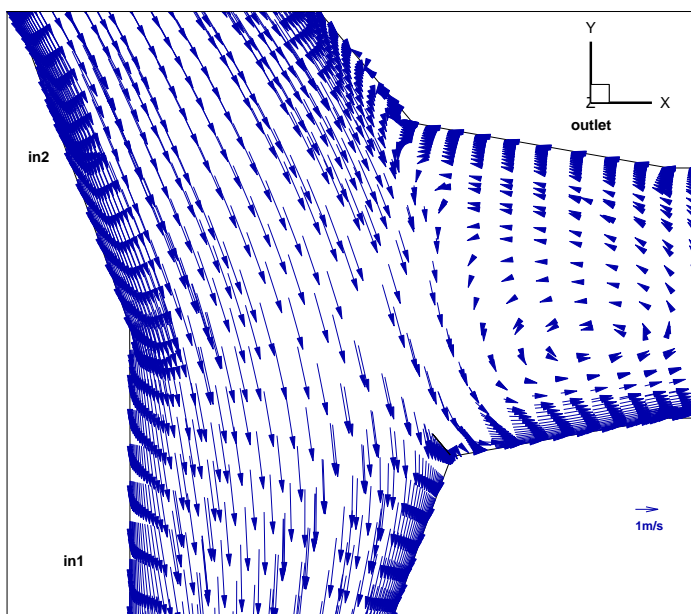
Εικόνα 7.62 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 3, $\alpha_2=120^\circ$)



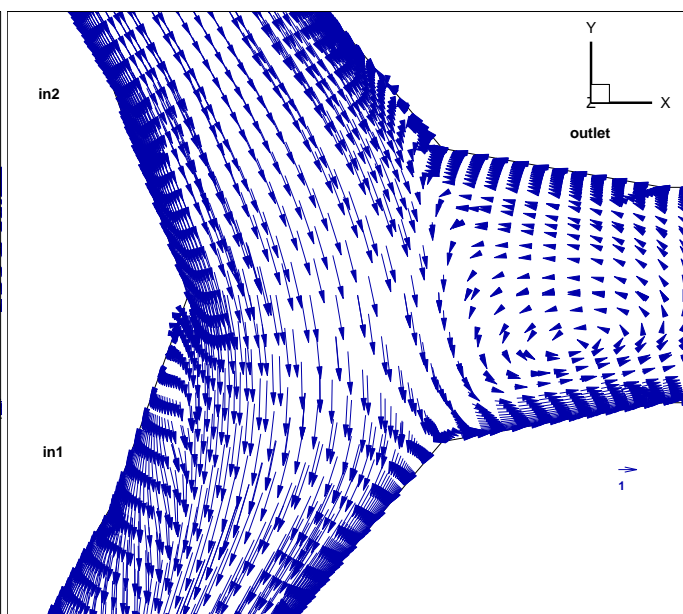
Εικόνα 7.63 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 3, $\alpha_2=140^\circ$)

Στις εικόνες 7.61-6.63 έχουμε τις ισοταχείς στην έξοδο outlet για τις διάφορες γωνίες α_2 . Παρατηρούμε ότι όσο μικραίνει η γωνία α_2 τόσο η ροή γίνεται πιο ανομοιόμορφη στην έξοδο η οποία επίσης παρουσιάζει και μεγαλύτερες ταχύτητες κυρίως κοντά στα τοιχώματα του αγωγού. Αυτό οφείλεται καθαρά στην συστροφή της ροής καθώς αυτή αλλάζει πορεία και γίνεται πιο έντονη για το σενάριο αυτό όταν η γωνία α_2 μικραίνει.

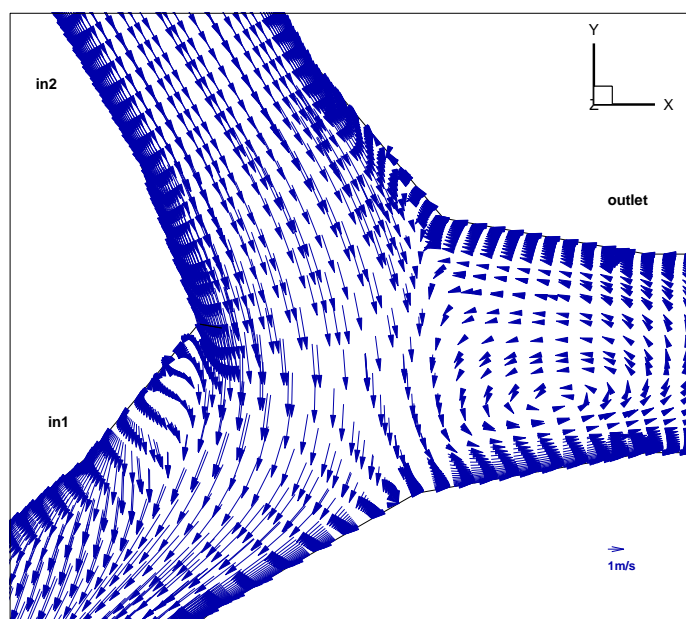
Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω αναμένουμε για το σενάριο αυτό οι απώλειες να είναι μικρότερες για $\alpha_2=140^\circ$.



Εικόνα 7.64 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 6, $\alpha_2=100^\circ$)

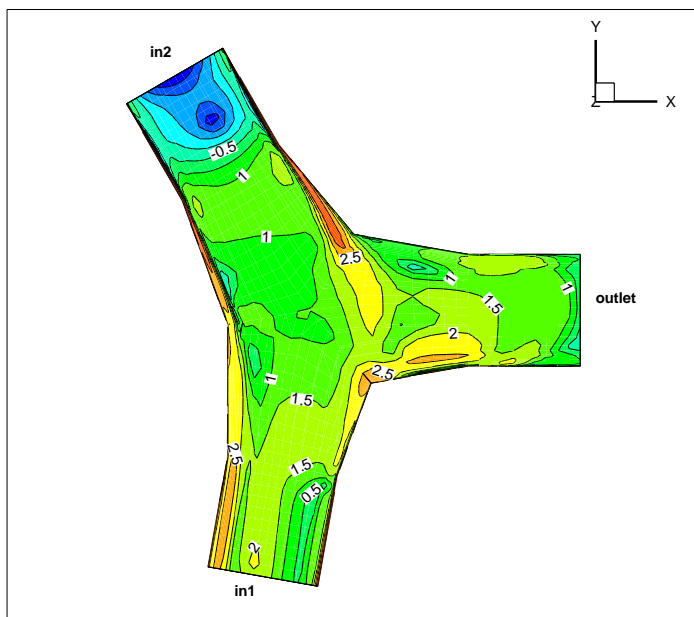


Εικόνα 7.65 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 6, $\alpha_2=120^\circ$)

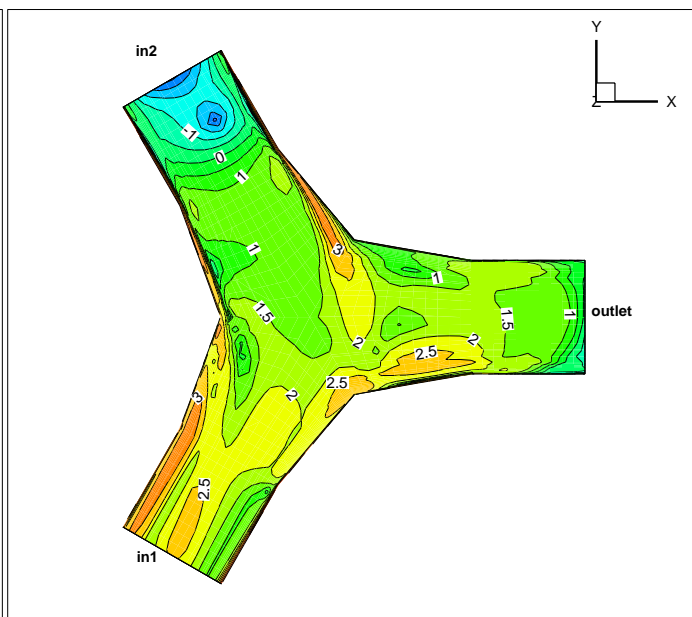


Εικόνα 7.66 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 6, $\alpha_2=140^\circ$)

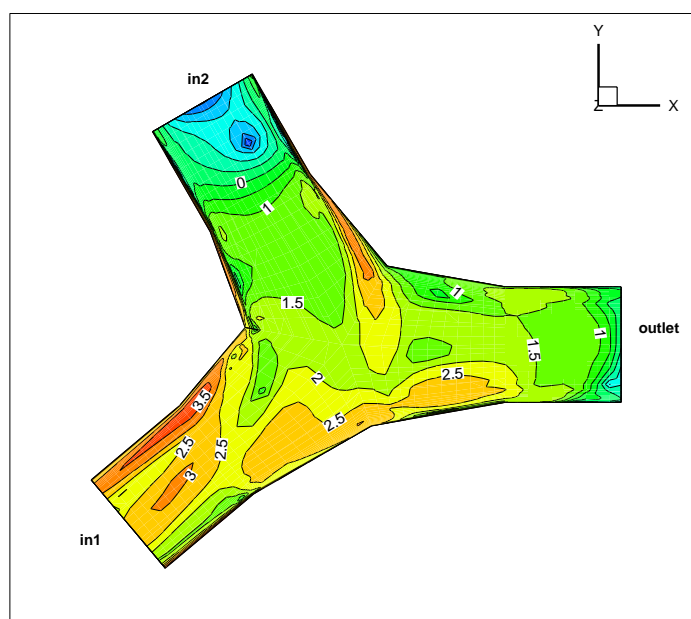
Στις εικόνες 7.64-7.66 έχουμε τα διανύσματα της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$ για τις διάφορες γωνίες α_2 για το σενάριο 6. Αντίθετα με το σενάριο 3 σε αυτήν την περίπτωση η αποκόλληση της ροής γίνεται μικρότερη καθώς μικραίνει η γωνία α_2 . Και εδώ έχουμε δημιουργία στροβιλισμών στο τμήμα της γεωμετρίας όπου δεν υπάρχει ροή με μεγαλύτερες ταχύτητες να αναπτύσσονται για $\alpha_2=140^\circ$.



Εικόνα 7.67 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 6, $\alpha_2=100^\circ$)

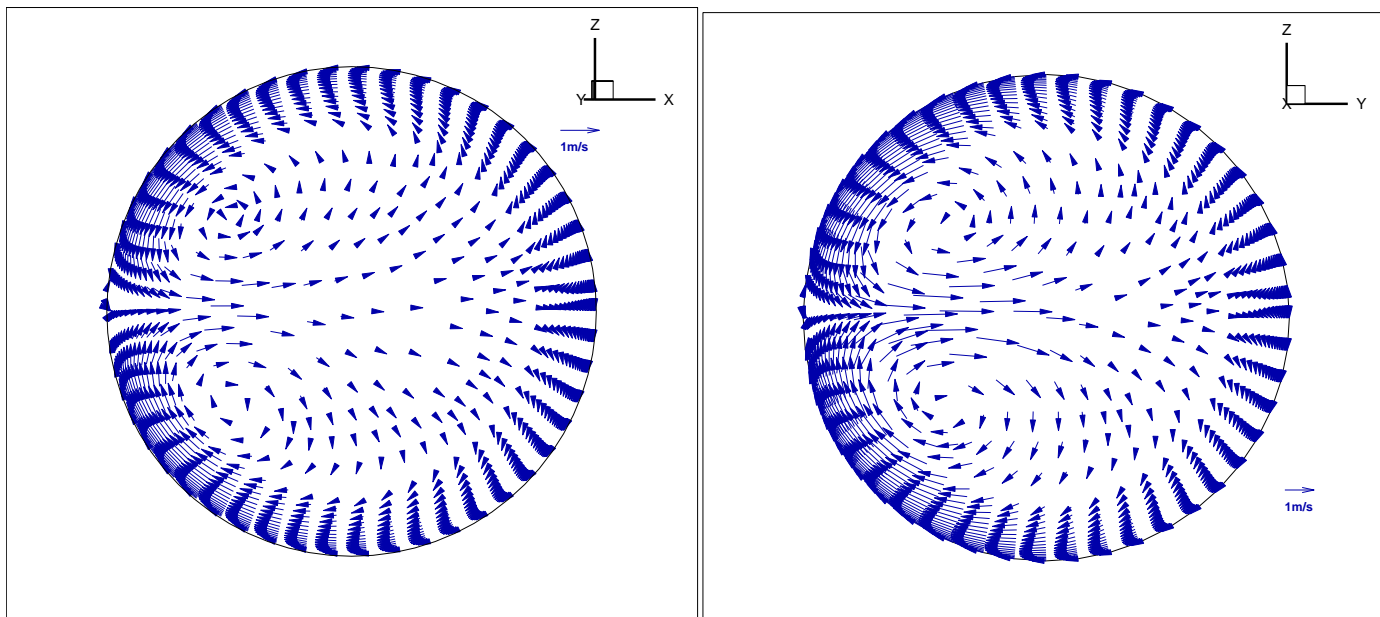


Εικόνα 7.68 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 6, $\alpha_2=120^\circ$)

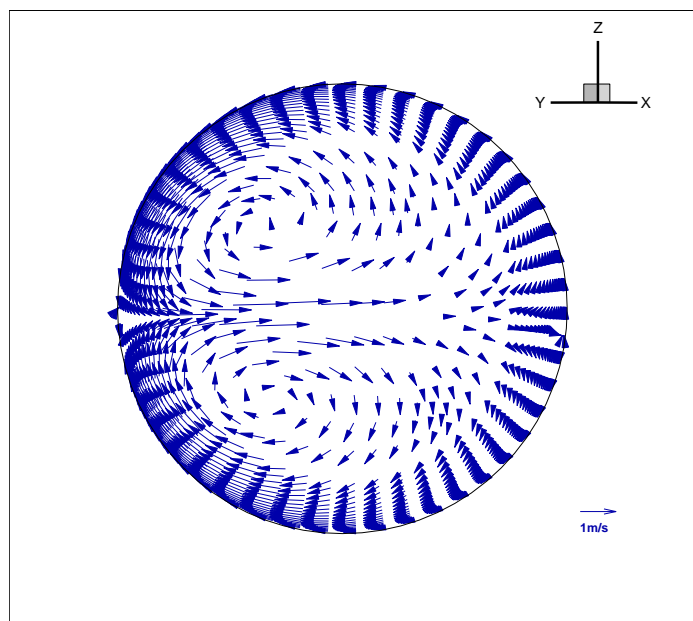


Εικόνα 7.69 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 6, $\alpha_2=140^\circ$)

Στις εικόνες 7.67-7.69 παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η γωνία α_2 τόσο αυξάνουν και οι απώλειες στην έξοδο in1. Αυτό οφείλεται καθαρά στο ότι η ροή χρειάζεται να «στρίψει» πιο πολύ με αποτέλεσμα μεγαλύτερων αποκολλήσεων και μεγαλύτερης έντασης στροβίλων Dean στην έξοδο. Τέλος για όσο μεγαλώνει η α_2 τόσο αυξάνει και η επιφάνεια που είναι κάθετη στη ροή με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών.

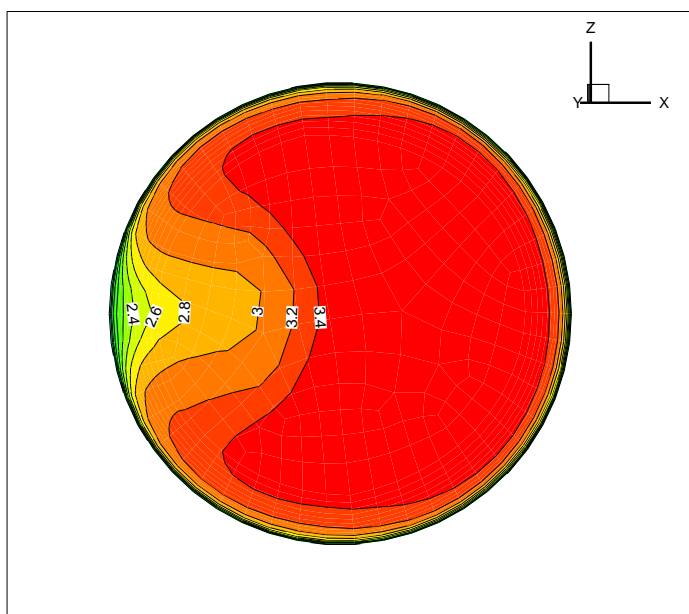


Εικόνα 7.70 Διανύσματα ταχύτητας στην in1 (σενάριο 6, $\alpha_2=100^\circ$) Εικόνα 7.71 Διανύσματα ταχύτητας στην in1 (σενάριο 6, $\alpha_2=120^\circ$)

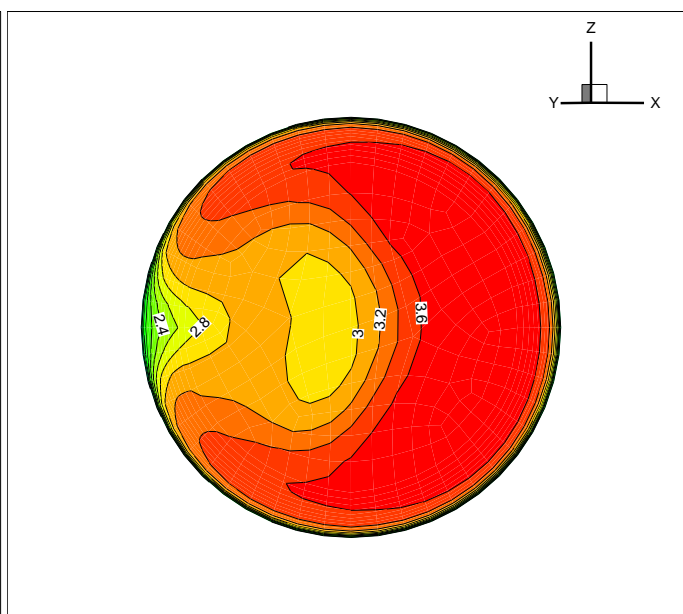


Εικόνα 7.72 Διανύσματα ταχύτητας στην in1 (σενάριο 6, $\alpha_2=140^\circ$)

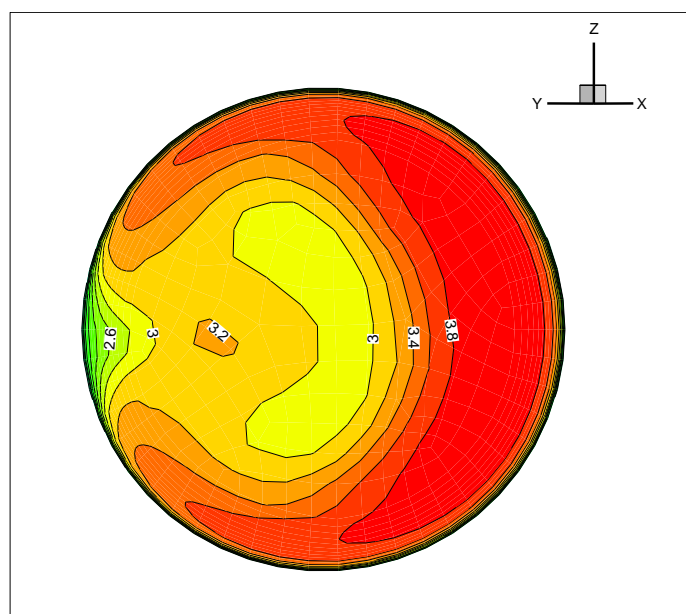
Οι εικόνες 7.70-7.72 δείχνουν τους στροβίλους Dean στην έξοδο in1 της γεωμετρίας και πως αυτοί γίνονται εντονότεροι καθώς αυξάνεται η γωνία α_2 .



Εικόνα 7.73 Ισοταχείς στην έξοδο in1(σενάριο 6, $\alpha_2=100^\circ$)



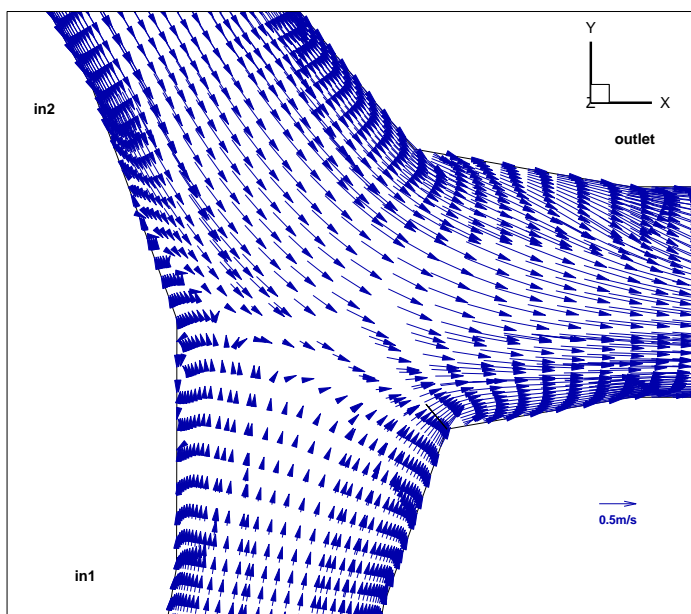
Εικόνα 7.74 Ισοταχείς στην έξοδο in1 (σενάριο 6, $\alpha_2=120^\circ$)



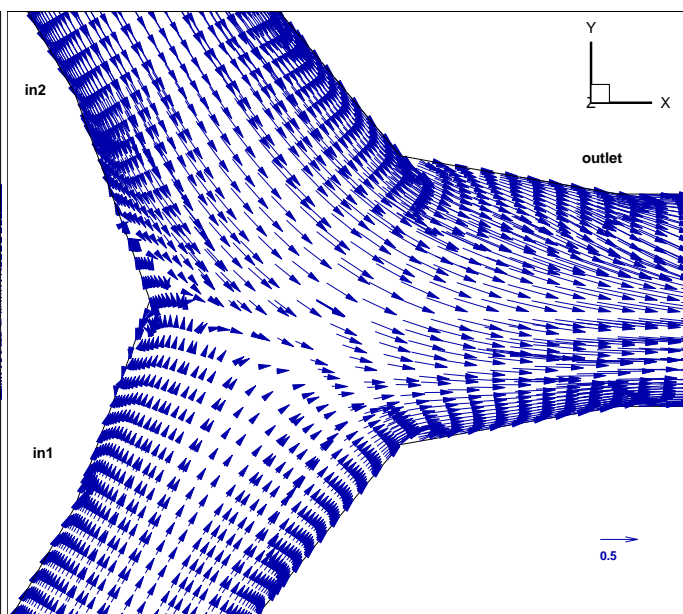
Εικόνα 7.75 Ισοταχείς στην έξοδο in1 (σενάριο 6, $\alpha_2=140^\circ$)

Στις εικόνες 7.73-7.75 έχουμε τις ισοταχείς στην έξοδο in1 για τις διάφορες γωνίες α_2 . Όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω η κατανομή της ταχύτητας είναι πιο ομοιόμορφη όσο μικρότερη είναι η γωνία α_2 όπου παρουσιάζονται και μικρότερες ταχύτητες. Αυτό υποδηλώνει ότι η στροβιλισμοί της ροής λόγω της συστροφής δεν είναι τόσο έντονοι όσο για μεγαλύτερες γωνίες τις α_2 .

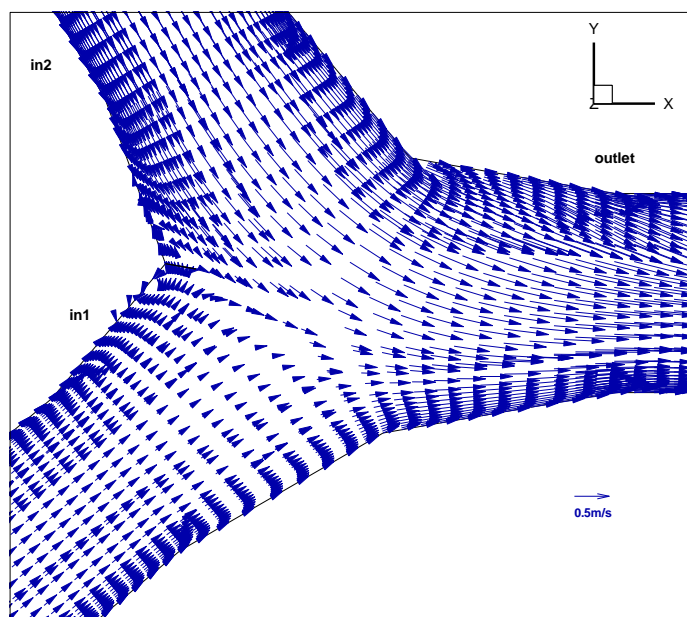
Αντίθετα με το προηγούμενο σενάριο αναμένουμε το αντίθετο όσον αφορά τις απώλειες, δηλαδή αυτές να είναι μικρότερες για μικρές τιμές της α_2 και πιο συγκεκριμένα για $\alpha_2=100^\circ$.



Εικόνα 7.76 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 7, $\alpha_2=100^\circ$)



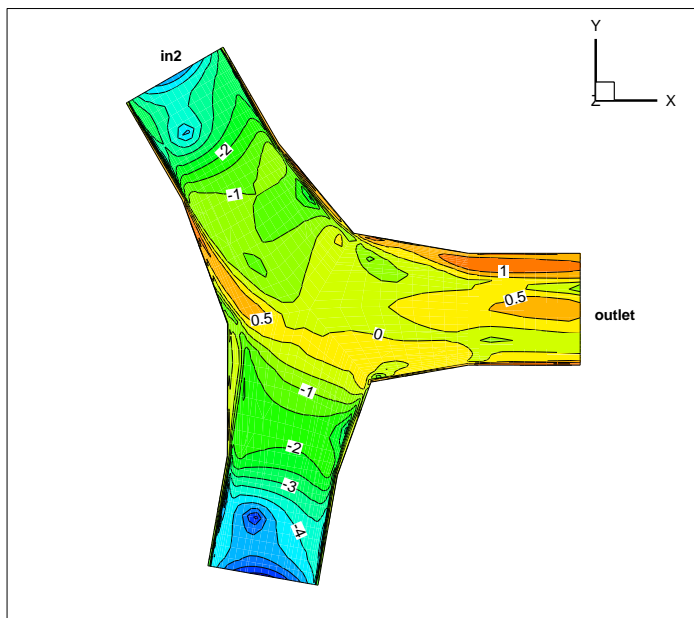
Εικόνα 7.77 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 7, $\alpha_2=120^\circ$)



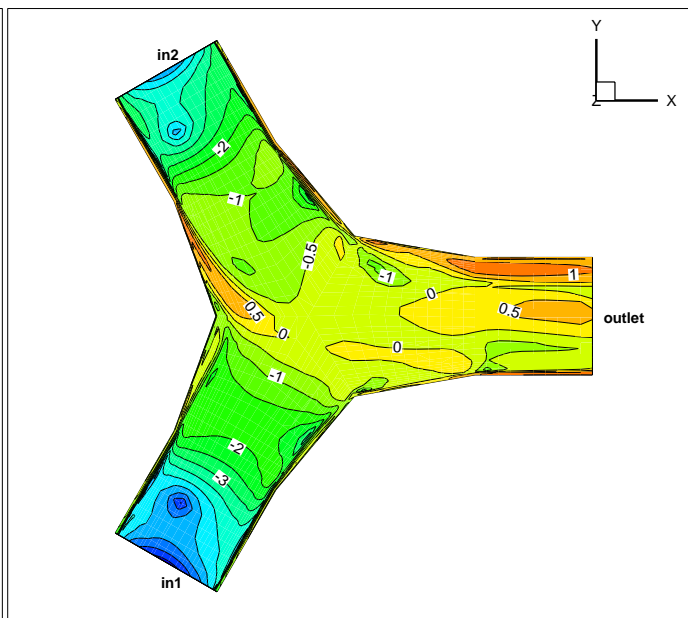
Εικόνα 7.78 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 7, $\alpha_2=140^\circ$)

Στις εικόνες 7.76-7.78 έχουμε τα διανύσματα της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$ για τις διάφορες γωνίες α_2 για το σενάριο 7. Παρατηρούμε ότι η ροή υψηλής ταχύτητας δεν αλλάζει ιδιαίτερα για τις διάφορες γωνίες. Αντίθετα στην ροή χαμηλής ταχύτητας παρατηρούνται διαφορές. Πιο συγκεκριμένα για μεγάλες γωνίες της α_2 μικρότερο τμήμα της ροής αναγκάζεται να κινηθεί αντίθετα με την ροή υψηλής ταχύτητας ενώ το υπόλοιπο αναμιγνύεται ευκολότερα με την υπόλοιπη ροή.

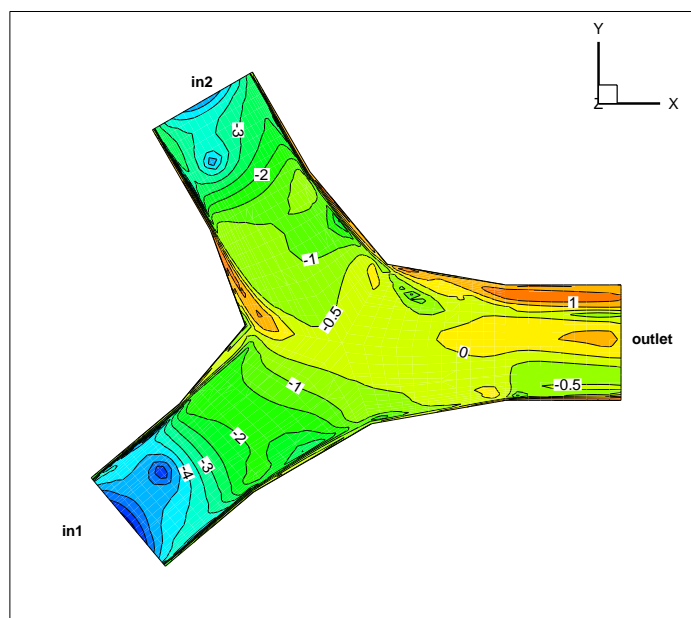
Αυτό αντικατοπτρίζεται και στις εικόνες 7.79-7.81 όπου παρατηρείται μείωση των τιμών της Φ στην περιοχή ανάμιξης της ροής και επομένως και των απωλειών. Γενικότερα δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη μεταβολή μιας και η ροή υψηλής ταχύτητας που επηρεάζεται από την γωνία α_1 δεν αλλάζει.



Εικόνα 7.79 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 7, $\alpha_2=100^\circ$)

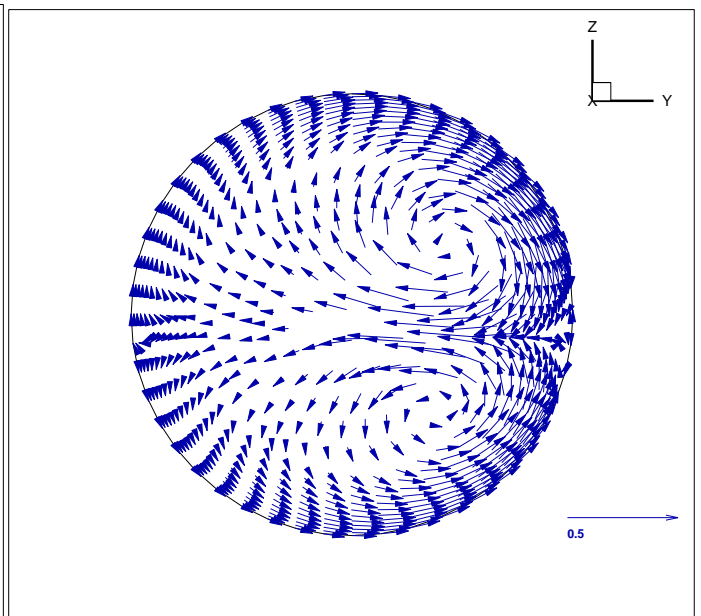
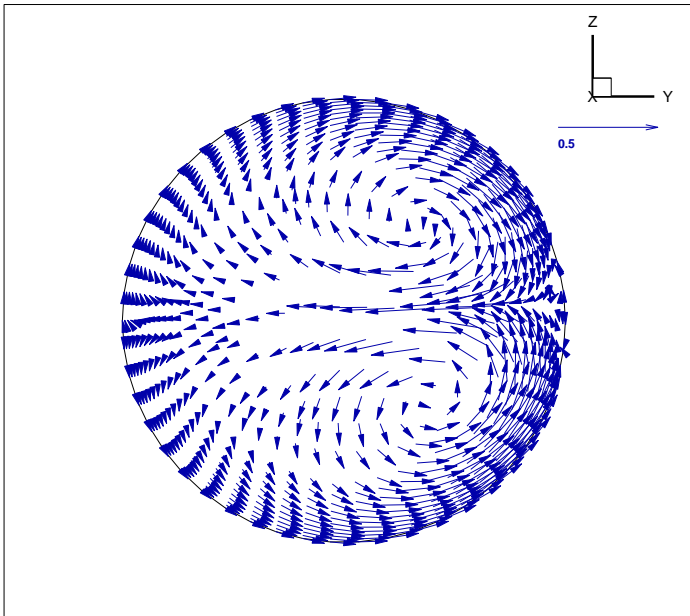


Εικόνα 7.80 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 7, $\alpha_2=120^\circ$)

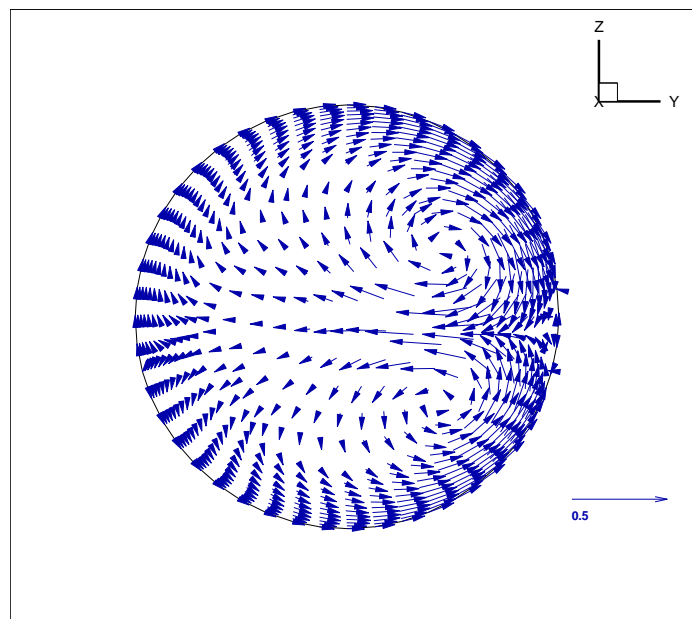


Εικόνα 7.81 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 7, $\alpha_2=140^\circ$)

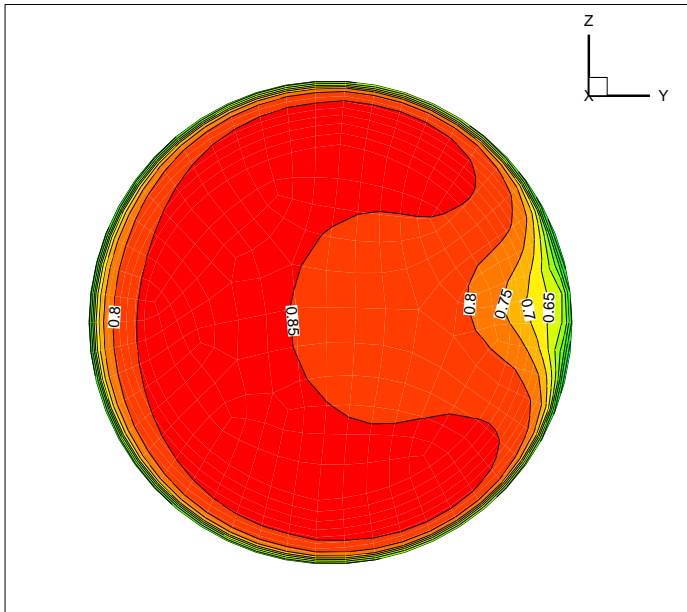
Το παραπάνω συμπέρασμα φαίνεται και στις εικόνες 7.82-7.87 όπου δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη μεταβολή τόσο στην κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο αλλά και στους στροβιλισμούς.



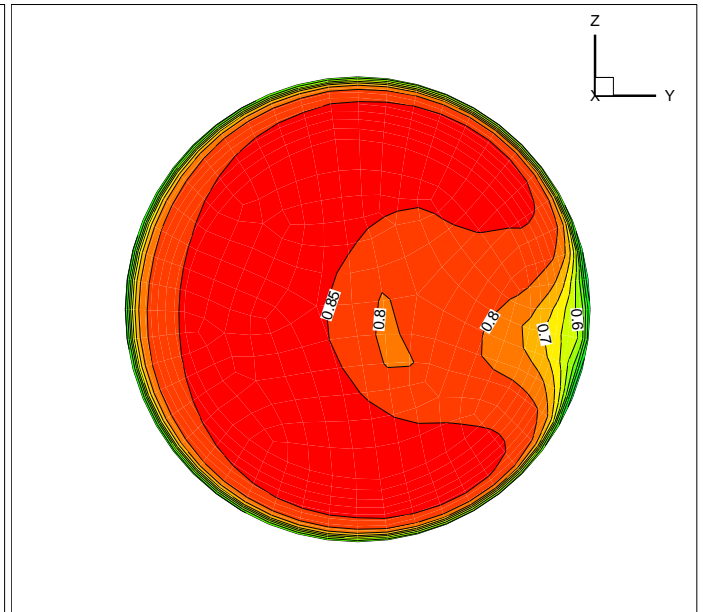
Εικόνα 7.82 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 7, $\alpha_2=100^\circ$) Εικόνα 7.83 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 7, $\alpha_2=120^\circ$)



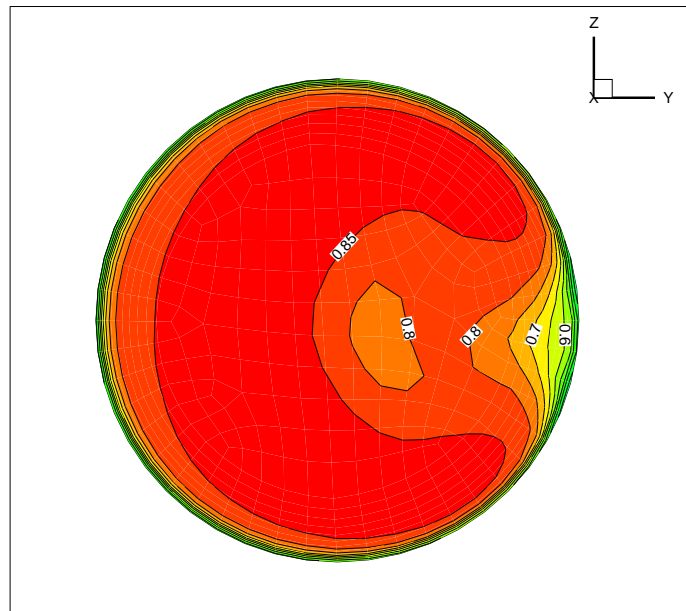
Εικόνα 7.84 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 7, $\alpha_2=140^\circ$)



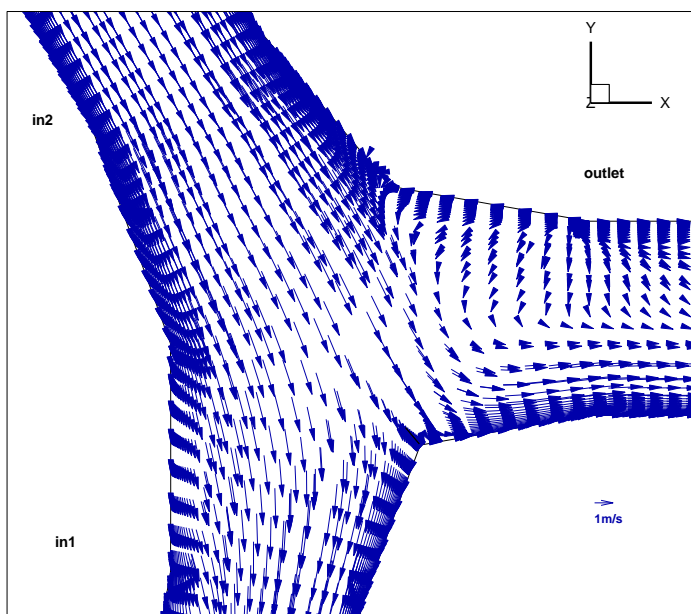
Εικόνα 7.85 Ισοταχείς στην έξοδο in1 (σενάριο 7, $\alpha_2=100^\circ$)



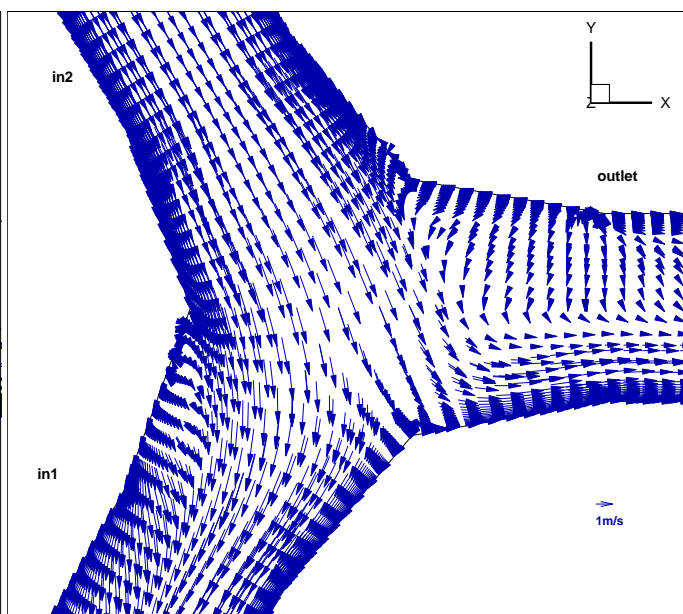
Εικόνα 7.86 Ισοταχείς στην έξοδο in1 (σενάριο 7, $\alpha_2=120^\circ$)



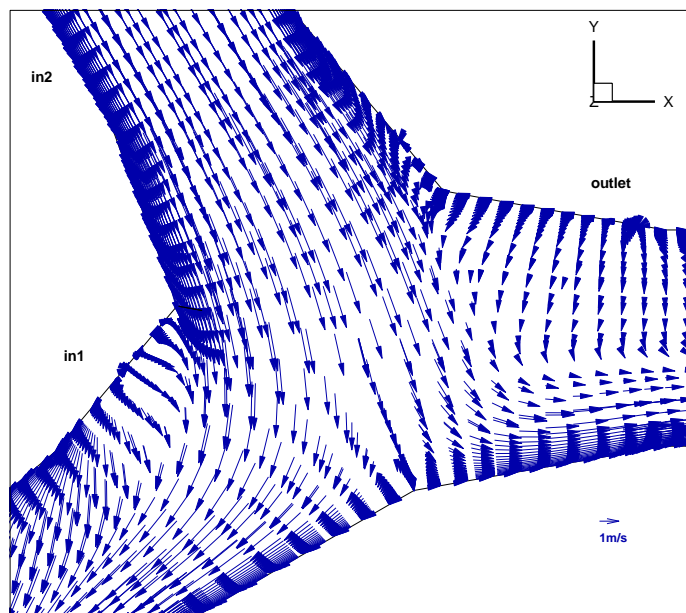
Εικόνα 7.87 Ισοταχείς στην έξοδο in1 (σενάριο 7, $\alpha_2=140^\circ$)



Εικόνα 7.88 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 9, $\alpha_2=100^\circ$)

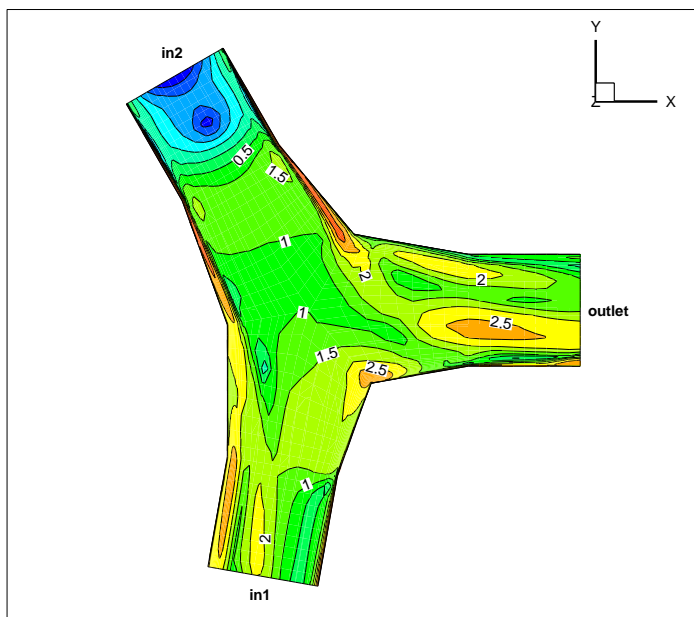


Εικόνα 7.89 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 9, $\alpha_2=120^\circ$)

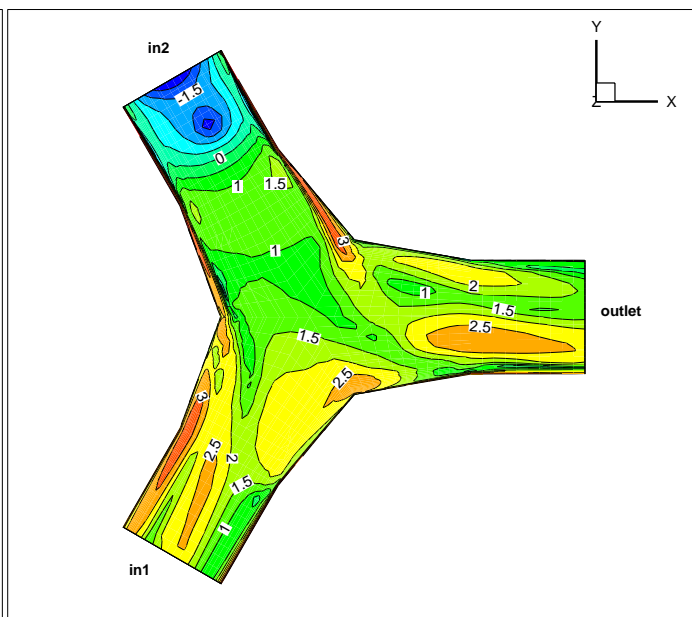


Εικόνα 7.90 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 9, $\alpha_2=140^\circ$)

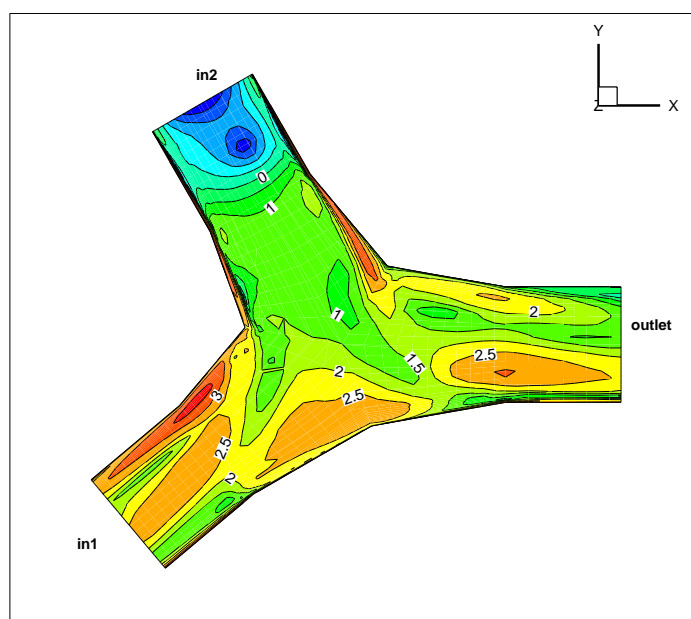
Στις εικόνες 7.88-7.90 έχουμε τα διανύσματα της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$ για τις διάφορες γωνίες α_2 για το σενάριο 9. Σε αυτό το σενάριο έχουμε διαχωρισμό της ροής και παρατηρούμε ότι στο τμήμα της ροής που πηγαίνει προς την έξοδο in1 έχουμε αποκόλληση η οποία αλλάζει για διαφορετικές γωνίες. Αντίθετα στο τμήμα τη ροής που πηγαίνει προς την έξοδο outlet έχουμε και εκεί αποκόλληση η οποία όμως δεν αλλάζει ιδιαίτερα με την αλλαγή της γωνίας α_2 μιας και επηρεάζεται κυρίως από την γωνία α_1 . Τέλος παρατηρούμε ότι το τμήμα κοντά στο τοίχωμα όπου διαχωρίζεται η ροή και έχουμε χαμηλές ταχύτητες είναι μεγαλύτερο για τις μεγάλες γωνίες α_2 .



Εικόνα 7.91 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 9, $\alpha_2=100^\circ$)

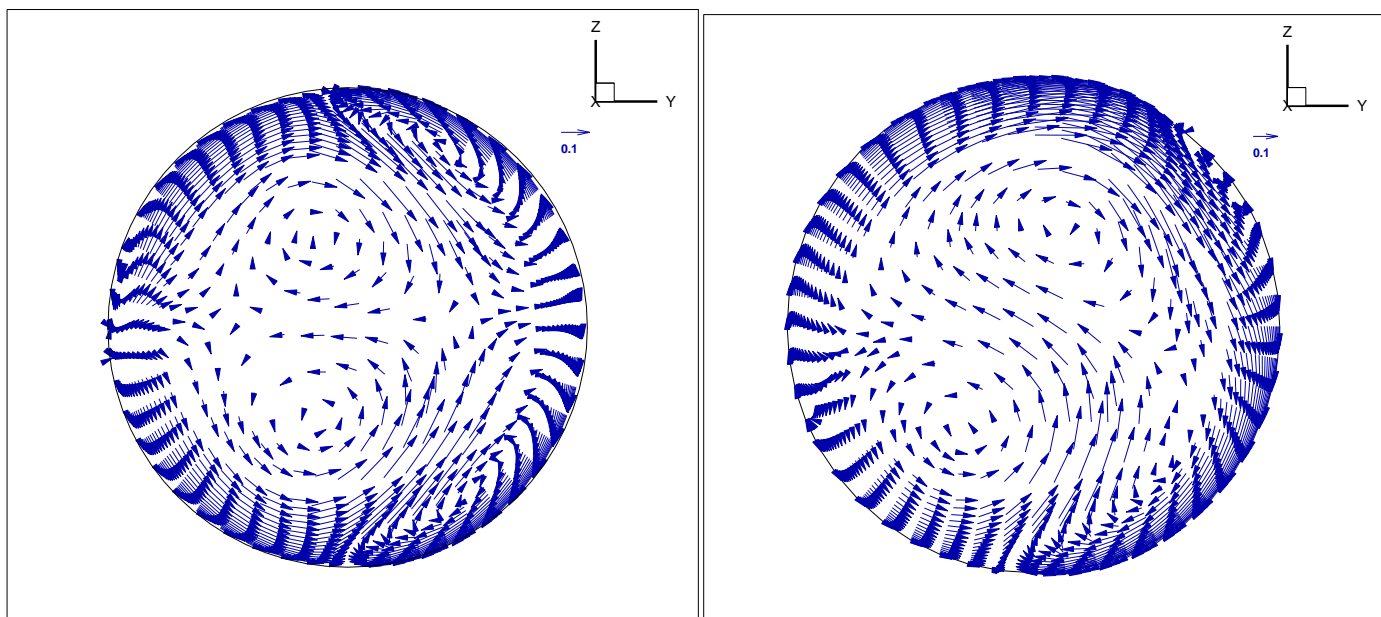


Εικόνα 7.92 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 9, $\alpha_2=120^\circ$)

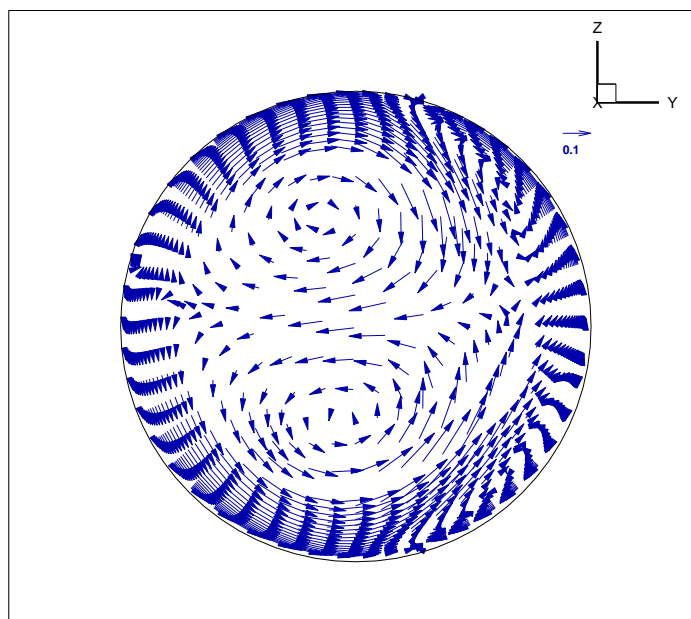


Εικόνα 7.93 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 9, $\alpha_2=140^\circ$)

Στις εικόνες 7.91-7.93 παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η γωνία α_2 τόσο αυξάνουν και οι απώλειες στην έξοδο in1. Το ίδιο συμβαίνει και στην έξοδο outlet αλλά όχι σε τόσο μεγάλο βαθμό. Επίσης αυξάνουν και οι απώλειες στο τμήμα της γεωμετρίας όπου η ροή είναι κάθετη στα τοιχώματα.

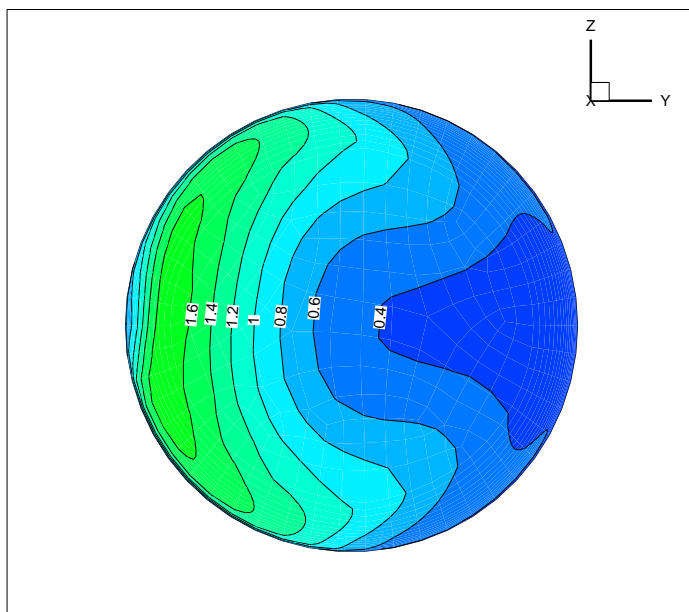


Εικόνα 7.94 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 9, $\alpha_2=100^\circ$) Εικόνα 7.95 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 9, $\alpha_2=120^\circ$)

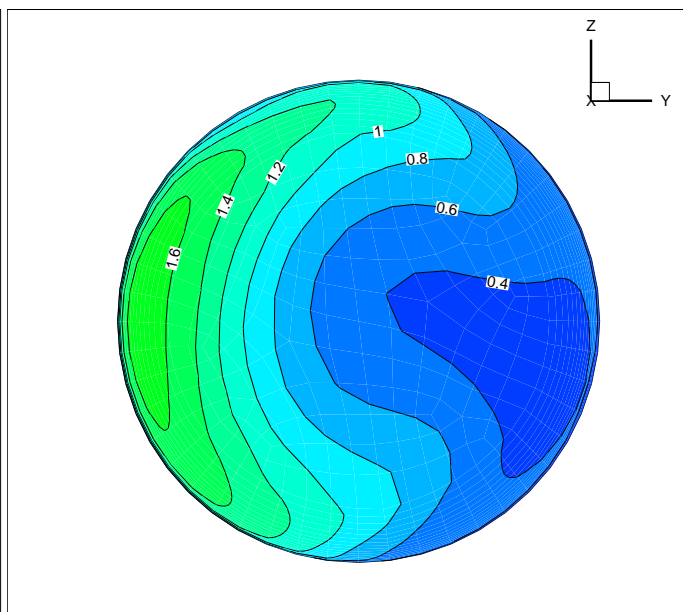


Εικόνα 7.96 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 9, $\alpha_2=140^\circ$)

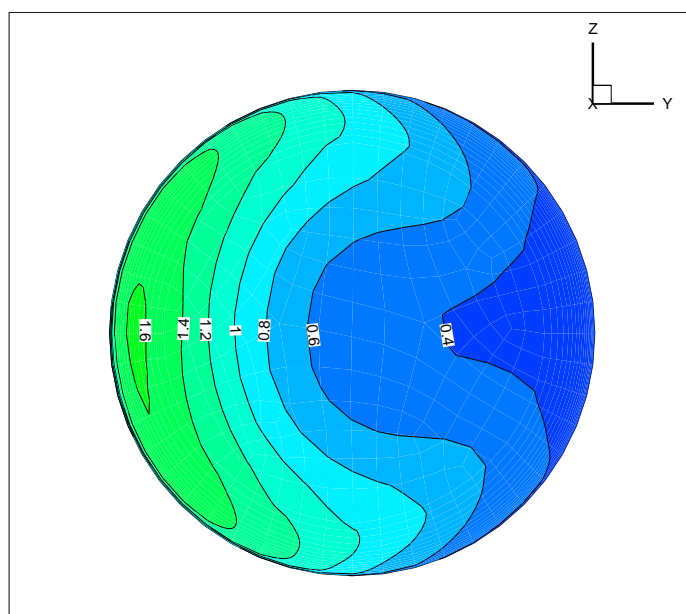
Οι εικόνες 7.94-7.96 δείχνουν τους στροβιλισμούς στην έξοδο outlet όπου δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη μεταβολή για τις διάφορες γωνίες α_2 .



Εικόνα 7.97 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 9, $\alpha_2=100^\circ$)

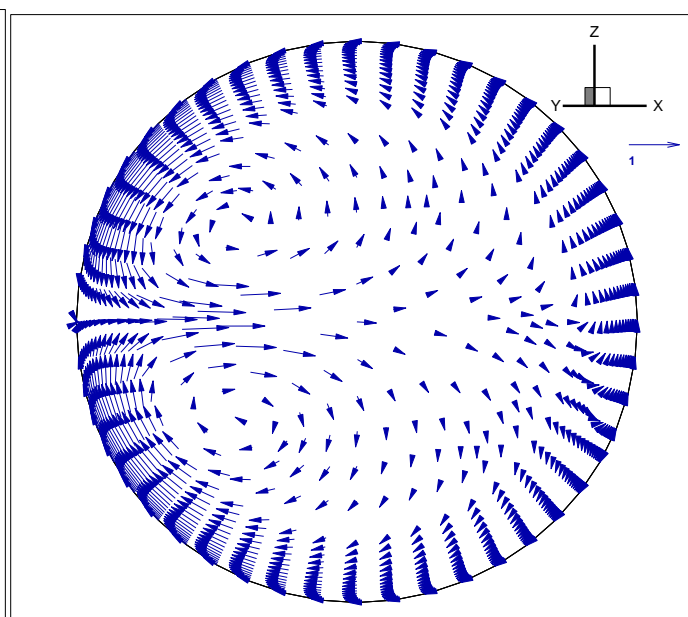
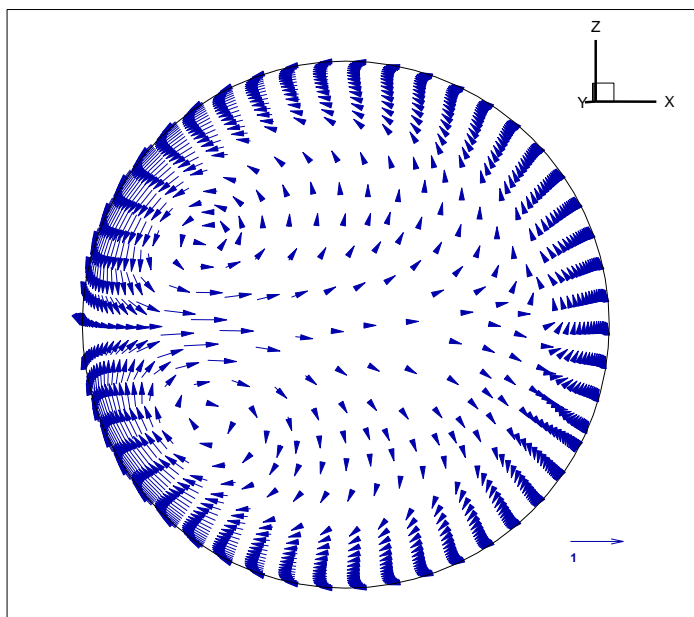


Εικόνα 7.98 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 9, $\alpha_2=120^\circ$)

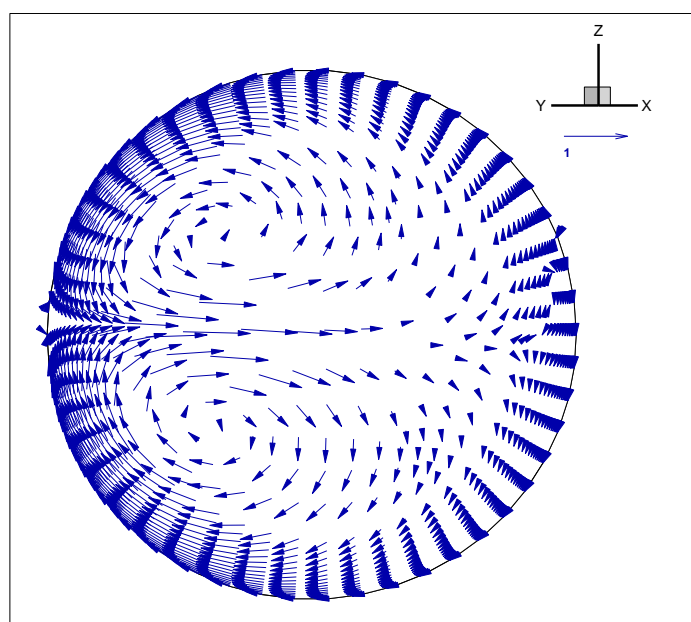


Εικόνα 7.99 Ισοταχείς στην έξοδο outlet (σενάριο 9, $\alpha_2=140^\circ$)

Στις εικόνες 7.97-7.99 έχουμε τις ισοταχείς στην έξοδο outlet. Παρατηρούμε και εδώ ότι οι αλλαγές είναι μικρές για τις διάφορες γωνίες καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η γωνία α_2 δεν επηρεάζει κατά πολύ την ροή που κατευθύνεται προς την έξοδο outlet.

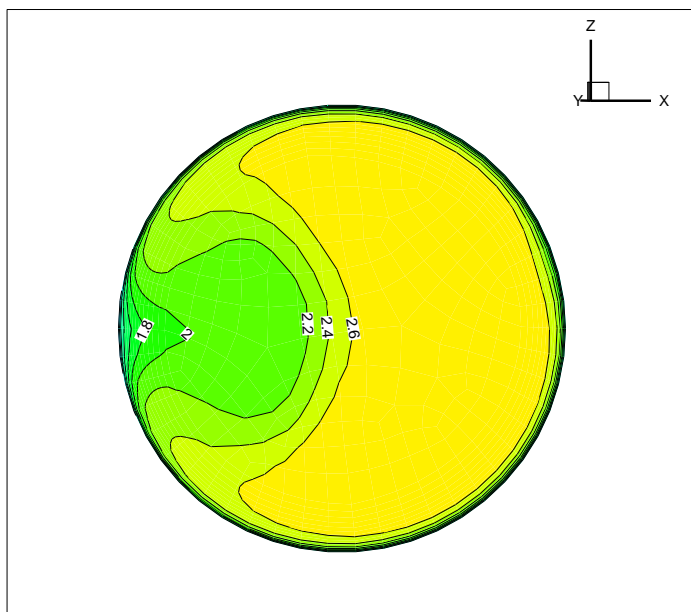


Εικόνα 7.100 Διανύσματα ταχύτητας στην in1 (σενάριο 9, $\alpha_2=100^\circ$) Εικόνα 7.101 Διανύσματα ταχύτητας στην in1 (σενάριο 9, $\alpha_2=120^\circ$)

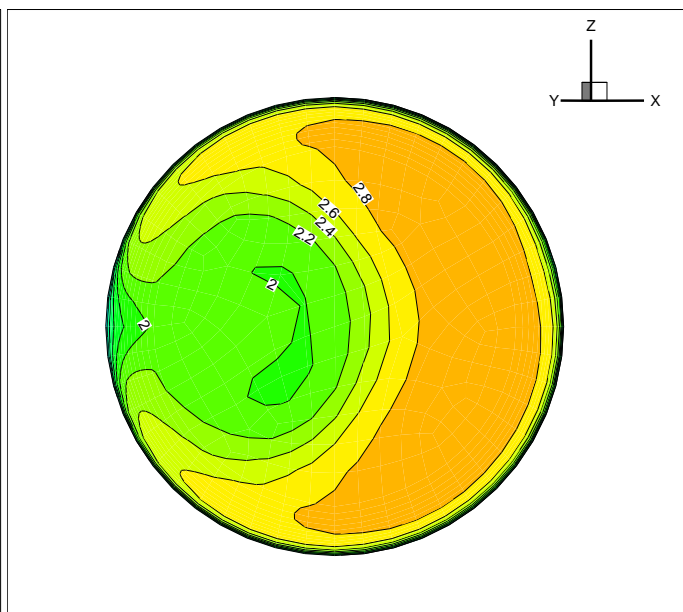


Εικόνα 7.102 Διανύσματα ταχύτητας στην in1 (σενάριο 9, $\alpha_2=140^\circ$)

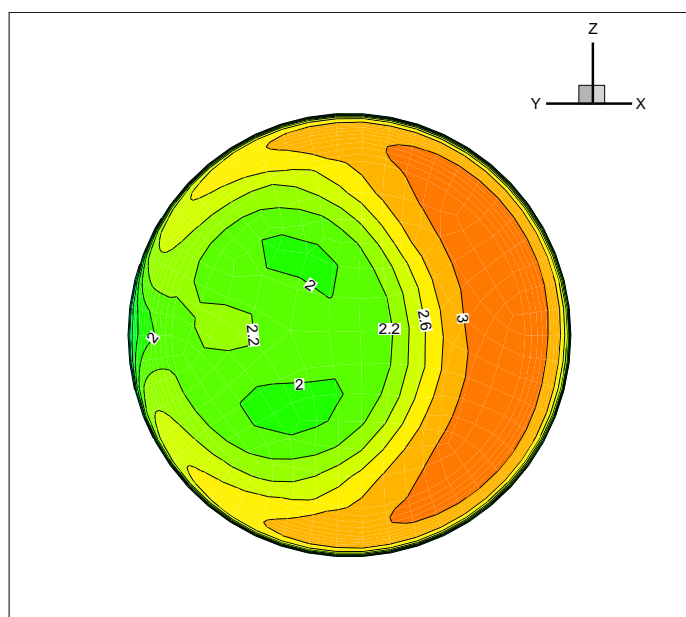
Οι εικόνες 7.100-7.102 δείχνουν τους στροβιλισμούς της ροής στην έξοδο in1. Αντίθετα με την έξοδο outlet εδώ παρατηρούνται διαφορές και πιο συγκεκριμένα καθώς αυξάνει η γωνία α_2 οι στροβιλισμοί στην έξοδο γίνονται εντονότεροι.



Εικόνα 7.103 Ισοταχείς στην έξοδο in1 (σενάριο 9, $\alpha_2=100^\circ$)



Εικόνα 7.104 Ισοταχείς στην έξοδο in1 (σενάριο 9, $\alpha_2=120^\circ$)



Εικόνα 7.105 Ισοταχείς στην έξοδο in1 (σενάριο 9, $\alpha_2=140^\circ$)

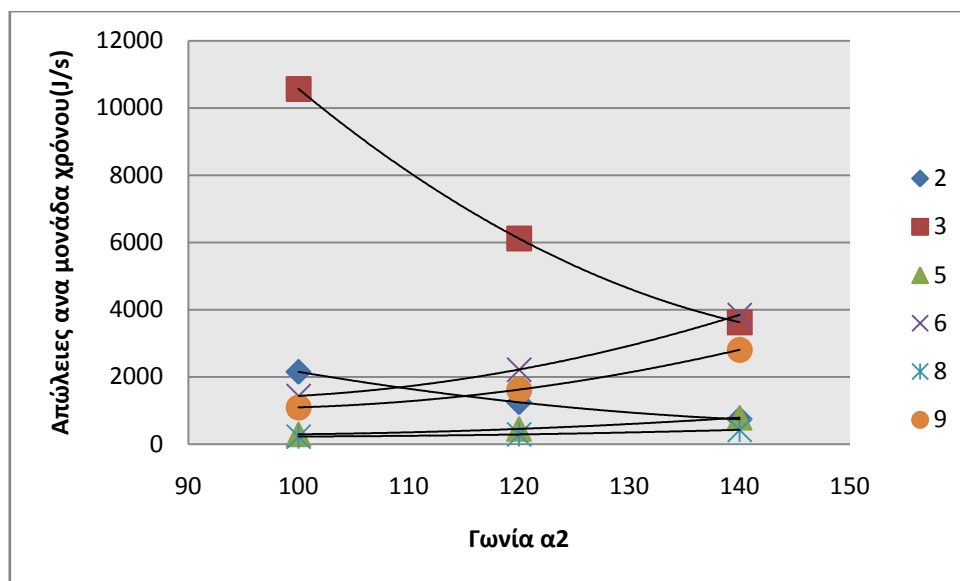
Τέλος στις εικόνες 7.103-7.105 έχουμε τις ισοταχείς στην έξοδο in1. Εδώ σε αντίθεση με την έξοδο outlet η κατανομή της ταχύτητας επηρεάζεται κατά πολύ με την αλλαγή της γωνίας α_2 . Πιο συγκεκριμένα αυτή γίνεται πιο ομοιόμορφη όσο μικραίνει η γωνία α_2 .

Σύμφωνα με τους πίνακες 7.3, 7.4, 7.5 και 7.6 παρατηρούμε ότι οι απώλειες για $\alpha_2=140^\circ$ ποσοτικά αυξάνονται σε σχέση με την περίπτωση όπου $\alpha_2=120^\circ$. Όμως εάν κοιτάξουμε τα σενάρια ξεχωριστά παρατηρούμε ότι στα σενάρια 1, 2 και 3 οι απώλειες μειώνονται. Αντίθετα στα υπόλοιπα οι απώλειες αυξάνονται και αυτό φαίνεται περισσότερο στα σενάρια όπου παρουσιάζονται υψηλές ταχύτητες. Για παράδειγμα στο σενάριο 6 το οποίο στην περίπτωση όπου $\alpha_2=120^\circ$ αποτελούσε περίπου το 30% των συνολικών απωλειών με 13,5 GJ απώλειες με $\alpha_2=140^\circ$ αποτελεί το 45% των απωλειών με 18,2 GJ απώλειες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την αλλαγή της γωνίας στις 140° η ροή στα σενάρια 1, 2 και 3 δεν χρειάζεται να «στρίψει» τόσο όσο χρειαζόταν στις 120° . Αντίθετα η ροή στα υπόλοιπα σενάρια «στρίβει» περισσότερο και ιδιαίτερα όταν έχουμε ροή από τις αντλίες (είσοδος in2) προς την άνω δεξαμενή (έξοδος in1).

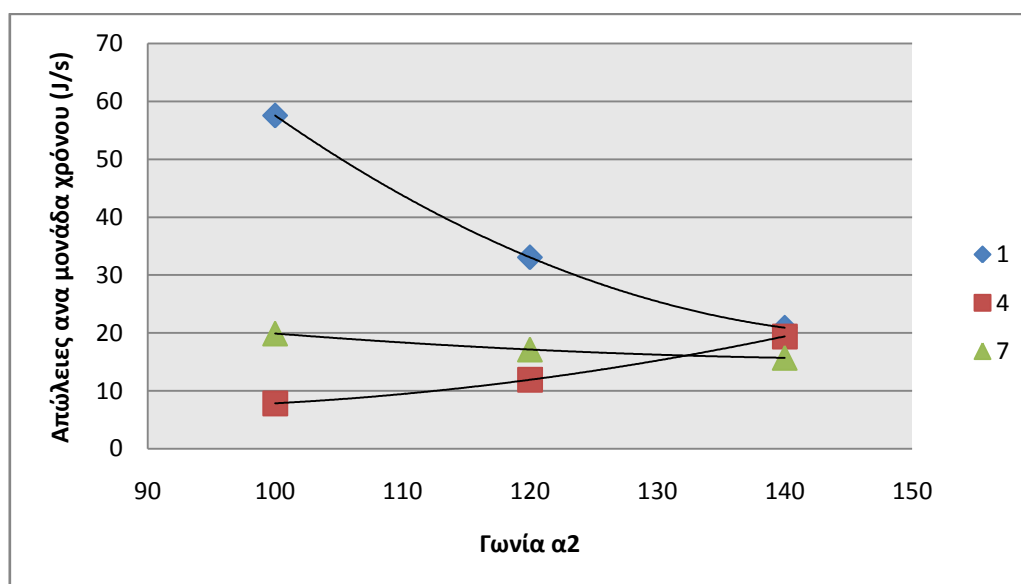
Σύμφωνα και με τους πίνακες 7.7 και 7.8 παρατηρούμε και εδώ ότι οι απώλειες για $\alpha_2=100^\circ$ αυξάνονται ποσοτικά σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, δηλαδή για $\alpha_2=120^\circ$ και $\alpha_2=140^\circ$. Αντίθετα με την περίπτωση όπου $\alpha_2=140^\circ$ για $\alpha_2=100^\circ$ παρατηρείται το αντίθετο σε σχέση με τα σενάρια και τις απώλειες. Πιο συγκεκριμένα στα σενάρια 1, 2 και 3 οι απώλειες αυξάνονται σε σχέση με τις περιπτώσεις όπου η α_2 ήταν 120° και 140° και λογικά αφού η ροή χρειάζεται να «στρίψει» περισσότερο. Στα υπόλοιπα σενάρια οι απώλειες μειώνονται αλλά αυτό δεν φαίνεται στις συνολικές απώλειες μιας και τα 3 πρώτα σενάρια υπερισχύουν.

Επομένως συνοπτικά έχουμε ότι οι συνολικές απώλειες για τις τρεις διαφορετικές τιμές της γωνίας α_2 είναι μικρότερες για $\alpha_2=120^\circ$. Όμως για $\alpha_2=140^\circ$ οι απώλειες στα σενάρια 1,2,3 μειώνονται και αυξάνονται για τα υπόλοιπα ενώ για $\alpha_2=100^\circ$ γίνεται ακριβώς το αντίθετο.

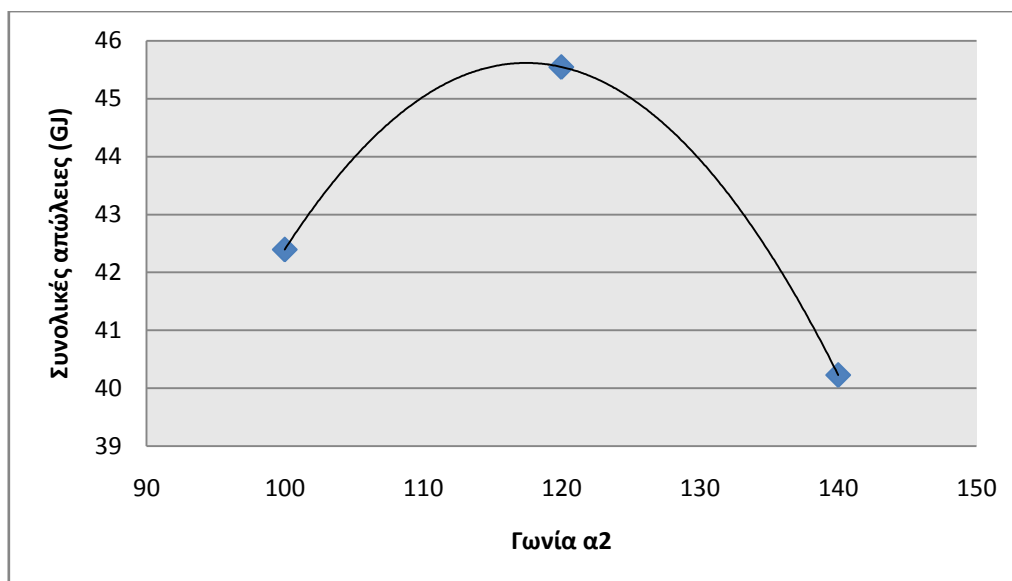
Όλα τα παραπάνω φαίνονται και στα παρακάτω διαγράμματα. Στα διαγράμματα 7.12 και 7.13 παρατηρούμε για τα διάφορα σενάρια την μεταβολή των απωλειών ανά μονάδα χρόνου. Αξιοσημείωτη είναι η μείωση των απωλειών του σεναρίου 3 καθώς αυξάνει η γωνία α_2 .



Διάγραμμα 7.12 Μεταβολή ισχύος απωλειών συναρτήσει της γωνίας α_2 για διάφορα σενάρια



Διάγραμμα 7.13 Μεταβολή ισχύος απωλειών συναρτήσει της γωνίας α_2 για διάφορα σενάρια



Διάγραμμα 7.14 Μεταβολή συνολικών απωλειών συναρτήσει γωνίας α_2

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε την μεταβολή των απωλειών ανά μονάδα χρόνου για κάθε σενάριο για τις διάφορες γωνίες α_2 .

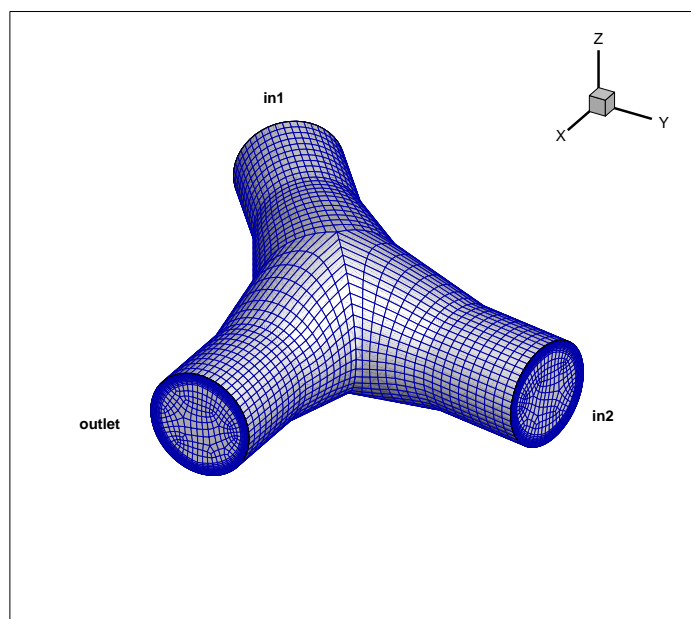
7.4 Παραμετρική διερεύνηση με παράμετρο την γωνία α_1 .

Στην συνέχεια θα κρατήσουμε σταθερή την γωνία α_2 στις 140° όπου έχουμε τις μικρότερες απώλειες για τα σενάρια 1, 2, 3 και θα μεταβάλουμε την γωνία α_1 με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών στα υπόλοιπα σενάρια. Θα επιλέξουμε γωνίες τέτοιες ώστε η αλλαγή κατεύθυνσης της ροής για τα σενάρια 4,5 και 6 να είναι μικρή.

7.4.1 Περίπτωση για $\alpha_1=80^\circ$

Οι διαστάσεις της γεωμετρίας είναι:

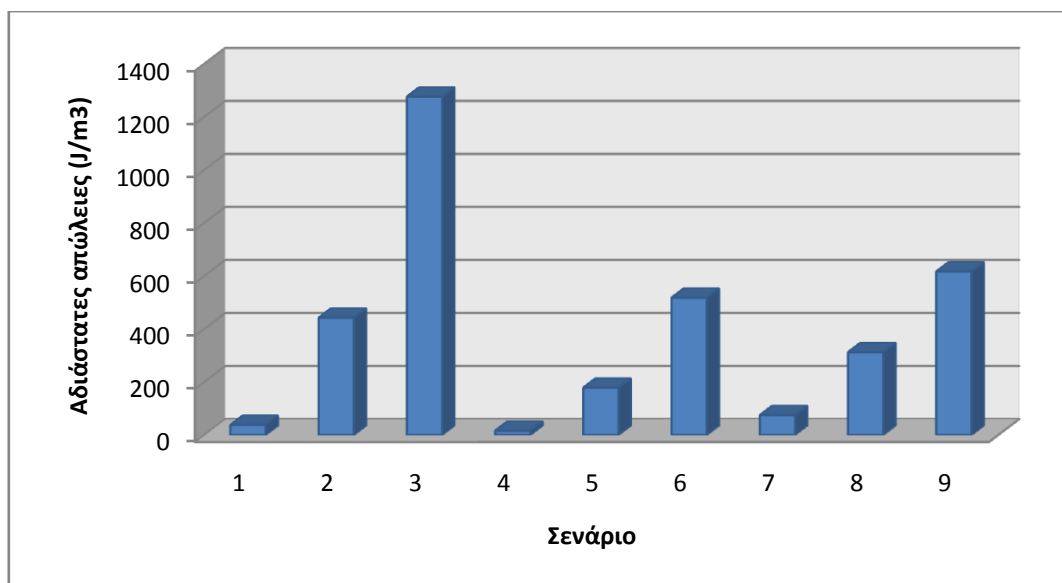
- $d_{\max}=1,5$ m
- $d_{\min}=1$ m
- $\varphi=10^\circ$
- $\alpha_1=80^\circ$
- $\alpha_2=140^\circ$



Εικόνα 7.106 Πλέγμα γεωμετρίας.

Σενάριο	Ποσοστό ετήσιας λειτουργίας (%)	Απώλειες (J/s)	Ετήσιες απώλειες (J)
1	8	24,72	62374222
2	11	947,04	3285228615
3	7	4644,20	10252160057
4	5	7,41	11691278
5	9	272,25	772702893
6	15	1339,31	6335486404
7	7	48,25	106515003
8	15	475,47	2249166032
9	8	1594,13	4021805103
Σύνολο (GJ)			27,10

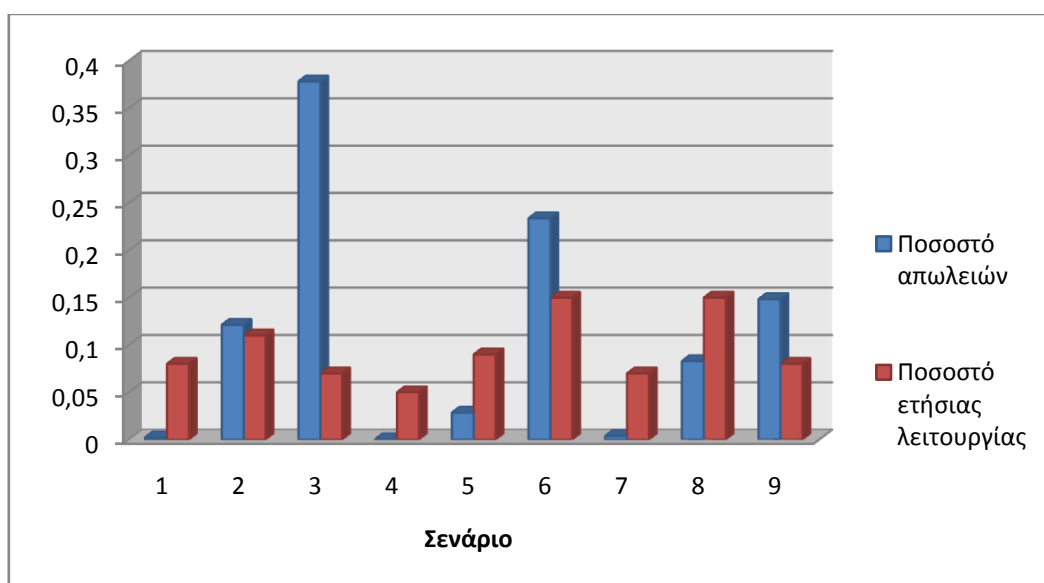
Πίνακας 7.9



Διάγραμμα 7.15 Αδιάστατες απώλειες ανά σενάριο

Σενάριο	Ποσοστό στις ετήσιες συνολικές απώλειες (%)
1	0,23
2	12,12
3	37,83
4	0,04
5	2,85
6	23,38
7	0,39
8	8,30
9	14,84

Πίνακας 7.10



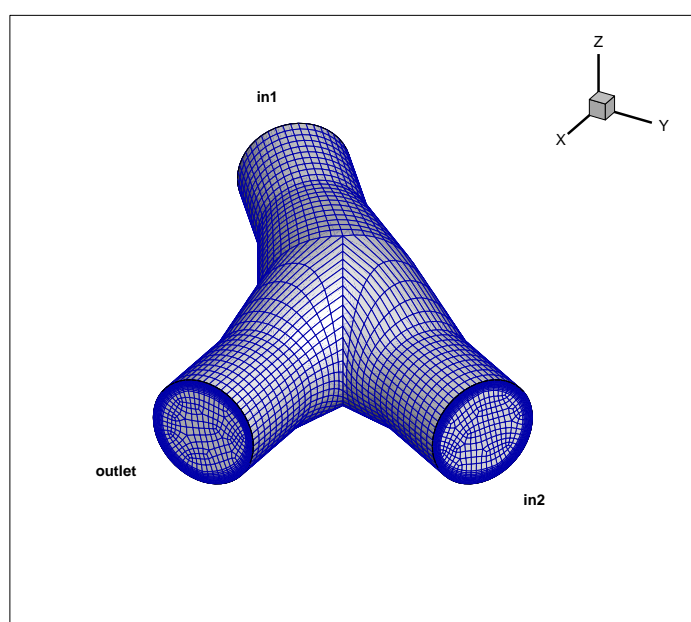
Διάγραμμα 7.16 Ποσοστό συνολικών απωλειών ανά σενάριο

7.4.2 Περίπτωση για $\alpha_1=60^\circ$.

Εδώ μειώνουμε ακόμα περισσότερο την γωνία α_1 κρατώντας σταθερά την γωνία α_2 .

Έτσι έχουμε:

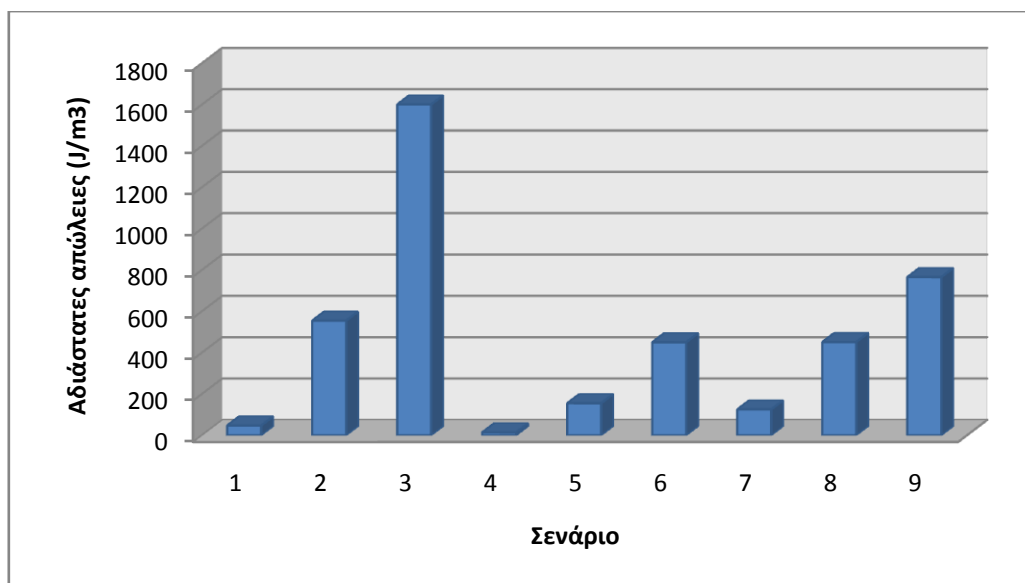
- $d_{\max}=1,5$ m
- $d_{\min}=1$ m
- $\varphi=10^\circ$
- $\alpha_1=60^\circ$
- $\alpha_2=140^\circ$



Εικόνα 7.107 Πλέγμα γεωμετρίας.

Σενάριο	Ποσοστό ετήσιας λειτουργίας (%)	Απώλειες (J/s)	Ετήσιες απώλειες (J)
1	8	30,53	77016210
2	11	1187,66	4119935321
3	7	5824,66	12858045231
4	5	6,53	10289187
5	9	236,22	670458135
6	15	1164,01	5506254096
7	7	80,51	177721166
8	15	686,25	3246257719
9	8	1928,22	4990815054
Σύνολο (GJ)			31,66

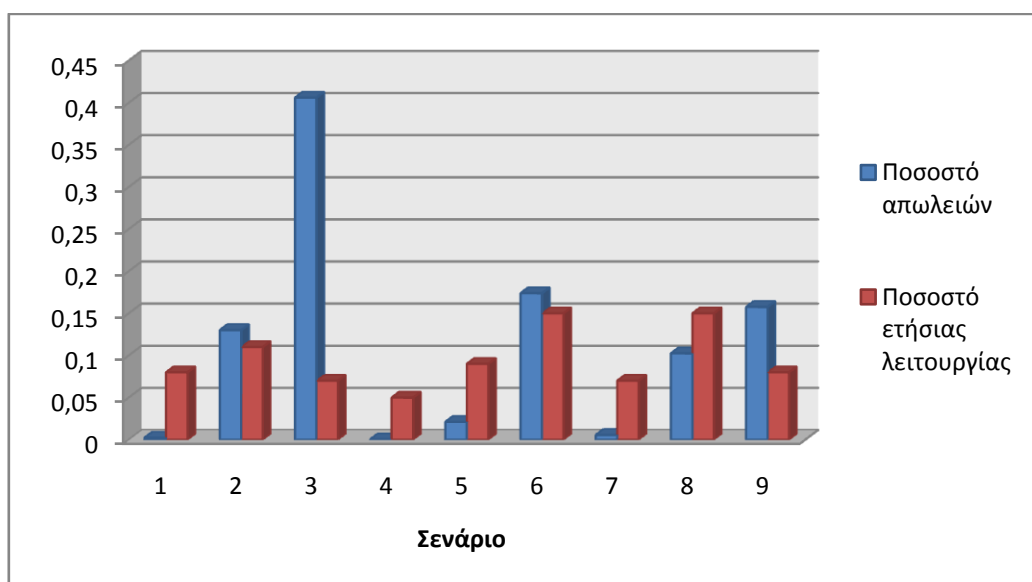
Πίνακας 7.11



Διάγραμμα 7.17 Αδιάστατες απώλειες ανά σενάριο

Σενάριο	Ποσοστό στις ετήσιες συνολικές απώλειες (%)
1	0,24
2	13,01
3	40,62
4	0,03
5	2,12
6	17,39
7	5,61
8	10,25
9	15,77

Πίνακας 7.12



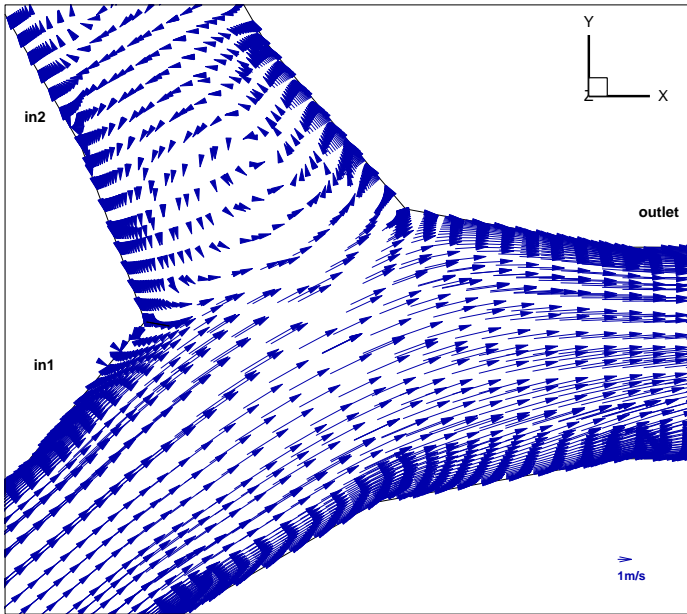
Διάγραμμα 7.18 Ποσοστό συνολικών απωλειών ανά σενάριο

7.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για $\alpha_1=120^\circ$, $\alpha_1=80^\circ$ και $\alpha_1=60^\circ$.

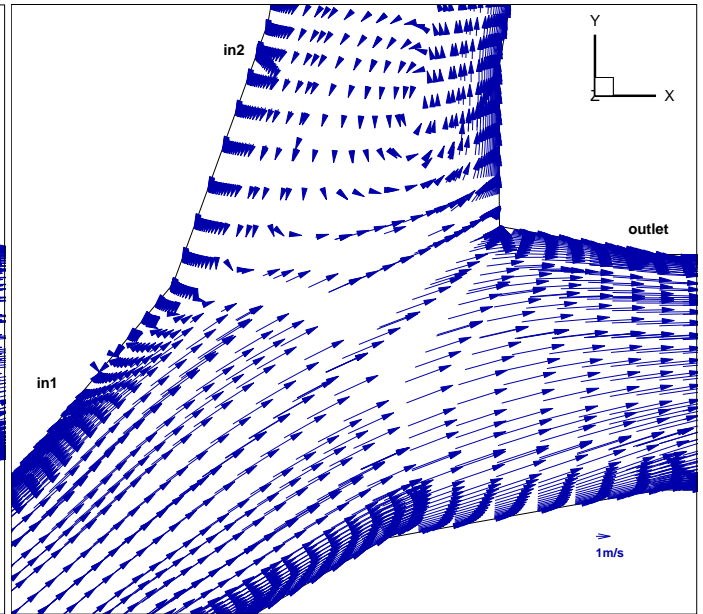
Σύμφωνα με τις δύο παραπάνω περιπτώσεις και με την 7.2.1 παρουσιάζονται οι παρακάτω εικόνες.

Οι εικόνες 7.108-7.110 μας δείχνουν τα διανύσματα της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$ για τις διάφορες γωνίες α_1 για το σενάριο 3. Παρατηρούμε ότι η αποκόλληση της ροής, καθώς αυτή αλλάζει, είναι η ίδια και για τις τρεις περιπτώσεις γιατί αυτή επηρεάζεται από την γωνία α_2 . Το μόνο που αλλάζει είναι οι ταχύτητες που αναπτύσσονται στο τμήμα του αγωγού που οδηγεί προς την επιφάνεια in_2 . Όσο μικραίνει η γωνία α_1 τόσο μεγαλύτερες ταχύτητες αναπτύσσονται κυρίως κοντά στο τοίχωμα.

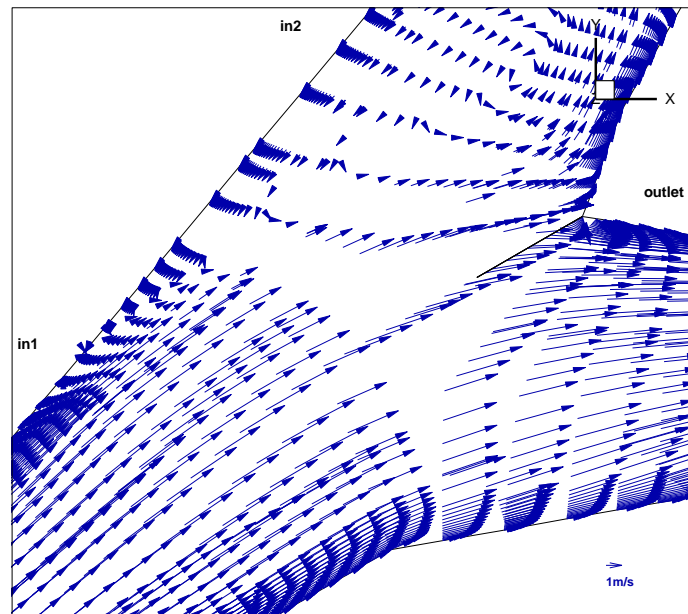
Τα παραπάνω φαίνονται και στις εικόνες 7.111-7.113 όπου μας δείχνουν τις ισοϋψείς της Φ . Δεν παρατηρείται κάποια διαφορά στις απώλειες στην έξοδο αλλά στις απώλειες στο τμήμα της γεωμετρίας που οδηγεί στην επιφάνεια in_2 . Παρατηρείται ότι αυτές αυξάνονται καθώς η γωνία α_1 μικραίνει γιατί όλο και περισσότερη ποσότητα ρευστού οδηγείται προς τα εκεί και αναγκάζεται να στροβιλιστεί.



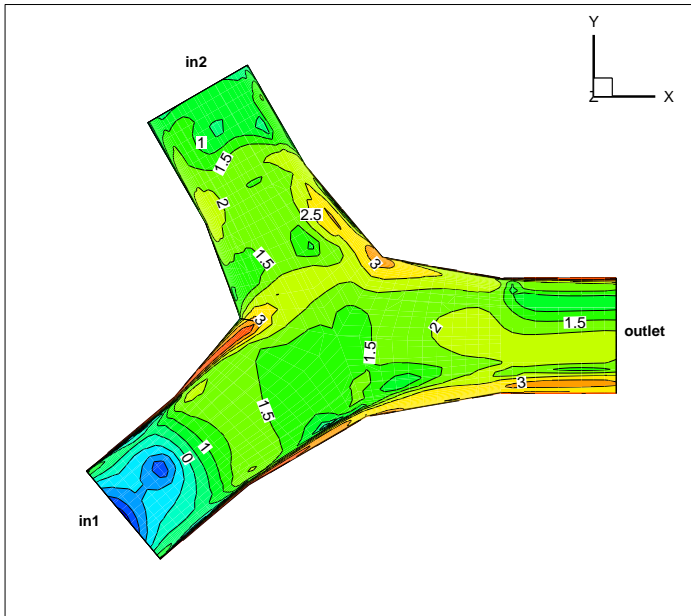
Εικόνα 7.108 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 3, $\alpha_1=120^\circ$)



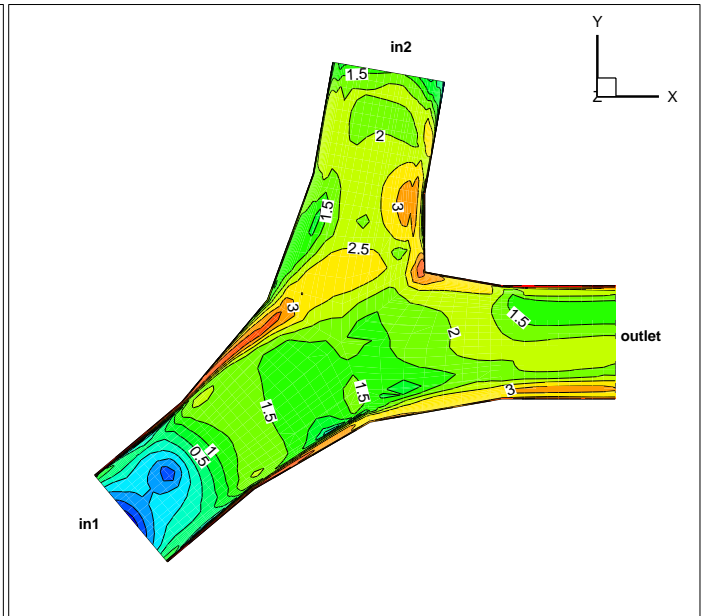
Εικόνα 7.109 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 3, $\alpha_1=80^\circ$)



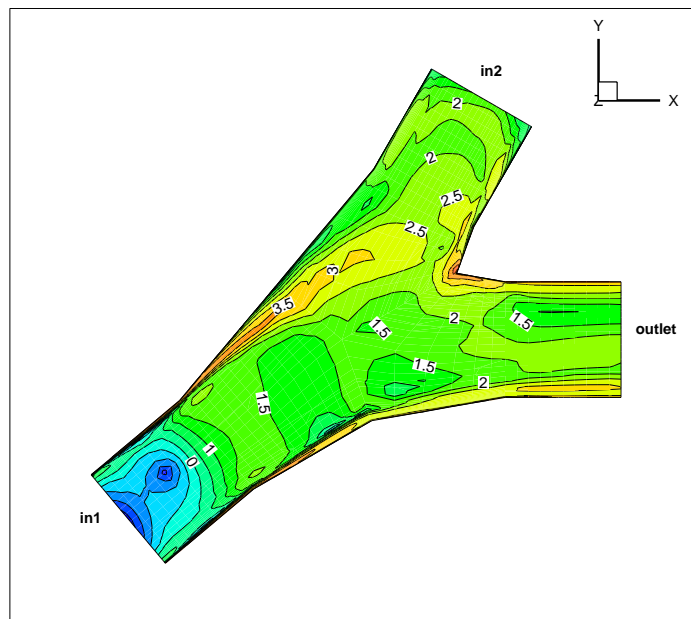
Εικόνα 7.110 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 3, $\alpha_1=60^\circ$)



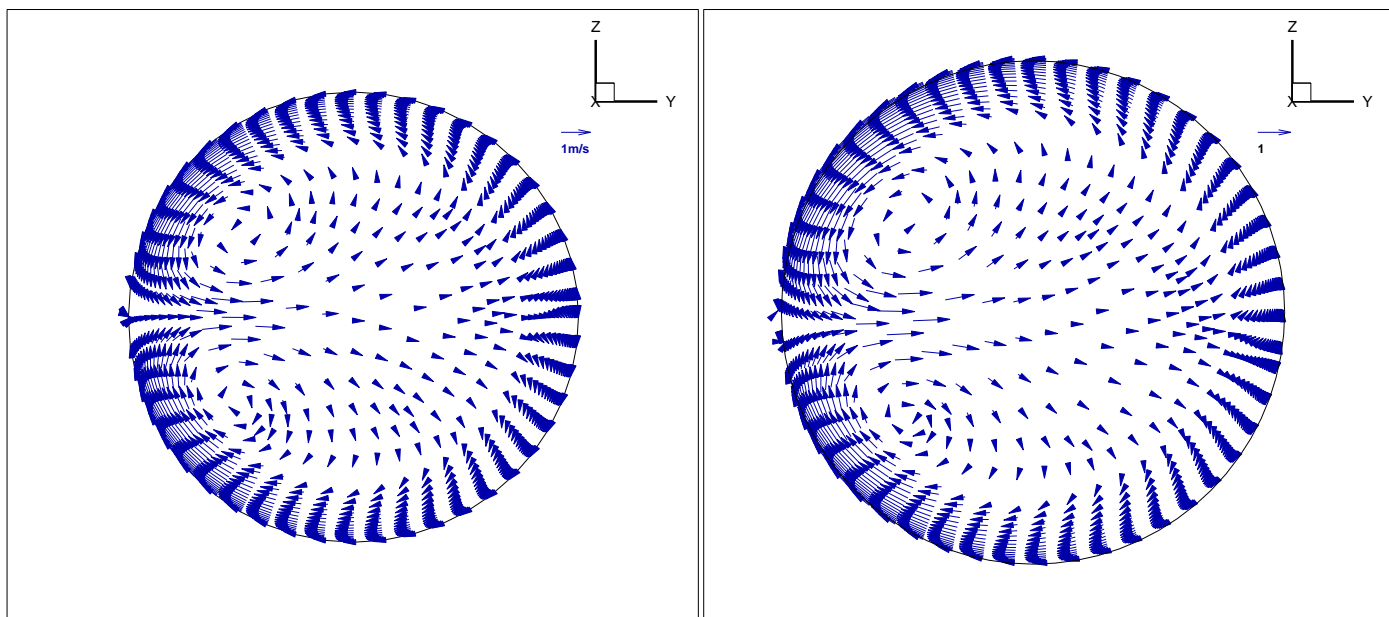
Εικόνα 7.111 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 3, $\alpha_1=120^\circ$)



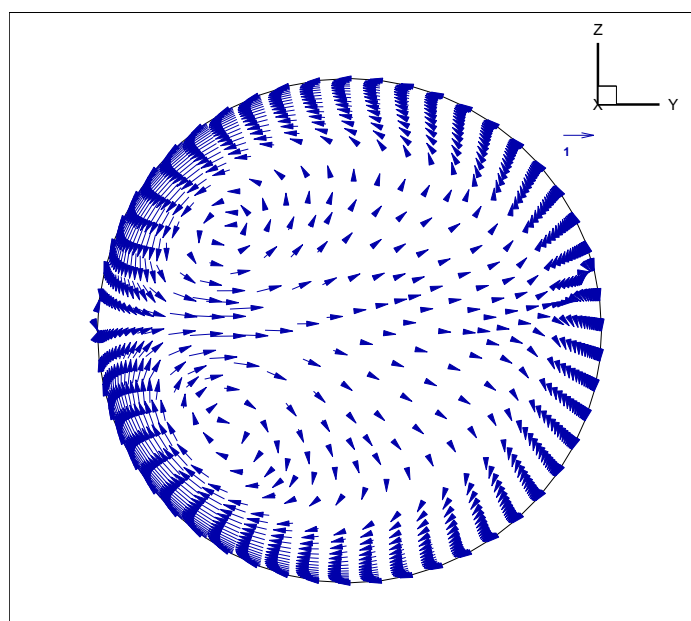
Εικόνα 7.112 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 3, $\alpha_1=80^\circ$)



Εικόνα 7.113 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 3, $\alpha_1=60^\circ$)

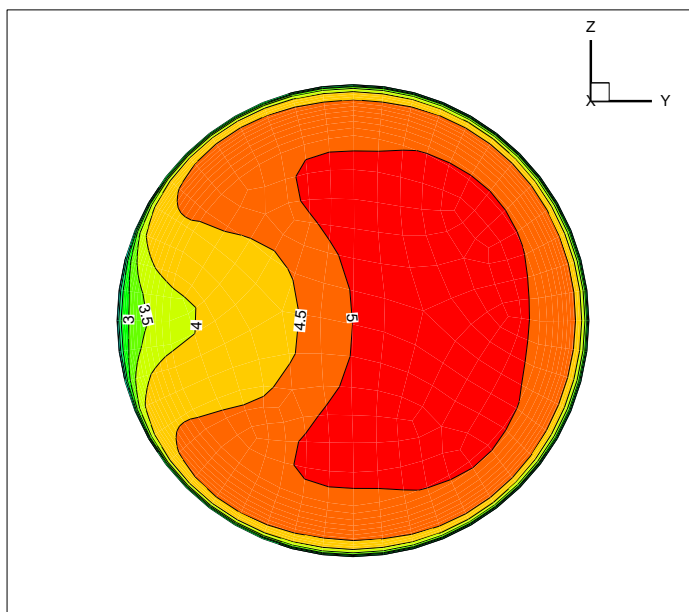


Εικόνα 7.114 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 3, $\alpha_1=120^\circ$) Εικόνα 7.115 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 3, $\alpha_1=80^\circ$)

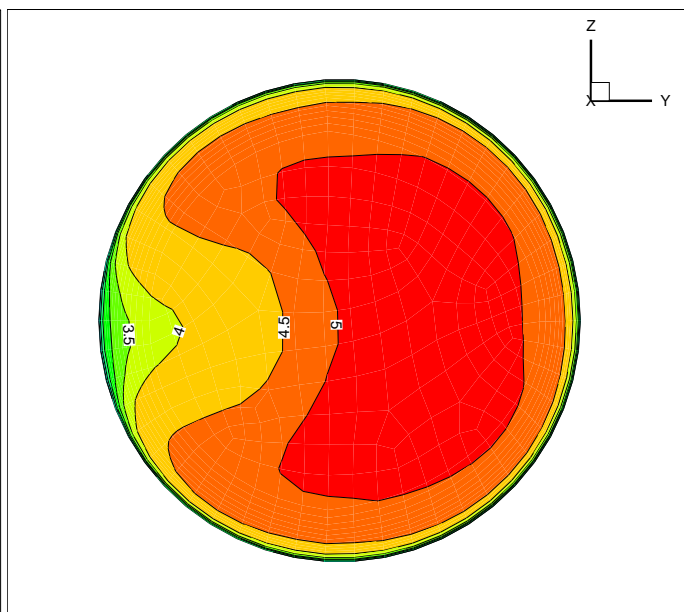


Εικόνα 7.116 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 3, $\alpha_1=60^\circ$)

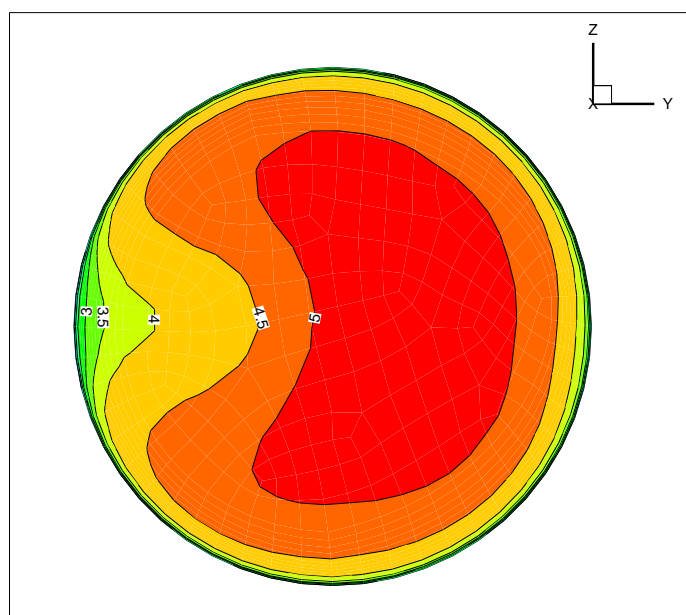
Οι εικόνες 7.114-7.116 δείχνουν τους στροβιλισμούς στην έξοδο outlet. Παρατηρείται ότι αυτοί δεν αλλάζουν καθώς η μορφή και η ένταση τους επηρεάζονται από την γωνία α_2 .



Εικόνα 7.117 Ισοταχείς στην outlet (σενάριο 3, $\alpha_1=120^\circ$)

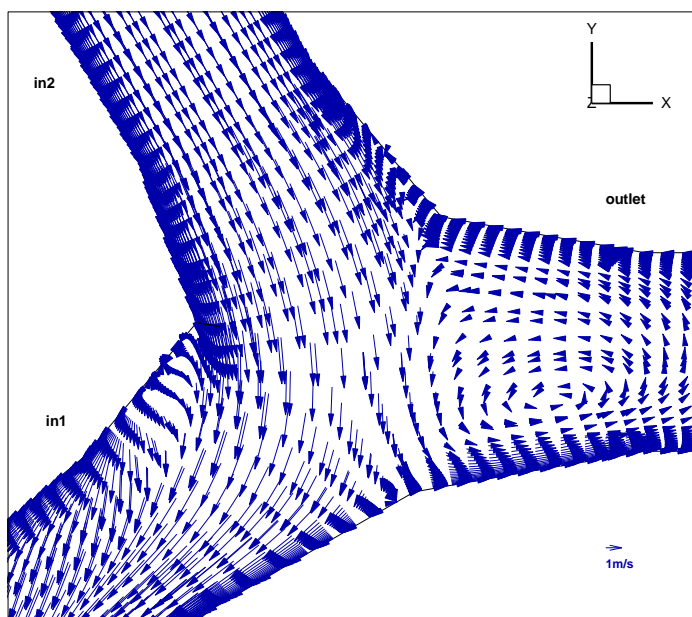


Εικόνα 7.118 Ισοταχείς στην outlet (σενάριο 3, $\alpha_1=80^\circ$)

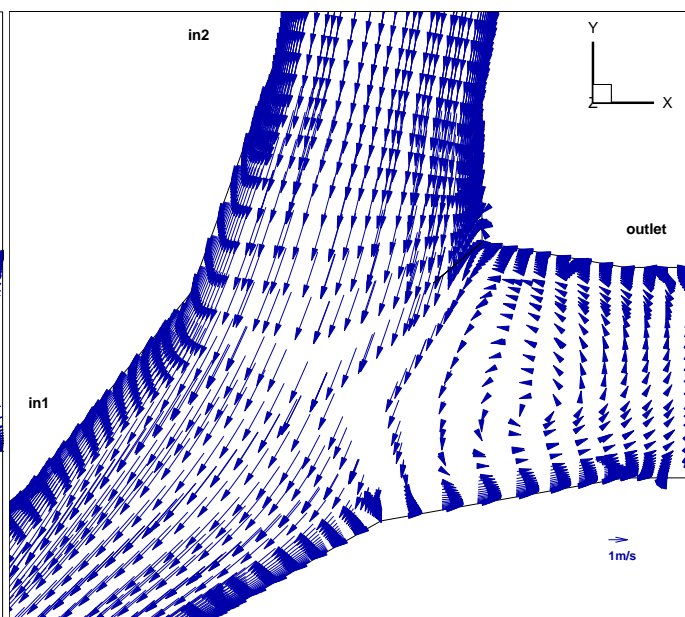


Εικόνα 7.119 Ισοταχείς στην outlet (σενάριο 3, $\alpha_1=60^\circ$)

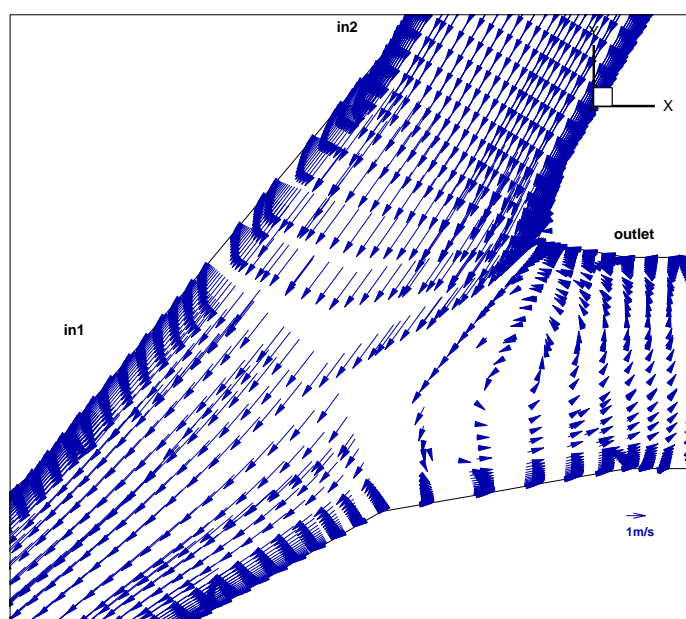
Στις εικόνες 7.117-7.119 έχουμε τις ισοταχείς για το σενάριο 3 στην έξοδο outlet. Παρατηρούμε ότι η κατανομή της ταχύτητας αλλάζει ελάχιστα καθώς όπως προαναφέρθηκε η γωνία α_1 δεν επηρεάζει πολύ την ροή για αυτό το σενάριο.



Εικόνα 7.120 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 6, $\alpha_1=120^\circ$)

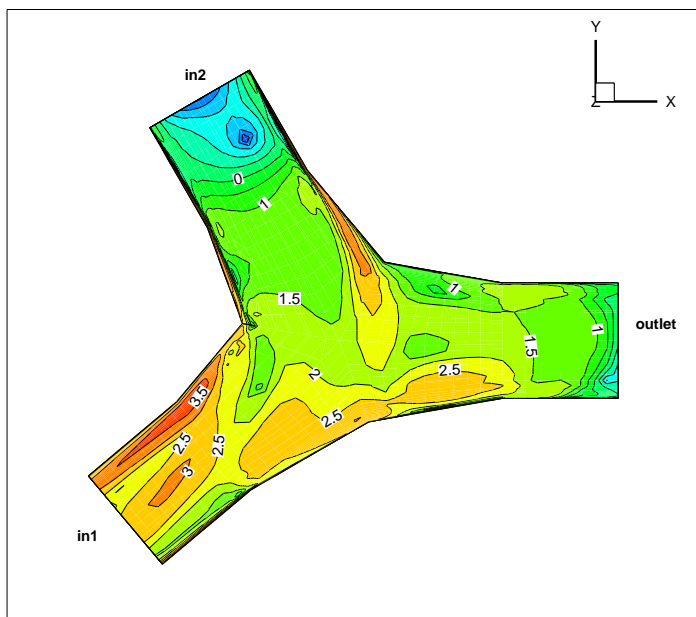


Εικόνα 7.121 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 6, $\alpha_1=80^\circ$)

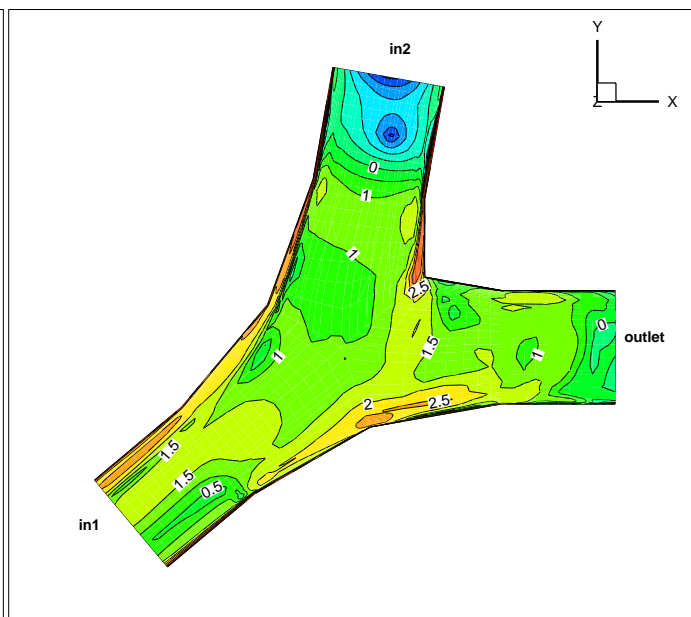


Εικόνα 7.122 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 6, $\alpha_1=60^\circ$)

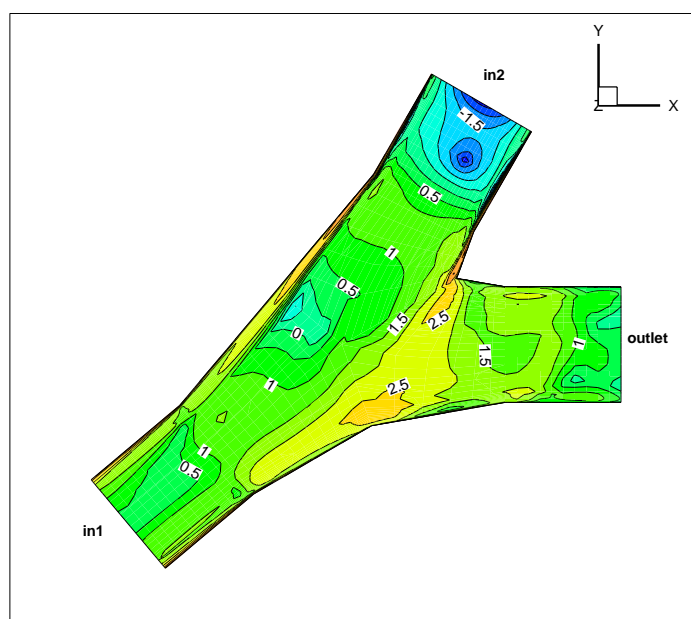
Στις εικόνες 7.120-7.122 βλέπουμε τα διανύσματα της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$ για τις διάφορες γωνίες α_1 για το σενάριο 6. Η αποκόλληση της ροής σε αυτήν την περίπτωση αλλάζει με βάση την γωνία α_1 . Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή τόσο πιο πολύ η ροή αποκολλάται.



Εικόνα 7.123 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 6, $\alpha_1=120^\circ$)

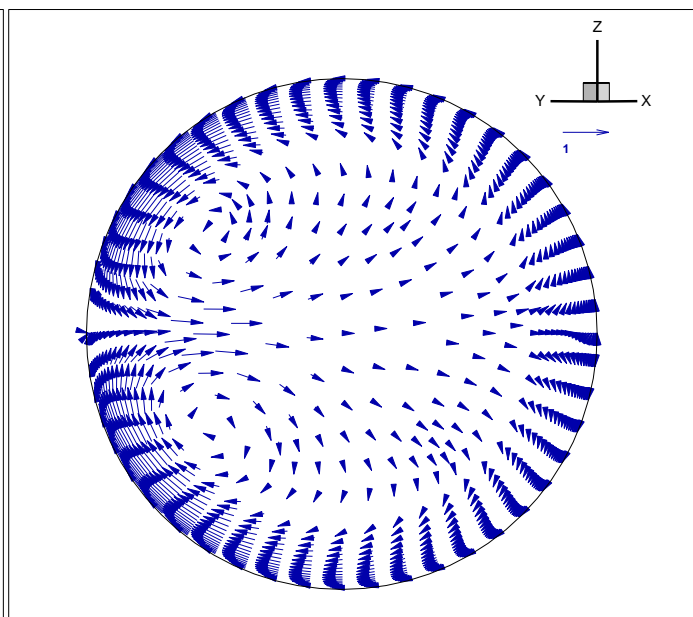
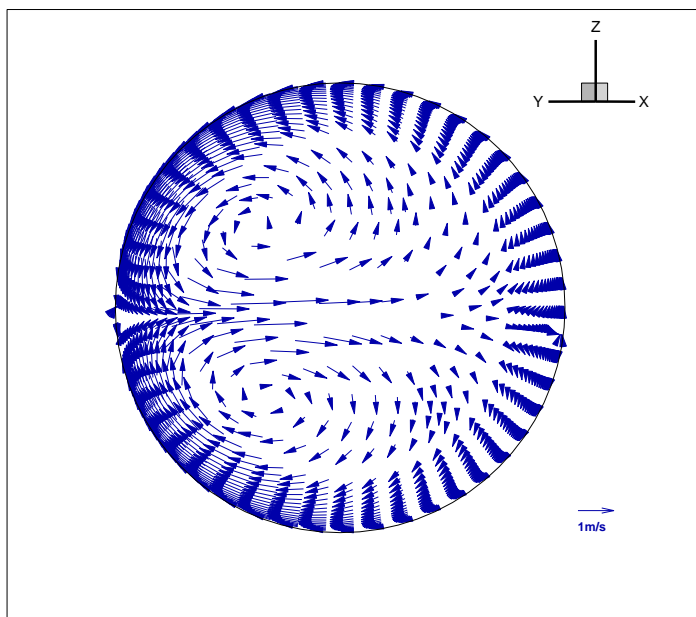


Εικόνα 7.124 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 6, $\alpha_1=80^\circ$)



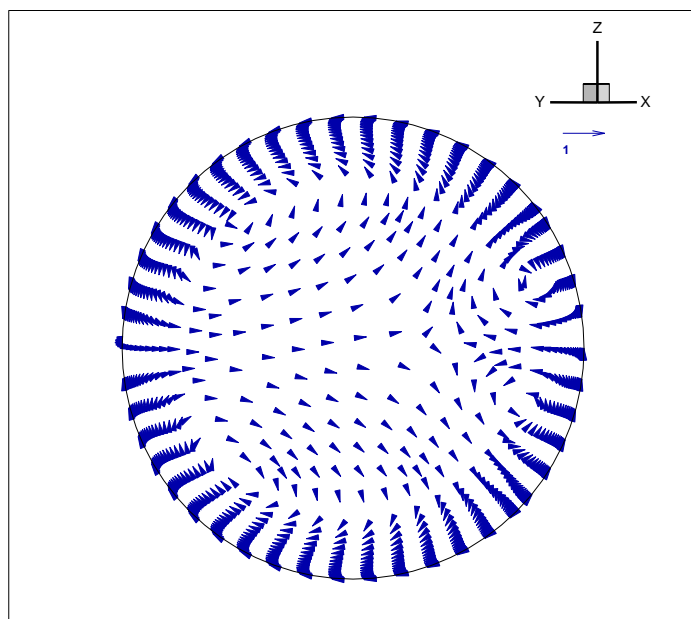
Εικόνα 7.125 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 6, $\alpha_1=60^\circ$)

Στις εικόνες 7.123-7.125 παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η γωνία α_1 τόσο μειώνονται οι απώλειες στην έξοδο γιατί η ροή δεν χρειάζεται να «στρίψει» σχεδόν καθόλου. Ένας ακόμα λόγος είναι ότι μειώνεται σημαντικά και η επιφάνεια η οποία είναι κάθετη στην ροή.



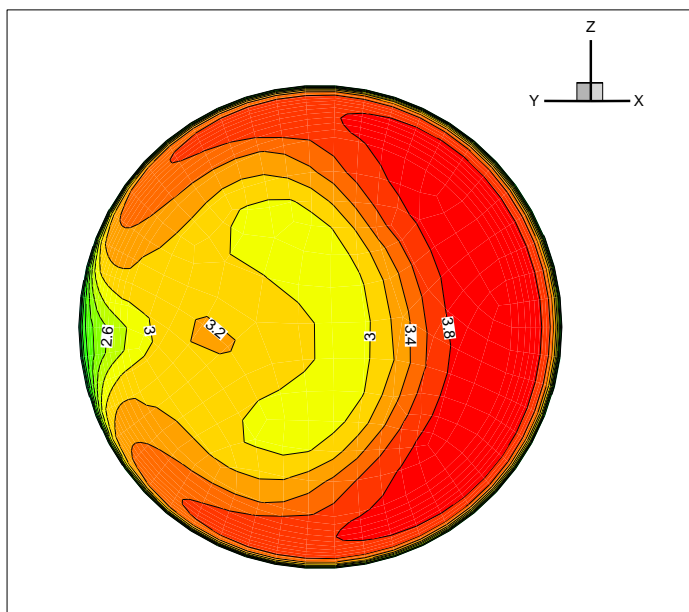
Εικόνα 7.126 Διανύσματα ταχύτητας στην in1 (σενάριο 6, $\alpha_1=120^\circ$)

Εικόνα 7.127 Διανύσματα ταχύτητας στην in1 (σενάριο 6, $\alpha_1=80^\circ$)

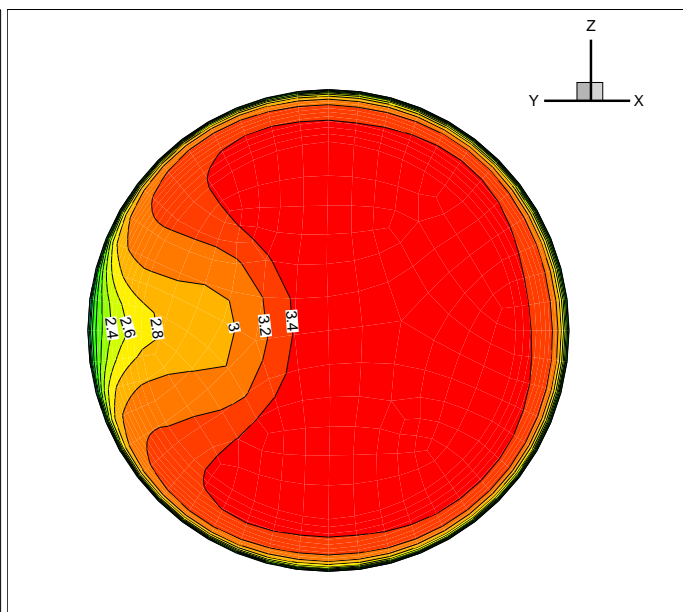


Εικόνα 7.128 Διανύσματα ταχύτητας στην in1 (σενάριο 6, $\alpha_1=60^\circ$)

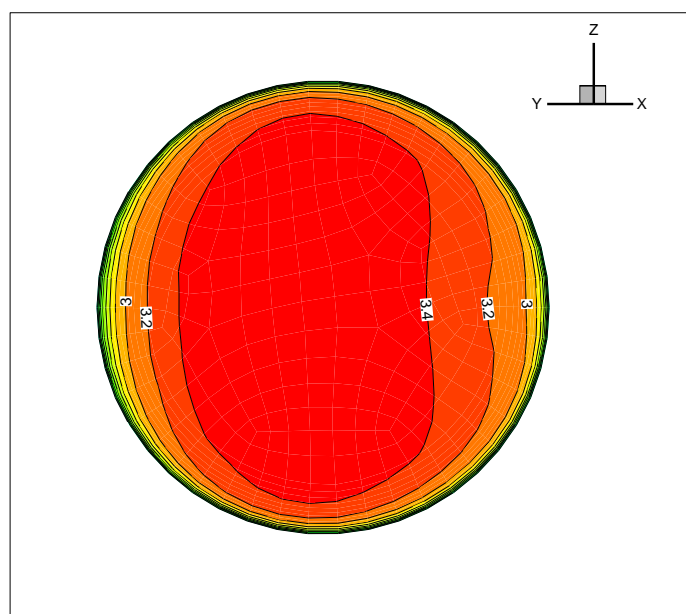
Οι εικόνες 7.125-7.128 δείχνουν τους στροβιλισμούς της ροής στην έξοδο για το σενάριο 6 και πώς αυτοί εξασθενούν καθώς μειώνεται η γωνία α_1 .



Εικόνα 7.129 Ισοταχείς στην in1 (σενάριο 6, $\alpha_1=120^\circ$)



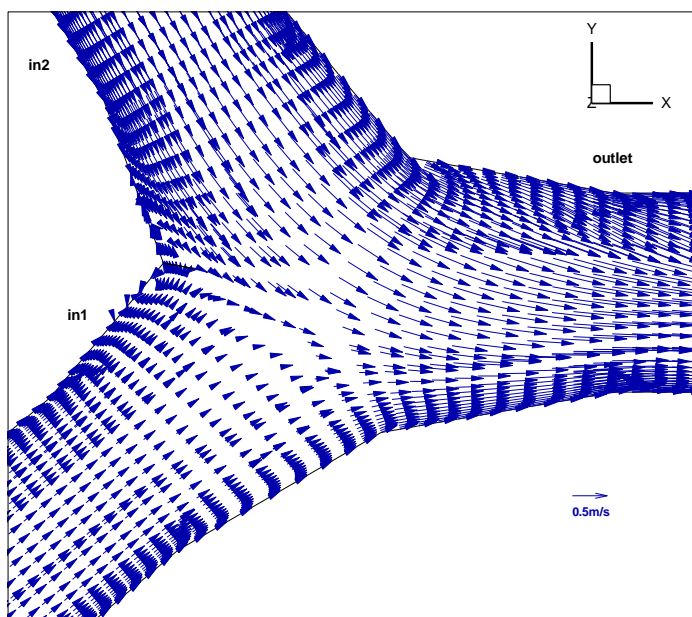
Εικόνα 7.130 Ισοταχείς στην in1 (σενάριο 6, $\alpha_1=80^\circ$)



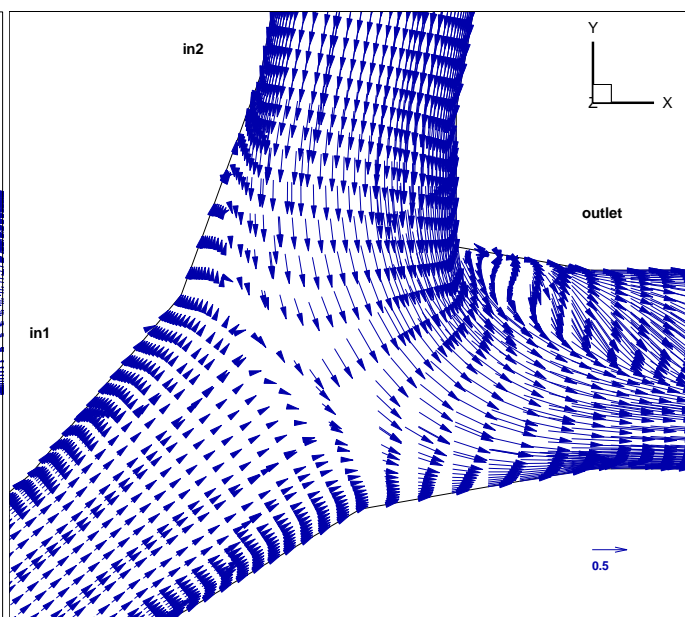
Εικόνα 7.131 Ισοταχείς στην in1 (σενάριο 6, $\alpha_1=60^\circ$)

Στις εικόνες 7.129-7.131 έχουμε τις ισοταχείς στην έξοδο in1 για τις διάφορες γωνίες α_1 για το σενάριο 6. Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία α_1 τόσο μεγαλύτερη είναι η ανομοιομορφία της ταχύτητας στην έξοδο in1 και με μεγαλύτερες τιμές αυτής. Ιδιαίτερα για $\alpha_1=60^\circ$ παρατηρούμε ότι η ταχύτητα είναι σχεδόν ομοιόμορφη στην έξοδο μιας και η ροή αλλάζει ελάχιστα κατεύθυνση.

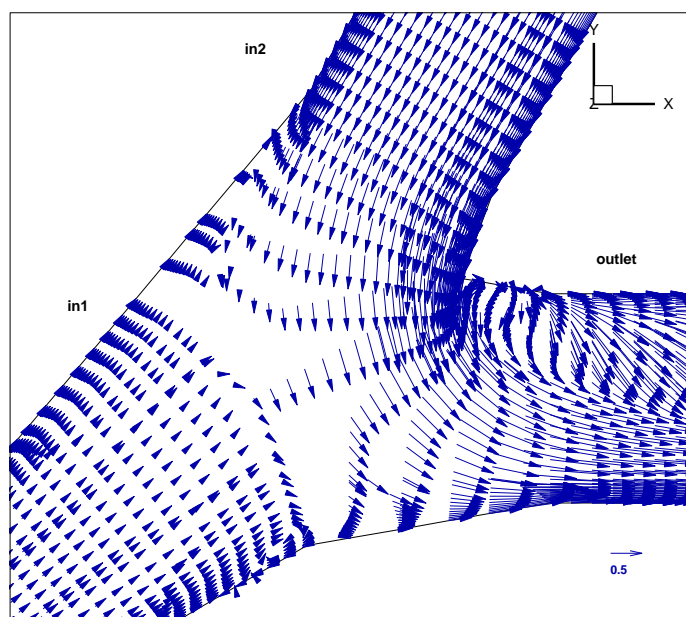
Επομένως αναμένουμε οι μικρότερες απώλειες για αυτό το σενάριο να είναι για $\alpha_1=60^\circ$.



Εικόνα 7.132 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 7, $\alpha_1=120^\circ$)

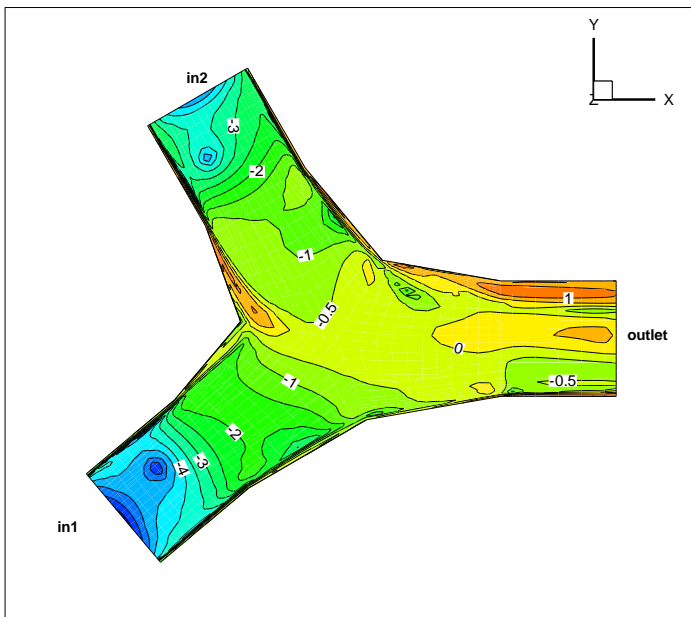


Εικόνα 7.133 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 7, $\alpha_1=80^\circ$)

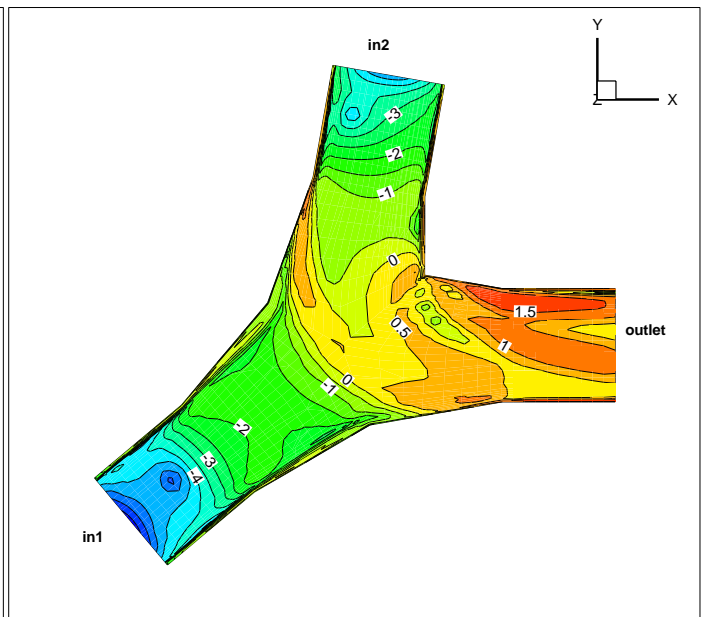


Εικόνα 7.134 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 7, $\alpha_1=60^\circ$)

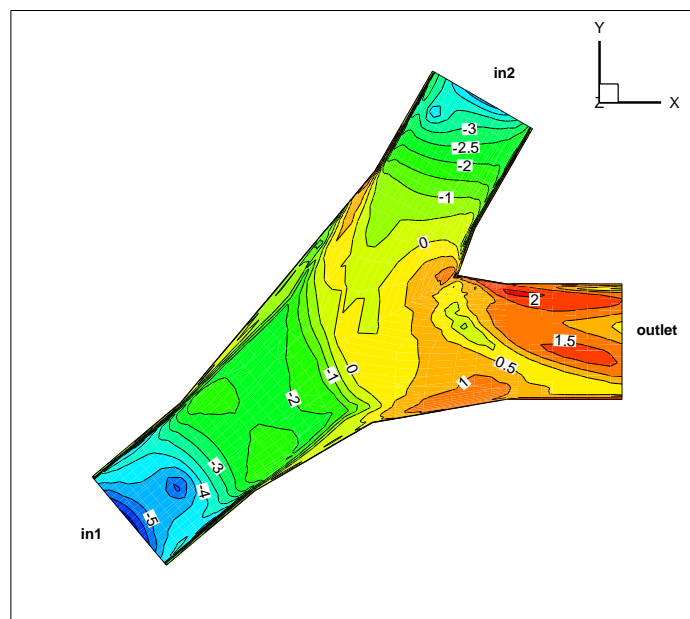
Στις εικόνες 7.132-7.134 έχουμε τα διανύσματα της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$ για τις διάφορες γωνίες α_1 για το σενάριο 7. Παρατηρούμε ότι αλλάζει η περιοχή αποκόλλησης της ροής υψηλής ταχύτητας με την αλλαγή της γωνίας α_1 και πιο συγκεκριμένα αυτή είναι πιο μεγάλη για μικρές γωνίες. Επίσης για μικρές τιμές της α_1 έχουμε περισσότερη ροή χαμηλής ταχύτητας που κινείται αντίθετα με αυτήν της υψηλής. Τέλος όπως είναι λογικό αυξάνονται και οι δευτερεύουσες ροές λόγω συστροφής της ροής όσο μικραίνει η γωνία α_1 .



Εικόνα 7.135 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 7, $\alpha_1=120^\circ$)

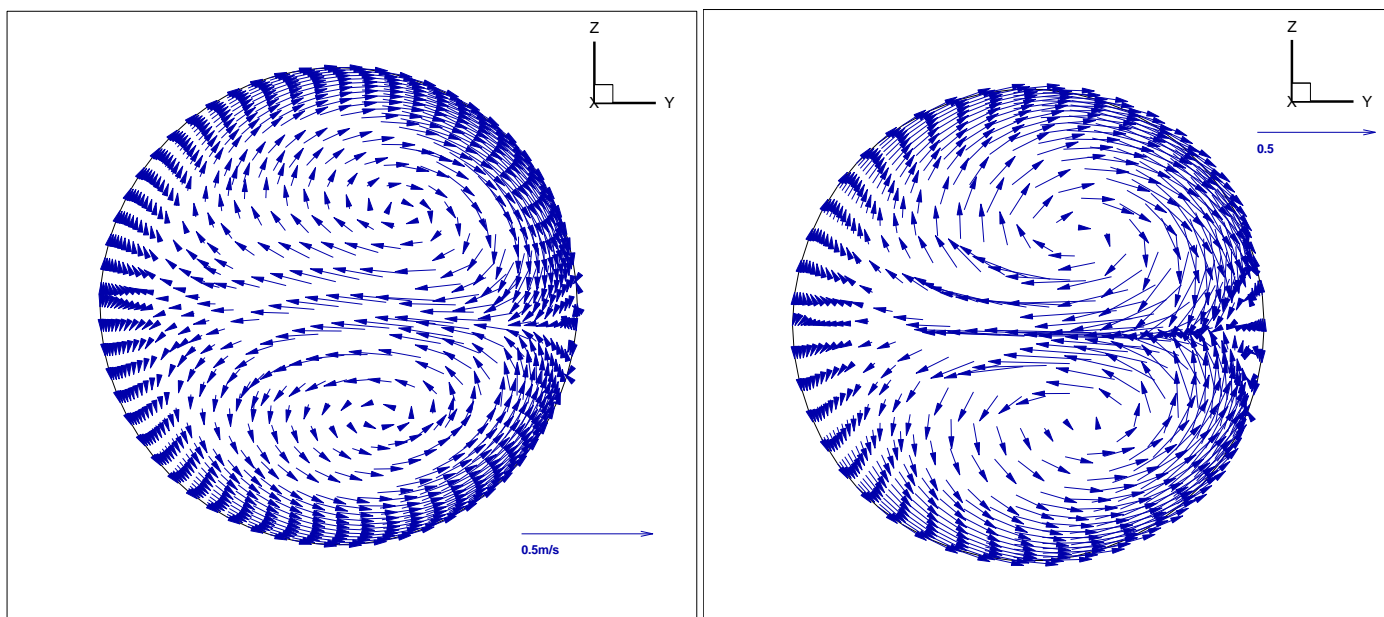


Εικόνα 7.136 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 7, $\alpha_1=80^\circ$)

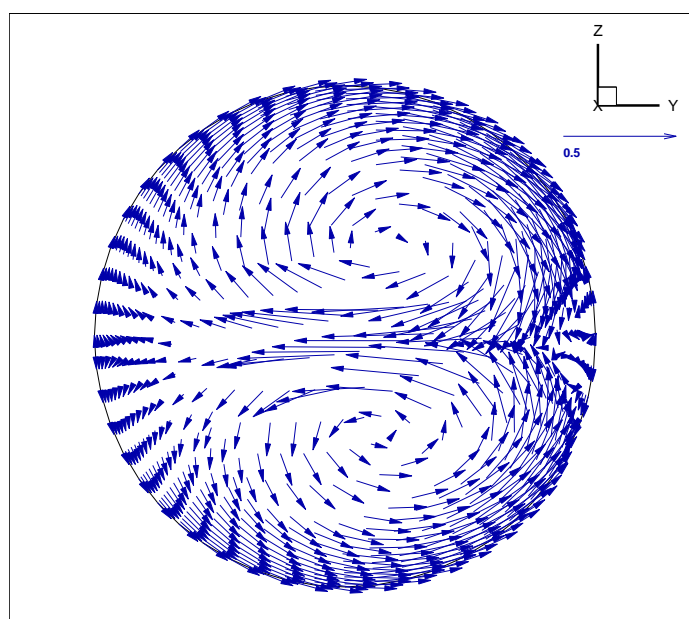


Εικόνα 7.137 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 7, $\alpha_1=60^\circ$)

Στις εικόνες 7.135-7.137 παρατηρείται η αύξηση των απωλειών στην έξοδο outlet για το σενάριο 7 καθώς μειώνεται η γωνία α_1 . Το παραπάνω είναι φυσιολογικό μιας και η ροή χρειάζεται να «στρίψει» αρκετά.

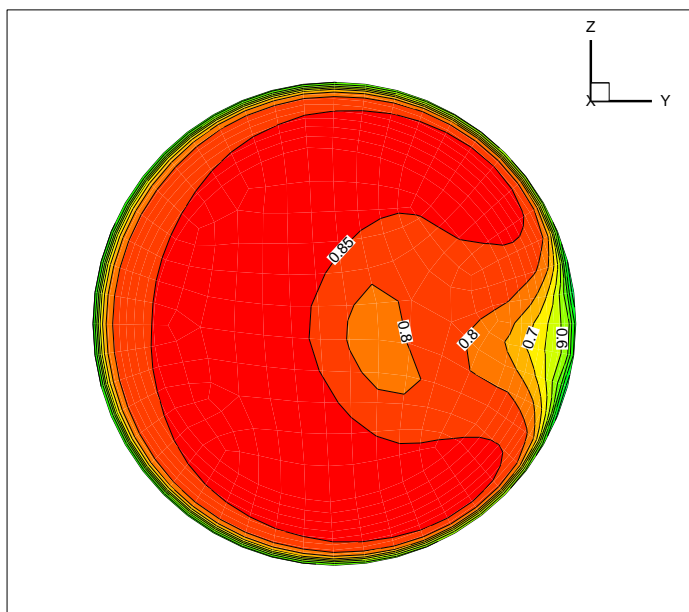


Εικόνα 7.138 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 7, $\alpha_1=120^\circ$) Εικόνα 7.139 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 7, $\alpha_1=80^\circ$)

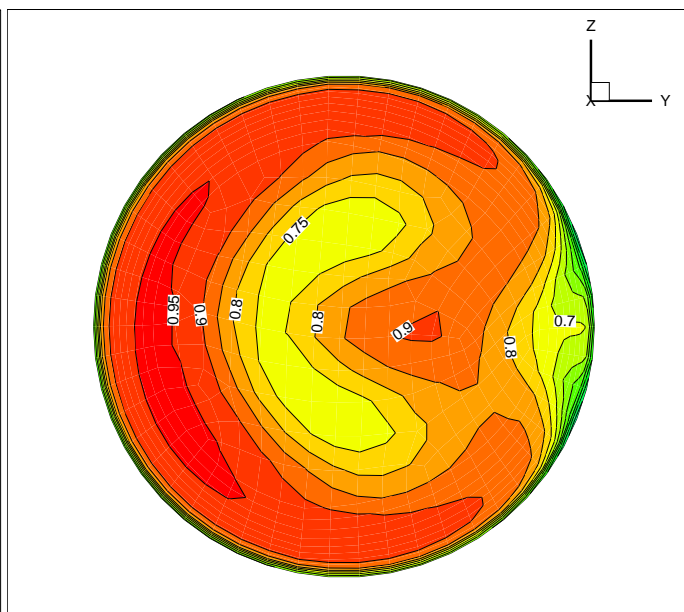


Εικόνα 7.140 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 7, $\alpha_1=60^\circ$)

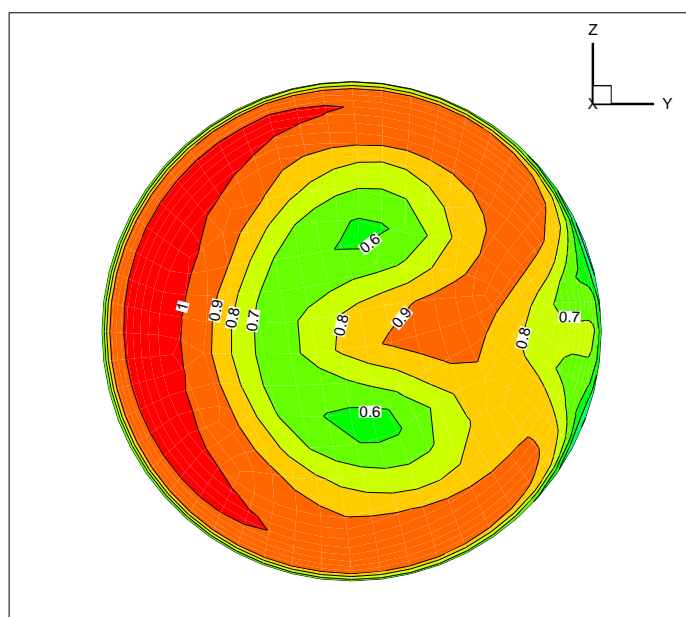
Οι εικόνες 7.138-7.140 δείχνουν τους στροβιλισμούς της ροής στην έξοδο outlet για το σενάριο 7 και όπως αναμένεται αυτοί γίνονται εντονότεροι όσο μειώνεται η γωνία α_1 .



Εικόνα 7.141 Ισοταχείς στην outlet (σενάριο 7, $\alpha_1=120^\circ$)

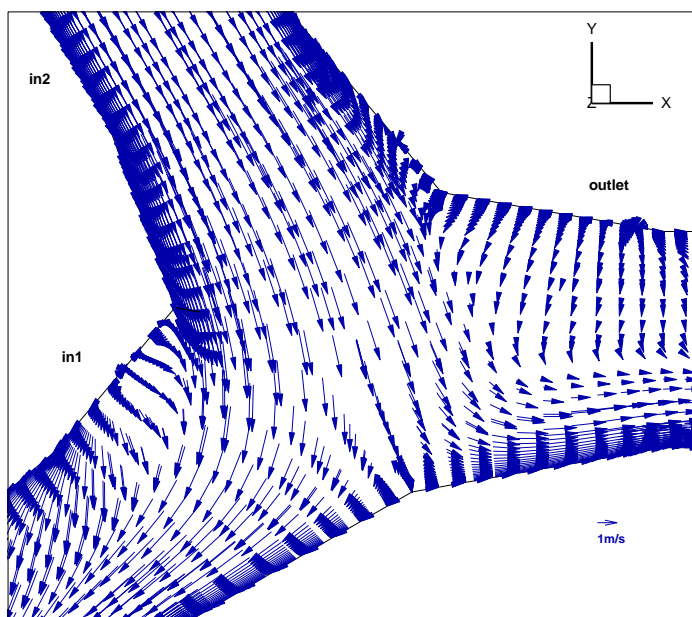


Εικόνα 7.142 Ισοταχείς στην outlet (σενάριο 7, $\alpha_1=80^\circ$)

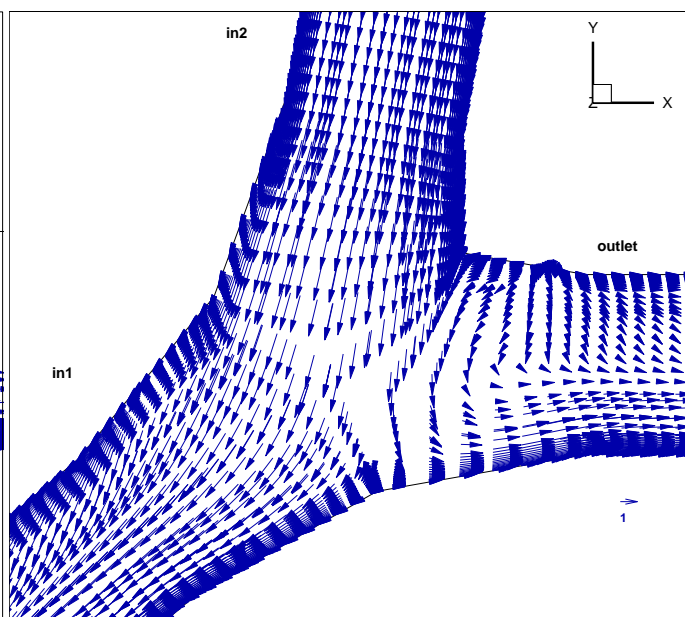


Εικόνα 7.143 Ισοταχείς στην outlet (σενάριο 7, $\alpha_1=60^\circ$)

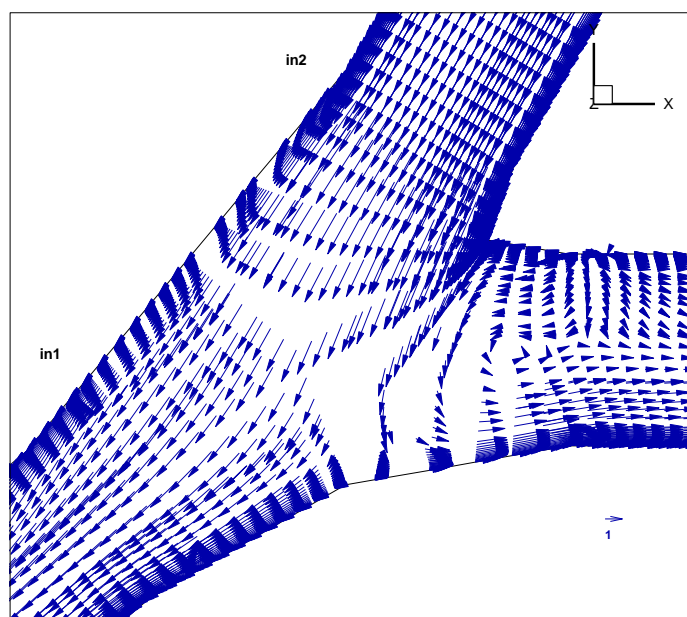
Στις εικόνες 7.141-7.143 έχουμε τις ισοταχείς στην έξοδο outlet. Παρατηρούμε ότι όσο μικραίνει η γωνία α_1 τόσο πιο ανομοιόμορφη γίνεται η κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο και τόσο αυξάνονται οι τιμές αυτής.



Εικόνα 7.144 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 9, $\alpha_1=120^\circ$)

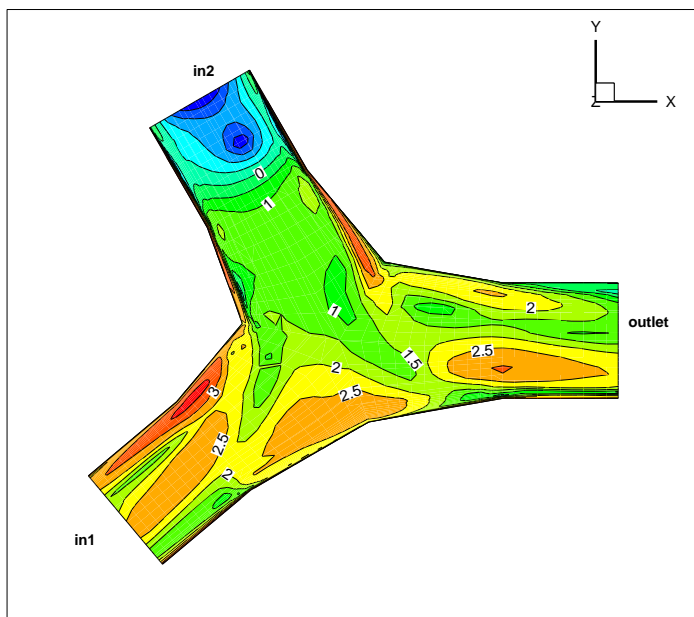


Εικόνα 7.145 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 9, $\alpha_1=80^\circ$)

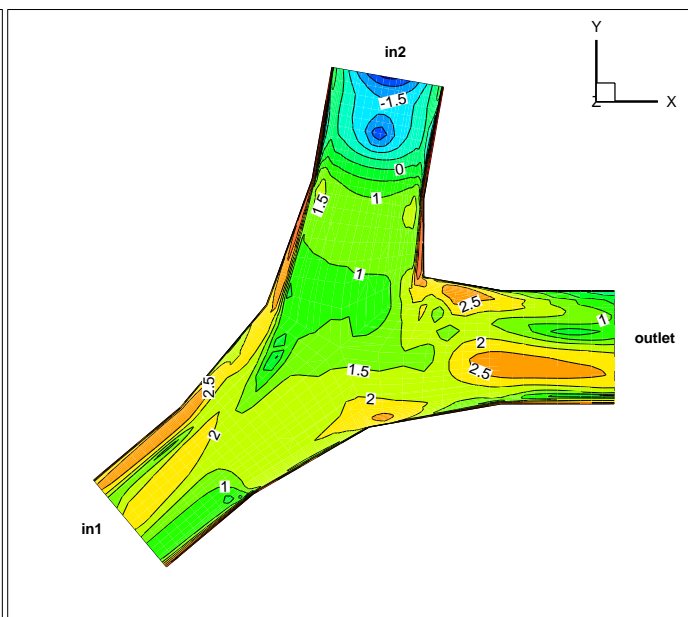


Εικόνα 7.146 Διανύσματα ταχύτητας $z=0$ (σενάριο 9, $\alpha_1=60^\circ$)

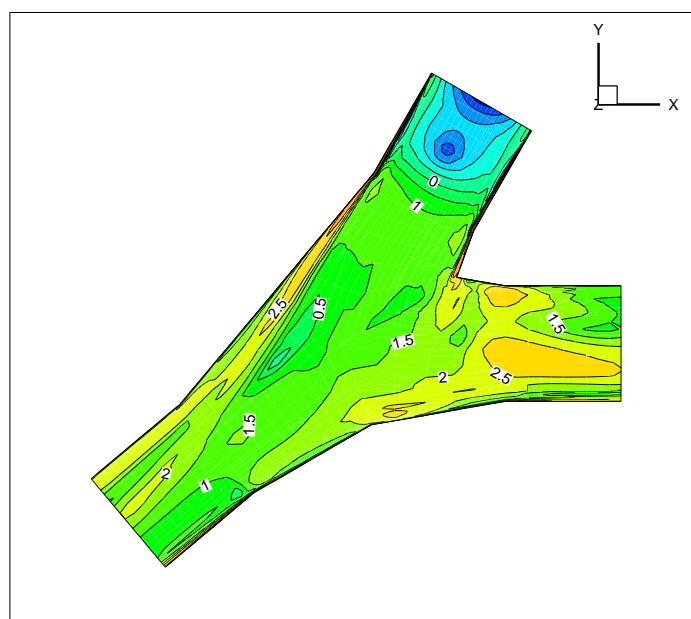
Στις εικόνες 7.144-7.146 έχουμε τα διανύσματα της ταχύτητας στο επίπεδο $z=0$ για τις διάφορες γωνίες α_1 για το σενάριο 9. Σε αυτό το σενάριο έχουμε διαχωρισμό της ροής και παρατηρούμε ότι στο τμήμα της ροής που πηγαίνει προς την έξοδο in1 έχουμε αποκόλληση της ροής η οποία αλλάζει για διαφορετικές γωνίες και είναι πιο μεγάλη για μεγάλες γωνίες. Αντίθετα στο τμήμα της ροής που πηγαίνει προς την έξοδο outlet έχουμε και εκεί αποκόλληση της ροής η οποία όμως είναι πιο έντονη για μικρές γωνίες.



Εικόνα 7.147 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 9, $\alpha_1=120^\circ$)

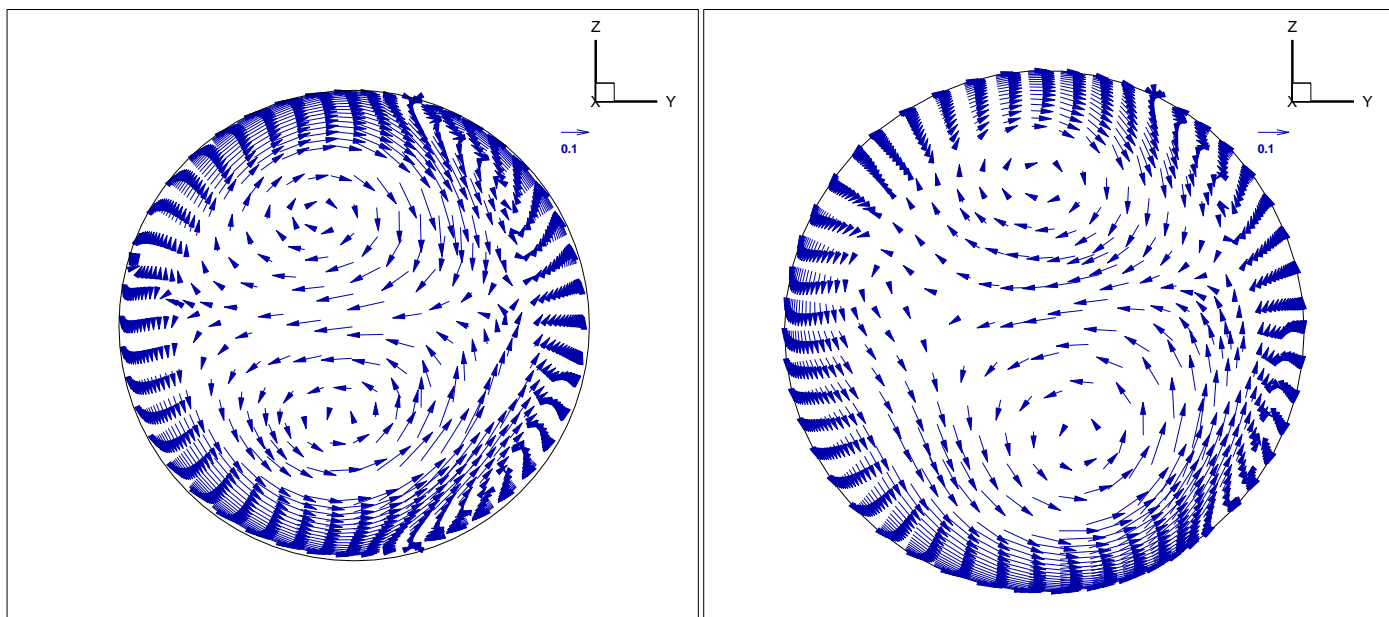


Εικόνα 7.148 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 9, $\alpha_1=80^\circ$)

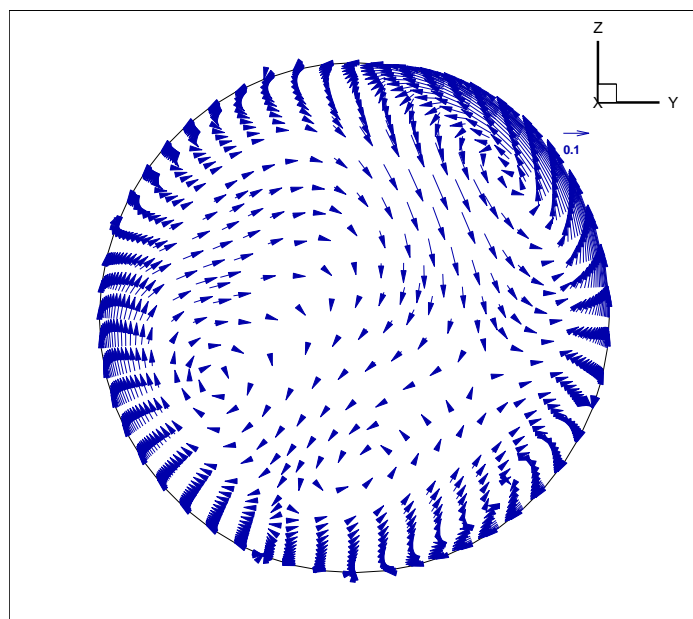


Εικόνα 7.149 Ισοϋψείς Φ στο επίπεδο $z=0$ (σενάριο 9, $\alpha_1=60^\circ$)

Οι εικόνες 7.147-7.149 δείχνουν που υπάρχουν απώλειες στο επίπεδο $z=0$ για το σενάριο 9. Παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η γωνία α_1 τόσο μειώνονται και οι γωνίες στην έξοδο in1. Αντίθετα οι απώλειες στην έξοδο outlet αυξάνονται καθώς η γωνία αλλαγής κατεύθυνσης είναι μικρή και επομένως η ροή αναγκάζεται να στρίψει πιο πολύ.

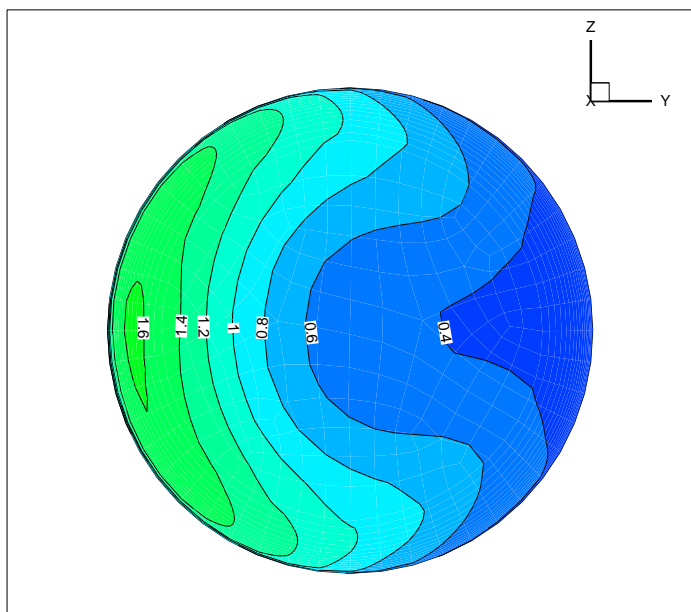


Εικόνα 7.150 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 9, $\alpha_1=120^\circ$) Εικόνα 7.151 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 9, $\alpha_1=80^\circ$)

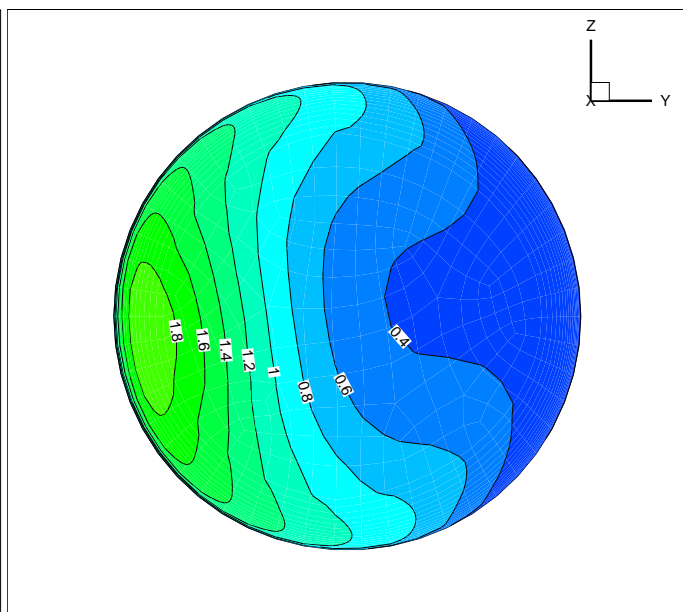


Εικόνα 7.152 Διανύσματα ταχύτητας στην outlet (σενάριο 9, $\alpha_1=60^\circ$)

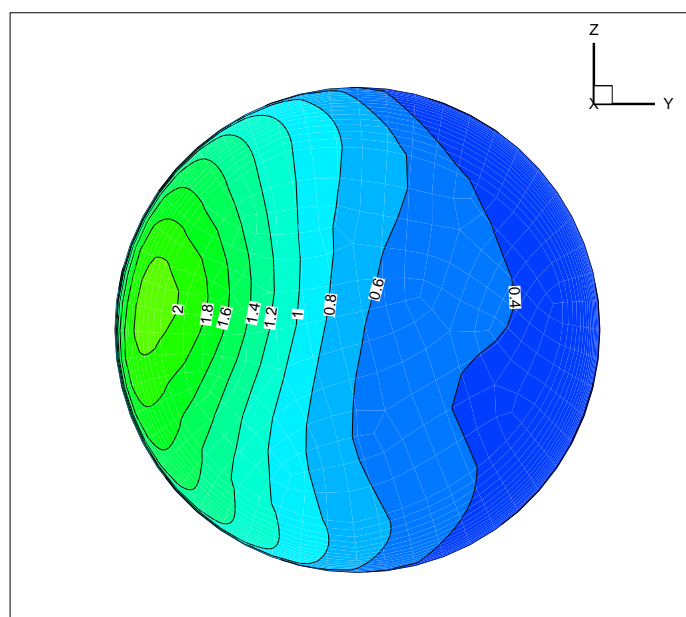
Οι εικόνες 7.150-7.152 δείχνουν τους στροβιλισμούς στην έξοδο outlet. Παρατηρείται ότι αυτοί γίνονται ακανόνιστοι καθώς μειώνεται η γωνία α_1 .



Εικόνα 7.153 Ισοταχείς στην outlet (σενάριο 9, $\alpha_1=120^\circ$)

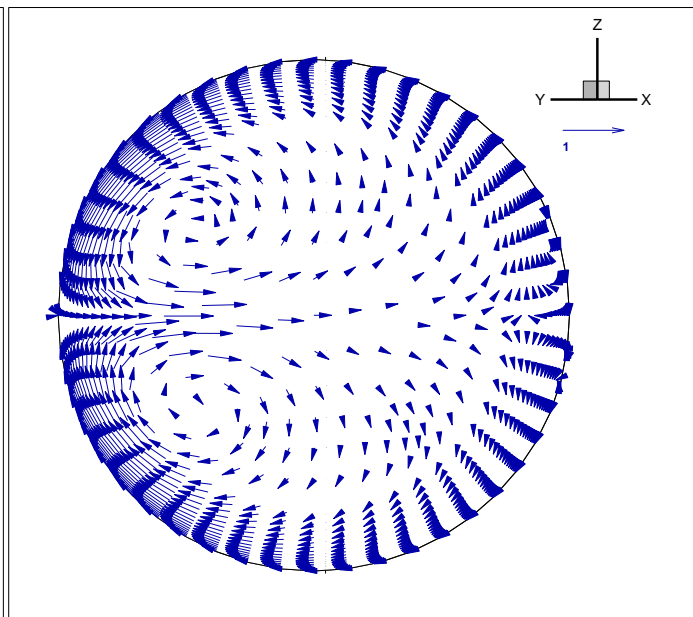
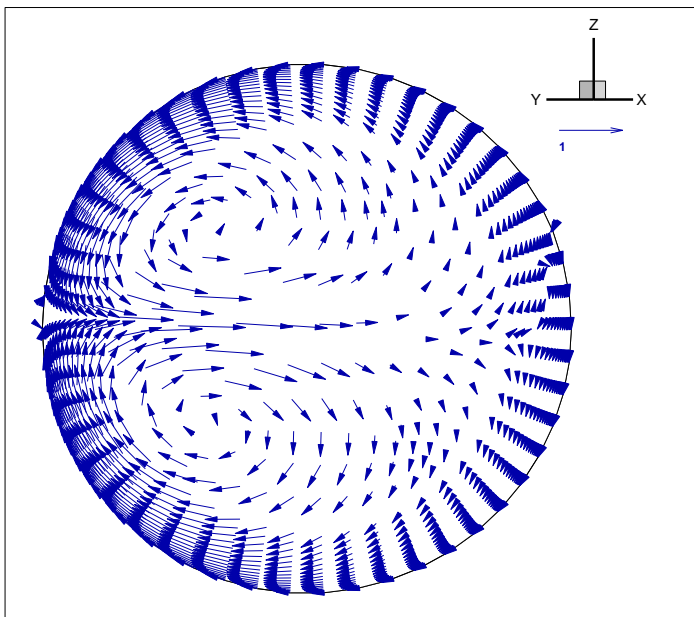


Εικόνα 7.154 Ισοταχείς στην outlet (σενάριο 9, $\alpha_1=80^\circ$)



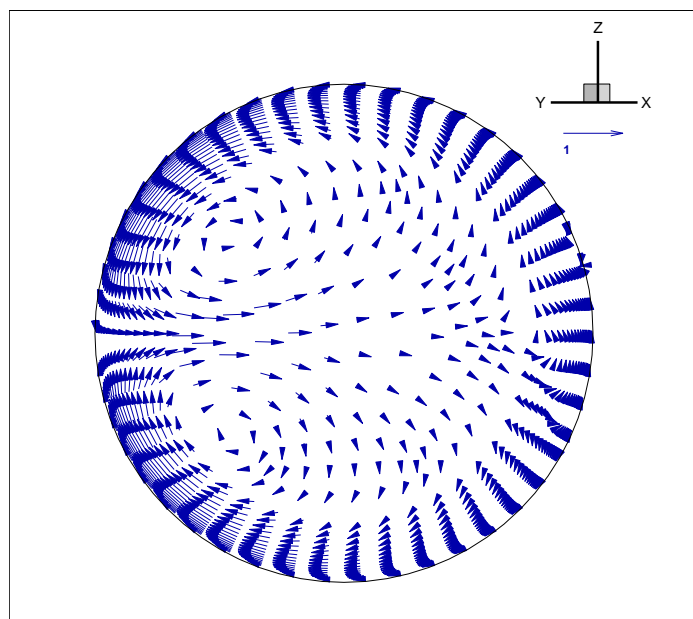
Εικόνα 7.155 Ισοταχείς στην outlet (σενάριο 9, $\alpha_1=60^\circ$)

Στις εικόνες 7.153-7.155 έχουμε τις ισοταχείς στην έξοδο outlet. Παρατηρούμε την ότι όσο μικραίνει η γωνία α_1 τόσο πιο ανομοιόμορφη γίνεται η κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο και τόσο αυξάνονται οι τιμές αυτής.



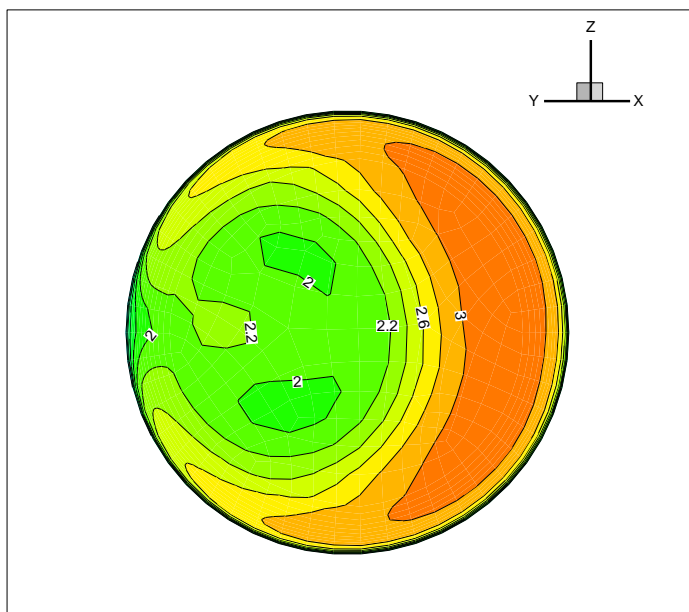
Εικόνα 7.156 Διανύσματα ταχύτητας στην in1 (σενάριο 9, $\alpha_1=120^\circ$)

Εικόνα 7.157 Διανύσματα ταχύτητας στην in1 (σενάριο 9, $\alpha_1=80^\circ$)

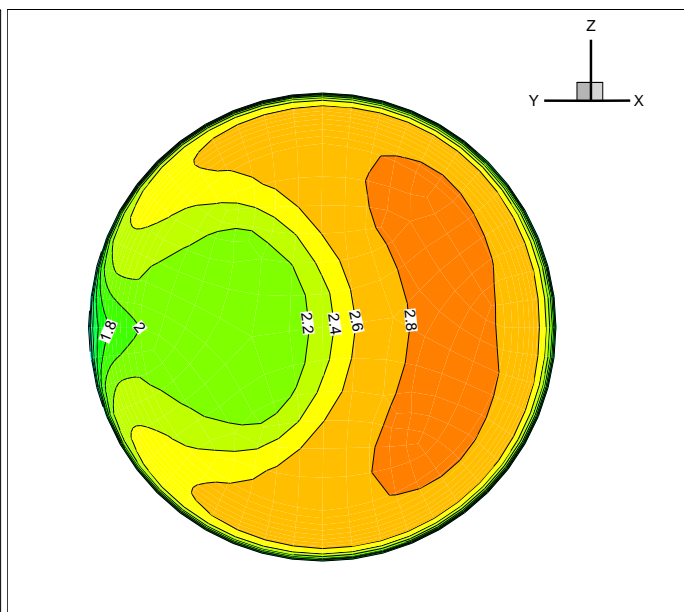


Εικόνα 7.158 Διανύσματα ταχύτητας στην in1 (σενάριο 9, $\alpha_1=60^\circ$)

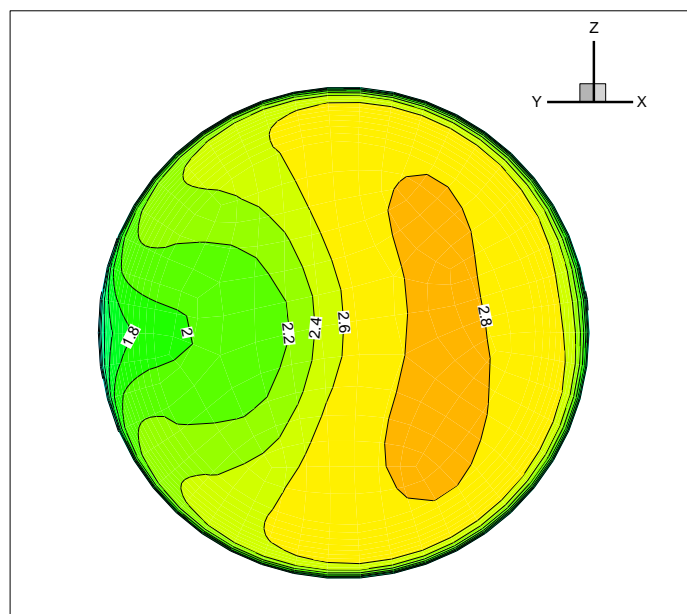
Οι εικόνες 7.155-7.157 δείχνουν τους στροβιλισμούς στην έξοδο in1. Παρατηρείται ότι αυτοί γίνονται εντονότεροι καθώς αυξάνεται η γωνία α_1 .



Εικόνα 7.159 Ισοταχείς στην in1 (σενάριο 9, $\alpha_1=120^\circ$)



Εικόνα 7.160 Ισοταχείς στην in1 (σενάριο 9, $\alpha_1=80^\circ$)



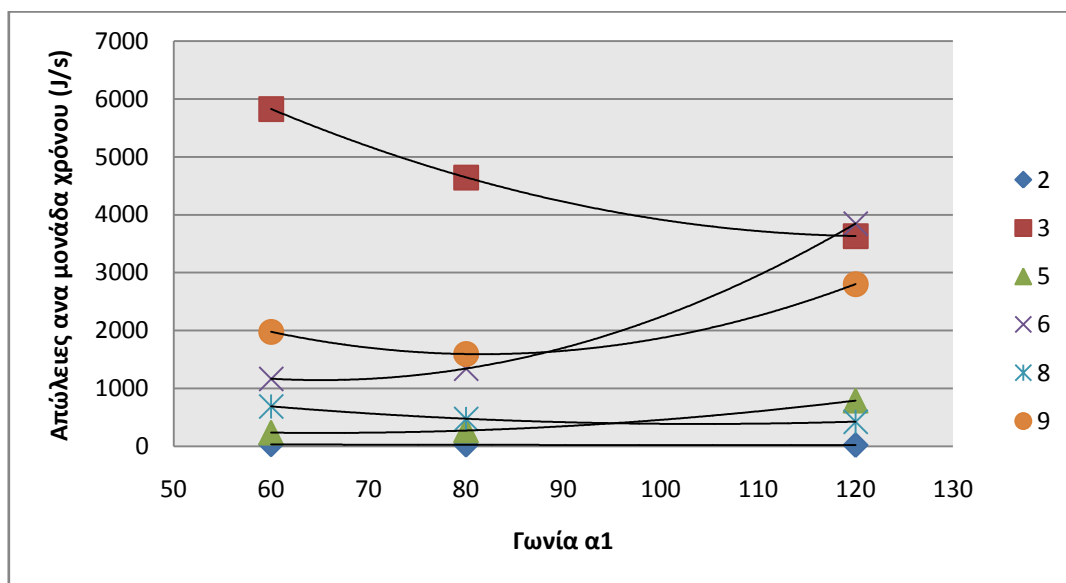
Εικόνα 7.161 Ισοταχείς στην in1 (σενάριο 9, $\alpha_1=60^\circ$)

Τέλος στις εικόνες 7.159-7.161 έχουμε τις ισοταχείς στην έξοδο in1. Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει η γωνία α_1 τόσο πιο ανομοιομορφη γίνεται η κατανομή της ταχύτητας στην έξοδο και τόσο αυξάνονται οι τιμές αυτής.

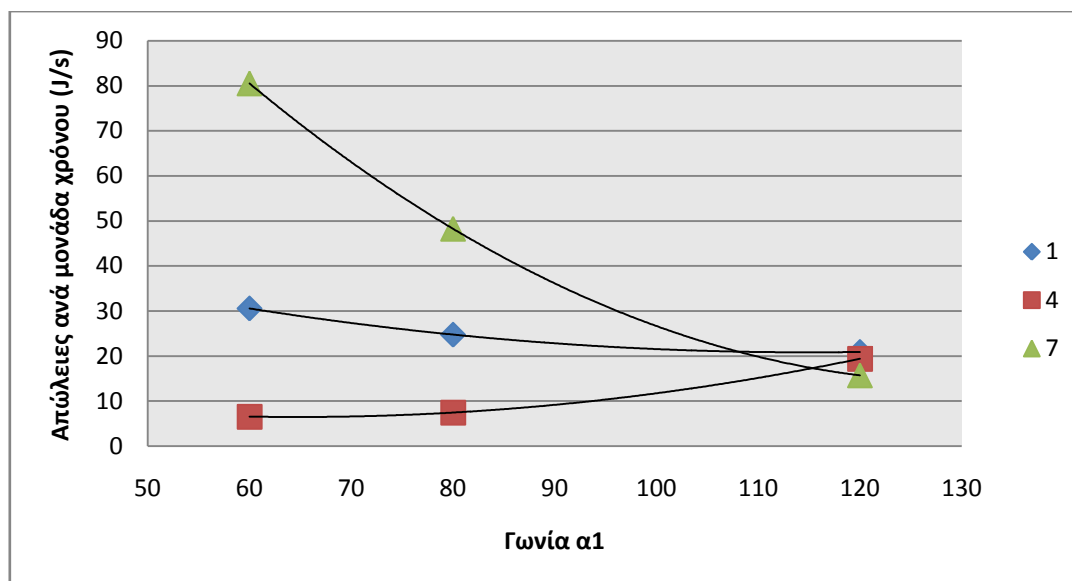
Σύμφωνα με τους πίνακες 7.5, 7.6, 7.9 και 7.10 παρατηρούμε ότι για $\alpha_1=80^\circ$ οι συνολικές απώλειες είναι μικρότερες από ότι για $\alpha_1=120^\circ$. Πιο συγκεκριμένα για τα σενάρια 1, 2, 3 για $\alpha_1=80^\circ$ οι απώλειες αυξάνονται σε σχέση με $\alpha_1=120^\circ$. Το ίδιο ισχύει και για τα σενάρια 7, 8, 9. Αντίθετα για τα σενάρια 4, 5, 6 οι απώλειες μειώνονται αισθητά μιας και η ροή «στρίβει» λιγότερο.

Επίσης σύμφωνα με τους πίνακες 7.11 και 7.12 παρατηρούμε ότι οι συνολικές απώλειες για $\alpha_1=60^\circ$ είναι μεγαλύτερες από ότι για $\alpha_1=80^\circ$ και μικρότερες από $\alpha_1=120^\circ$. Επίσης σε σχέση με $\alpha_1=80^\circ$ οι απώλειες για όλα τα σενάρια εκτός από τα 4,5 και 6 αυξάνονται.

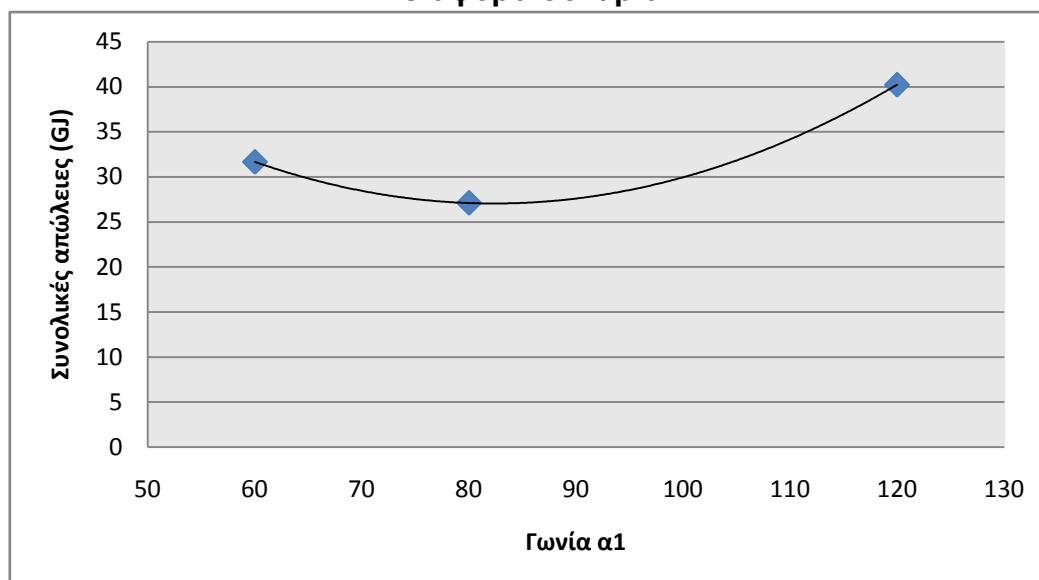
Όλα τα παραπάνω φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα συνοπτικά.



Διάγραμμα 7.19 Μεταβολή ισχύος απωλειών συναρτήσει γωνίας α_1 για διάφορα σενάρια



Διάγραμμα 7.20 Μεταβολή ισχύος απωλειών συναρτήσει γωνίας α_1 για διάφορα σενάρια



Διάγραμμα 7.21 Μεταβολή συνολικών απωλειών συναρτήσει γωνίας α_1

Όπως παρατηρούμε στα διαγράμματα 7.19 και 7.21 η μεγάλη αύξηση των απωλειών στα σενάρια 2, 3 και 9 αλλά και η μικρή μείωση στα σενάρια 5 και 6 για $\alpha_1=60^\circ$ σε σχέση με $\alpha_1=80^\circ$ έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των συνολικών απωλειών για $\alpha_1=60^\circ$.

Επομένως σύμφωνα με τα παραπάνω το ζευγάρι γωνιών με τις μικρότερες απώλειες είναι $\alpha_1=80^\circ$ και $\alpha_2=140^\circ$.

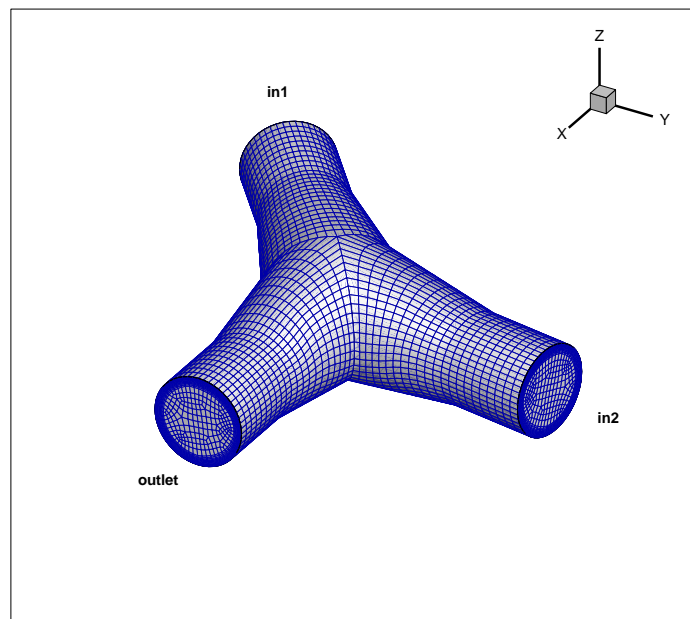
7.5 Παραμετρική διερεύνηση με παράμετρο την γωνία φ .

Για τις παρακάτω περιπτώσεις θα διατηρήσουμε όλες τις διαστάσεις εκτός από την γωνία φ .

7.5.1 Περίπτωση με $\varphi=8^\circ$

Έχουμε λοιπόν τις παρακάτω διαστάσεις:

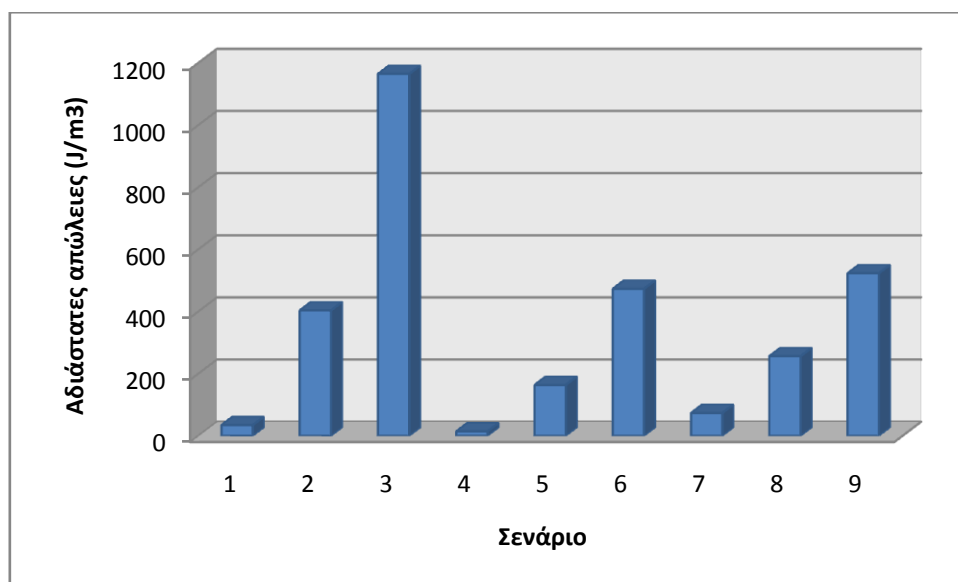
- $d_{\max}=1,5$ m
- $d_{\min}=1$ m
- $\varphi=8^\circ$
- $\alpha_1=80^\circ$
- $\alpha_2=140^\circ$



Εικόνα 7.162 Πλέγμα γεωμετρίας.

Σενάριο	Ποσοστό ετήσιας λειτουργίας (%)	Απώλειες (J/s)	Ετήσιες απώλειες (J)
1	8	22,34	56381373
2	11	864,41	2998604407
3	7	4238,89	9357431053
4	5	6,66	10497704
5	9	249,17	707214478
6	15	1223,60	5788124630
7	7	47,39	104618567
8	15	389,91	1844411910
9	8	1352,54	3412287235
Σύνολο (GJ)			24,28

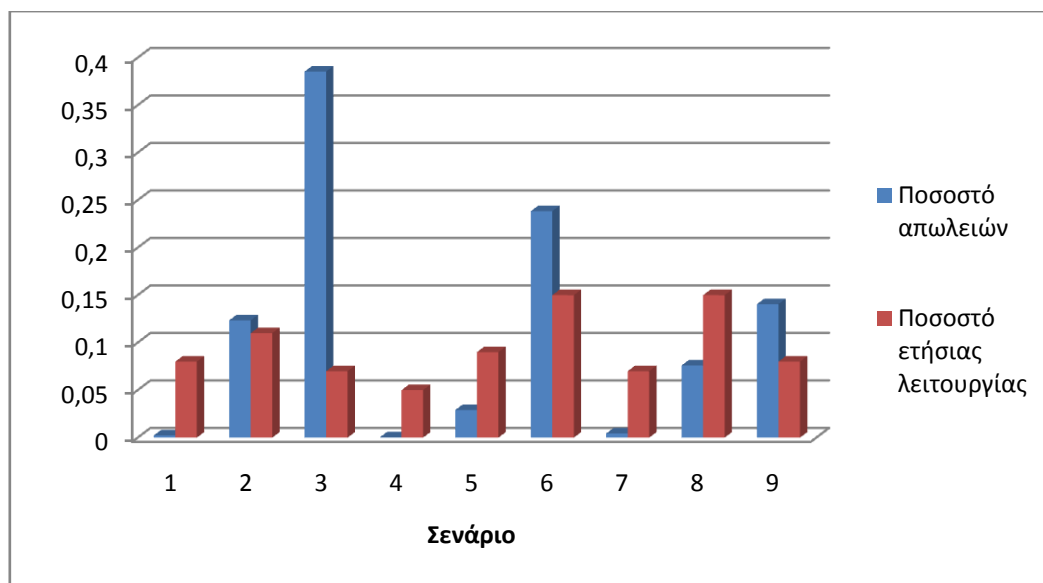
Πίνακας 7.13



Διάγραμμα 7.16 Αδιάστατες απώλειες ανά σενάριο

Σενάριο	Ποσοστό στις ετήσιες συνολικές απώλειες (%)
1	0,23
2	12,35
3	38,54
4	0,04
5	2,91
6	23,83
7	0,43
8	7,60
9	14,05

Πίνακας 7.14

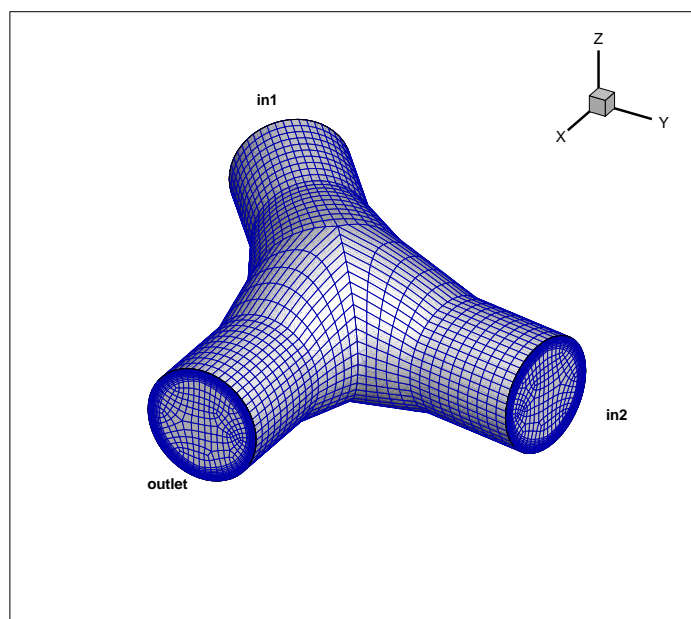


Διάγραμμα 7.22 Ποσοστό απωλειών ανά σενάριο

7.5.2 Περίπτωση με $\varphi=12^\circ$

Έχουμε λοιπόν τις παρακάτω διαστάσεις:

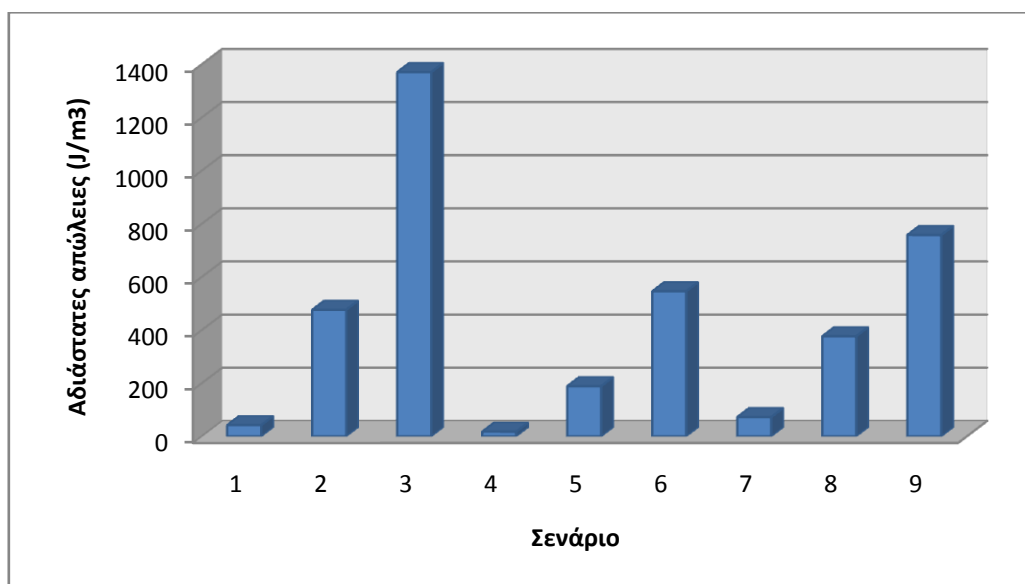
- $d_{\max}=1,5$ m
- $d_{\min}=1$ m
- $\varphi=12^\circ$
- $\alpha_1=80^\circ$
- $\alpha_2=140^\circ$



Εικόνα 7.163 Πλέγμα γεωμετρίας.

Σενάριο	Ποσοστό ετήσιας λειτουργίας (%)	Απώλειες (J/s)	Ετήσιες απώλειες (J)
1	8	27,01	68156511
2	11	1018,81	3534215300
3	7	4986,46	11007712563
4	5	7,96	12554103
5	9	286,96	814463621
6	15	1410,45	6671995329
7	7	46,53	102724250
8	15	572,57	2708473775
9	8	1352,54	4940199976
Σύνολο (GJ)			29,86

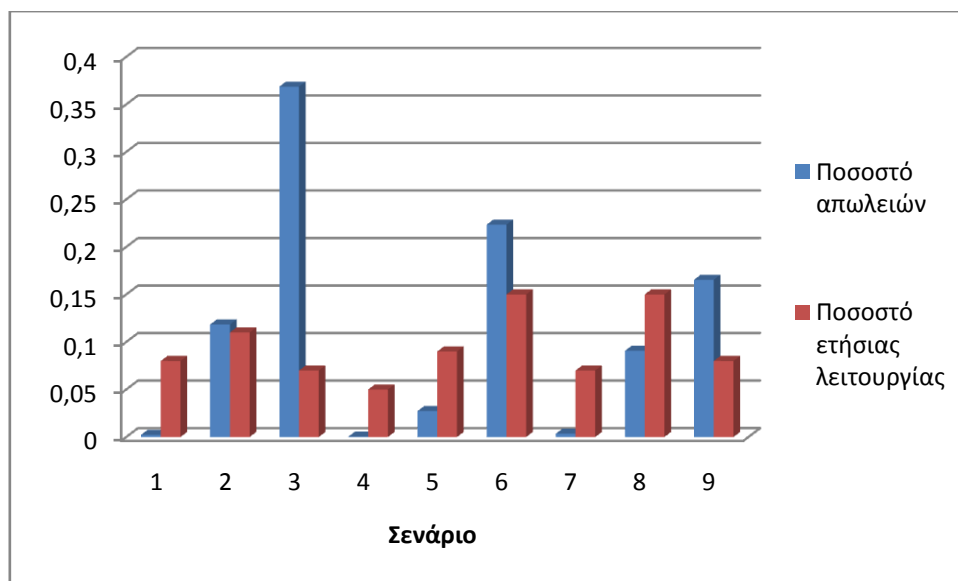
Πίνακας 7.15



Διάγραμμα 7.23 Αδιάστατες απώλειες ανά σενάριο

Σενάριο	Ποσοστό στις ετήσιες συνολικές απώλειες (%)
1	0,23
2	11,84
3	36,86
4	0,04
5	2,72
6	22,34
7	0,34
8	9,07
9	16,54

Πίνακας 7.16

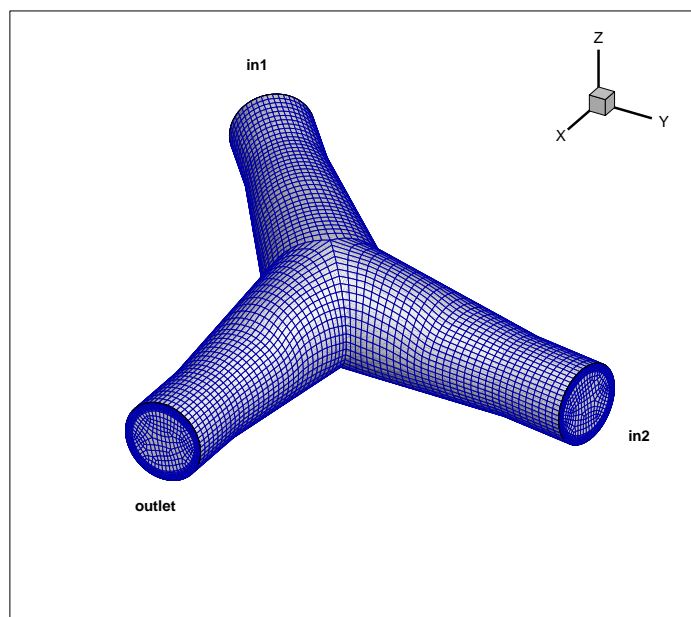


Διάγραμμα 7.24 Ποσοστό συνολικών απωλειών ανά σενάριο

7.5.3 Περίπτωση με $\varphi=5^\circ$

Έχουμε λοιπόν τις παρακάτω διαστάσεις:

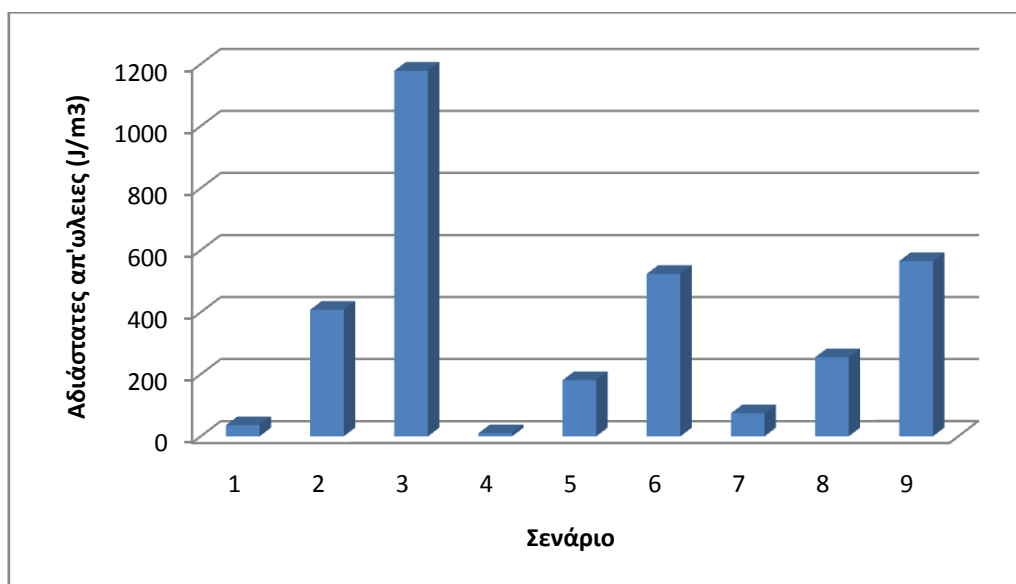
- $d_{\max}=1,5$ m
- $d_{\min}=1$ m
- $\varphi=5^\circ$
- $\alpha_1=80^\circ$
- $\alpha_2=140^\circ$



Εικόνα 7.164 Πλέγμα γεωμετρίας.

Σενάριο	Ποσοστό ετήσιας λειτουργίας (%)	Απώλειες (J/s)	Ετήσιες απώλειες (J)
1	8	23,09	58260212
2	11	872,86	3027927526
3	7	4287,38	9264483720
4	5	4,55	7168637
5	9	275,44	78176555
6	15	1353,29	6401614747
7	7	47,65	105189167
8	15	387,37	1832435767
9	8	1460,04	3683497087
Σύνολο (GJ)			25,36

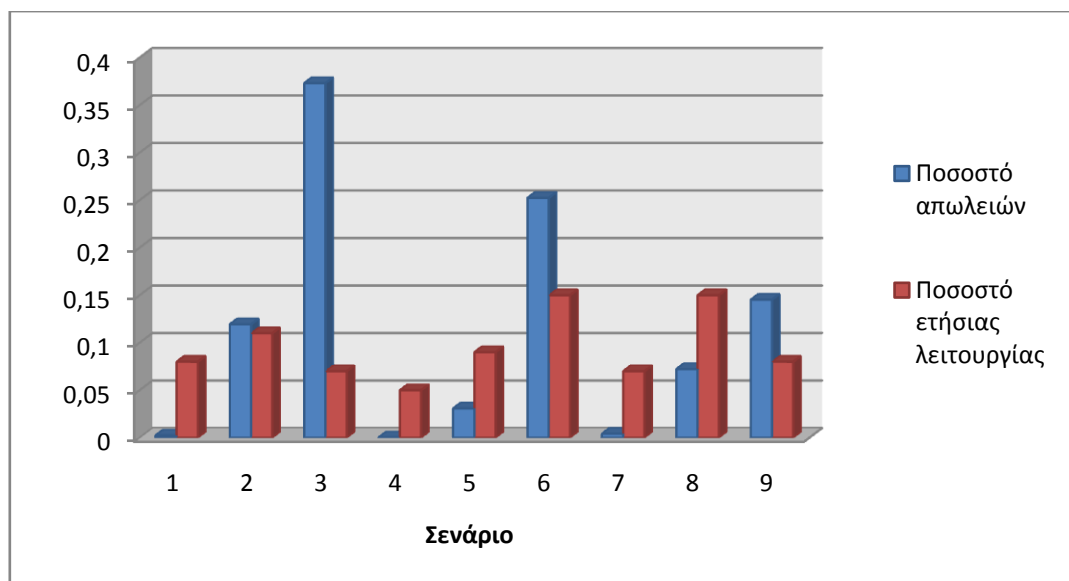
Πίνακας 7.17



Διάγραμμα 7.25 Αδιάστατες απώλειες ανά σενάριο

Σενάριο	Ποσοστό στις ετήσιες συνολικές απώλειες (%)
1	0,23
2	11,94
3	37,31
4	0,03
5	3,08
6	25,24
7	0,41
8	7,22
9	14,52

Πίνακας 7.18

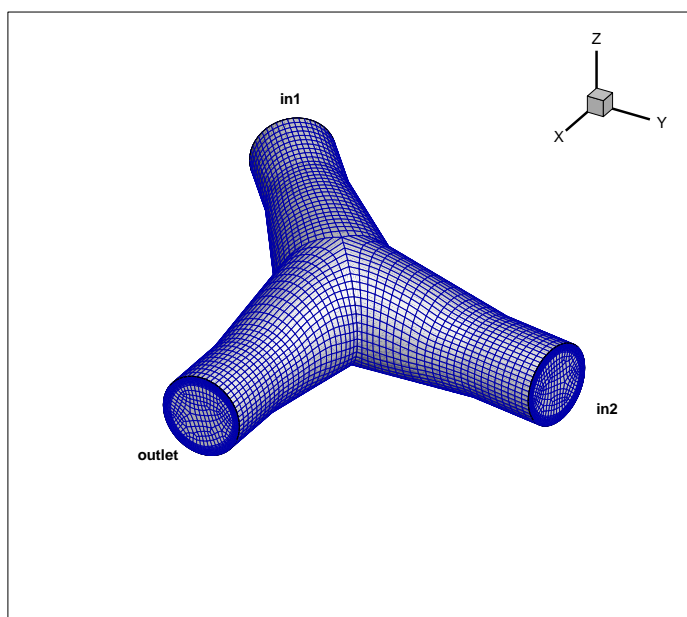


Διάγραμμα 7.26 Ποσοστό συνολικών απωλειών ανά σενάριο

7.5.4 Περίπτωση με $\varphi=6.5^\circ$

Έχουμε λοιπόν τις παρακάτω διαστάσεις:

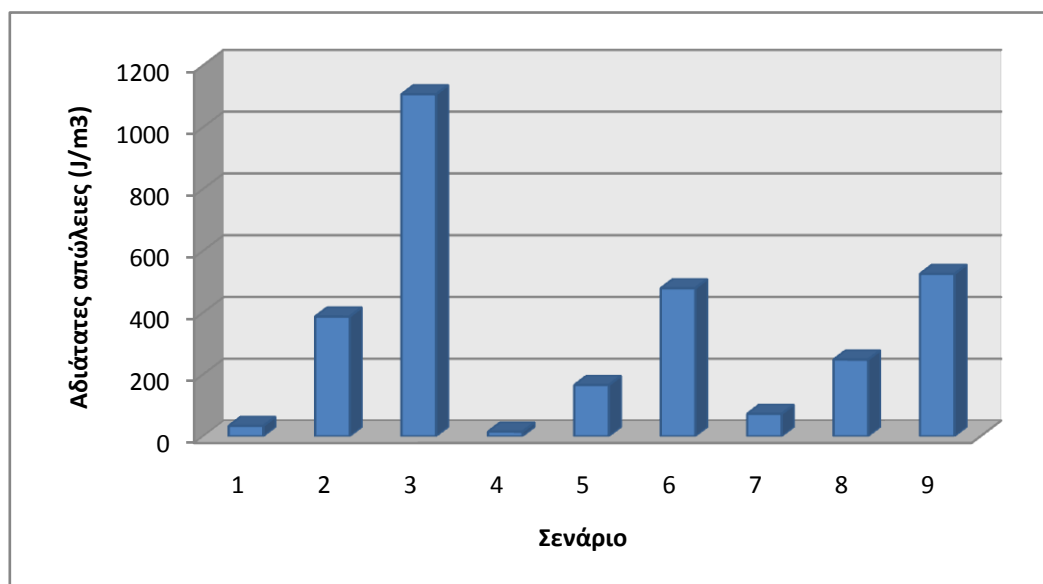
- $d_{\max}=1,5$ m
- $d_{\min}=1$ m
- $\varphi=6.5^\circ$
- $\alpha_1=80^\circ$
- $\alpha_2=140^\circ$



Εικόνα 7.165 Πλέγμα γεωμετρίας

Σενάριο	Ποσοστό ετήσιας λειτουργίας (%)	Απώλειες (J/s)	Ετήσιες απώλειες (J)
1	8	21,65	54615911
2	11	829,16	2876338137
3	7	4027,27	8890270240
4	5	6,70	716144717
5	9	252,32	78176555
6	15	1237,74	5854986374
7	7	46,64	102956569
8	15	377,23	1784439331
9	8	1358,41	3427100375
Σύνολο (GJ)			23,72

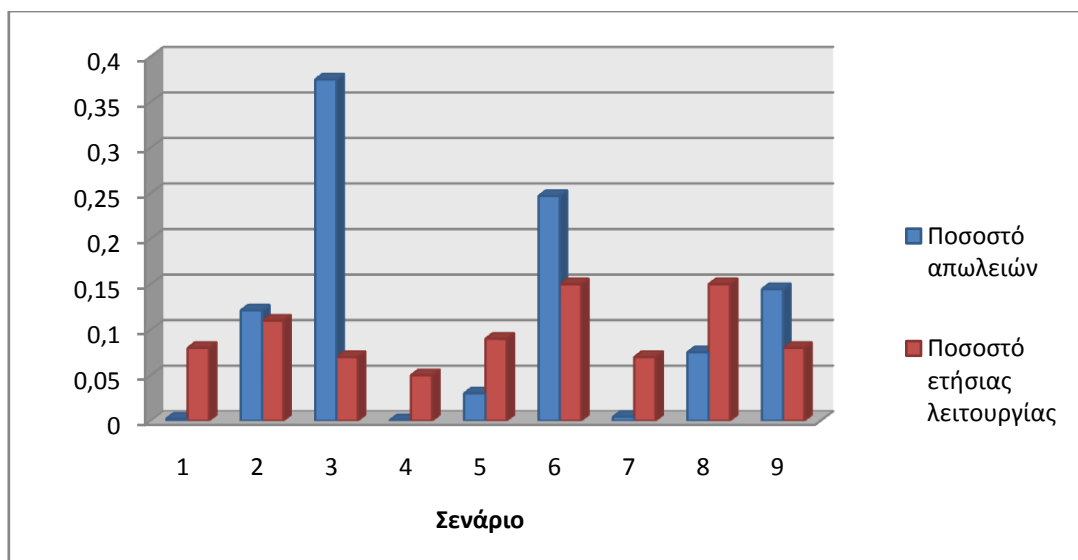
Πίνακας 7.19



Διάγραμμα 7.27 Αδιάσπαστες απώλειες ανά σενάριο

Σενάριο	Ποσοστό στις ετήσιες συνολικές απώλειες (%)
1	0,23
2	12,12
3	37,48
4	0,04
5	3,02
6	24,68
7	0,43
8	7,52
9	14,45

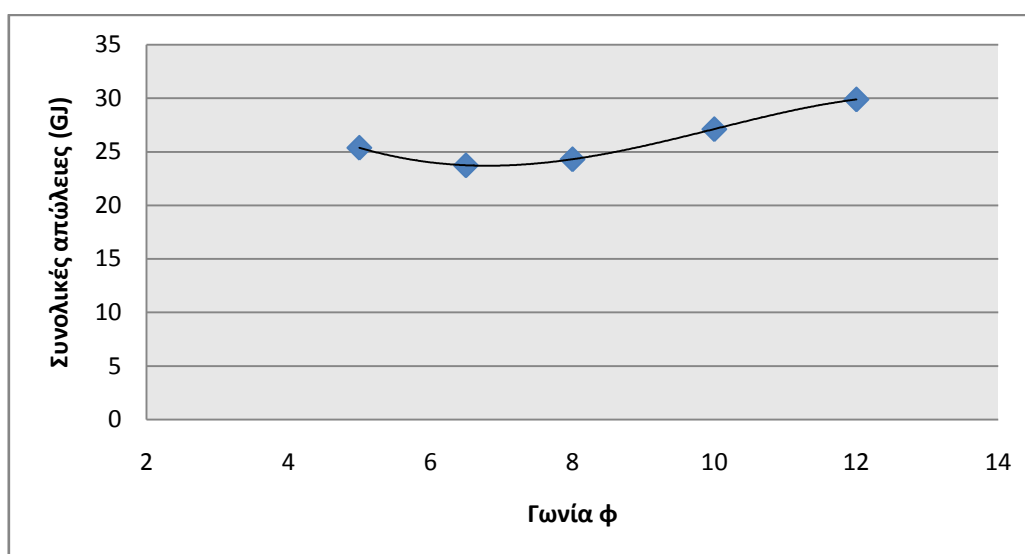
Πίνακας 7.20



Διάγραμμα 7.28 Ποσοστό συνολικών απωλειών ανά σενάριο

7.5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις διάφορες γωνίες ϕ

Σύμφωνα με τους πίνακες 7.9, 7.13, 7.15, 7.17, 7.19 έχουμε ότι η βέλτιστη γωνία ϕ για την ελαχιστοποίηση των απωλειών είναι στην περιοχή των $6,5^\circ$ και είναι κοντά στη περιοχή των 8° που είχε αναφερθεί στην θεωρία. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα (7.20). Στους πίνακες 7.10, 7.14, 7.16, 7.18, 7.20 παρατηρούμε ότι το κάθε σενάριο έχει το ίδιο ποσοστό απωλειών για κάθε διαφορετική γωνία ϕ . Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι οι απώλειες αυξάνονται και μειώνονται αναλογικά για όλα τα σενάρια ανάλογα με την γωνία ϕ . Δηλαδή η γωνία ϕ δεν επηρεάζει συγκεκριμένα σενάρια, όπως με τις γωνίες α_1 και α_2 , αλλά τις συνολικές απώλειες.

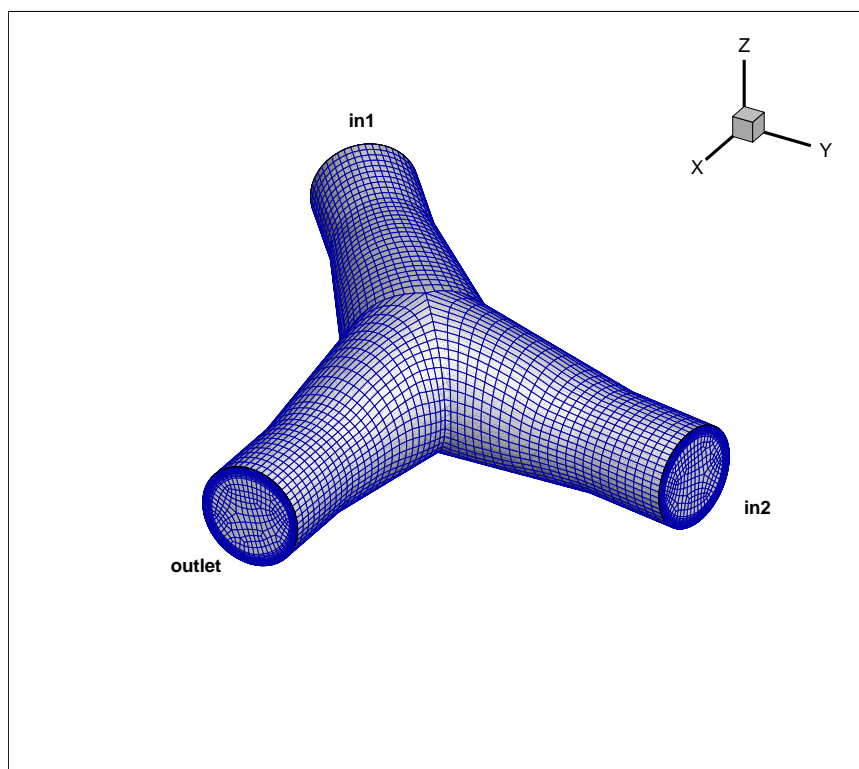


Διάγραμμα 7.20 Μεταβολή συνολικών απωλειών συναρτήσει γωνίας ϕ

7.6 Βέλτιστη γεωμετρία για άλλη χρονοσειρά παροχών.

Η γεωμετρία με τις λιγότερες απώλειες για την χρονοσειρά παροχών που εξετάστηκε ήταν η

- $d_{\max}=1,5$ m
- $d_{\min}=1$ m
- $\varphi=6.5^\circ$
- $\alpha_1=80^\circ$
- $\alpha_2=140^\circ$



Εικόνα 7.166 Βέλτιστη γεωμετρία

Από τις παραπάνω παραμέτρους και με όσα προαναφέρθηκαν παρατηρείται ότι μόνο η γωνίες α_1 και α_2 είναι αυτές που έχουν διαφορετικές βέλτιστες τιμές για όλα τα σενάρια. Αντίθετα η διάμετρος d_{\max} και η γωνία φ έχουν μια κοινή βέλτιστη τιμή για όλα τα σενάρια. Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω θα εξετάσουμε για ποιο ζευγάρι γωνιών έχουμε τις λιγότερες απώλειες για μία άλλη χρονοσειρά παροχών (Πίνακας 7.21). Επειδή όμως τα ζευγάρια γωνιών εξετάστηκαν για $\varphi=10^\circ$ αναγκαστικά οι απώλειες που θα προκύψουν θα αναφέρονται σε αυτήν την γωνία. Για τις συγκεκριμένες παροχές και για τα είδη σεναρίων οι κύριες ροές που επηρεάζουν τις απώλειες είναι 2. Η ροή από τον άνω ταμιευτήρα (in1) στον στρόβιλο (outlet) και από τον κάτω ταμιευτήρα μέσω των αντλιών (in2) στον άνω (in1). Οι ροές αυτές βρίσκονται σε όλα τα σενάρια και μάλιστα με μεγάλες παροχές. Αντίθετα η ροή από τις αντλίες στον στρόβιλο βρίσκεται μόλις σε τρία σενάρια (7, 8, 9) και με μικρές παροχές.

Επομένως οι περισσότερες και μεγαλύτερες απώλειες αναμένονται για τις δύο προαναφερθείσες ροές που έχουν ως βέλτιστο ζευγάρι γωνιών το $\alpha_1=80^\circ$, $\alpha_2=140^\circ$. Για τον λόγο αυτό αντικαταστήσαμε το σενάριο 7 με ένα παρόμοιο με μεγαλύτερες παροχές. Πιο συγκεκριμένα η παροχή για την παραγωγή ισχύος αποτελεί το 85% της μέγιστης παροχής ($Q_T=0,85Q_{Tmax}$), από 15% που ήταν πριν και η παροχή των αντλιών και αυτή το 85% της μέγιστης ($Q_P=0,85Q_{Pmax}$), από 15%.

Επιλέγουμε τυχαία τιμές για τα ποσοστά ετήσιας λειτουργίας των σεναρίων του υβριδικού σταθμού που φαίνονται παρακάτω.

Σενάριο	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ποσοστό ετήσιας λειτουργίας (%)	10	12	10	8	10	5	12	10	6

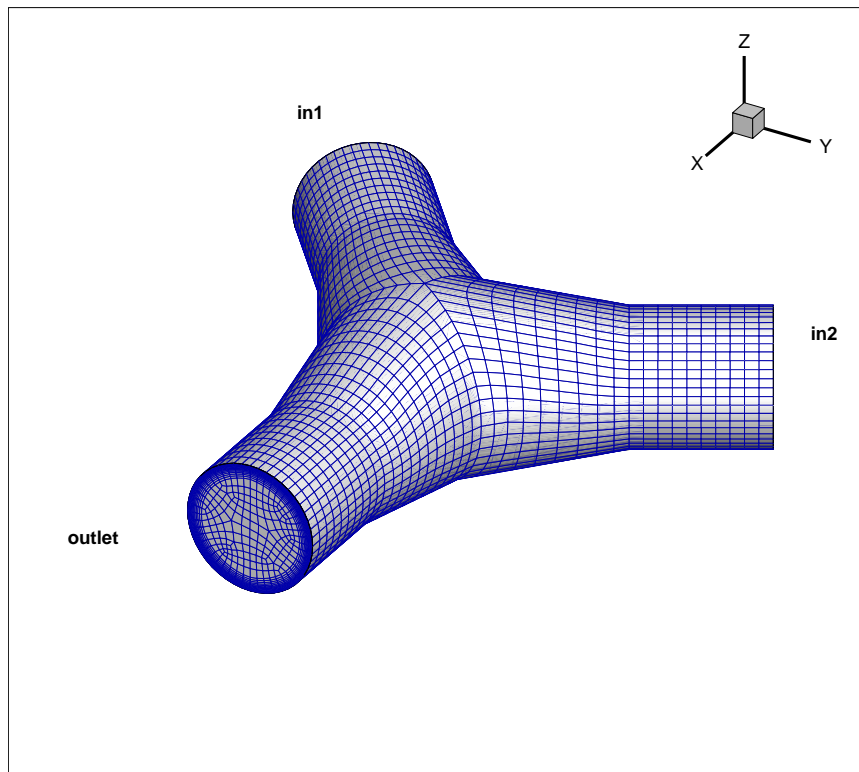
Πίνακας 7.21

Επομένως σύμφωνα με τις απώλειες που υπολογίστηκαν για τις διάφορες γωνίες προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

Περίπτωση	Συνολικές απώλειες (Gj)
$\alpha_1=120^\circ$, $\alpha_2=120^\circ$	35,13
$\alpha_1=120^\circ$, $\alpha_2=100^\circ$	50,09
$\alpha_1=120^\circ$, $\alpha_2=140^\circ$	31,53
$\alpha_1=80^\circ$, $\alpha_2=140^\circ$	32,03
$\alpha_1=60^\circ$, $\alpha_2=140^\circ$	41,97

Πίνακας 7.22

Παρατηρούμε ότι για το παραπάνω σενάριο λειτουργίας του σταθμού και με την αλλαγή του σεναρίου 7 με ένα όμοιο με μεγαλύτερες παροχές η βέλτιστη γεωμετρία της διάταξης αλλάζει. Επομένως το ζευγάρι γωνιών που ελαχιστοποιεί τις ετήσιες απώλειες είναι το $\alpha_1=120^\circ$, $\alpha_2=140^\circ$.



Εικόνα 7.167 Βέλτιστη γεωμετρία για διαφορετικό σενάριο λειτουργίας του υβριδικού σταθμού.

Κεφάλαιο 8^ο Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

8.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία έγινε αριθμητική επίλυση της ροής σε ένα πρότυπο σύστημα διανομής, που χρησιμοποιείται σε έναν αναστρέψιμο σταθμό παραγωγής με αντλησιοταμίευση, για διάφορα σενάρια λειτουργίας του σταθμού. Η επίλυση έγινε για διάφορες γεωμετρίες της διάταξης και σκοπό είχε την εύρεση εκείνης της γεωμετρίας που ελαχιστοποιεί τις ετήσιες απώλειες ενέργειας. Κατά την διαδικασία αυτή παρατηρήθηκαν διάφορα συμπεράσματα τα οποία παρατίθενται παρακάτω.

8.2 Συμπεράσματα

1. Οι σημαντικότερες απώλειες ενέργειας στην διάταξη που εξετάστηκε οφείλονται στις υδραυλικές απώλειες στα τοιχώματα του αγωγού, στις απώλειες λόγω τυρβώδους ροής, στις αποκολλήσεις και ανακυκλοφορίες της ροής, στην ανομοιομορφία του πεδίου ταχυτήτων και στις δευτερεύουσες ροές που αναπτύσσονται τόσο στην έξοδο λόγω των στροβίλων Dean αλλά και σε άλλα σημεία της διάταξης.
2. Οι κύριες ροές που επηρεάζουν τις απώλειες είναι η ροή από τον άνω ταμιευτήρα (in1) στον στρόβιλο (outlet) και από τον κάτω ταμιευτήρα μέσω των αντλιών (in2) στον άνω (in1). Οι ροές αυτές βρίσκονται σε όλα τα σενάρια και μάλιστα με μεγάλες παροχές. Οι απώλειες ενέργειας είναι ανάλογες της παροχής και μάλιστα η ισχύς των απωλειών είναι ανάλογη του κύβου της παροχής ($N_{\text{απ}} \sim Q^3$). Άρα τα σενάρια όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες παροχές, δηλαδή τα σενάρια 3, 6 και 9, καθορίζουν την όλη συμπεριφορά και απόδοση της διάταξης σε όλο το έτος.
3. Η διάμετρος d_{max} επηρεάζει ανάλογα και τις συνολικές απώλειες. Δηλαδή αύξηση της d_{max} αυξάνει τις απώλειες και μείωση της d_{max} τις μειώνει. Αυτό συμβαίνει διότι για δεδομένη γωνία ϕ και μεγάλη d_{max} αυξάνει το μήκος της γεωμετρίας και επομένως οι γραμμικές απώλειες. Επίσης για μεγάλη d_{max} δημιουργούνται περιοχές ανακυκλοφορίας και δευτερεύουσες ροές οι οποίες αυξάνουν και αυτές τις απώλειες.
4. Η γωνία ϕ της προοδευτικής διαστολής για δεδομένες τις άλλες διαστάσεις έχει μια τιμή για την οποία ελαχιστοποιεί τις απώλειες και αυτή είναι περίπου στις $6,5^\circ$. Μικρότερη γωνία σημαίνει μεγαλύτερο

συνολικό μήκος της διάταξης άρα μεγαλύτερες γραμμικές απώλειες. Μεγαλύτερη γωνία σημαίνει μικρότερο μήκος αλλά εντονότερες αποκολλήσεις ροής και επομένως αύξηση των απωλειών.

5. Η γωνίες α_1 και α_2 επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην έχουμε απότομες αλλαγές στην κατεύθυνση της ροής πράγμα που σημαίνει δευτερεύουσες ροές και αποκολλήσεις. Η ροή χάνει την αξονική συμμετρία της, ενώ οι ροϊκές γραμμές καμπυλώνονται, προκαλώντας πρόσθετες ενεργειακές απώλειες. Η ανομοιομορφία στο προφίλ ταχυτήτων συνεπάγεται αύξηση των απωλειών λόγω αύξησης της κινητικής ενέργειας και ασυμμετρίας των διαμηθικών τάσεων και επιπλέον μπορεί να προκληθεί αποκόλληση της ροής στις περιοχές αυξανόμενης πίεσης.
6. Επομένως απότομη γωνία αλλαγής κατεύθυνσης σημαίνει εντονότερους στροβιλισμούς στην έξοδο, ανομοιόμορφο πεδίο ταχυτήτων, περισσότερες αποκολλήσεις της ροής. Όλα αυτά σύμφωνα με τα παραπάνω αυξάνουν τις απώλειες. Αντίθετα ομαλές γωνίες αλλαγής κατεύθυνσης σημαίνουν το αντίθετο με αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες.
7. Από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν βρέθηκε ότι υπάρχει βέλτιστη γεωμετρία που παρουσιάζει ελάχιστες απώλειες 23,72Gj ενώ η χειρότερη που εξετάστηκε παρουσιάζει απώλειες 51,13 Gj
8. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μπορεί εύκολα να δώσει τη βέλτιστη γεωμετρία της διάταξης για οποιοδήποτε επιθυμητό ή τρόπο λειτουργίας του υβριδικού σταθμού. Η βέλτιστη γεωμετρία μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το εκάστοτε σενάριο, επομένως η βελτιστοποίηση μπορεί να βελτιώσει την όλη ενεργειακή απόδοση του υβριδικού σταθμού.

8.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Σύμφωνα με τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν καταλήξαμε σε μία γεωμετρία η οποία έχει τις λιγότερες συνολικές απώλειες σύμφωνα πάντα με τις δεδομένες παροχές που μας δόθηκαν. Αυτή η γεωμετρία όμως δεν σημαίνει ότι είναι η βέλτιστη μιας και έγινε μόνο μία παραμετρική διερεύνηση. Για την βέλτιστη λύση απαιτείται αριθμητική βελτιστοποίηση σχεδιασμού της διάταξης με χρήση κατάλληλης μεθόδου βελτιστοποίησης.
- Θα μπορούσε να γίνει μελέτη με μεγαλύτερα μήκη αγωγών για πληρέστερη εκτίμηση των υδραυλικών απωλειών ώστε η ροή στις εξόδους να είναι διαμορφωμένη.
- Επίσης η παραπάνω βελτιστοποίηση μπορεί να συνδυαστεί από ανάλυση τάσεων του υλικού και δυνάμεις στα τοιχώματα και στη στήριξη, οπότε να γίνει συνολική βελτιστοποίηση λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος κατασκευής της διάταξης.
- Τέλος μπορεί να μελετηθεί η επίδραση μεταβατικών φαινομένων κατά την έναρξη/τερματισμό ή μεταβολή της ροής.

Βιβλιογραφία

1. Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, Νέες προοπτικές για την Ανάπτυξη της αντλησιοταμίευσης στην Ελλάδα, ΤΕΕ Ιωάννινα 2009
2. Αντώνιος Γ. Τσικαλάκης, Διδακτορική διατριβή: Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών - Ιούλιος 2008.
3. www.energystorage.com
4. Electric Energy Storage Climate TechBook. May 2009
5. Παπαντώνης Δ., Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες – Υδροστρόβιλοι, Εκδόσεις Συμείων, Έκδοση 2^η, Αθήνα 2004
6. John S. Anagnostopoulos, Dimitris E. Papantonis, “Pumping station design for a pumped-storage wind-hydro power plant”, 2007
7. S. Papaefthymiou, E. Karamanou, S. Papathanassiou, M. Papadopoulos, N. Boulaxis “Operating policies for hybrid wind-hydro power stations in island grids”
8. El Hierro: 100% RES. An innovative project for islands’ energy self-sufficiency
9. Μαθιουλάκης Δ., Αναγνωστόπουλος Ι., Τουζόπουλος Δ., Βιομηχανική Ρευστομηχανική, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005
10. Βαρώνος Α., Διδακτορική Διατριβή: Μέθοδοι αριθμητικής προσομοίωσης και εφαρμογή στην καύση στερεών καυσίμων σε βιομηχανικούς ατμοπαραγωγούς, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών - Μαρτίος 1999.
11. Τσαγγάρης Σ., Μηχανική των Ρευστών, Αθήνα 2005
12. Μπεργελές Γ., Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Αθήνα 2006
13. FLUENT, <http://www.fluent.com>
14. Fluent, Gambit .Released notes ,Tutorials
15. Ζερβός Α., Κάραλης Γ, Σημειώσεις Αιολικής Ενέργειας, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009
16. Κάραλης Γ, Διδακτορική Διατριβή: Ανάπτυξη και ανάλυση συστημάτων ανεμοκινητήρων και αντληταμιευτήρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών - Μαρτίος 2008.
17. I. Omar and N. Dlakavu, Optimisation of the operation of a pumped storage plant,
18. RK Malik, Paras Paudel, 3d Flow Modeling of the First Trifurcation made in Nepal,

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο παρών παράρτημα παρουσιάζεται το αρχείο journal που χρησιμοποιήθηκε για την αυτόματη κατασκευή της γεωμετρίας στο Gambit. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τι παραμέτρους \$R1, \$R2, \$f, \$a1, \$a2 στη συνέχεια να αποθηκεύσει το αρχείο και να το τρέξει στο Gambit.

\$R1=0.5 //ορίζεται η διάμετρος dmin

\$R2=0.75 //ορίζεται η διάμετρος dmax

\$f=6.5 //ορίζεται η γωνία φ

\$a1=80 //ορίζεται η γωνία α1

\$a2=140 //ορίζεται η γωνία α2

\$a3=360-\$a1-\$a2 //υπολογίζεται η βοηθητική γωνία α3

\$h=(\$R2-\$R1)/tan(\$f) //υπολογίζεται το μήκος του κάθε κωνικού τμήματος της γεωμετρίας

volume create height \$h radius1 \$R2 radius3 \$R1 offset (\$h/2) 0 0 xaxis frustum //κατασκευάζεται το κωνικό τμήμα

volume cmove "volume.1" multiple 1 dangle \$a1 vector 0 0 1 origin 0 0 0

volume cmove "volume.1" multiple 1 dangle -\$a2 vector 0 0 1 origin 0 0 0
//κατασκευάζονται και τα άλλα δύο με την βοήθεια της περιστροφής

face create width 8 height 8 zxplane rectangle //κατασκευάζεται μια βοηθητική επιφάνεια

face cmove "face.10" multiple 1 dangle \$a1 vector 0 0 1 origin 0 0 0

face cmove "face.10" multiple 1 dangle -\$a2 vector 0 0 1 origin 0 0 0

face move "face.10" dangle (\$a1/2) vector 0 0 1 origin 0 0 0

face move "face.12" dangle (\$a2/2) vector 0 0 1 origin 0 0 0

face move "face.11" dangle (\$a3/2) vector 0 0 1 origin 0 0 0 //δημιουργούνται κάποιες επιφάνειες με βάση την παραπάνω οι οποίες θα «κόψουν» την γεωμετρία σε κάποια σημεία

volume split "volume.1" faces "face.12" "face.10" connected keptool

volume split "volume.2" faces "face.10" "face.11" connected keptool

volume split "volume.3" faces "face.12" "face.11" connected // κόβονται κάποια τμήματα της γεωμετρίας με την εντολή split

volume delete "volume.9" "volume.4" "volume.6" "volume.5" "volume.8" \
"volume.7" lowertopology

face delete "face.10" lowertopology //διαγράφονται κάποια κομμάτια

volume unite volumes "volume.1" "volume.2" "volume.3" //γίνεται ένωση των υπόλοιπων σε μια γεωμετρία

edge create straight "vertex.28" "vertex.27"

face create wireframe "edge.53" "edge.52" real

face create wireframe "edge.53" "edge.51" real

face create wireframe "edge.53" "edge.50" real //δημιουργούνται κάποιες επιφάνειες

volume split "volume.1" faces "face.26" "face.28" "face.27" connected // η γεωμετρία κόβεται με τις παραπάνω επιφάνειες δημιουργώντας τρεις όμοιες

vertex create coordinates 0 0 0

vertex create coordinates \$d 0 0

edge create straight "vertex.29" "vertex.30"

edge cmove "edge.56" multiple 1 dangle \$a1 vector 0 0 1 origin 0 0 0

edge cmove "edge.56" multiple 1 dangle -\$a2 vector 0 0 1 origin 0 0 0

volume create translate "face.9" vector cos(\$a2) -sin(\$a2) 0

volume create translate "face.6" vector cos(\$a1) sin(\$a1) 0

volume create translate "face.3" vector 1 0 0 //δημιουργούνται τα κυλινδρικά τμήματα της γεωμετρίας

physics create "out" btype "INTERIOR" face "face.3"

physics create "in1" btype "VELOCITY_INLET" face "face.29"

physics create "in2" btype "VELOCITY_INLET" face "face.32"

physics create "wall" btype "WALL" face "face.25" "face.17" "face.22"

physics modify "wall" btype face "face.25" "face.17" "face.22" "face.31" \
"face.30" "face.34"


```
physics create "int1" btype "INTERIOR" face "face.9"
```

```
physics create "int2" btype "INTERIOR" face "face.6"
```

```
physics create "interior" btype "INTERIOR" face "face.28" "face.26" "face.27"
```

```
physics create "outlet" btype "OUTFLOW" face "face.33" //ορίζονται οι  
επιφάνειες
```

```
blayer create first 0.01 growth 1.15 total 0.203037 rows 10 transition 1 \
```

```
trows 0 uniform
```

```
blayer attach "b_layer.1" face "face.26" "face.27" "face.28" edge "edge.52" \
```

```
"edge.51" "edge.50" add //δημιουργείται το οριακό στρώμα
```

```
volume mesh "volume.7" cooper source "face.28" "face.27" "face.3" size 0.1
```

```
volume mesh "volume.6" cooper source "face.28" "face.26" "face.6" size 0.1
```

```
volume mesh "volume.1" cooper source "face.27" "face.26" "face.9" size 0.1
```

```
volume mesh "volume.9" "volume.8" "volume.10" cooper size 0.1  
//δημιουργείται το πλέγμα.
```