



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Αριθμητική μοντελοποίηση και ανάλυση της ροής σε
ρυθμιστική βαλβίδα τύπου έδρας (globe) με χρήση του
λογισμικού OpenFOAM

Numerical modeling and analysis of the flow in a globe
valve using the OpenFOAM software

Διπλωματική Εργασία

Ελευθέριος Χουλιάρης

Επιβλέπων: Ιωάννης Αναγνωστόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018

Αριθμητική μοντελοποίηση και ανάλυση της ροής σε ρυθμιστική βαλβίδα τύπου έδρας (globe) με χρήση του λογισμικού OpenFOAM

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αριθμητική διερεύνηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς μιας τυπικής δισκοβαλβίδας (globe valve). Η βαλβίδα αυτή χρησιμοποιείται για ρύθμιση της παροχής και γι' αυτό μελετήθηκε σε διάφορες θέσεις, από πλήρως ανοικτή έως σχεδόν κλειστή, προκειμένου να παραχθούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες της παροχής και των υδραυλικών απωλειών συναρτήσει του ποσοστού ανοίγματος της. Η ανάλυση έγινε αρχικά αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα ως δισδιάστατο και ύστερα επιλύθηκε το πλήρες, τρισδιάστατο πεδίο ροής. Επίσης, η βαλβίδα στην τρισδιάστατη ανάλυση μελετήθηκε και από πλευράς ενδεχόμενης πρόκλησης σπηλαιώσης.

Αρχικά, επιλέχθηκε μια δισκοβαλβίδα στο εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών ΕΜΠ, η οποία ανοίχθηκε και μετρήθηκαν με ακρίβεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι εσωτερικές διαστάσεις της. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε η γεωμετρία της βαλβίδας αυτής στο λογισμικό Solidworks και διατηρήθηκε μόνο το εσωτερικό τμήμα της, που αποτελεί τον υπολογιστικό χώρο προσομοίωσης της ροής. Αφού έγινε ακριβής αποτύπωση της γεωμετρίας, περικόπηκαν τα πιο περίπλοκα σημεία, τα οποία διαπιστώθηκε ότι είχαν μηδαμινή επίδραση στα αριθμητικά αποτελέσματα, ώστε να περιοριστεί το υπολογιστικό κόστος. Στην συνέχεια κατασκευάστηκαν τα πλέγματα, δισδιάστατα και μετά τρισδιάστατα, για όλες τις θέσεις λειτουργίας της βαλβίδας. Η κατασκευή έγινε στο λογισμικό ANSYS. Ακολούθησε μελέτη ανεξαρτησίας των αριθμητικών αποτελεσμάτων και έγινε προσπάθεια να κατασκευαστούν όσο το δυνατόν ελαφρύτερα πλέγματα, πυκνώνοντας τις σημαντικές περιοχές του χωρίου και αραιώνοντας άλλες, όπου δεν εμφανίζονται σημαντικές κλίσεις των μεγεθών της ροής. Τέλος, η προσομοίωση της ροής έγινε με την χρήση του ελεύθερου λογισμικού OpenFOAM σε περιβάλλον Linux, αλλά και με το εμπορικό λογισμικό ANSYS, για λόγους σύγκρισης. Επιλέχθηκαν οι αλγόριθμοι επίλυσης των ρευστομηχανικών μεγεθών πίεσης και ταχυτήτων, καθώς και τα σχήματα διακριτοποίησής τους, ενώ για τη μοντελοποίηση της τύρβης επιλέχθηκε το μοντέλο τύρβης k-ε.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στις διάφορες θέσεις της βαλβίδας κατασκευάστηκαν τελικά οι χαρακτηριστικές καμπύλες για το δισδιάστατο και το τρισδιάστατο πρόβλημα. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών έδειξε ότι η δισδιάστατη αντιμετώπιση το προβλήματος αδυνατεί να περιγράψει την πραγματική ροή μέσα σε μια βαλβίδα και να παράξει σωστά τη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της βαλβίδας, για μια σειρά λόγους που θα αναπτυχθούν στην παρούσα εργασία. Αντίθετα, τα αποτελέσματα της τριδιάστατης επίλυσης συμφωνούν απόλυτα μεταξύ τους και ικανοποιητικά με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας, αναπαράγοντας την αναμενόμενη μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης για γεωμετρία βαλβίδας γρήγορου ανοίγματος, όπως είναι αυτή που εξετάζεται εδώ. Τέλος από την πλευρά της σπηλαιώσης βρέθηκε ότι σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας (παροχή και πίεση νερού) η ροή στη βαλβίδα δεν εμφανίζει σπηλαιώση. Αυξάνοντας όμως την πίεση λειτουργίας και τις ταχύτητες της ροής η βαλβίδα μπορεί να σπηλαιώνει σε πολύ μικρά ανοίγματα.

Numerical modeling and analysis of the flow in a globe valve using the OpenFOAM software

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to investigate the hydrodynamic behavior of a typical globe valve. This valve is used to regulate the flow rate and has therefore been studied at various positions, from fully open to nearly closed, in order to produce characteristic flow curves and hydraulic losses as a function of its opening rate. The analysis was initially treated by addressing the problem as two-dimensional and then solved the full, three-dimensional flux field. Also, the valve in the three-dimensional analysis was also studied in terms of a possible cavitation challenge.

The valve that was chosen, a globe valve from the Laboratory of Hydraulic Turbomachinery, N.T.U.A., which was opened and precisely measured its geometrical characteristics and internal dimensions. Then, the geometry of the valve was constructed in Soliworks software and only its internal part was maintained, which comprises the fluid domain of the simulation. After an accurate mapping of the geometry, the most complex points, which were found to have had a slight effect on the numerical results, were cut. That was done in order to limit the computational cost. After that, the meshes, for all positions of the valve, were constructed. First two-dimensional and then three-dimensional ones. The construction was done in ANSYS software. The next step was the study of the independence of the numerical results. After that, an attempt was made to construct the lightest meshes, densifying the important areas of the domain and diluting others, where no significant gradients of flow quantities appear. Finally, the simulation of the flow was conducted by using OpenFOAM free software, in Linux environment, Commercial ANSYS software, were also used, for comparison purposes. For the set up of the case, they were also chosen, the algorithms for solving the hydrodynamic quantities, the discretization schemes. In order to model the turbulence, the model k- ϵ were chosen.

From the results of the simulations at the different positions of the valve, the characteristic curves for the two-dimensional and three-dimensional problem were finally constructed. The analysis of these results has shown that the two-dimensional problem fails to describe the actual flow within a valve and produce the characteristic flow curve, correctly, for a number of reasons to be developed in this work. On the other hand, the results of the three-dimensional solution are perfectly consistent and satisfactory with those of the literature, reproducing the expected shape of the characteristic curve for a quick opening valve geometry, such as that discussed here. Finally, in terms of cavitation, it was found that under typical operating conditions (water supply and pressure) the flow in the valve does not show cavitation. However, by increasing operating pressure and flow rates, the valve can cavitate in very small openings.

Πρόλογος

Οι βαλβίδες αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που συναντώνται σε μια σωλήνωση και οποιαδήποτε άλλη υδροδυναμική εγκατάσταση. Η ποικιλία των εφαρμογών εκτείνεται από απλές βάνες της καθημερινότητας, όπως στα υδραυλικά των σπιτιών, έως σύνθετα βιομηχανικά συστήματα σε σωληνώσεις μεταφοράς φυσικού αερίου, στην χημική βιομηχανία, την ηλεκτροπαραγωγή για την απομάστευση ατμού κα. Μέχρι τα μέσα του προηγούμενου αιώνα ο σχεδιασμός και η κατασκευή βαλβίδων ήταν περισσότερο τεχνική παρά επιστημονική διαδικασία, και αυτό που ενδιέφερε κυρίως ήταν η λειτουργία και όχι οι επιδόσεις. Ωστόσο, οι απαιτήσεις της βιομηχανίας για βαλβίδες υψηλής ακρίβειας αλλά και αντοχής, που θα ανταποκρίνονται στα νέα δεδομένα, οδήγησε τους κατασκευαστές στην ανάπτυξη επιστημονικής έρευνας με χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής και όχι μόνο, με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών των βαλβίδων.

Οι δισκοβαλβίδες (globe valves) είναι βαλβίδες που χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν την παροχή σε ένα σύστημα. Το βασικό πρόβλημα που έχουν είναι η περίπλοκη εσωτερική γεωμετρία τους. Λόγω αυτής της γεωμετρίας υπάρχουν μεγάλες υδραυλικές απώλειες σε όλες τις θέσεις λειτουργίας. Γι' αυτό κρίνεται αναγκαία η μελέτη της ροής και η βελτίωση του υδροδυναμικού σχεδιασμού των βαλβίδων αυτών.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αριθμητική προσομοίωση και ανάλυση της ροής σε μια τυπική δισκοβαλβίδα, με σκοπό την μελέτη της λειτουργικής συμπεριφοράς και χάραξη των χαρακτηριστικών καμπυλών της, καθώς και διερεύνηση ενδεχόμενης εμφάνισης σπηλαίωσης στο εσωτερικό της.

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Αναγνωστόπουλο Ιωάννη για την δυνατότητα που μου έδωσε στην ανάθεση αυτού του θέματος. Ευχαριστώ τον υποψήφιο Διδάκτορα Γεώργιο Μουσιμούλη για την άψογη συνεργασία που είχαμε και την καθοδήγησή του καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Επίσης ευχαριστώ και τον υποψήφιο Διδάκτορα Κωνσταντίνο Αρβανίτη που χωρίς αυτόν η εργασία θα ήταν μάλλον αδύνατη. Τέλος ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αγάπη και την υποστήριξή της όλα αυτά τα χρόνια.

Λευτέρης Χουλιαράς

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract	2
Πρόλογος.....	4
Περιεχόμενα	6
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	10
1.1 Υδραυλικές εγκαταστάσεις	10
1.1.1 Σωληνώσεις.....	11
1.1.2 Βαλβίδες.....	12
1.1.3 Στοιχεία αλλαγής κατεύθυνσης.....	13
1.1.4 Στοιχεία διακλάδωσης της ροής.....	13
1.1.5 Στοιχεία αλλαγής διατομής.....	14
1.1.6 Άλλα στοιχεία σωληνώσεων	14
1.2 Όργανα διακοπής και ρύθμισης.....	15
1.2.1 Σφαιρική βάνα (Ball valve)	15
1.2.2 Συρταρωτή βάνα (gate valve).....	16
1.2.3 Δισκοβαλβίδα (glove valve):.....	17
1.2.4 Βαλβίδα πεταλούδα (butterfly valve).....	19
1.2.5 Βαλβίδα αντεπιστροφής (check valve).....	21
1.2.6 Ειδικές βαλβίδες.....	22
1.3 Λειτουργικές και σχεδιαστικές παράμετροι	24
1.3.1 Σπηλαιώση.....	24
1.3.2 Ροπή χειρισμού.....	26
1.3.3 Υλικά κατασκευής.....	27
1.4 Μεθοδολογία και διάρθρωση της παρούσας εργασίας.....	28
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	29
2.1 Γενικά	29
2.2 Δημοσιεύσεις ερευνητών.....	29
Κεφάλαιο 3 Στοιχεία θεωρίας	34
3.1 Εξισώσεις διατήρησης.....	34
3.1.1 Η εξίσωση της συνέχειας.....	34
3.1.2 Η εξίσωση διατήρησης της ορμής σε τρεις διαστάσεις.....	34
3.2 Διακριτοποίηση εξισώσεων διατήρησης.....	35
3.2.1 Κατασκευή πλέγματος.....	35
3.2.2 Αριθμητικά σχήματα	36

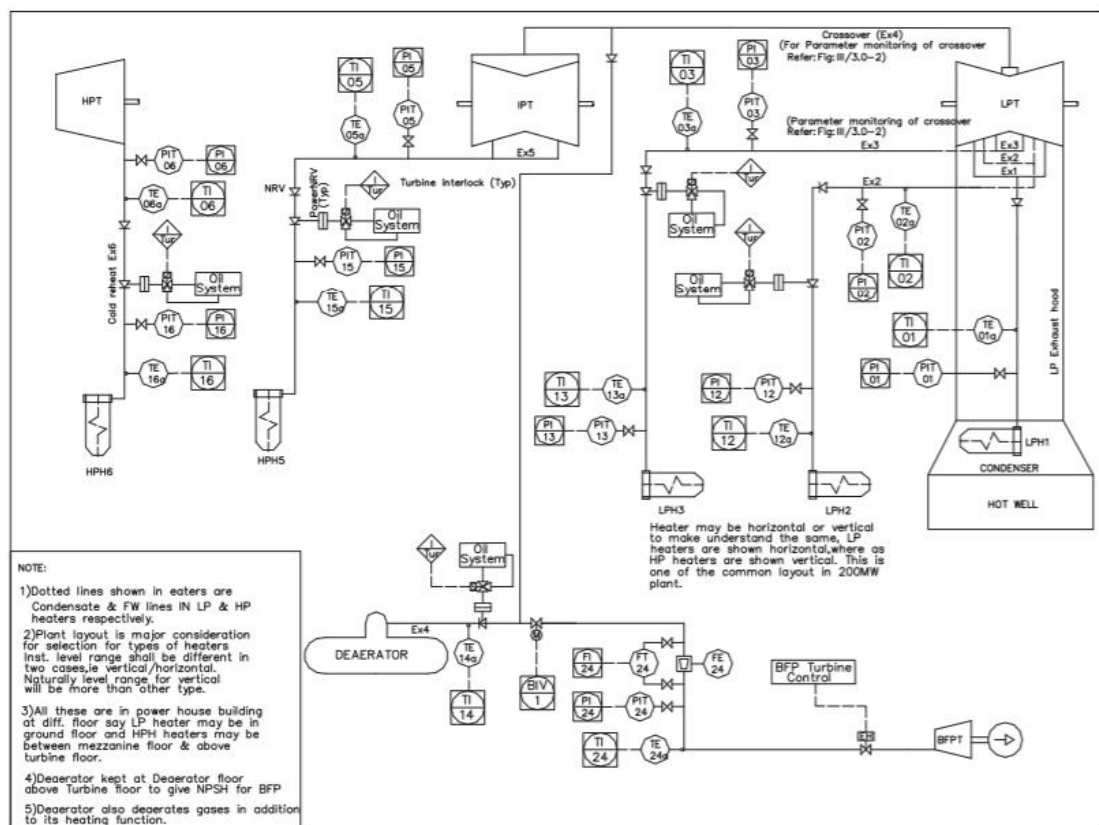
3.3	Η τύρβη και η μοντελοποίηση της	38
3.3.1	Παράγοντες που οφείλεται η τύρβη	38
3.3.2	Γενική κατηγοριοποίηση μοντέλων.....	39
3.3.3	Το μοντέλο $k - \varepsilon$	40
Κεφάλαιο 4 Παρουσίαση γεωμετρίας		42
4.1	Η αρχική γεωμετρία	42
4.2	Το υπολογιστικό χωρίο.....	44
4.3	2Δ Πλέγματα	47
4.3.1	Πλέγματα στην πλήρως ανοικτή θέση των 20 mm.	48
4.3.2	Πλέγμα στην θέση των 5 mm.....	52
4.4	Τρισδιάστατα Πλέγματα.....	53
4.4.1	Πλέγματα στην πλήρως ανοικτή θέση των 20 mm.	54
4.4.2	Πλέγματα στις υπόλοιπες θέσεις στην μερικώς ανοικτή θέση των 15 mm.	59
Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα Δισδιάστατης Προσομοίωσης.....		62
5.1	Γενικά	62
5.2	Αποτελέσματα μελέτης ανεξαρτησίας αποτελεσμάτων	62
5.2.1	Αποτελέσματα πεδίου πιέσεων.....	63
5.2.2	Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων	64
5.3	Μελέτη δισδιάστατου προβλήματος	65
5.3.1	Ισοϋψείς καμπύλες της πίεσης.....	65
5.3.2	Ισοϋψείς καμπύλες της ταχύτητας.....	66
5.3.3	Χαρακτηριστικές παροχής και αντίστασης	68
Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα Τρισδιάστατης Προσομοίωσης.....		71
6.1	Αποτελέσματα μελέτης ανεξαρτησίας αποτελεσμάτων	71
6.1.1	Αποτελέσματα πεδίου πιέσεων.....	71
6.1.2	Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων	72
6.2	Μελέτη τρισδιάστατου προβλήματος.....	74
6.2.1	Ισοϋψείς καμπύλες της πίεσης.....	74
6.2.2	Ισοϋψείς καμπύλες ταχύτητας.....	76
6.2.3	Χαρακτηριστικές παροχής και αντίστασης	77
6.3	Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων	80
6.3.1	Επικύρωση αποτελεσμάτων	80
6.3.2	Σύγκριση με αποτελέσματα εμπορικού λογισμικού.....	80
6.4	Ανάλυση του πεδίου ροής στη βαλβίδα	86
6.4.1	Συστροφή.....	86
6.4.2	Σύγκριση 2Δ-3Δ	90

Κεφάλαιο 6 Σπηλαίωση.....	91
6.1 Γενικά.....	91
6.2 Οριακές συνθήκες	92
6.3 Αποτελέσματα σπηλαίωσης	92
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα και Προτάσεις	95
Παράρτημα.....	98
Βιβλιογραφία.....	99

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Υδραυλικές εγκαταστάσεις

Με τον όρο υδραυλική εγκατάσταση ονομάζουμε οποιαδήποτε διάταξη η οποία διακινεί ρευστά κυρίως υγρά και τα μεταφέρει από ένα σημείο σε ένα άλλο. Η πιο συνηθισμένη διακίνηση είναι αυτή μεταξύ δεξαμενών. Κατά την διάρκεια αυτής της μετακίνησης είναι δυνατόν να υπάρξουν διάφορες ενδιάμεσες διαδικασίες όπως καθαρισμός του διακινούμενου μέσου από τυχόν ακαθαρσίες, ο διαχωρισμός του στα επιμέρους στοιχεία από τα οποία αποτελείται ή η μεταβολή των θερμοδυναμικών του μεγεθών. Υπάρχουν διάφορων ειδών υδραυλικές εγκαταστάσεις. Δίκτυο ύδρευσης, άρδευσης σε κάποιον οικισμό, αποχετευτικό σύστημα, υδραυλική εγκατάσταση κεντρικής θέρμανσης σε οικήματα ή βιομηχανικούς χώρους, στην χημική βιομηχανία η μεταφορά και η επεξεργασία του προϊόντος μέσα από ένα σύστημα σωληνώσεων, στην βιομηχανία πετρελαίου και εξόρυξης καθώς και σε πειραματικές διατάξεις. Όλο ή τμήμα της εγκατάστασης παριστάται γραφικά και σχεδιαστικά με διάφορα σύμβολα, τα επονομαζόμενα P&ID.



Εικόνα 1. Τυπικό P&ID εξαγωγής ατμού [1]

Οι υδραυλικές εγκαταστάσεις αποτελούνται από επιμέρους στοιχεία και εξαρτήματα. Σωλήνες, φλάντζες, βαλβίδες, δοχεία πίεσης, μετρητικά όργανα, με το κάθε ένα να επιτελεί και μια διαφορετική λειτουργία. Σχεδόν όλα τα εξαρτήματα, εκτός από εξειδικευμένες περιπτώσεις, έχουν τυποποιημένες διαστάσεις και υλικά κατασκευής για ευκολία στους υπολογισμούς την διαστασιολόγηση και την συναρμολόγησή τους. Η τυποποίηση πραγματοποιείται από διάφορους διεθνείς οργανισμούς τυποποίησης, π.χ. ISO, ASME, ANSI,

API BS κ.α. οι οποίοι έχουν την αρμοδιότητα να προτείνουν σχεδιαστικές οδηγίες στους κατασκευαστές ανάλογα με την εφαρμογή και να εγγυώνται την αξιοπιστία της κατασκευής. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα κυριότερα στοιχεία των υδροδυναμικών εγκαταστάσεων, η χρήση τους, και οι παράμετροι τυποποίησης τους.

1.1.1 Σωληνώσεις

Το βασικότερο στοιχείο σε μια υδραυλική εγκατάσταση είναι οι σωληνώσεις. Οι σωλήνες είναι κλειστοί αγωγοί που είναι συνήθως κυκλικής διατομής για λόγους μείωσης του κόστους, λιγότερων υδραυλικών απωλειών καθώς και μεγαλύτερης αντοχής αφού δεν υπάρχουν επικίνδυνες διατομές. Η διάμετρος είναι μεταβλητού μεγέθους και τυποποιημένων διαστάσεων. Το πιο βασικό μέγεθος είναι η ονομαστική διάμετρος (NPS) σε ίντσες. Ο τύπος της ροής του ρευστού που αναπτύσσεται μέσα στον σωλήνα καθορίζεται από τον αριθμό Reynolds.

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (1.1)$$

Όπου u [m/s] ταχύτητα της ροής, ν [m^2/s] το κινηματικό ιξώδες και d [m] η υδραυλική διάμετρος του αγωγού.

$$d = \frac{4A}{S} \quad (1.2)$$

Με A [m^2] και S [m] το εμβαδόν και η περίμετρος του αγωγού αντίστοιχα.

Από τη θεωρία της μηχανικής των ρευστών γνωρίζουμε ότι για $Re < 2300$ περίπου, η ροή μένει στρωτή ενώ για $Re > 2300$ η ροή γίνεται τυρβώδης. Σε πειραματικές διατάξεις η ροή μπορεί να παραμείνει στρωτή και για $Re \approx 40000$. Σε πρακτικές εφαρμογές η ροή είναι σχεδόν πάντα τυρβώδης. Οι μηχανικές απώλειες λόγω συνεκτικότητας και τριβών εκφράζονται από την αντίστοιχη πτώση πίεσης:

$$\delta p = \lambda \frac{L \rho}{d} u^2 \quad \text{ή} \quad \delta h = \lambda \frac{L}{d} \frac{u^2}{2g} \quad (1.3)$$

Για στρωτή ροή το λ λαμβάνεται ίσο με

$$\lambda = \frac{c}{Re} \quad (1.4)$$

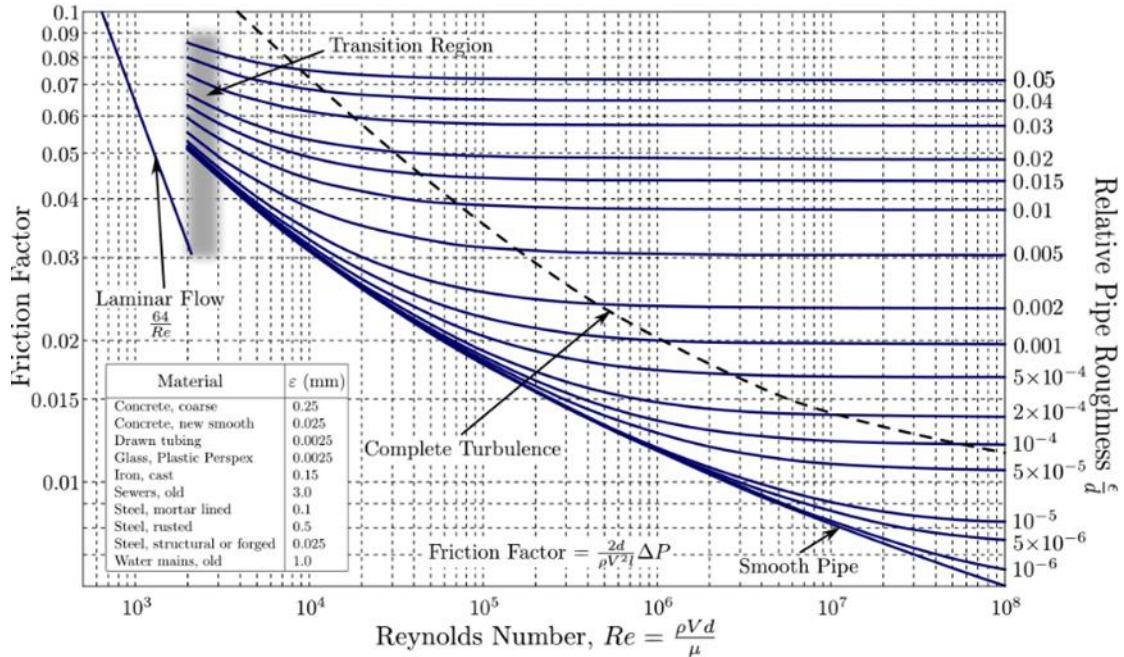
όπου ο συντελεστής c εξαρτάται από το προφίλ του αγωγού. Για τυρβώδεις ροές η δυσκολία ανάγεται στον υπολογισμό του λ . Για λείους αγωγούς και για Re έως 10^5 ο συντελεστής τριβής λ προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τον εμπειρικό νόμο του Blasius:

$$\lambda = 0.3164 Re^{-1/4} \quad (1.5)$$

Σε πιο πρακτικές εφαρμογές η εσωτερική επιφάνεια των αγωγών είναι τραχεία και εμφανίζεται πολύ μεγαλύτερη αντίσταση στην ροή η οποία εξαρτάται και από την τραχύτητα. Έχουν προταθεί διάφορες εκφράσεις για την εκτίμηση του λ στην περιοχή της τυρβώδους ροής. Η ακριβέστερη είναι η σχέση των Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{\epsilon/D}{3.17} \right) \quad 1.6$$

όπου ε [mm] η απόλυτη τραχύτητα της εσωτερικής επιφάνειας του αγωγού δοσμένη από τον κατασκευαστή. Το μειονέκτημα είναι ότι η εξίσωση αυτή δεν έχει αναλυτική λύση και πρέπει να λυθεί αριθμητικά. Εναλλακτικά ο συντελεστής τριβής μπορεί να ληφθεί και από το διάγραμμα Moody (Εικόνα 2) όπου είναι στην πραγματικότητα η γραφική απεικόνιση της σχέσης λυμένη για διάφορες τιμές των παραμέτρων.



Εικόνα 2. Διάγραμμα Moody

Εναλλακτικά η πτώση πίεσης μπορεί να υπολογιστεί είτε πειραματικά είτε υπολογιστικά με προσομοίωση της ροής (CFD) με χρήση λογισμικών (OpenFOAM, ANSYS). Για κάθε μια ονομαστική διάμετρο κυλινδρικού σωλήνα υπάρχουν συγκεκριμένα πάχη τοιχωμάτων. Αυτά τα δυο μεγέθη καθορίζουν τον σωλήνα (schedule). Για παράδειγμα ένας σωλήνας με NPS 4" και με πάχος τοιχωμάτων 8,56 mm είναι ο σωλήνας 80XS. Τα υλικά ποικίλουν και μπορεί να είναι από ανοξείδωτους χάλυβες και χαλκό, μέχρι συνθετικά πλαστικά και PVC ανάλογα με το είδος της εφαρμογής. Επίσης τυποποιούνται και άλλες κατασκευαστικές παράμετροι όπως η εσωτερική τραχύτητα καθώς επίσης εξετάζεται αν διαθέτει προστασία σε όξινα περιβάλλοντα (κατά το πρότυπο NACE) ή αντοχή στο αλάτι σε παράκτιες (off-shore) κατασκευές.

1.1.2 Βαλβίδες

Οι βαλβίδες ή βάνες αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία μια σωλήνωσης γιατί με την χρήση τους μπορούμε να ελέγξουμε την ροή. Η λειτουργία τους είναι είτε τύπου διακόπτη, ON-OFF οπότε έχουν δυο καταστάσεις λειτουργίας, πλήρως ανοικτή ή πλήρως κλειστή, είτε ρυθμίζουν την διερχόμενη παροχή και έχουν διάφορες θέσεις λειτουργίας. Οι βαλβίδες ρύθμισης σχεδιάζονται με μεγάλο εύρος λειτουργίας και με γνώμονα την βελτιστοποίηση της ροής. Εξετάζεται η όσο το δυνατόν ομοιόμορφη ροή, η ελαχιστοποίηση των απωλειών, ο περιορισμός ή εξάλειψη της σπηλαιώσης και η μείωση του θορύβου. Στις ON-OFF βαλβίδες ενδιαφέρουν οι απώλειες στην πλήρως ανοικτή θέση ενώ στις βαλβίδες ρύθμισης παροχής είναι χρήσιμη η καμπύλη λειτουργίας που εκφράζει τις απώλειες ζ ως συνάρτηση του ανοίγματος. Οι εντοπισμένες απώλειες στις βαλβίδες εκφράζονται με την σχέση:

$$\delta h = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (1.7)$$

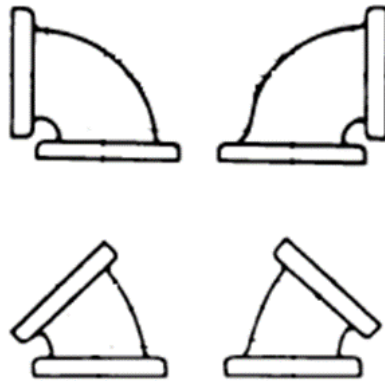
Και σε αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής ζ υπολογίζεται είτε εμπειρικά, είτε πειραματικά είτε με αριθμητική προσομοίωση. Για τον εμπειρικό τρόπο χρειαζόμαστε τον συντελεστή παροχής C_V και στην περίπτωση των ρυθμιζόμενων βαλβίδων το διάγραμμα μεταβολής του C_V συναρτήσει του ανοίγματος. Τα στοιχεία αυτά παρέχονται από τον κατασκευαστή. Για δεδομένο C_V υπολογίζουμε το ζ από τον τύπο:

$$C_V = \frac{U}{\sqrt{2g \cdot \delta h}} = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad (1.8)$$

Όπου U η μέση ταχύτητα του ρευστού. Οι βαλβίδες έρχονται σε μεγάλη ποικιλία τύπων και διαστάσεων ανάλογα με την εφαρμογή και είναι και αυτές ένα στοιχείο το οποίο έχει τυποποιημένες διαστάσεις. Τυποποιείται η διάμετρος της βαλβίδας από τις μικρές διαμέτρους μέχρι και τις μεγάλες έως 80'', τα πάχη των τοιχωμάτων και η αντοχή στις πιέσεις λειτουργίας. Σε ειδικές περιπτώσεις βέβαια, σε μεγάλα έργα η κατασκευή γίνεται κατά παραγγελία. Σημαντική παράμετρος είναι η επιλογή των υλικών και η μέθοδος της κατεργασίας τα οποία εξασφαλίζουν την αντοχή και την διάρκεια στον χρόνο. Επίσης οι βαλβίδες περνάνε από μια σειρά ελέγχων ποιότητας προκειμένου να κριθούν κατάλληλες.

1.1.3 Στοιχεία αλλαγής κατεύθυνσης

Τα στοιχεία αυτά είναι καμπυλωμένοι σωλήνες που εκτρέπουν τη ροή σε γωνίες 15°, 30°, 45°, 60°, 90° (Εικόνα 3). Η ροή στα στοιχεία αυτά χάνει την αξονική της συμμετρία και οι γραμμές ροής καμπυλώνονται με αποτέλεσμα να προκαλούνται πρόσθετες εντοπισμένες ενεργειακές απώλειες.



Εικόνα 3. Στοιχεία αλλαγής κατεύθυνσης

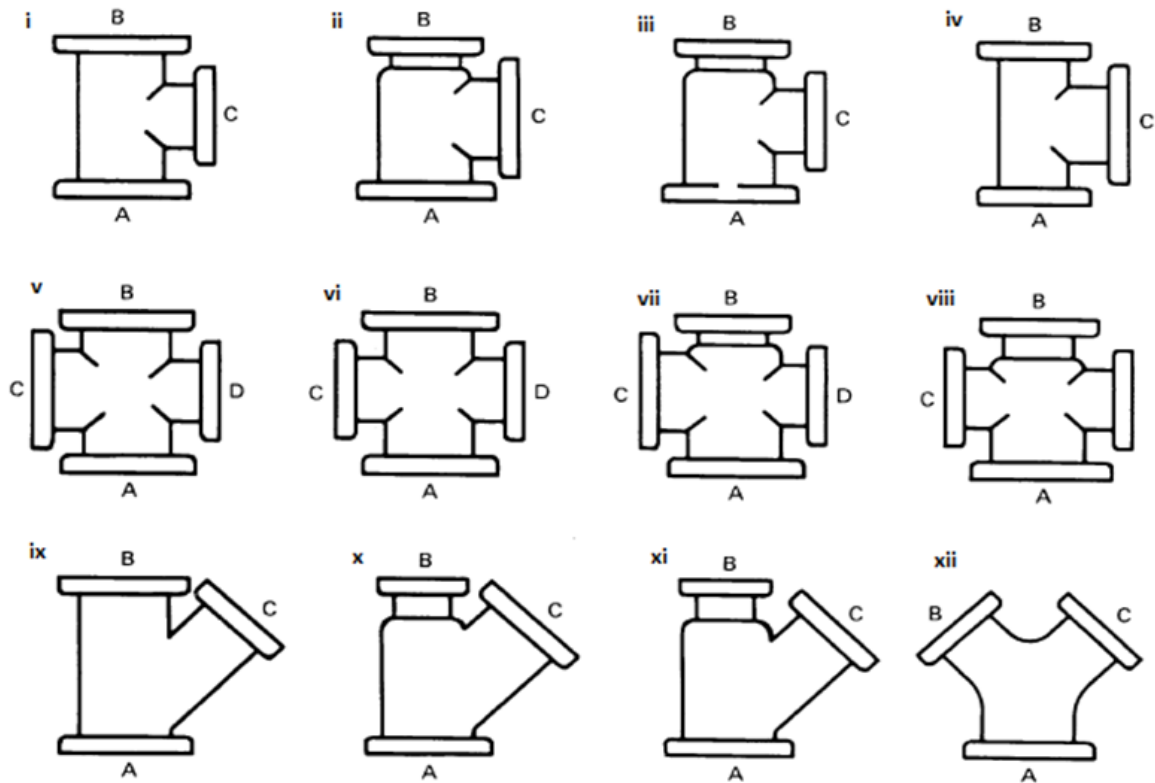
Ο συντελεστής απωλειών ζ εξαρτάται από τη γωνία του στοιχείου, την καμπυλότητα R και την τραχύτητα των εσωτερικών τοιχωμάτων.

1.1.4 Στοιχεία διακλάδωσης της ροής

Τα στοιχεία διακλάδωσης της ροής χρησιμοποιούνται για την συμβολή δυο ή περισσότερων ροών ή τον διαχωρισμό μιας κύριας ροής. Υπάρχουν διακλαδώσεις τύπου "ταφ" όπου οι γωνίες είναι κάθετες, τύπου "Υ" όπου το δευτερεύον ρεύμα έρχεται ή φεύγει υπό γωνία, συνήθως 45° ή τύπου "σταυρός".

Χαρακτηριστικό μέγεθος και εδώ είναι ο συντελεστής απωλειών πίεσης ο οποίος συσχετίζει την κύρια ροή με κάθε δευτερεύουσα με την σχέση:

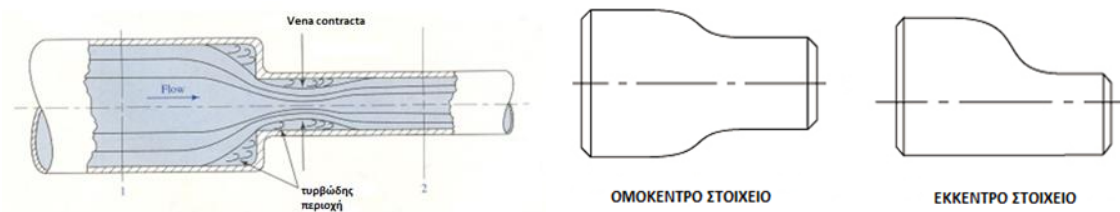
$$\zeta_{ij} = \frac{p_{o,i} - p_{o,j}}{\rho u_m^2 / 2} \quad (1.9)$$



Εικόνα 4. Τυπικά στοιχεία διακλάδωσης [5]

1.1.5 Στοιχεία αλλαγής διατομής

Τα στοιχεία αλλαγής διατομής μπορεί να είναι στοιχεία συστολής ή στοιχεία διαστολής. Η αλλαγή της διατομής συνήθως γίνεται προοδευτικά από την μια διάμετρο στην άλλη και μπορεί να είναι αξονοσυμμετρικό ή έκκεντρο. Σπάνια η μεταβολή γίνεται απότομα λόγω της δραματικής αύξησης των εντοπισμένων απωλειών.



Εικόνα 5. Στοιχεία συστολής [6]

1.1.6 Άλλα στοιχεία σωληνώσεων

Εκτός από τα παραπάνω σε μια εγκατάσταση είναι σίγουρο ότι θα υπάρχουν μετρητικά όργανα, παροχόμετρα, ροόμετρα, πιεσόμετρα κ.α. Τα πιεσόμετρα τοποθετούνται κάθετα στην σωλήνα και μεταξύ αυτών των δυο παρεμβάλλονται βαλβίδες συνήθως σφαιρικές έτσι ώστε να

κλείνουν όταν αφαιρεθεί το όργανο για αντικατάσταση ή συντήρηση. Τα παροχόμετρα, τα οποία είναι διαφόρων τύπων, ηλεκτρομαγνητικά, ηχητικά, παροχόμετρα μάζας, τοποθετούνται κατά μήκος της σωληνογραμμής. Και αυτά τα στοιχεία παρουσιάζουν εντοπισμένες απώλειες οι οποίες δίνονται από εμπειρικούς τύπους και διαγράμματα. Σε μια εγκατάσταση είναι δυνατόν να βρίσκονται ακόμα δοχεία πίεσης, κλειστές δεξαμενές, συστήματα πυρόσβεσης (Deluge skid) και πινάκες με σωλήνες πολλαπλής εισαγωγής (manifold).

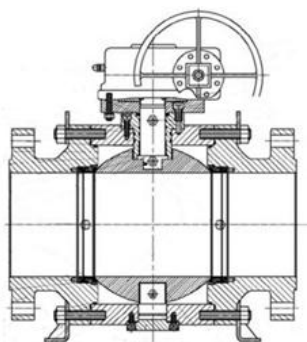
1.2 Όργανα διακοπής και ρύθμισης

Όπως αναφέρθηκε, σε μια υδραυλική εγκατάσταση απαραίτητη είναι η χρήση των στοιχείων ρύθμισης, δηλαδή των βαλβίδων. Επειδή υπάρχει μεγάλη ποικιλία αναγκών αλλά και μεθόδων με τις οποίες μπορούμε να ελέγξουμε την ροή, έχουν αναπτυχθεί πολλά είδη βαλβίδων με το κάθε ένα να έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ανάλογα με τον τρόπο χρήσης.

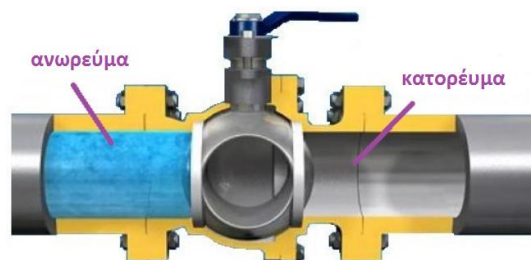
Σε μια εγκατάσταση μπορεί να υπάρχουν χειροκίνητες ή αυτόματες βαλβίδες. Οι αυτόματες είναι οι χειροκίνητες με ενσωματωμένο αυτόματο μηχανισμό ανοίγματος - κλεισίματος και χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου το άνοιγμα ή το κλείσιμο πρέπει να γίνουν ακαριαία, όπως στην περίπτωση συστήματος πυρόσβεσης, ή εκεί όπου δεν μπορεί να μπει ώστε να τις χρησιμοποιήσει ο άνθρωπος. Ο μηχανισμός ενεργοποίησης είναι είτε υδραυλικός, είτε πνευματικός, είτε ηλεκτρομαγνητικός.

1.2.1 Σφαιρική βάνα (Ball valve)

Η βαλβίδα αυτή χρησιμοποιεί μια διάτρητη και διαμπερή μεταλλική μπάλα. Όταν η οπή της μπάλας είναι παράλληλη με την ροή τότε η βαλβίδα είναι ανοικτή και όταν η μπάλα περιστραφεί κατά 90° μέσω μοχλού τότε η βαλβίδα είναι κλειστή (Εικόνες 10, 11).



Εικόνα 6. Σχέδιο σφαιρικής βαλβίδας [8]



Εικόνα 7. Μοντέλο σφαιρικής βαλβίδας [9]

Τα πλεονεκτήματα αυτής της βαλβίδας είναι η υψηλή αντοχή και ότι έχει την δυνατότητα να δουλέψει ομαλά μετά από πολλούς κύκλους λειτουργίας. Επιπλέον με το κλείσιμο επιφέρει απόλυτη στεγάνωση και μηδενικές διαρροές κάνοντας την κατάλληλη σχεδόν σε όλες τις βιομηχανικές εφαρμογές όπου χρειάζεται ON-OFF λειτουργία. Οι βαλβίδες αυτές σπάνια χρησιμοποιούνται για ρύθμιση της παροχής. Συνεπώς η μπάλα βρίσκεται είτε στην πλήρως ανοικτή είτε στην πλήρως κλειστή θέση. Στην πλήρως ανοικτή θέση οι ενεργειακές απώλειες είναι μικρές διότι η ροή παρεμποδίζεται ελάχιστα.

Ένα μεγάλο μειονέκτημα της βαλβίδας είναι ότι όταν κλείνει παγιδεύει νερό στο εσωτερικό της μπάλας με αποτέλεσμα αν βρίσκεται σε κρύο περιβάλλον το υγρό να παγώσει, να

διασταλεί και τελικά να ραγίσουν τα τοιχώματα. Αυτό το πρόβλημα μπορούμε να το αντιμετωπίσουμε είτε με κατάλληλη μόνωση είτε με μια επιπλέον μικρή βαλβίδα μέσω της οποίας στραγγίζουμε το παγιδευμένο νερό. Υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά είδη σφαιρικών βαλβίδων: ενός κομματιού, δυο κομματιών, τριών κομματιών και συγκολλητές ανάλογα από το πόσα κομμάτια αποτελείται το σώμα της βαλβίδας και πως συναρμολογούνται μεταξύ τους. Λειτουργικά δεν υπάρχει καμιά διαφορά.

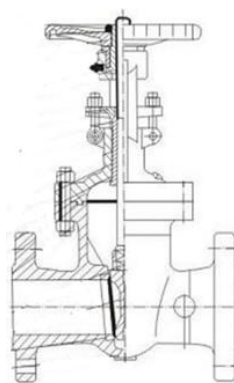
Επιπλέον χωρίζονται σε δυο ακόμα κατηγορίες όσον αφορά το διαμέτρημα της μπάλας. Στις πλήρους διαμετρήματος (full bore) το μέγεθος της μπάλας είναι μεγαλύτερο με σκοπό το διαμέτρημα της οπής να είναι ακριβώς ίδιο με το διαμέτρημα της σωλήνας. Με αυτόν τον τρόπο η ροή δεν παρεμποδίζεται οπότε οι απώλειες είναι μικρές. Στις μειωμένου διαμετρήματος (reduced bore), η μπάλα είναι ένα μέγεθος μικρότερη από τον σωλήνα με αποτέλεσμα η ροή σε αυτό το σημείο να επιταχύνεται σύμφωνα με την σχέση $A_1 u_1 = A_2 u_2$. Στις συνήθεις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται οι μειωμένου διαμετρήματος βαλβίδες ενώ full bore βαλβίδες είναι ακριβότερες και χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις.

1.2.2 Συρταρωτή βάνα (gate valve)

Η συρταρωτή βαλβίδα (Εικόνα 13) χρησιμοποιεί έναν σύρτη ορθογώνιο ή στρογγυλό ο οποίος όταν απομακρυνθεί από τον δρόμο του υγρού η βαλβίδα είναι ανοικτή. Στην κλειστή θέση ο σύρτης φωλιάζει στις εγκοπές που είναι διαμορφωμένες περιφερικά του σώματος της βαλβίδας παρέχοντας έτσι μέγιστη στεγάνωση. Οι επιφάνειες του σύρτη είναι στις περισσότερες περιπτώσεις υπό κλίση σχηματίζοντας μια σφήνα. Μπορεί όμως να υπάρξουν και με παράλληλα τοιχώματα.



Εικόνα 8. Knife gate valve [11]



Εικόνα 9. Συρταρωτή βαλβίδα [8]

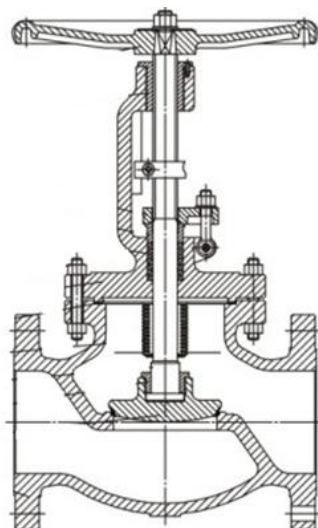
Η λειτουργία της είναι ON-OFF και δεν ενδείκνυται η χρήση για ρύθμιση, εκτός και αν έχει σχεδιαστεί κατάλληλα. Αυτό συμβαίνει διότι σε μια ενδιάμεση θέση η ταχύτητα του ρευστού στο κάτω μέρος του σύρτη αυξάνεται λόγω στένωσης της διατομής με αποτέλεσμα να τον φθείρει και να τον αναγκάζει σε ταλαντώσεις όπου μειώνουν την διάρκεια ζωής [10]. Επιπλέον λόγω της μικρής γωνίας που έχει, προκαλεί αποκόλληση της ροής αυξάνοντας κατά πολύ τις απώλειες.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου βαλβίδας είναι οι πολύ μικρές απώλειες στην ανοικτή θέση καθώς επίσης και η λιτή κατασκευή. Εξ αιτίας της ικανότητας τους να 'κόβουν' το ρευστό, λόγω της γεωμετρίας του συρτή, έχει αναπτυχτεί ένας ειδικός τύπος που λέγεται knife gate valve, που χρησιμοποιείται σε πολύ πηχτά ρευστά, με πολύ λεπτό συρτή για να κόβει με μικρότερη δύναμη το ρευστό (Εικόνα 12).

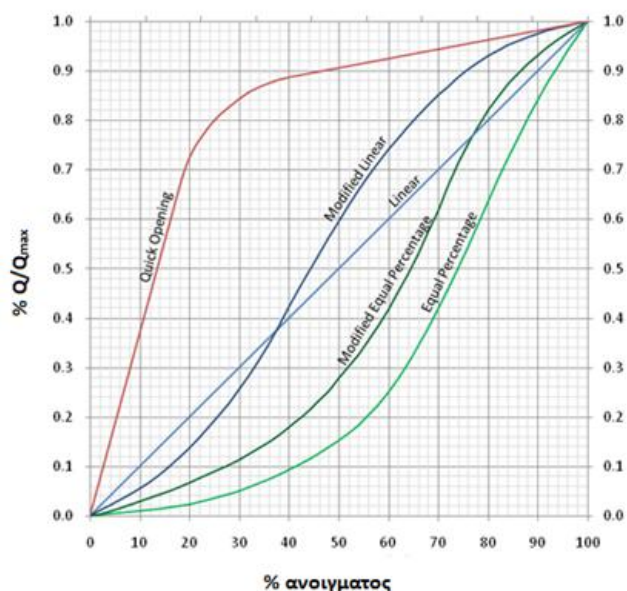
Το μειονεκτήματα τους είναι ότι για έναν πλήρη χειρισμό, από το κλείσιμο στο άνοιγμα και το αντίστροφο, απαιτείται μεγάλη διαδρομή του βάρκρου με αποτέλεσμα να καθυστερεί σημαντικά. Επιπλέον για τον χειρισμό τους είναι απαραίτητη η εφαρμογή μεγάλης ροπής εξ αιτίας των υψηλών τάσεων που ασκούνται σε αυτές. Γι αυτό συνήθως χρησιμοποιείται ένας αυτόματος επενεργητής που δίνει σήμα σε ηλεκτροκινητήρα με μειωτήρα.

1.2.3 Δισκοβαλβίδα (globe valve):

Οι δισκοβαλβίδες (Εικόνα 14), σε αντίθεση με τις προηγούμενες, είναι βαλβίδες ρύθμισης της παροχής. Πήραν το αγγλικό όνομα τους, globe, από το σφαιρικό σχήμα που έχει εξωτερικά το σώμα της βαλβίδας το οποίο χωρίζεται από το εσωτερικό βάρκρο. Κατασκευαστικά αποτελείται και αυτή από το σώμα, το καπάκι, το οποίο μπορεί να είναι βιδωτό, συγκολλητό ή ολόσωμο, το πώμα το οποίο ονομάζεται δίσκος, δηλαδή το εξάρτημα ρύθμισης της παροχής και το δακτύλιο στον οποίο εδράζεται ο δίσκος και επιτυγχάνει τη στεγανότητα. Όπως φαίνεται και από το σχήμα η ρύθμιση γίνεται μετακινώντας τον δίσκο κάθετα στην ροή δημιουργώντας έτσι ένα άνοιγμα ανάμεσα τον δίσκο και την έδραση από όπου παίρνει το ρευστό.



Εικόνα 10. δισκοβαλβίδα βαλβίδα [8]



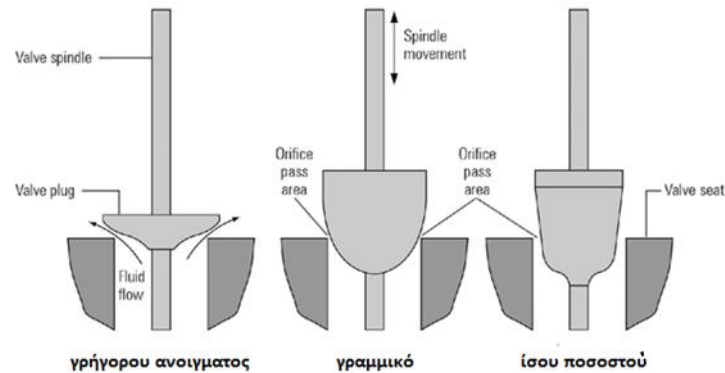
Εικόνα 11. Τυπικές χαρακτηριστικές παροχής [12]

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα κατασκευαστικά στοιχεία του δίσκου. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι δίσκων - πωμάτων όπου διαμορφώνουν την χαρακτηριστική καμπύλη της βαλβίδας. Η χαρακτηριστική της παροχής είναι η καμπύλη που συνδέει την διερχόμενη παροχή συνάρτηση του ανοίγματος την βαλβίδας και μπορεί να είναι ή γραμμική ή γρήγορου ανοίγματος ή σταθερού ποσοστού όπως παρουσιάζεται στη Εικόνα 15.

- Στην γραμμική συσχέτιση η παροχή μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με το ποσοστό που είναι ανοικτή η βαλβίδα.
- Στην γρήγορου ανοίγματος βάνα, στην πλήρως ανοικτή θέση και στην γειτονική περιοχή περνάει μεγάλο ποσοστό της ροής και προς το πλήρες κλείσιμο η παροχή μειώνεται σημαντικά.

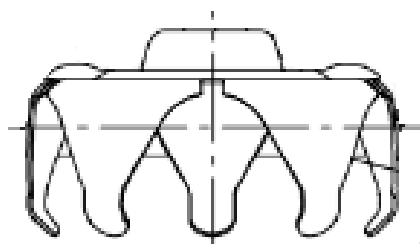
- Στην σταθερού ποσοστού, για την ίδια διαδρομή του βάκτρου από μια προηγούμενη θέση η ποσοστιαία μεταβολή, ως προς την παροχή της προηγούμενης κατάστασης είναι σταθερή.

Στην Εικόνα 16 βλέπουμε ότι ανάλογα με την γεωμετρία του δίσκου διαμορφώνεται η χαρακτηριστική καμπύλη παροχής



Εικόνα 12. Τυπικά σχήματα δίσκων [12]

Επιπλέον ο δίσκος μπορεί να είναι με οδηγία πτερύγια ή χωρίς (Εικόνες 17, 18). Στις μικρές βαλβίδες ή όπου η πτώση της πίεσης είναι μικρή και οι δυνάμεις του ρευστού είναι σχετικά χαμηλές τοποθετείται δίσκος χωρίς οδηγία πτερύγια οδηγώντας έτσι σε χαμηλότερο κόστος. Στις μεγαλύτερες η ύπαρξη οδηγίων πτερυγίων είναι αναγκαστική, αφού το ρευστό ασκεί πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις στο σύστημα βάκτρο-δίσκος. Τα οδηγία πτερύγια κρατάνε το σύστημα ευθυγραμμισμένο κατακόρυφα. Απουσία αυτών θα σήμανε πλαστική παραμόρφωση του βάκτρου καθιστώντας την λειτουργία της βαλβίδας δύσκολη έως αδύνατη.



Εικόνα 13. Σχεδίο απλού δίσκου με οδηγία πτερύγια [8]



Εικόνα 14. Δίσκος με οδηγία πτερύγια στη βάνα προς μελέτη της παρούσας εργασίας

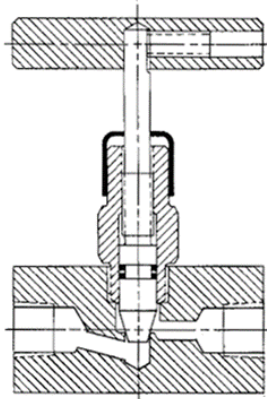
Βασικά πλεονεκτήματα των δισκοβαλβίδων είναι η δυνατότητα ρύθμισης της παροχής και η μικρή διαδρομή που έχει να διανύσει το βάκτρο σε έναν πλήρη χειρισμό της, το οποίο οδηγεί σε γρηγορότερη απόκριση της εγκατάστασης.

Σημαντικό μειονέκτημα είναι η μεγαλύτερη πτώση πίεσης από τις άλλες βαλβίδες, ακόμα και στην πλήρως ανοικτή θέση, λόγω της απότομης και βίαιης αλλαγής της κατεύθυνσης του διακινούμενου ρευστού.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι ο υπολογισμός των υδραυλικών απωλειών ζ σε αυτές τις βάνες είναι αρκετά πολύπλοκος και έχει σχέση με τα γεωμετρικά στοιχεία της βαλβίδας και με τα στοιχεία

της ροής. Τα περισσότερα διαγράμματα και τύποι που εκτιμούν τον συντελεστή απωλειών βασίζονται σε ημιεμπειρικές μεθόδους και πειράματα. Μεγάλη σημασία λοιπόν δίνεται στην υπολογιστική προσομοίωση τέτοιων βαλβίδων με σκοπό τον ακριβέστερο υπολογισμό των απωλειών.

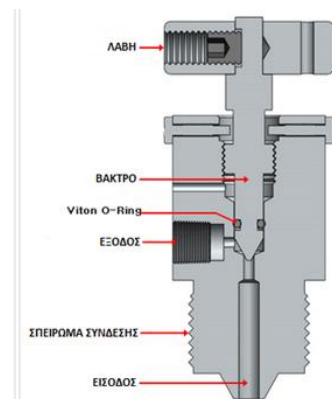
Τέλος, στις δισκοβαλβίδες κατατάσσονται και οι βελονοειδής βαλβίδες (needle valve) όπως της Εικόνας 19, στις οποίες ο δίσκος έχει την μορφή συμπαγούς βελόνας. Οι βαλβίδες αυτές είναι τυποποιημένες για μικρές διαστάσεις έως 25mm και είναι κατάλληλες για ακριβή ρύθμιση της παροχής, σε υδραυλικούς αυτοματισμούς και ως ανακουφιστικές βαλβίδες (bleed valve) (Εικόνα 20) σε περιπτώσεις όπου υπάρχει ο κίνδυνος υπερυψηλής πίεσης.



Εικόνα 15. Βελονοειδής βαλβίδα [8]

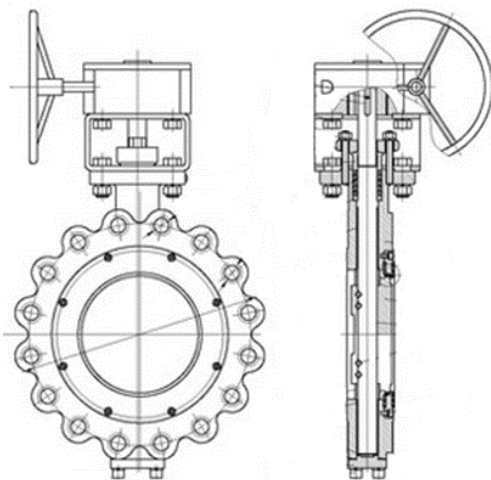


Εικόνα 16. Ανακουφιστική βαλβίδα [13]



1.2.4 Βαλβίδα πεταλούδα (butterfly valve)

Οι βαλβίδες πεταλούδα, ή στρεφόμενου δίσκου (Εικόνες 21, 22), έχουν έναν δίσκο για την ρύθμιση της παροχής. Ο δίσκος αυτός είναι πακτωμένος σε έναν άξονα και περιστρέφεται γύρω από αυτόν. Είναι κατάλληλες και για ON-OFF λειτουργία αλλά και για ρύθμιση της παροχής. Η θέση της πλήρους κλειστής είναι όταν ο δίσκος βρίσκεται κάθετα στην ροή του μέσου οπότε φράζει τελείως την διατομή, ενώ η πλήρως ανοικτή θέση είναι όταν ο δίσκος βρίσκεται παράλληλα στην ροή με αποτέλεσμα να προβάλεται η ελάχιστη αντίσταση στο ρευστό και η εκτιθέμενη επιφάνεια είναι ουσιαστικά το πάχος του δίσκου.



Εικόνα 17. Κατασκευαστικό σχέδιο βαλβίδας πεταλούδα [8]



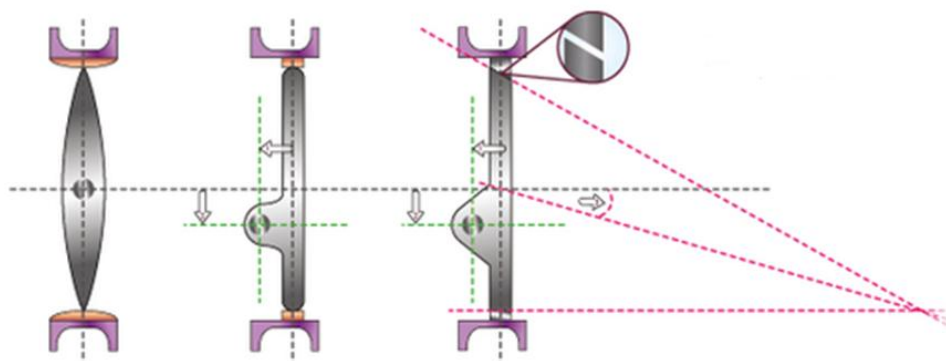
Εικόνα 18. Βαλβίδα πεταλούδα [11]

Οι παλαιότερης τεχνολογίας βαλβίδες, τύπου πεταλούδα, παρουσίαζαν διαρροές και αδυνατούσαν να παρέχουν απόλυτη στεγανότητα. Συνήθως τοποθετούνταν παράλληλα με συρτοβαλβίδα η οποία εξασφάλιζε την στεγανότητα. Οι σύγχρονες έχουν εξαλείψει αυτό το πρόβλημα και είναι πλήρως στεγανές. Ωστόσο δεν χρησιμοποιούνται σε υψηλές πιέσεις γιατί είναι αρκετά επιρρεπείς στις διαρροές. Είναι κατάλληλες όμως για μεγάλες παροχές. Τυποποιούνται για ονομαστικές διαμέτρους έως 2400 mm και πίεση 50 bar.

Τα πλεονεκτήματα αυτών των βαλβίδων είναι η σχεδόν γραμμική χαρακτηριστική του συντελεστή αντίστασης ζ με το άνοιγμα του δίσκου, το χαμηλό κόστος και η λιτή κατασκευή καθώς επίσης και η χαμηλή ροπή που χρειάζεται για τον χειρισμό της.

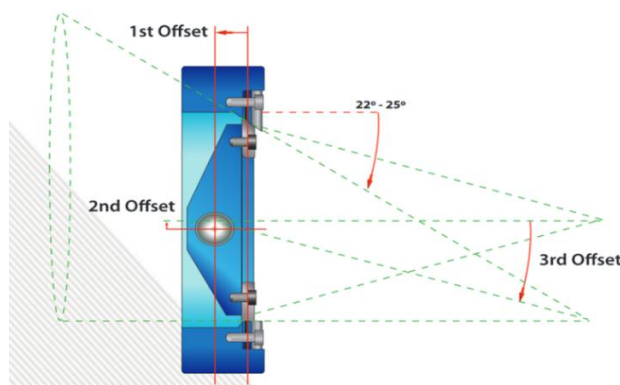
Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό σε αυτές τις βαλβίδες είναι η κατασκευή και η τοποθέτηση του δίσκου. Ανάλογα με αυτό το χαρακτηριστικό υπάρχουν οι βαλβίδες μηδενικής εκκεντρότητας, διπλής εκκεντρότητας και τριπλής εκκεντρότητας οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 23.

Στις βαλβίδες με μηδενική εκκεντρότητα ο άξονας που περιστρέφει τον δίσκο διέρχεται από το κέντρο του. Η στέγνωση επιτυγχάνεται με ένα μαλακό πλαστικό στο εσωτερικό περίβλημα του σώματος της βάνας. Αυτή η κατασκευή χρησιμοποιείται σε εφαρμογές χαμηλής πίεσης.



Εικόνα 19. Οι τύποι εκκεντρότητας [12]

Στις υψηλότερων επιδόσεων διπλής εκκεντρότητας βάνες, που χρησιμοποιούνται σε συστήματα μεγαλύτερων πιέσεων, υπάρχει εκκεντρότητα από την αξονική γραμμή του δίσκου και του σώματος (πρώτη εκκεντρότητα) και της αξονικής γραμμής του δίσκου (δεύτερη εκκεντρότητα). Με αυτήν την κατασκευή υπάρχει μικρότερη τριβή στο πλαστικό της έδρασης με τον δίσκο, συγκεκριμένα 10° πριν το άνοιγμα και 10° πριν το κλείσιμο, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

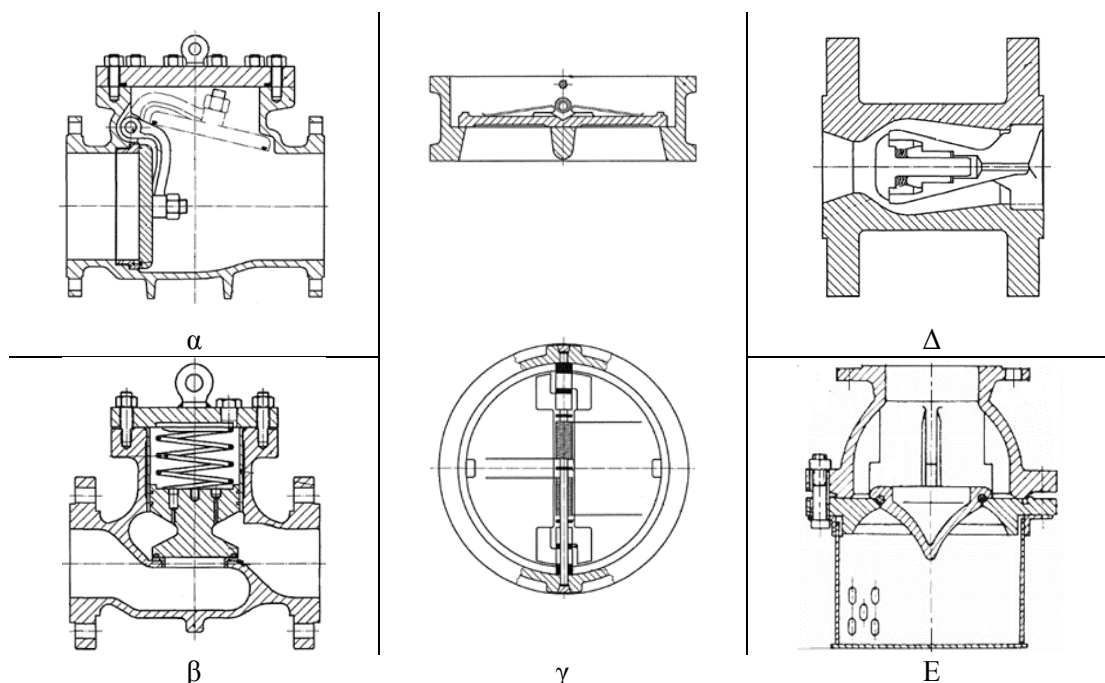


Εικόνα 20. Βαλβίδα με τριπλή εκκεντρότητα [14]

Τέλος, οι πλέον προτεινόμενες και χρησιμοποιούμενες σε υψηλών πιέσεων συστήματα είναι οι βαλβίδες με τριπλή εκκεντρότητα (Εικόνα 24). Σε αυτήν την περίπτωση η τρίτη εκκεντρότητα βρίσκεται στον άξονα στις εδράσεις του δίσκου. Ο νοητός κώνος ο οποίος προκύπτει από τον τρόπο που είναι κατεργασμένη η έδραση είναι εκκεντρος ως προς την αξονική γραμμή του σώματος. Με αυτόν το τρόπο εκμηδενίζουμε την επαφή του δίσκου με την ελαστική στεγάνωση της έδρασης με αποτέλεσμα καλύτερες επιδόσεις στην στέγνωση και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Το μεγάλο μειονέκτημα είναι ότι στην πλήρως ανοικτή θέση η εκτιθέμενη επιφάνεια στην ροή είναι μεγαλύτερη λόγω της εκκεντρότητας, χαρακτηρίζοντας την έτσι με μεγαλύτερο συντελεστή απωλειών.

1.2.5 Βαλβίδα αντεπιστροφής (check valve)

Ο σκοπός των βαλβίδων αυτών είναι να επιτρέπουν την ροή κατά την μια κατεύθυνση και να κλείνουν όταν η φορά αλλάζει μη επιτρέποντας έτσι την διέλευση του ρευστού στην αντίθετη κατεύθυνση. Η πιο χαρακτηριστική εφαρμογή τους είναι στους αγωγούς κατάθλιψης των αντλιών. Αν η αντλία αποσυνδεθεί και δεν υπάρχει η βαλβίδα αντεπιστροφής τότε όλο το νερό από την δεξαμενή κατάθλιψης που έχει υψηλότερη πίεση θα ρέει προς τα κάτω, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Στην πραγματικότητα οι βαλβίδες της καρδιάς είναι βαλβίδες αντεπιστροφής στις κοιλίες αφού η καρδιά λειτουργεί σαν αντλία. Η λειτουργία των βαλβίδων αυτών βασίζεται στην διαφορά πίεσης ανάντη και κατάντη του στοιχείου στεγάνωσης η οποία δημιουργεί θετική πίεση και μετακινεί το στοιχείο. Βασικό μέγεθος είναι η πίεση κατωφλιού η οποία είναι η ελάχιστη πίεση του ανορεύματος για να υπερνικηθούν οι απώλειες και η βαλβίδα να λειτουργήσει. Επίσης σημαντική είναι και η πτώση πίεσης που εκφράζεται από τον συντελεστή ζ. Στις βαλβίδες αντεπιστροφής υπάρχει μεγάλη ποικιλία από είδη και κυρίως στο στοιχείο που εξασφαλίζει την στέγνωση. Μπορεί να είναι δίσκος ή κάπου είδους έμβολο.



Εικόνα 21. Είδη βαλβίδων αντεπιστροφής α) με κλαπέτο, β) με έμβολο, γ) με δυο κλαπέτα ή αυτιά, δ) με αζονικό πιστόνι και ε) ποδοβαλβίδα [8]

Ανάλογα με την εφαρμογή χρησιμοποιείται και ο αντίστοιχος τύπος. Για παράδειγμα, η κατασκευή με κλαπέτο (Εικόνα 25 α) έχει μικρή πτώση πίεσης και είναι κατάλληλη για μικρές ταχύτητες και όχι για συχνούς χειρισμούς γιατί ο δίσκος χτυπά την έδραση με αρκετή δύναμη

ώστε να τον φθείρει. Οι βαλβίδες της Εικόνας 25 β, δ λειτουργούν υπό την επίδραση της διαφοράς πίεσης που επικρατεί ανάντη και κατόντη της ροής και που μετακινεί το έμβολο. Επιπλέον έχουν ελατήρια προκειμένου το στοιχείο στεγάνωσης να επαναφέρεται γρηγορότερα και πιο άμεσα στην κλειστή θέση όταν η ροή ελαττώνεται.

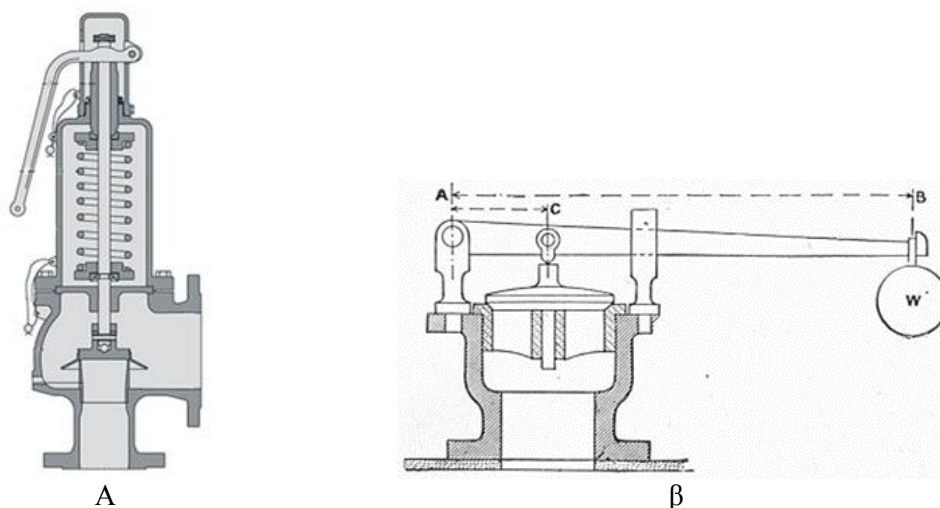
Οι αξονικές βαλβίδες με αξονοσυμμετρικό έμβολο (Εικόνα 25δ) χρησιμοποιούνται σε αξονικές ροές και παρουσιάζουν χαμηλή πτώση πίεσης. Έχουν το πλεονέκτημα χαμηλής συχνότητας κατωφλιού, δηλαδή αρχίζουν την λειτουργία τους για χαμηλή διαφορά πίεσης, και έχουν καλή στεγάνωση στην κλειστή θέση. Επιπλέον δεν είναι κρουστικού τύπου, η βαλβίδα κλείνει ομαλά και γραμμικά με την ελάττωση της ροής και χωρίς να προσκρούει στην έδραση στο κλείσιμο και δεν δημιουργείται αποκόλληση της ροής.

Τέλος οι ποδοβαλβίδες (foot valve) (Εικόνα 25 ε) χρησιμοποιούνται σε αντλητικές εγκαταστάσεις σε κατακόρυφη διάταξη και η λειτουργία τους βασίζεται στην ανύψωση του δίσκου λόγω της πίεσης που ασκεί το νερό.

1.2.6 Ειδικές βαλβίδες

Ασφαλιστική βαλβίδα υπερπίεσης

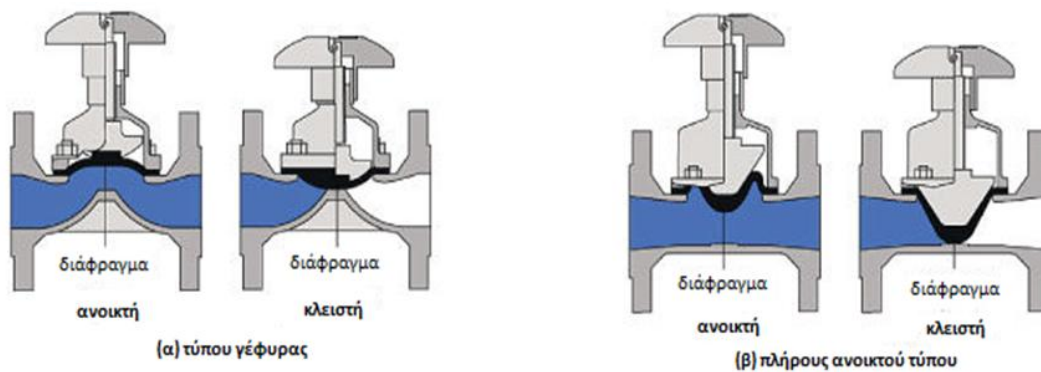
Οι βαλβίδες αυτές (Εικόνα 26) χρησιμοποιούνται σε δοχεία πίεσης, λέβητες ατμού και δίκτυα σωληνώσεων και σκοπό έχουν να προστατεύουν το σύστημα από υπερπίεση. Η βαλβίδα αυτού του τύπου είναι μια βαλβίδα με έμβολο η οποία παραμένει κλειστή υπό την επίδραση ενός ελατηρίου ή αντιβαρουν σε μοχλό. Όταν η πίεση στο δοχείο υπερβεί ένα προκαθορισμένο όριο τότε η επίδραση του μηχανισμού υπερνικάται με αποτέλεσμα ο ατμός ή το οποιοδήποτε μέσο να φεύγει στο περιβάλλον με αποτέλεσμα η εσωτερική πίεση να πέφτει. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας βαλβίδας είναι η βαλβίδα στην χύτρα ταχύτητας η οποία ανοίγει όταν η πίεση στο εσωτερικό αυξηθεί σημαντικά.



Εικόνα 22. Ασφαλιστικές βαλβίδες α) με ελατήριο, β) με βάρος και μοχλό [8]

Βαλβίδα διαφράγματος

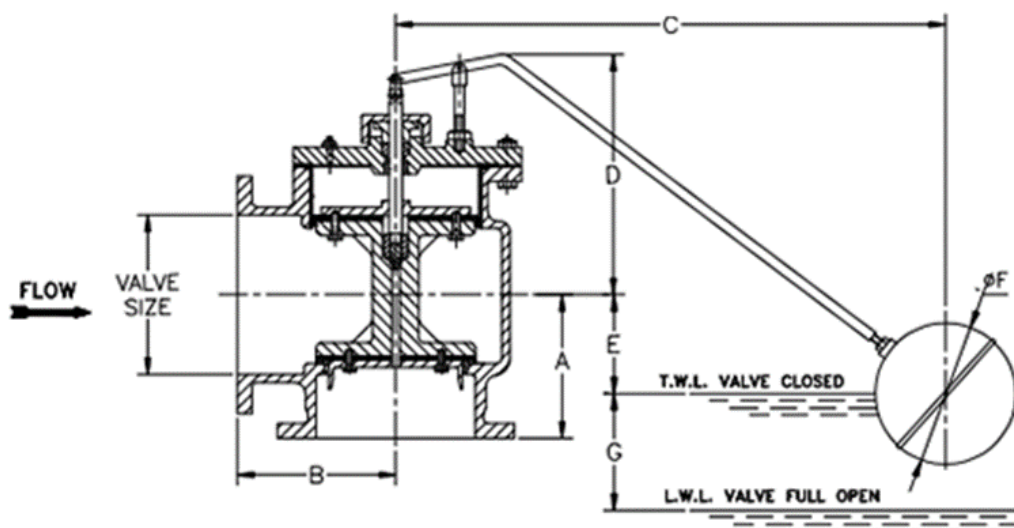
Οι βαλβίδες διαφράγματος σαν της Εικόνας 27 φέρουν μια ελαστική μεμβράνη η οποία συμπιέζεται μέσω βάρου και κινείται κάθετα στην ροή. Είναι κατάλληλες για ON-OFF λειτουργία και για ρύθμιση της παροχής. Επίσης είναι πολύ αποτελεσματικές σε συνθήκες διάβρωσης και εξασφαλίζουν καλή στεγανότητα. Υπάρχουν δυο ειδών βαλβίδες. Οι βαλβίδες με γέφυρα και οι βαλβίδες πλήρους διατομής



Εικόνα 23. Βαλβίδα διαφράγματος [8]

Βαλβίδα στάθμης (πλωτήρας)

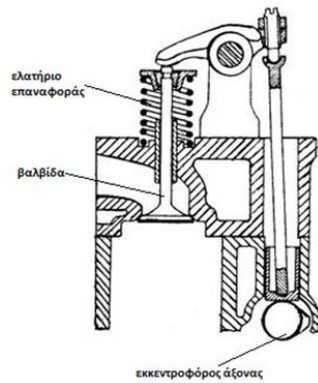
Η βαλβίδα στάθμης (Εικόνα 28) είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται για να ελέγχει την στάθμη του νερού σε μία δεξαμενή. Αποτελείται από μια βαλβίδα η οποία είναι συνδεδεμένη με έναν διαμπερή πλωτήρα μέσω μοχλού. Η βαλβίδα επίσης συνδέεται με την παροχή νερού και ανοιγοκλείνει μέσω του μοχλού. Όταν η στάθμη στην επιφάνεια της δεξαμενής είναι χαμηλά τότε ο μοχλός ανοίγει την βαλβίδα και επιτρέπει να περάσει νερό το οποίο γεμίζει την δεξαμενή. Όσο η δεξαμενή γεμίζει τόσο ο μοχλός, μέσω του πλωτήρα, ανεβαίνει και όταν η στάθμη φτάσει το επιθυμητό επίπεδο τότε η βαλβίδα κλείνει.



Εικόνα 24. Σκαρίφημα πλωτήρα [8]

Βαλβίδες MEK (poppet valve):

Οι βαλβίδες αυτές, σαν της Εικόνας 29 είναι οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής των καυσαερίων σε εμβολοφόρους MEK. Αποτελούνται από ένα πώμα με διαμόρφωση δίσκου στην άκρη και ένα ελατήριο για επαναφορά. Η βαλβίδα ανοίγει μέσω ενός εκκεντροφόρου άξονα ο οποίος περιστρέφεται από πάνω της και αφού γίνει η διαδικασία της εισαγωγής ή εξαγωγής μέσω του ελατηρίου επαναφέρεται στην κλειστή θέση.

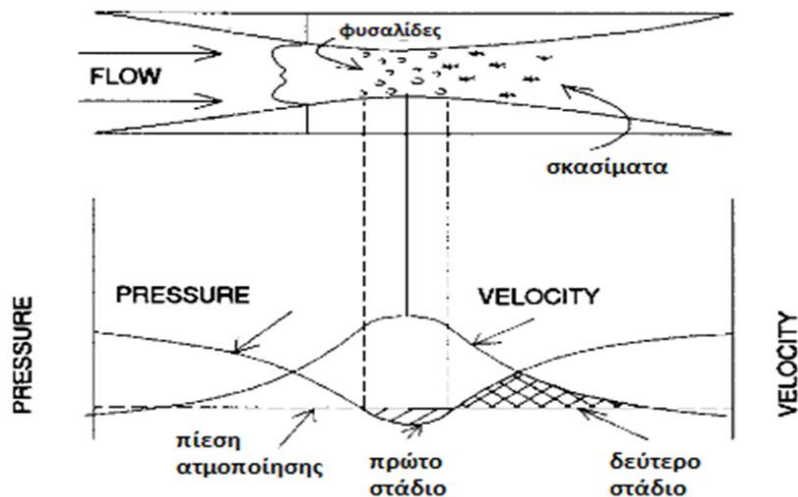


Εικόνα 25. Σύστημα βαλβίδας MEK [15]

1.3 Λειτουργικές και σχεδιαστικές παράμετροι

1.3.1 Σπηλαιώση

Η σπηλαιώση είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να μικρύνει σημαντικά την διάρκεια ζωής της βαλβίδας καταστρέφοντας συνήθως το τρύμα, δηλαδή το στοιχείο στέγνωσης. Το φαινόμενο αυτό εξελίσσεται σε δύο στάδια. Όταν μια ποσότητα υγρού περάσει μέσα από μια στένωση όπως για παράδειγμα το άνοιγμα μια βαλβίδας ελέγχου, η ταχύτητα του ρευστού αυξάνει. Καθώς η ταχύτητα αυξάνει, η στατική πίεση μειώνεται λόγω της αρχής του Bernoulli. Αν η ταχύτητα συνεχίσει να μικραίνει, η πίεση στην στένωση πέφτει κάτω από την πίεση ατμοποίησης του υγρού με αποτέλεσμα μικρές φυσαλίδες να δημιουργούνται. Αυτό είναι το πρώτο στάδιο της σπηλαιώσης. (βλέπε Εικόνα 26)



Εικόνα 26. Μεταβολή της πίεσης και της ταχύτητας κατά μήκος της στένωσης [16]

Καθώς το ρευστό κινείται κατάντη της στένωσης η ταχύτητα μειώνεται και αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης. Εάν η πίεση αυτή σταθεροποιηθεί πάνω από την πίεση ατμοποίησης του υγρού, οι μικρές φυσαλίδες ατμού σκάνε. Αυτό είναι το δεύτερο στάδιο της σπηλαιώσης που παρουσιάζεται στην Εικόνα 26.

Το δεύτερο στάδιο της σπηλαιώσης είναι το πιο επιβλαβές για την βαλβίδα. Οι επανυγροποιήσεις των φυσαλίδων ατμού που περιγράφηκαν στο δεύτερο στάδιο αντιστοιχούν σε ανάπτυξη έντονων κρουστικών υπερπίεσεων και όταν αυτές γίνονται κοντά στην περιρρεώμενη επιφάνεια είναι καταστροφικές για το υλικό, γιατί αντιστοιχούν σαν σφύρες που καταπονούν τα τοιχώματα. Η καταπόνηση αυτή της στερεής επιφάνειας έχει ως αποτέλεσμα την φθορά του υλικού μετά απο μακροχρόνια ανάπτυξη του φαινομένου. Είναι λοιπόν απαραίτητη η μελέτη της λειτουργίας μιας βαλβίδας και ως προς την σπηλαιώση. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί το μέγεθος της σπηλαιώσης εισάγεται ο συντελεστής σπηλαιώσης σ ο οποίος ισούται με:

$$\sigma = \frac{P_i - P_s}{\Delta P} \quad (1.10)$$

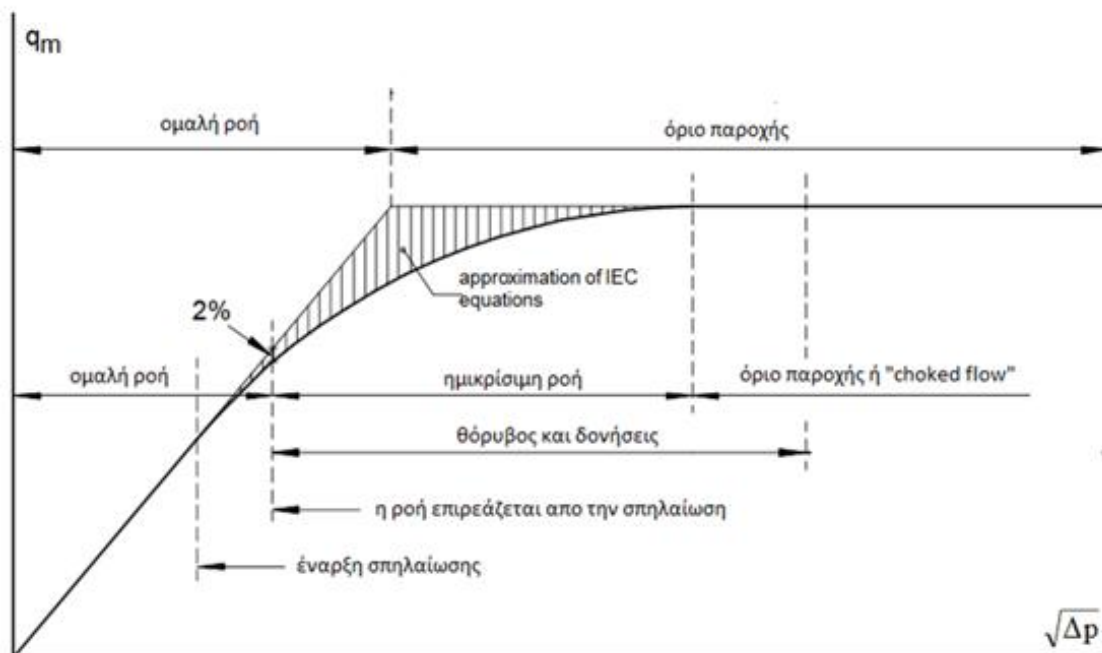
όπου:

P_i = η πίεση στο ανορέυμα της βαλβίδας

P_s = η πίεση ατμοποίησης του υγρού

$\Delta P = P_i - P_o$ = η πτώση πίεσης που παρουσιάζει η βαλβίδα

Σαν βασικό κανόνα οι κατασκευαστές αναφέρουν ότι για $\sigma < 2,5$ είναι πιθανό να υπάρξει σπηλαιώση [17]. Μικρές τιμές του βαθμού σπηλαιώσης είναι ανεκτές σε βαλβίδες ελέγχου. Ωστόσο υπάρχει ένα σημείο όπου η αύξηση του βαθμού σπηλαιώσης γίνεται πάρα πολύ καταστροφική για την βαλβίδα καθώς αυξάνονται και μεγαλώνουν οι φυσαλίδες. Κάποια στιγμή γίνονται τόσο μεγάλες που αρχίζουν να παρεμποδίζουν την ροή με αποτέλεσμα όσο ανοίγει η βαλβίδα να μην παρατηρείται ανάλογη αύξηση της παροχής και στο έσχατο στάδιο η παροχή να μένει σταθερή αφού οι φυσαλίδες έχουν φράξει όλη την διατομή. (Εικόνα 27)



Εικόνα 27. Μεταβολή της παροχής κατά μήκος της βαλβίδας με συνθήκες σπηλαιώσης [16]

1.3.2 Ροπή χειρισμού

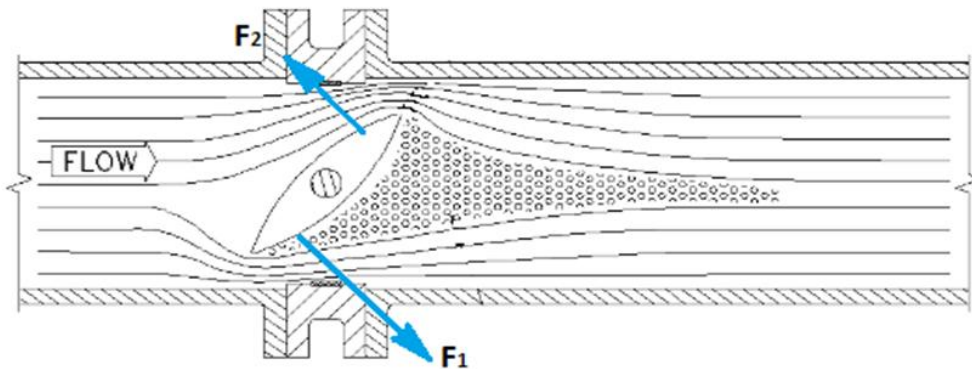
Ο χειρισμός μιας βαλβίδας γίνεται με την εφαρμογή ροπής. Η ροπή περιστρέφει την μπάλα ή τον δίσκο τις σφαιρικές βάνες και τις βάνες πεταλούδας ή μετατρέπεται σε μεταφορική κίνηση μέσω του σπειρώματος του βάκτρου και ανυψώνει το τρύμα στις δισκοβαλβίδες και τις συρτοβαλβίδες. Η συνολική ροπή που απαιτείται για τον χειρισμό οφείλεται στους εξής παράγοντες:

- Στις τριβές που αναπτύσσονται στο τρύμα με το ρευστό, στο σπείρωμα του βάκτρου και στις εδράσεις κύλισης. (T_f)
- Στο πεδίο πιέσεων που ασκεί το ρευστό στο τρύμα ιδίως στην πλήρως κλειστή θέση. (T_h)
- Στην δυναμική πίεση που αναπτύσσεται λόγω φαινομένου άνωσης στο τρύμα. (T_d)

Καταλήγοντας έτσι στην σχέση:

$$T_o = T_f + T_h + T_d \quad (1.17)$$

Η δυναμική πίεση αναπτύσσεται σε βαλβίδες που το τρύμα έχει εν δυνάμει μορφή αεροτομής, παράδειγμα ο δίσκος στις βαλβίδες πεταλούδας και η μπάλα στις σφαιρικές βαλβίδες.



Εικόνα 28. Κατανομή δυνάμεων στον δίσκο βαλβίδας πεταλούδας [17]

Σε μια ενδιάμεση θέση το ρευστό στην ακμή πρόσπτωσης του δίσκου έχει μικρότερη ταχύτητα από ότι στην ακμή εκφυγής. Αυτή η διαφορά στην ταχύτητα οδηγεί σε ανομοιόμορφη διανομή της πίεσης κατά μήκος του δίσκου. Η συνολική δύναμη που ασκείται κάθετα στο μπροστινό μέρος είναι μεγαλύτερη από αυτή που ασκείται στο πίσω μέρος. (Εικόνα 28). Αυτή η κατανομή δυνάμεων έχει την τάση να επαναφέρει τον δίσκο στην κλειστή θέση. Την μεγαλύτερη τιμή την παίρνει στο άνοιγμα που αντιστοιχεί σε περίπου 75° και έχει προταθεί η παρακάτω σχέση υπολογισμού της.

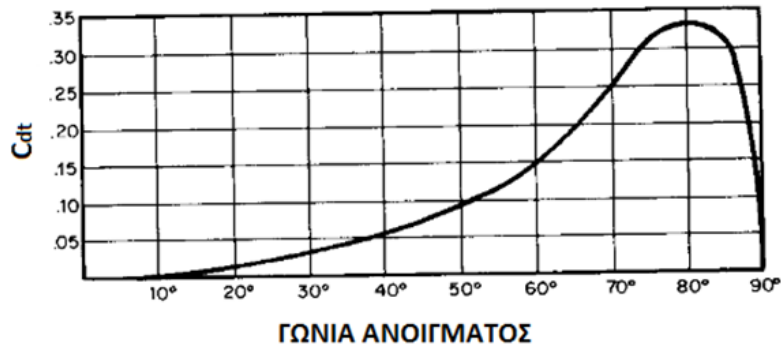
$$T_d = C_{dt} \cdot D^3 \cdot \Delta P \quad (1.18)$$

όπου:

C_{dt} = συντελεστής δυναμικής ροπής (από το διάγραμμα στην Εικόνα 29)

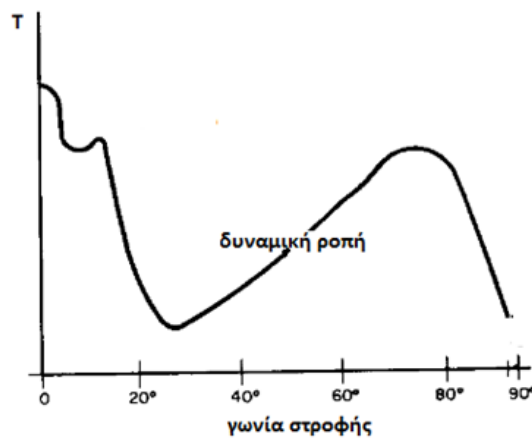
D = η διάμετρος του δίσκου

ΔP = η πτώση πίεσης που παρουσιάζει η βαλβίδα



Εικόνα 29. Συντελεστής δυναμικής ροπής [16]

Η Εικόνα 30 δείχνει ενδεικτικά την ροπή που χρειάζεται για να λειτουργήσει η βαλβίδα πεταλούδα.



Εικόνα 30. Ροπή λειτουργίας βαλβίδας πεταλούδας [16]

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να δοθεί έμφαση κατά τον σχεδιασμό οποιασδήποτε βαλβίδας για την ελαχιστοποίηση της ροπής λειτουργίας με την λεπτομερή ανάλυση του πεδίου πιέσεων. Επίσης μείωση μπορεί να επιτευχτεί με την τοποθέτηση της βαλβίδας σε θέση όπου το προφίλ της ταχύτητας που εισάγεται να είναι πλήρως αναπτυγμένο και σε απόσταση από στοιχεία αλλαγής κατεύθυνσης.

1.3.3 Υλικά κατασκευής

Αυτό που χαρακτηρίζει μια καλή βαλβίδα εκτός από την σωστή ρευστοδυναμική ανάλυση και σωστή μελέτη των φαινομένων που αναπτύσσονται είναι η αντοχή και η διάρκεια στον χρόνο. Για να επιτευχτεί αυτό χρησιμοποιούνται κατάλληλα υλικά τα οποία έχουν τις επιθυμητές ιδιότητες και στοιχεία αντοχής. Για μικρές υδραυλικές εγκαταστάσεις σε συστήματα άρδευσης και τις υδραυλικές εγκαταστάσεις σε πολυκατοικίες χρησιμοποιούνται υλικά όπως ο χαλκός, πλαστικό ή PVC. Σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις σε βιομηχανική κλίμακα χρησιμοποιούνται χαλύβδινες βαλβίδες. Τα υλικά κατασκευής είναι ανοξείδωτοι χάλυβες ή οστενιτικοί χάλυβες νικελίου-χρωμίου (inconel). Σημαντικό ρόλο στην αντοχή και στην κατανομή των εσωτερικών τάσεων έχει και ο τρόπος καταργασίας. Αν δηλαδή τα εξαρτήματα είναι σφυρήλατα, χυτά ή καταργασμένα σε κέντρα καταργασιών (φρέζα, τórνος).

1.4 Μεθοδολογία και διάρθρωση της παρούσας εργασίας

Η παρούσα εργασία σκοπό είχε την μελέτη της ροής σε μια τυπική δισκοβαλβίδα ονομαστικής διαμέτρου $\Phi 60$. Στόχος ήταν η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της σε διάφορες θέσεις λειτουργίας κάνοντας δισδιάστατη και τρισδιάστατη ανάλυση. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία των χαρακτηριστικών καμπύλων της παροχής και του συντελεστή απωλειών ζ συναρτήσει του ανοίγματος. Επιπλέον έγινε έλεγχος ως προς την σπηλαιώση στην ποιο επικίνδυνη διατομή

Αρχικά αφού έγινε η εκλογή της βαλβίδας που θα μελετηθεί, αποτυπώθηκε η γεωμετρία της ψηφιακά με την χρήση του Solidworks. Κατά την αποτύπωση δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στις σημαντικές λεπτομέρειες που καθόριζαν την πορεία του φαινομένου. Στην συνέχεια στην γεωμετρία που προέκυψε και για κάθε θέση κατασκευάστηκαν πλέγματα με σκοπό την αριθμητική επίλυση της ροής. Τα πλέγματα δημιουργήθηκαν στο ANSYS τα οποία ύστερα εισήχθησαν στο OpenFOAM. Η επίλυση έγινε με τον αλγόριθμο Simple και το πρόβλημα λύθηκε σε συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady state). Αρχικά μελετήθηκε η ανεξαρτησία του πλέγματος. Ύστερα έγινε προσωμοίωση για άλλες τις θέσεις και κατασκευάστηκαν οι χαρακτηριστικές της παροχής και των απωλειών. Τέλος μελετήθηκε και η συμπεριφορά ως προς την σπηλαιώση.

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται μια γενική περιγραφή των υδραυλικών εγκαταστάσεων και τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα στοιχεία θεωρίας που απαιτούνται για την κατανόηση των φαινομένων και την επίλυση του προβλήματος,

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η γεωμετρία της βαλβίδας και τα πλέγματα που κατασκευάστηκαν για την επίλυση. Εξηγείται η πολυπλοκότητα του υπολογιστικού χωρίου και οι αναγκαίες απλοποιήσεις που έγιναν προκειμένου να γίνει οικονομία χρόνου και υπολογιστικού κόστους. Επίσης συγκρίνονται τα πλέγματα μεταξύ τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η μελέτη της διδιάστατης ανάλυσης και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Στο τέλος παρατίθεται οι χαρακτηριστικές καμπύλες της παροχής και των απωλειών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται οή η διαδικασία επίλυσης της τρισδιάστατης ροής. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσωμοιώσεων, ταυτοποιούνται τα αποτελέσματα με άλλα παρόμοια από την διεθνή βιβλιογραφία και τέλος εξηγούνται κάποια δευτερογενή φαινόμενα.

Στο έκτο κεφάλαιο μελετάται η βαλβίδα από πλευρας σπηλαιώσης. Ελεγχεται κάτω από ποιες συνθήκες σπηλαιώνει και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσωμοίωσης.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα της εργασίας και τέλος στο όγδοο προτείνονται θέματα για περαιτέρω έρευνα και και εργασία.

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Γενικά

Η διεθνής βιβλιογραφία που ασχολείται με την έρευνα των δισκοβαλβίδων (globe valves) χωρίζεται σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη έχει σκοπό την σχεδίαση από την αρχή μιας βαλβίδας με επιθυμητά χαρακτηριστικά. Μελετώνται όλες οι σχεδιαστικές παράμετροι με σκοπό την πλήρη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού. Η δεύτερη επικεντρώνεται στην προσομοίωση ήδη κατασκευασμένων βαλβίδων με σκοπό να χαρτογραφήσει πλήρως την λειτουργία και να προτείνει τυχόν αλλαγές και βελτιώσεις στον σχεδιασμό νέων βελτιστοποιημένων βαλβίδων.

Αυτό που ενδιαφέρει κυρίως και στις δυο περιπτώσεις είναι οι διάφορες παράμετροι που αφορούν την ροή. Σημαντική θέση κατέχει η ανάλυση του πεδίου ροής και το πεδίου πιέσεων με σκοπό τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης ανάντη και κατάντη της βαλβίδας καθώς και ο καθορισμός του συντέλεση παροχής C_v . Επίσης μελετάται και ο έλεγχος ως προς την σπηλαιώση. Ένα άλλο στοιχείο που ερευνάται είναι η ανάλυση των δυνάμεων που ασκεί το ρευστό στα διάφορα μέρη της βαλβίδας με σκοπό τον υπολογισμό της ροπής που απαιτείται για να λειτουργήσει ή την αντοχή του βάκτρου σε λογισμό και μόνιμη παραμόρφωση. Σε κάποιες πιο εξειδικευμένες μελέτες εξετάζεται η διάχυση του νερού σε πηχτότερο μέσο όπως το πετρέλαιο σε κατάσταση διφασικού μείγματος. Όλη η έρευνα που διεξάγεται υπολογιστικά γίνεται με την χρήση του ANSYS. Καμία μελέτη δεν βρέθηκε που να πραγματοποιήθηκε με το OpenFOAM

Σε αυτο το κεφάλαιο παρατήθενται κάποιες δημοσιεύσεις ερευνητικών ομάδων πάνω στο αντικείμενο των δισκοβαλβίδων.

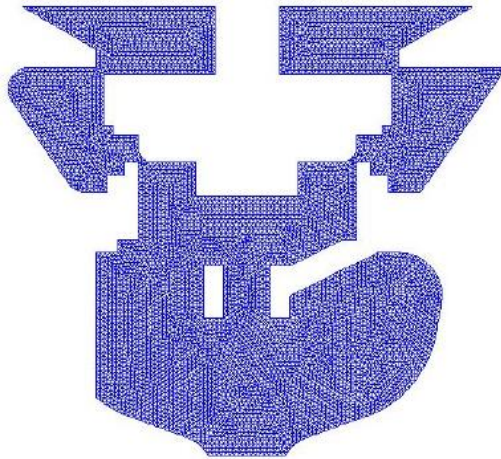
2.2 Δημοσιεύσεις ερευνητών

Guillermo Palau Salvador και Jaime Arviza Valverde, THREE-DIMENSIONAL CONTROL VALVE WITH COMPLEX GEOMETRY: CFD MODELING AND EXPERIMENTAL VALIDATION

Στην εργασία αυτη που έγινε το 2004 στο American Institute of Aeronautics μελετήθηκε η συμπεριφορά μια δισκοβαλβιδας (globe) χρησιμοποιώντας τρια διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης. Το πρώτο ήταν το k-ε από την ευρύτερη οικογένεια των RANS μοντέλων, το δεύτερο ήταν το μοντέλο RSM, και το τρίτο, ήταν η μέθοδος LES.

Αρχικά κατασκευάστηκε το υπόλογιστικο χωρίο, στο οποίο θα επιλύθει η ροή, χωρίς να γίνει απλοποίησή του. Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν ήταν, διαφορά πίεσης $\Delta p = 9,79$ MPa και υπολογίστηκε η παροχή που αντιστοιχεί.

Ύστερα, κατασκευάστηκε μη δομημένο πλέγμα με 1.000.000 κελία, μέγιστου μεγέθους κελιών 1mm στο software GAMBIT 2. Επιπλέον, για την επιλύση χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας του Fluent 6.1, πεπερασμένων όγκων και εφαρμόστηκαν τα τρια προηγούμενα μοντέλα. Λόγω αυξημένου υπόλογιστικού κόστους το χωρίο χωρίστηκε σε δυο μέρη και υπολογίστηκε χωριστά.



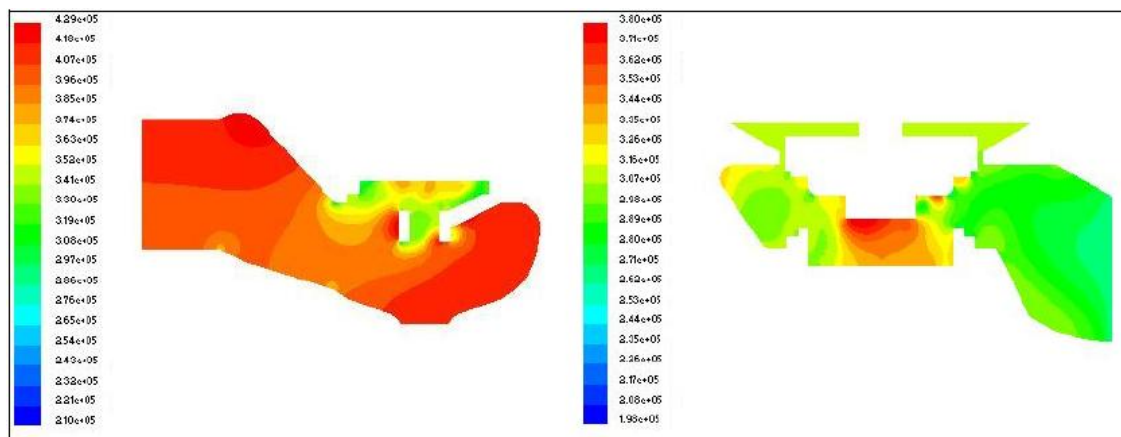
Εικόνα 31. Μη δομημένο πλέγμα βαλβίδας

Η επαληθευση των αποτελεσμάτων έγινε με αποτελέσματα που προέκυψαν απο πειραματική διάταξη όπου η διαφορά πίεσης μετρήθηκε με αισθητήρες μέτρησης σχετικής πίεσης. Η παρακάτω εικόνα δείχνει τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων και της πειραματικής διάταξης.

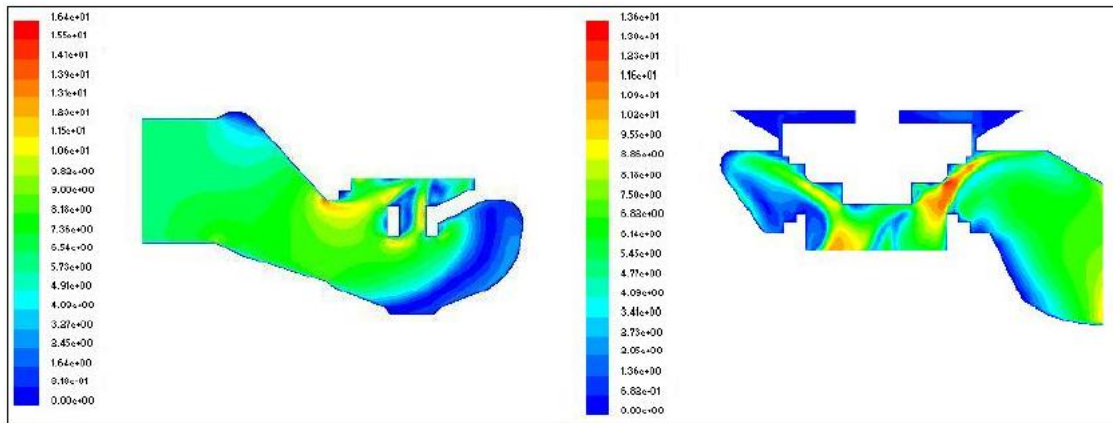
		Experimental	Fluent
Model	Pressure drop (Pa)	Mass flow run (kg/s)	Mass flow rate (kg/s)
Standard ke	9.79×10^6	3.133	3.098
RSM model	9.79×10^6	3.133	3.104
LES model	9.79×10^6	3.133	3.105

Εικόνα 32. Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων

Το συμπέρασμα ήταν ότι το μοντέλο της τύρβης k-ε προέβλεψε την συμπεριφορά της ροής εξίσου καλά με τα άλλα πιο σύνθετα μοντέλα και επομένως θεωρήθηκε πως είναι προτιμητέο, γιατί εξοικονομεί χρόνο. Επίσης, το υπολογιστικό μοντέλο συνέπεσε πολύ κοντά με τις πειραματικές μετρήσεις.



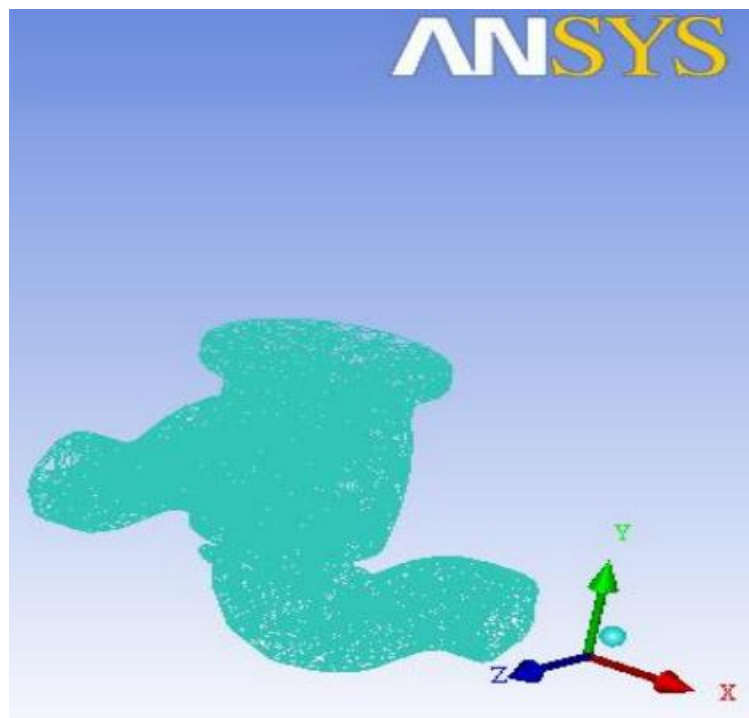
Εικόνα 33. Ισοϋψείς πίεσης



Εικόνα 34. Ισοϋψείς ταχύτητας

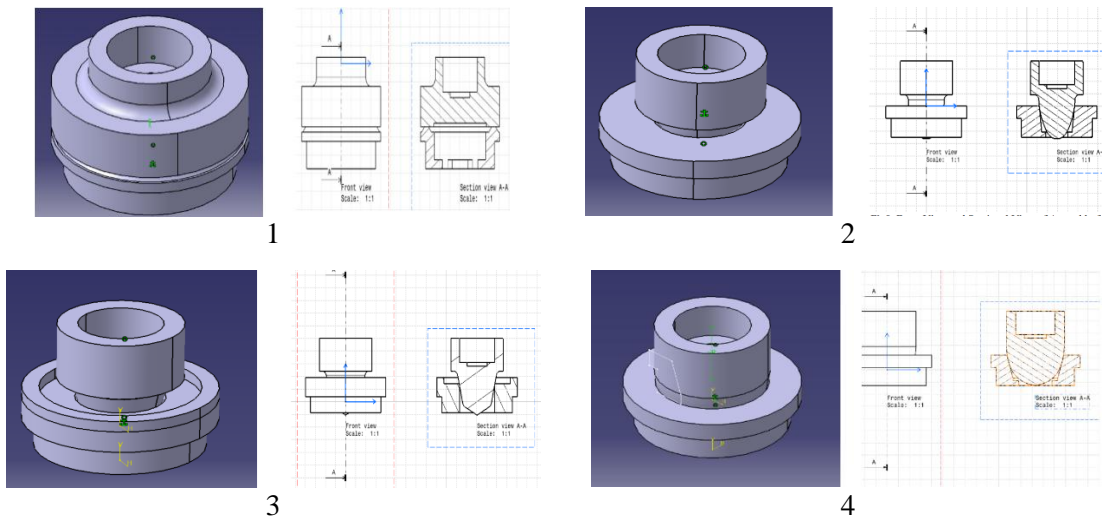
V. J. Sonawane¹, T. J. Rane, A.D. Monde, R.V. Vajarinkar, P. C. Gawade, Design and Analysis of Globe Valve as Control Valve Using CFD Software

Η μελέτη αυτή έγινε το 2015 στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, του κολεγίου Pune στην Ινδία. Ο σκοπός ήταν, σε μία υπάρχουσα globe βαλβίδα γρήγορου ανοίγματος, να μελετηθεί η συμπεριφορά του ρευστού και έπειτα να κατασκευαστούν τρύματα άλλων τύπων, γραμμικό και σταθερού ποσοστού, με σκοπό να βρεθούν οι βέλτιστες συνθήκες ροής, για διάφορες θέσεις ανοίγματος. Το πλέγμα και η επίλυση έγιναν στο ANSYS.

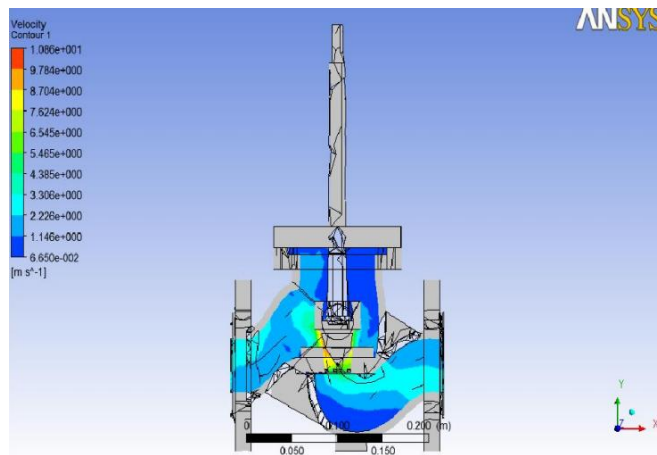


Εικόνα 35. Το πλέγμα επίλυσης

Οι επόμενες εικόνες παρουσιάζουν τα διαφορετικά σείτ τρύματος και έδρασης που εφαρμοστικαν και ελέγχθησαν.

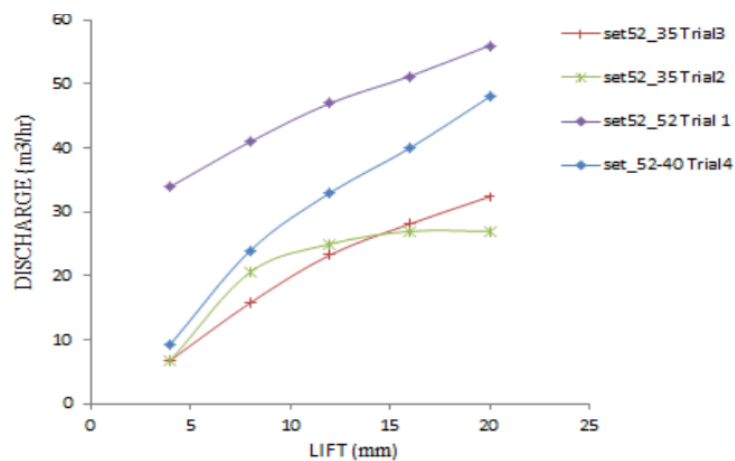


Εικόνα 36. Οι διαφορετικές περιπτώσεις



Εικόνα 37. Η ολοκληρωμένη γεωμετρία

Υστερα από προσομοιώσεις, για όλες τις περιπτώσεις σε όλες τις θέσεις φτιάχτηκαν οι εξής χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας.



Εικόνα 38. Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας

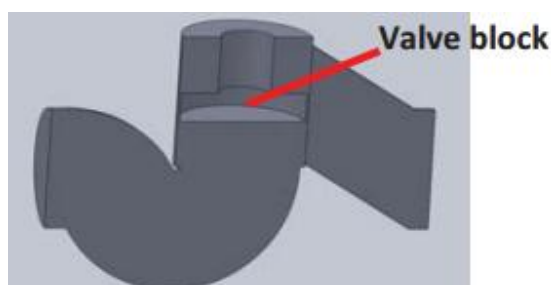
Από τα αποτελέσματα, κατανοήθηκε η συμπεριφορά της βαλβίδας σε κάθε περίπτωση και χαρακτηρίστηκε ως γρήγορου ανοίγματος, σταθερού ποσοστού ή γραμμική. Η χρήση κάθε ενός

από τα παραπάνω τρύματα εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και ως εκ τούτου δεν μπορεί να υπάρξει χαρακτηρισμός κάποιου ως καλύτερο από το άλλο.

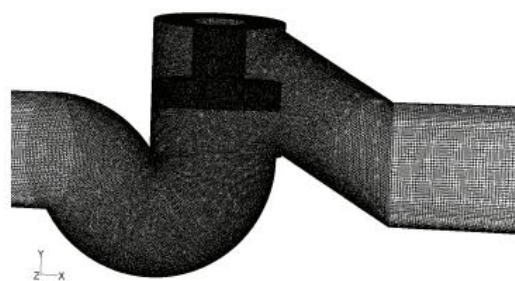
Qin Yang, Zhiguo Zhang, Mingyue Liu, Jing Hu, Numerical Simulation of Fluid Flow inside the Valve

Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε το 2011 στο τμήμα Ναυτικής Τεχνολογίας και Ωκεανολογίας του πανεπιστημίου Huazhong της Κίνας. Ο σκοπός ήταν να μελετηθεί αριθμητικά μια πραγματική δισκοβαλβίδα, να εξαχθούν οι ισοϋψείς πίεσης και ταχύτητας για την πλήρως ανοικτή θέση, και να εξετάσει τις διακυμάνσεις της πίεσης στον ομόρου της βαλβίδας.

Ομοίως αφού κατασκευάστηκε το χωρίο, δημιουργήθηκε το πλέγμα επίλυσης. Το πλέγμα κατασκευάστηκε με το λογισμικό Gambit, μη δομημένο και 1.200.000 κελιών. Οι εικόνες δείχνουν την αρχική γεωμετρία και το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε.



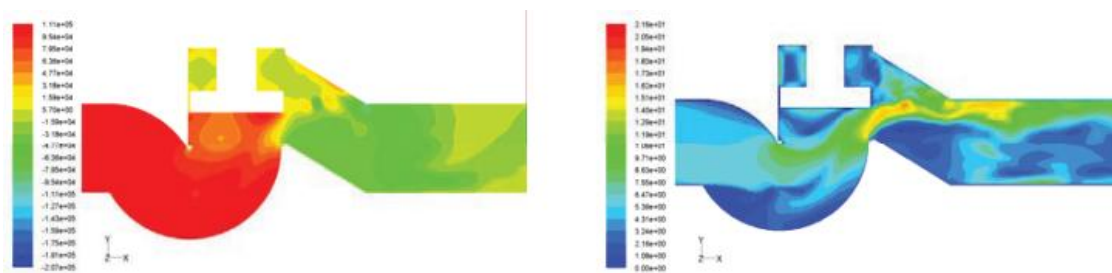
Εικόνα 39. Η γεωμετρία



Εικόνα 40. Το πλέγμα επίλυσης

Για την επίλυση χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας του fluent και η διακριτοποίηση έγινε με δεύτερης τάξης upwind σχήματα. Για την τύρβη εφαρμόστηκε το μοντέλο RNG k-ε, της οικογένειας RANS, ως το πλέον κατάλληλο.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στις επόμενες εικόνες. Η κύρια πτώση πίεσης παρουσιάζεται στο χείλος της βαλβίδας και η ταχύτητα σε εκείνο το σημείο γίνεται περίπου δύομιση φορές μεγαλύτερη της ταχύτητας εισαγωγής.



Εικόνα 41. Ισοϋψείς καμπύλες πίεσης και ταχύτητας

Η ανάλυση για τις ταλαντώσεις της πίεσης στον ομόρου έδειξε ότι, οι χαμηλών συχνοτήτων ταλαντώσεις είναι εκείνες που καταπνούν και βλάπτουν περισσότερο το σύστημα.

Κεφάλαιο 3 Στοιχεία Θεωρίας

3.1 Εξισώσεις διατήρησης

Οι εξισώσεις που διέπουν την κίνηση των ρευστών είναι η μαθηματική διατύπωση των φυσικών νόμων της διατήρησης [21] οι οποίοι παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

3.1.1 Η εξίσωση της συνέχειας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.1)$$

Για ασυμπίεστο ρευστό και ροή σταθερής κατάστασης η πυκνότητα είναι σταθερή και η εξίσωση (2.1) γράφεται:

$$\text{div}(\vec{v}) = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

3.1.2 Η εξίσωση διατήρησης της ορμής σε τρεις διαστάσεις

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ grad } u) \quad (3.4)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{ grad } v) \quad (3.5)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{ grad } w) \quad (3.6)$$

Οι παραπάνω τρεις εξισώσεις, γνωστές και ως εξισώσεις Navier-Stokes, περιγράφουν το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα στο ασυμπίεστο ρευστό. Χρησιμοποιώντας το τελεστή Laplace καθώς και την κλίση του βαθμωτού πεδίου πίεσης (grad) οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να γραφούν και ως μία:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\text{grad } p + \mu \Delta \vec{v} \quad (3.7)$$

Όπου Δ ο τελεστής του Laplace:

$$\Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Και

$$\text{grad}p = \frac{\partial p}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{k} \quad (3.8)$$

Οι εξισώσεις Navier-Stokes για το ασυμπίεστο ρευστό μαζί με την εξίσωση της συνέχειας (2.2) αποτελούν πλήρες σύστημα τεσσάρων εξισώσεων με τέσσερις αγνώστους (u, v, w, p) ανεξάρτητα από την επίλυση της ενεργειακής εξίσωσης.

3.2 Διακριτοποίηση εξισώσεων διατήρησης

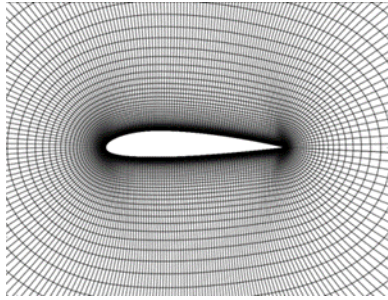
Οι εξισώσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο είναι αρκετά πολύπλοκες και μάλιστα έως και σήμερα δεν έχει βρεθεί ακριβή αναλυτική λύση. Έχουν λυθεί μόνο σε έναν πολύ περιορισμένο αριθμό περιπτώσεων που αφορούν αρκετά απλοποιημένες ροές και ως εκ τούτου στις συνήθεις πρακτικές εφαρμογές παραμένουν ακόμα άλυτες. Είναι λοιπόν ζωτικής σημασίας για τους μηχανικούς να αναπτύξουν μεθόδους που θα λύνουν τις εξισώσεις αυτές αριθμητικά χρησιμοποιώντας τις μεθόδους της αριθμητικής ανάλυσης.

3.2.1 Κατασκευή πλέγματος

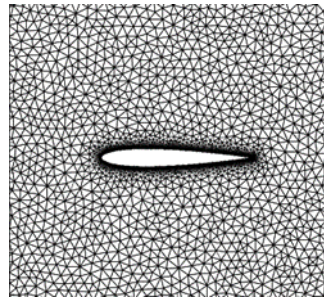
Το πρώτο βήμα για την επίλυση των εξισώσεων είναι η γραμμικοποίηση τους. Αυτό σημαίνει ότι τα διαφορικά των εξισώσεων εκφράζονται σαν πράξεις πεπερασμένων διαφορών σε διακριτά σημεία του χώρου και του χρόνου μετατρέποντας τη διαφορική εξίσωση σε αλγεβρική. Το δεύτερο βήμα είναι η επιλογή εκείνων των σημείων του χώρου πάνω στα οποία θα λυθούν οι εξισώσεις του προβλήματος καθώς και του χρονικού βήματος. Η πρώτη διαδικασία αφορά την κατασκευή του πλέγματος για τη διακριτοποίηση του χώρου επίλυσης, το υπολογιστικό χωρίο. Για να είναι ακριβής η λύση και να παράγει αξιόπιστα και σωστά αποτελέσματα πρέπει το μέγεθος του πλέγματος το οποίο θα κατασκευαστεί καθώς και η επιλογή του χρονικού βήματος να επαρκούν για την ορθή περιγραφή των αλλαγών των φυσικών μεγεθών (u, p, T).

Για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί πολλά λογισμικά προγράμματα τα οποία κατασκευάζουν πλέγματα με αυτά τα χαρακτηριστικά. Όσον αφορά το μέγεθος των κελιών και του χρονικού βήματος, χρειάζεται ιδεατά να είναι το δυνατό μικρότερα. Ωστόσο η κατανάλωση και η υπολογιστική ισχύς που θα χρειαζόταν για την επίλυση θα ήταν ασύμφορη και επομένως γίνεται ένας συμβιβασμός. Στις περιοχές όπου τα μεγέθη παρουσιάζουν απότομες κλίσεις και μεγάλες διακυμάνσεις το πλέγμα γίνεται πολύ πυκνό με πολύ μικρού μεγέθους κελιά. Τέτοιες περιοχές είναι για παράδειγμα τα σημεία κοντά στα τοιχώματα όπου αναπτύσσεται οριακό στρώμα ή περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος.

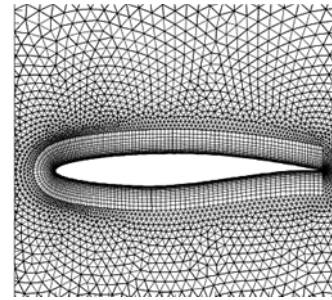
Ένα βασικό χαρακτηριστικό του πλέγματος είναι αν είναι δομημένο ή μη δομημένο. Παραδείγματα δίνονται στις Εικόνες 42, 43, 44. Οι κόμβοι στο δομημένο πλέγμα έχουν ξεκάθαρη δομή και τοποθετούνται επιλεκτικά κατά μήκος των ακμών με στόχο να προσεγγίσουν καλύτερα τις μεταβολές των μεγεθών και να τοποθετηθούν λιγότερα στοιχεία. Τα κελιά είναι τετράγωνα ή εξαέδρα σε 2Δ και 3Δ πλέγματα αντίστοιχα. Τα θετικά είναι ότι επιτυγχάνεται καλύτερη σύγκλιση του προβλήματος και ο υπολογιστικός χρόνος είναι λιγότερος αφού τα κελιά είναι λιγότερα από το μη δομημένο και ο υπολογιστής τα χειρίζεται πιο εύκολα. Το μειονέκτημα είναι ότι σε πολλές περιπτώσεις είναι επίπονη και χρονοβόρα η διαδικασία κατασκευής τους και στο μεγαλύτερο μέρος πρέπει να γίνει χειροκίνητα.



Εικόνα 42. Δομημένο πλέγμα [22]



Εικόνα 43. Μη δομημένο πλέγμα [22]



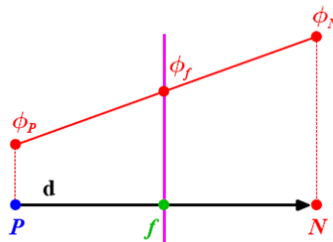
Εικόνα 44. Υβριδικό πλέγμα [22]

Το μη δομημένο πλέγμα από την άλλη είναι ένα πλέγμα που εμφανίζει τυχαία δομή στον τρόπο διάταξης των κόμβων και των κελιών. Για την κατασκευή χρησιμοποιεί τρίγωνα και τετράεδρα σε 2Δ και 3Δ πλέγματα αντίστοιχα. Είναι πιο σύγχρονη τεχνική και υπάρχουν δυο βασικές αρχές για την δημιουργία. Η τεχνική του προελαύνοντος κύματος και η τριγωνοποίηση Delauney. Στην τεχνική του προελαύνοντος κύματος δημιουργούνται σταδιακά τρίγωνα και τετράεδρα ενώ στη τεχνική Delauney δημιουργούνται ταυτόχρονα όλα και ύστερα υποδιαιρούνται. Στα θετικά συγκαταλέγεται η πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία κατασκευής ενώ στα αρνητικά ο μεγαλύτερος υπολογιστικός χρόνος που χρειάζεται η επίλυση.

Τέλος υπάρχει και το υβριδικό πλέγμα το οποίο είναι συνδυασμός των δυο. Χρησιμοποιείται ευρέως και συνδυάζει τα θετικά το δομημένου και του μη δομημένου πλέγματος μαζί. Τέτοιου είδους πλέγμα χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

3.2.2 Αριθμητικά σχήματα

Τα αριθμητικά σχήματα [23] παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επίλυση του προβλήματος. Στην πραγματικότητα είναι ο τρόπος που μετατρέπουμε τις παραγώγους των εξισώσεων σε διαφορές. Στην πιο απλή του μορφή ένα αριθμητικό σχήμα έχει την παρακάτω μορφή:

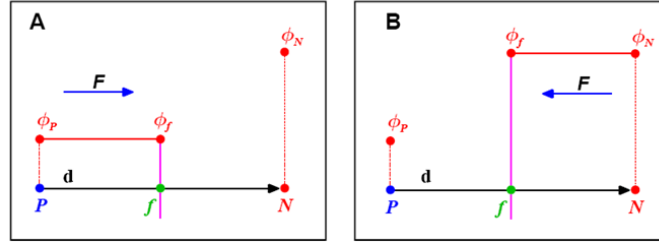


Εικόνα 45. Σχήμα κεντρικών παρεμβολών [23]

$$\varphi_f = f_x \varphi_P + (1 + f_x) \varphi_P \quad (3.9)$$

Το σχήμα αυτού του είδους είναι γνωστό σαν γραμμική παρεμβολή κεντρικών παρεμβολών και είναι δεύτερης τάξης ακρίβειας. Αν και είναι ένα απλό σχήμα πολλές φορές μπορεί να προκαλέσει αστάθεια κατά την λύση.

Ένα άλλο σχήμα παρουσιάζεται παρακάτω:

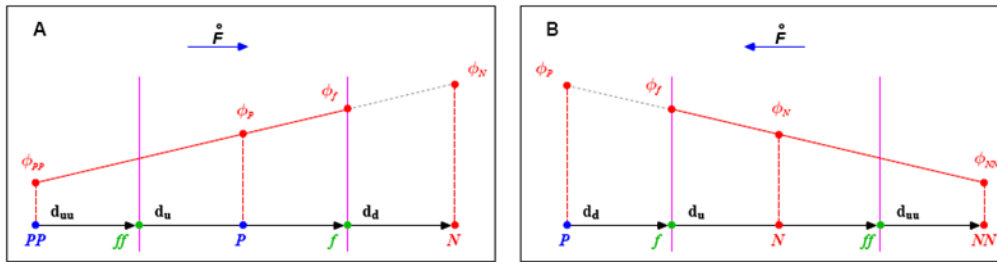


Εικόνα 46. Διαφορά upwind [23]

$$\varphi_f = \begin{cases} \varphi_P & \text{για } F \geq 0 \\ \varphi_N & \text{για } F < 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

Αυτό το σχήμα είναι γνωστό ως διαφορά upwind και είναι πρώτης τάξης ακρίβειας αρκετά σταθερό και δεν προκαλεί ταλαντώσεις, ωστόσο παρουσιάζει έντονη διάχυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Αυτό είναι το σχήμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε από το OpenFOAM για την επίλυση του προβλήματος.

Τέλος υπάρχει και το παρακάτω πιο σύνθετο σχήμα:



Εικόνα 47. Σχήμα SOU [23]

$$\varphi_f = \begin{cases} \varphi_P + \frac{1}{2}(\varphi_P - \varphi_{PP}) = \frac{2}{3}\varphi_P - \frac{1}{2}\varphi_{PP} & \text{για } F \geq 0 \\ \varphi_P + \frac{1}{2}(\varphi_P - \varphi_{PP}) = \frac{2}{3}\varphi_P - \frac{1}{2}\varphi_{PP} & \text{για } F < 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Γνωστό ως δεύτερης τάξης διάφορα upwind (SOU) ή Bean-Warming (BW) και είναι δεύτερης τάξης ακρίβειας. Χρησιμοποιείται σε ροές με ισχυρό τον όρο συναγωγής και όπου υπάρχουν μεγάλες κλίσεις στα μεγέθη. Αυτό το σχήμα χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση της 2Δ ροής. Σε συνθετότερα προβλήματα δυστυχώς είναι ασταθές.

Για να αντιμετωπιστεί η αστάθεια εισάγεται μια συνάρτηση ψ_r που λέγεται περιοριστής και το σχήμα παίρνει την μορφή:

$$\varphi_f = \begin{cases} \varphi_P + \frac{1}{2}\psi_r^-(\varphi_P - \varphi_{PP}) & \text{για } F \geq 0 \\ \varphi_P + \frac{1}{2}\psi_r^+(\varphi_P - \varphi_{PP}) & \text{για } F < 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

Όταν ο περιοριστής εντοπίσει μεγάλες κλίσεις στο πεδίο, αλλάζει και μετατρέπεται τοπικά σε χαμηλότερης ακρίβειας (upwind). Με έναν καλά σχεδιασμένο περιοριστή παίρνουμε ένα δεύτερης ακρίβειας και σταθερό σχήμα. Αυτό είναι το TVD σχήμα. Τέλος υπάρχουν και άλλα

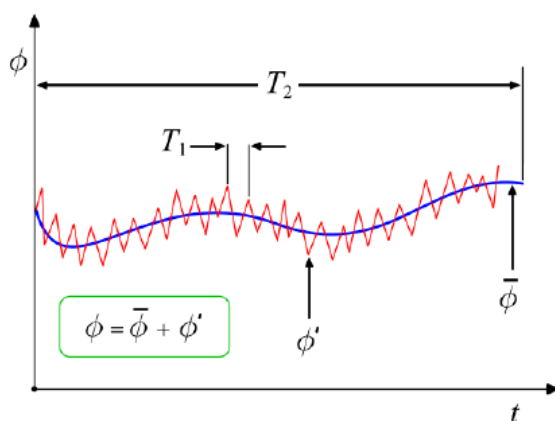
πολύ εξελιγμένα σχήματα. Μερικά από αυτά είναι: Linear Upwind 2^{ης} τάξης, SuperBee-Compressive, Minmod-Diffusive, vanLeer-Smooth

3.3 Η τύρβη και η μοντελοποίηση της

Σε όλες τις ροές οι οποίες υπάρχουν στη φύση και αντιμετωπίζονται στην μηχανολογία, από τις απλές όπως ο όμορος ενός σώματος, μέχρι τις ποιο σύνθετες τρισδιάστατες ροές γίνονται ασταθείς πάνω από ένα ορισμένο αριθμό Reynolds (εξ. 1.1) Για μικρούς αριθμούς Reynolds οι ροές είναι στρωτές. Οι στρωτές ροές περιγράφονται πλήρως από τις εξισώσεις της παραγράφου 3.1. Για μεγάλους αριθμούς Reynolds οι ροές γίνονται τυρβώδεις. Μια ασταθής και απεριοδική κίνηση κατά την οποία τα μεταφερόμενα μεγέθη, ταχύτητα, πίεση, θερμοκρασία, παρουσιάζουν διαταραχές στον χώρο και τον χρόνο (Εικόνα 49). Τη στιγμή εμφάνισης της τύρβης σε μια ροή δημιουργούνται επιπλέον και δίνες. Οι δίνες στην αρχή είναι μεγάλες και παίρνουν ενέργεια από την ροή. Οι μεγάλες αυτές δίνες είναι ασταθείς και σπάνε σε μικρότερες οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε θερμική (Εικόνα 48).



Εικόνα 48. Δίνες της τύρβης [23]



Εικόνα 49. Διαταραχές ενός μεγέθους στον [23]

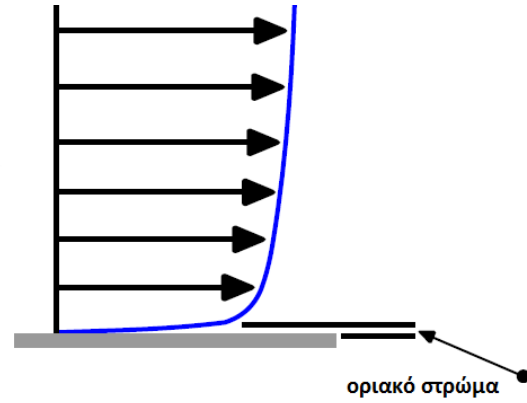
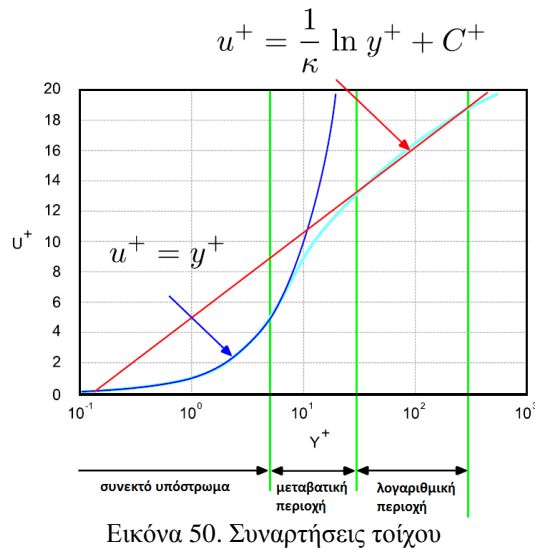
Οι περισσότερες, αν όχι όλες οι ροές πρακτικού μηχανολογικού ενδιαφέροντος είναι τυρβώδεις. Συνεπώς η αντιμετώπιση της τύρβης δεν είναι απλώς θεωρητικού ενδιαφέροντος αλλά και πρακτικού.

3.3.1 Παράγοντες που οφείλεται η τύρβη

Η τύρβη είναι ένα σύνθετο φαινόμενο. Μια από τις αιτίες δημιουργίας είναι τα στερεά τοιχώματα της γεωμετρίας. Όταν μια ροή με μεγάλο αριθμό Reynolds έρθει σε επαφή με ένα τοίχωμα αναπτύσσεται στρωτό οριακό στρώμα. Όσο εξελίσσεται το φαινόμενο οι διατρητικές τάσεις ανάμεσα στο τοίχωμα και το ρευστό μεγαλώνουν και ως εκ τούτου το οριακό στρώμα έχει την τάση να μετατρέπεται σε τυρβώδες οριακό στρώμα. Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο οριακό στρώμα δεν έχουν περιγραφεί πλήρως με ακρίβεια, ωστόσο σε γενικές γραμμές η περιοχή κάτω από το οριακό στρώμα χωρίζεται σε τρεις υποπεριοχές. Βασικός δείκτης είναι το αδιάστατο μήκος y^+ .

- Συνεκτικό υπόστρωμα $0 < y^+ < 5$
- Μεταβατική περιοχή $5 < y^+ < 30$
- Λογαριθμική περιοχή $y^+ > 30$

Η ταχύτητα του ρευστού, κατά την κατακόρυφη έννοια καθώς απομακρυνόμαστε από το τοίχωμα, μεταβάλλεται διαφορετικά σε κάθε υποπεριοχή. (Εικόνα 50).



Από τον νόμο του τοίχου προκύπτει ότι η ταχύτητα αλλάζει ραγδαία μέσα στο οριακό στρώμα (Εικόνα 51). Επομένως είναι σημαντικό κατά την μοντελοποίηση της τύρβης να δοθεί μεγάλη προσοχή κοντά στον τοίχο. Όταν φτιάχνεται ένα πλέγμα χρησιμοποιείται τοπική πύκνωση κοντά στα τοιχώματα της γεωμετρίας. Εδώ υπάρχουν δύο βασικές στρατηγικές που μπορούν να εφαρμοστούν.

Στην πρώτη στρατηγική ως βασικός κανόνας προτείνεται να τοποθετούνται 6-10 κελία σε πάχος που αντιστοιχεί σε $y^+ < 10$. Σε αυτήν την περίπτωση ο επιλυτής λύνει αριθμητικά την ροή σε όλο το οριακό στρώμα ξεκινώντας από το συνεκτικό υπόστρωμα. Αυτή είναι η πιο ακριβής μέθοδος αλλά και η πιο κοστόβορα

Εάν δεν ενδιαφέρει η επίλυση της ροής μέσα στο οριακό στρώμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι συναρτήσεις του τοίχου (wall functions). Οι συναρτήσεις αυτές θα μοντελοποιήσουν την ροή στην περιοχή για $y^+ < 30$. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιήσει πιο αραιά πλέγματα και είναι γρηγορότερη. Ωστόσο αντιμετωπίζει προβλήματα ευστάθειας και σύγκλισης. [23]

3.3.2 Γενική κατηγοριοποίηση μοντέλων

Ο σκοπός λοιπόν των μοντέλων που εισάγονται είναι να κατασκευάσουν νέες ή να ανασκευάσουν τις ήδη υπάρχουσες εξισώσεις ώστε να προβλέπουν την συμπεριφορά της τύρβης και να υπολογίζουν τις μέσες τιμές της ταχύτητας, της πίεσης και της θερμοκρασίας απαλλαγμένες από τις χρονικές διαταραχές.

Η βασική μέθοδος που εφαρμόζεται για να εξαλείψει την ανάγκη υπολογισμού των χρονικών διαταραχών είναι η **Reynolds averaging (RANS)** με τα εξής χαρακτηριστικά:

Reynolds averaging (RANS)

- Μοντελοποιεί όλα τα μεγέθη της τύρβης
- Είναι 2Δ και 3Δ
- Μόνιμες και μη μόνιμες ροές

Ο σκοπός των μοντέλων τύρβης είναι να μοντελοποιήσουν τα φαινόμενα της τύρβης εισάγοντας νέες μεταβλητές και συνεπώς επιπλέον εξισώσεις και να λυθούν παράλληλα με τις Navier-Stokes εξισώσεις του προβλήματος. Η μέθοδος RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη και η πιο διαδεδομένη στην βιομηχανία χάρη στο σχετικά χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Έχουν αναπτυχτεί πολλά μοντέλα με βάση αυτήν την μέθοδο, μιας εξίσωσης, δύο εξισώσεων κ.α. που μοντελοποιούν όλα τα μεγέθη της τύρβης.

Τα πιο διάσημα είναι:

- $k - \varepsilon$ (δύο εξισώσεις)
 - Standard k-ε
 - RNG k-ε
 - Realizable k-ε
- $k - \omega$ (δύο εξισώσεις)
 - Standard k-ω
 - K-ω SST
 - Realizable k-ε
- Reynolds stress models (RSM) (επτά εξισώσεις)
 - Linear Pressure - Strain
 - Quadratic Pressure - Strain
 - Stress - Omega

3.3.3 Το μοντέλο $k - \varepsilon$

Το μοντέλο $k - \varepsilon$ είναι ένα μοντέλο τύπου RANS. Η γενική μέθοδος RANS χωρίζει την μεταφερόμενη ποσότητα σε δυο συνιστώσες. Την μέση τιμή και την διακύμανση στον χρόνο που στην πραγματικότητα είναι οι χρονικές διαταραχές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Έτσι η μεταφερόμενες ποσότητες αναλύονται ως εξής:

$$u(x, t) = \bar{u}(x) + u'(x, t) \quad (3.13)$$

$$p(x, t) = \bar{p}(x) + p'(x, t) \quad (3.14)$$

Αντικαθιστώντας αυτά τα μεγέθη στις αρχικές εξισώσεις Navier-Stokes για την ασυμπίεστη ροή (2.3, 2.7) προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}\bar{\mathbf{u}}) = \frac{-\nabla \bar{p}}{\rho} + \nu \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \tau^R \quad (3.16)$$

Οι νέες αυτές εξισώσεις είναι παρόμοιες με τις μητρικές με τη διαφορά ότι είναι οι μέσες ποσότητες και εμφανίζεται και ο τανυστής του Reynolds τ^R ο οποίος ισούται:

$$\tau^R = -\rho(\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}) = -\begin{pmatrix} \overline{\rho u' u'} & \overline{\rho u' v'} & \overline{\rho u' w'} \\ \overline{\rho v' u'} & \overline{\rho v' v'} & \overline{\rho v' w'} \\ \overline{\rho w' u'} & \overline{\rho w' v'} & \overline{\rho w' w'} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Η προσέγγιση λοιπόν της μεθόδου RANS είναι να υπολογίσει τις παραπάνω τάσεις που εμφανίζονται στον τανυστή γνώστες ως τάσεις Reynolds (Reynolds stresses).

Μια προσέγγιση είναι η εφαρμογή της υπόθεσης Boussinesq. Κάνοντας χρήση της υπόθεσης Boussinesq ο τανυστής πέρνει την μορφή:

$$\tau^R = \mu_T [\nabla \bar{\mathbf{u}} + \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}^T] - \frac{2}{3} \rho \kappa \mathbf{I} \quad (3.18)$$

Όπου

μ_T : τυρβώδης συνεκτικότητα

$\kappa = \frac{\overline{\mathbf{u}^2 v^2}}{2} =$ τυρβώδης κινητική ενέργεια

Τελικά αυτό που πρέπει να υπολογιστεί είναι ο συντελεστής μ_T ο οποίος δεν είναι μια φυσική σταθερά του ρευστού αλλά ένα λογιστικό μέγεθος το οποίο εξαρτάτε από το πεδίο ροής και αλλάζει από σημείο σε σημείο.

Το μοντέλο $k - \varepsilon$ ορίζει $\mu_T = \rho C_D \frac{\kappa^2}{\varepsilon}$. ο συντελεστής κ εκφράζει την τυρβώδη κινητική ενέργεια που παράγεται ενώ το ε εκφράζει την ενέργεια που καταστρέφεται σε θερμότητα. Για να κλείσει το σύστημα έχουμε τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\rho \left(u \frac{\partial \kappa}{\partial x} + v \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial y} \right) + \mu_T \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \rho \varepsilon \quad (3.19)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + 1.45 \rho \kappa \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - 0.18 \rho \frac{\varepsilon}{\kappa} \quad (3.20)$$

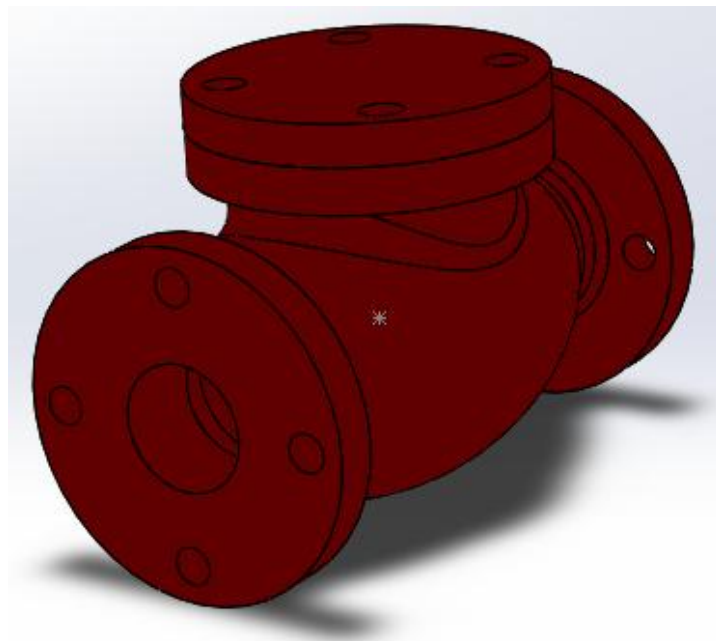
Κεφάλαιο 4 Παρουσίαση γεωμετρίας

4.1 Η αρχική γεωμετρία

Η γεωμετρία η οποία αναλύεται είναι μια δισκοβαλβίδα ονομαστικής διαμέτρου $\Phi 60$ (εικόνα 52). Όπως φαίνεται από την φωτογραφία πρόκειται για μια παλιά βαλβίδα. Για την ψηφιακή αποτύπωση της γεωμετρίας (Εικόνα 53) της βαλβίδας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Solidworks. Όπως είναι φανερό δόθηκε έμφαση στην εσωτερική γεωμετρία της βαλβίδας και όχι στον υπόλοιπο μηχανισμό αφού αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η περιοχή της ροής

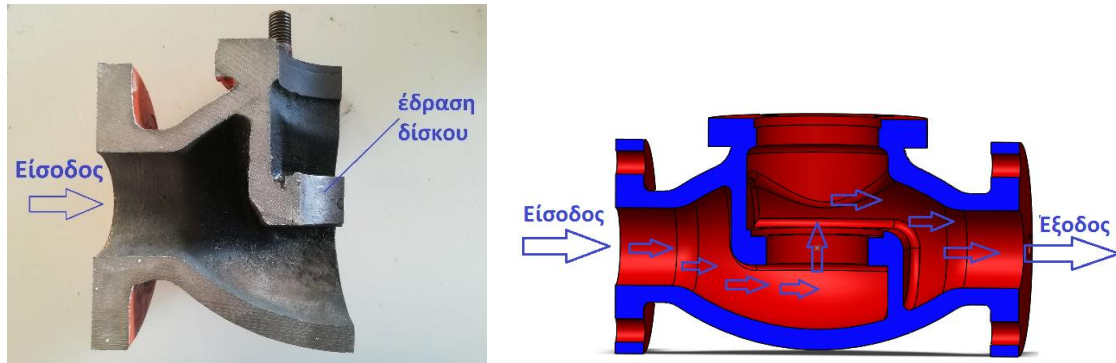


Εικόνα 52. Η προς μελέτη βαλβίδα

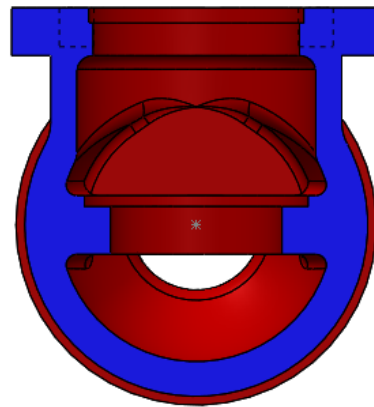


Εικόνα 53. Το μοντέλο της βαλβίδας

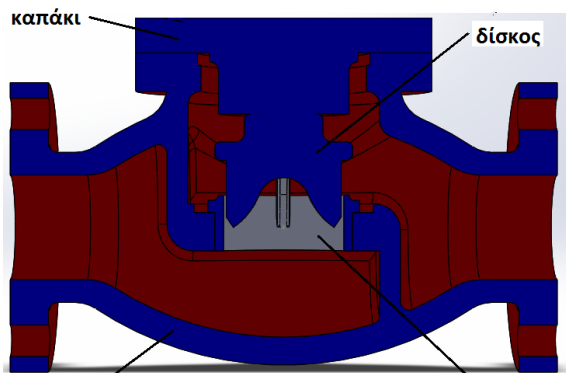
Στις Εικόνες 54, 55, 56, 57, παρουσιάζονται οι διάφορες τομές για να γίνει κατανοητή η εσωτερική γεωμετρία της βαλβίδας. Η διάμετρος στην είσοδο είναι 60 mm, το μήκος της βαλβίδας είναι 315 mm και η διάμετρος του δαχτυλιδιού της έδρασης είναι 34,5 mm. Αναλυτικές διαστάσεις των εξαρτημάτων και του συναρμολογήματος παρατίθενται σε παράρτημα στο τέλος της εργασίας.



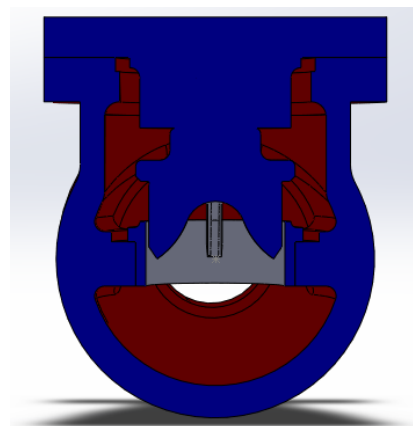
Εικόνα 54. Τομή του σώματος της βαλβίδας



Εικόνα 55. Εγκάρσια τομή



Εικόνα 56. Τομή του συναρμολογήματος



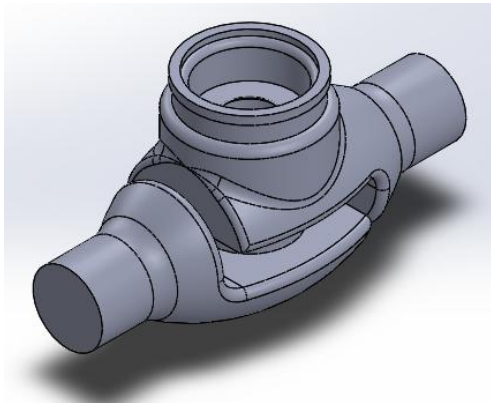
Εικόνα 57. Εγκάρσια τομή

4.2 Το υπολογιστικό χωρίο

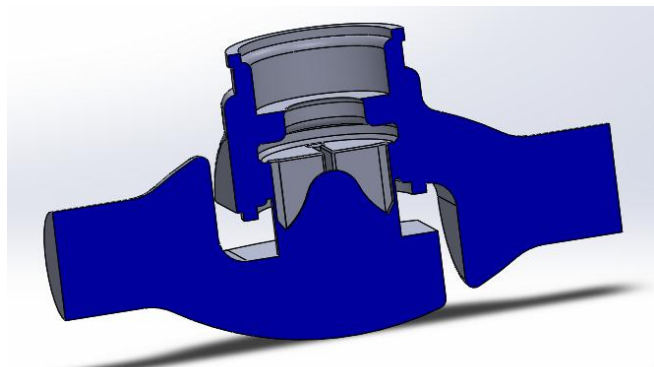
Το επόμενο βήμα είναι πάρουμε τη γεωμετρία μέσα στην οποία θα λυθεί η ροή. Να εξαχθεί δηλαδή το ‘αρνητικό’ αυτής της γεωμετρίας. Αυτό είναι δυνατόν να γίνει στο Solidworks με την εξής διαδικασία:

- Ενώνουμε όλα τα εξαρτήματα που συγκροτούν τη βαλβίδα σε ένα συναρμολόγημα και το αποθηκεύουμε ως ένα κομμάτι με την εντολή *save as part*.
- Μετατρέπουμε το ένα κομμάτι με πολλά σώματα σε ένα κομμάτι με ένα σώμα με την εντολή *combine*.
- Σε ένα άλλο μεγαλύτερο σώμα, κύλινδρο εισάγουμε το σώμα της βαλβίδας. Από τον κύλινδρο αφαιρούμε το σώμα της βαλβίδας σαν να είναι πράξεις συνόλων με την εντολή *subtract*.

Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι το υπολογιστικό χωρίο το οποίο φαίνεται στις παρακάτω Εικόνες 58, 59.

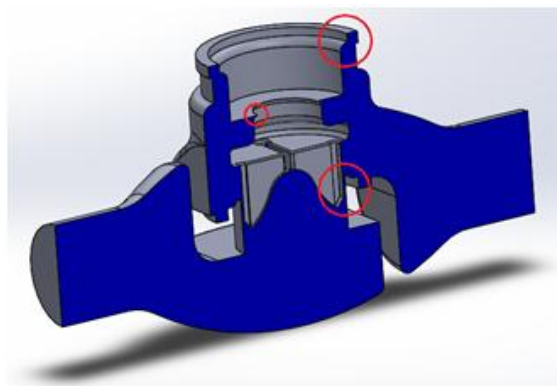


Εικόνα 58. Υπολογιστικό χωρίο

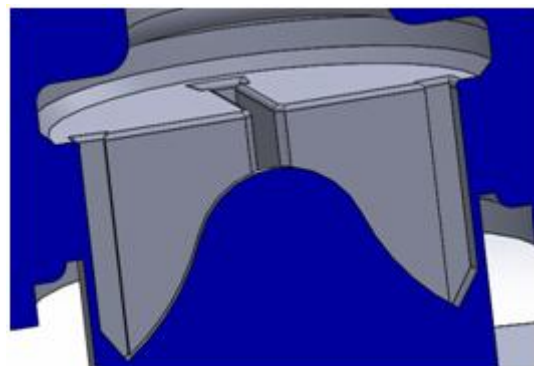


Εικόνα 59. Τομή υπολογιστικού χωρίου

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι συνήθης πρακτική στο CFD να απλοποιείται η γεωμετρία όσο το δυνατό με σκοπό την μείωση του υπολογιστικού κόστους, την αξιοπιστία και την ταχύτερη σύγκληση του κώδικα. Στην υπό εξέταση περίπτωση η γεωμετρία απλοποιήθηκε στα παρακάτω σημεία (Εικόνα 60):



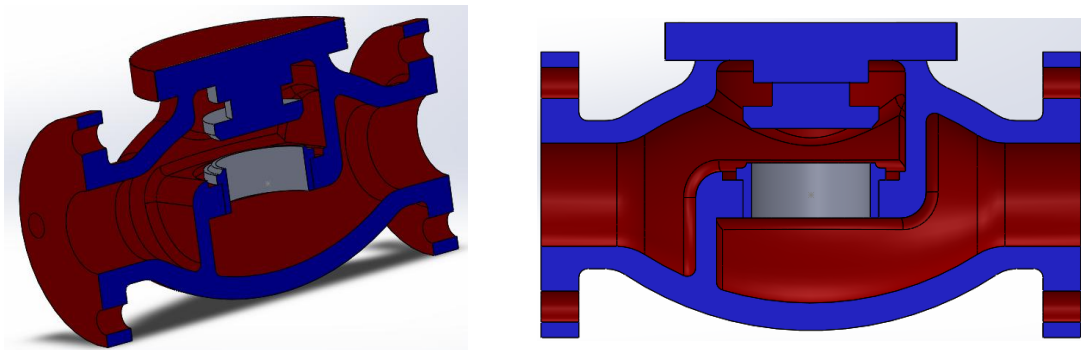
Εικόνα 60. Οι λεπτομέρειες που απλοποιήθηκαν



Εικόνα 61. Λεπτομέρεια των οδηγών περυγίων

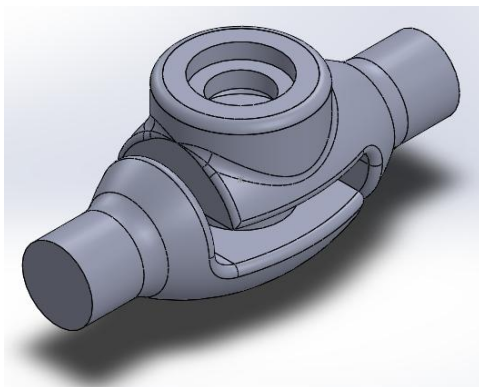
- Οι γωνίες που προκύπτουν στο πάνω μέρος της διαμόρφωσης μπορούν να απλοποιηθούν καθώς σε αυτήν την περιοχή δεν παρατηρείται σημαντική κίνηση ρευστού ή πτώση πίεσης.
- Κάποιες οξείες γωνίες έγιναν ορθές καθώς σε αυτά τα σημεία ο κώδικας του πλέγματος παρουσίαζε σημαντική αδυναμία και η εξάλειψή τους είχε μηδαμινή επίδραση στα αποτελέσματα.
- Επίσης τα οδηγία πτερύγια απλοποιήθηκαν χάρι απλότητας. Η επιφάνεια ανάμεσα στα πτερύγια και το τοίχωμα είναι πολύ μικρή, 1-2 mm οπότε η δημιουργία πλέγματος σε εκείνο το σημείο είναι προβληματική (εικόνα 61).

Ύστερα από την απλοποίηση προκύπτει η γεωμετρία της Εικόνας 62.

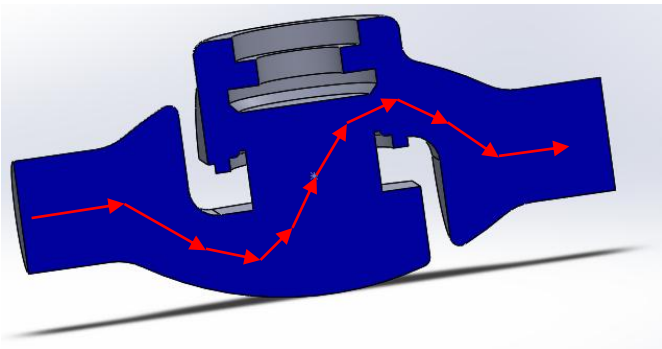


Εικόνα 62. Η απλοποιημένη γεωμετρία

Και το τελικό υπολογιστικό χωρίο είναι αυτο που παρουσιάζουν οι Εικόνες 63, 64. Φαίνεται πόσο πιο απλοποιημένο είναι σε σχέση με το αρχικό, αλλά και πόσο έχει διατηρηθεί η βασική γεωμετρία. Με κόκκινα βέλη σημειώνεται η πορεία του ρευστού.

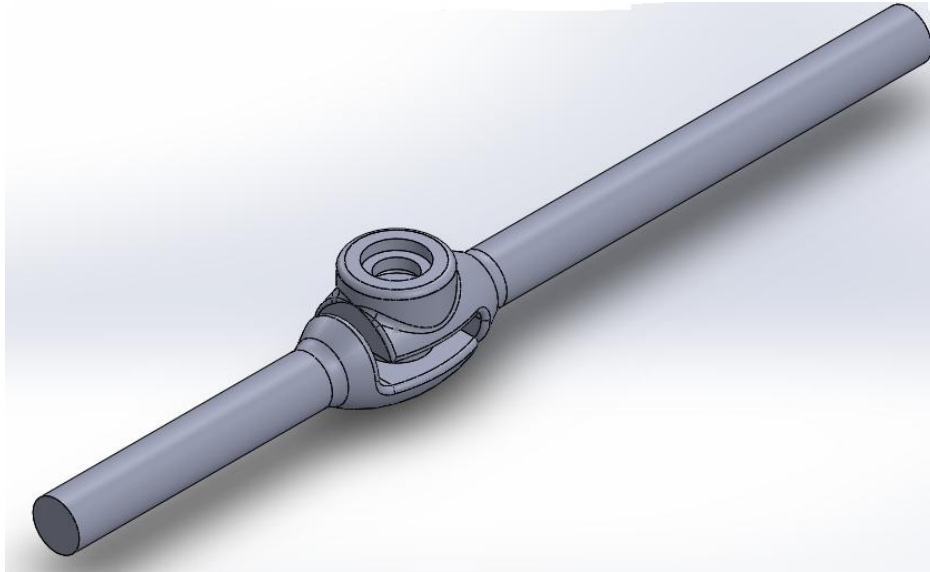


Εικόνα 63. Απλοποιημέν χωρίο



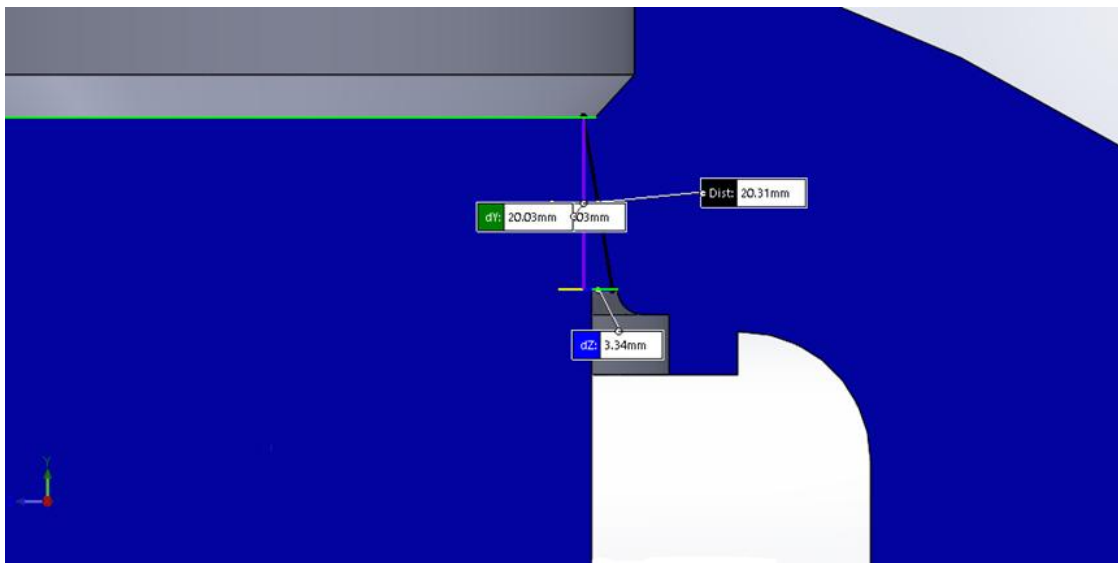
Εικόνα 64. Τομή απλοποιημένου χωρίου

Για να γίνει το χωρίο κατάλληλο για επίλυση της ροής πρέπει να προεκταθούν τα άκρα των σωλήνων πέντε φορές την διάμετρο του σωλήνα πριν την είσοδο και δεκαπέντε φορές μετά την έξοδο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουμε α)ομοιόμορφο προφίλ ταχυτήτων στην είσοδο την βαλβίδας και β) στην έξοδο έχει προλάβει να αναπτυχθεί πλήρως η ροή ώστε να πάρουμε τα σωστά αποτελέσματα για την πτώση της πίεσης και του προφίλ των ταχυτήτων. Με αυτές τις τροποποιήσεις το υπολογιστικό χωρίο παίρνει τελικά την παρακάτω μορφή της Εικόνας 65.



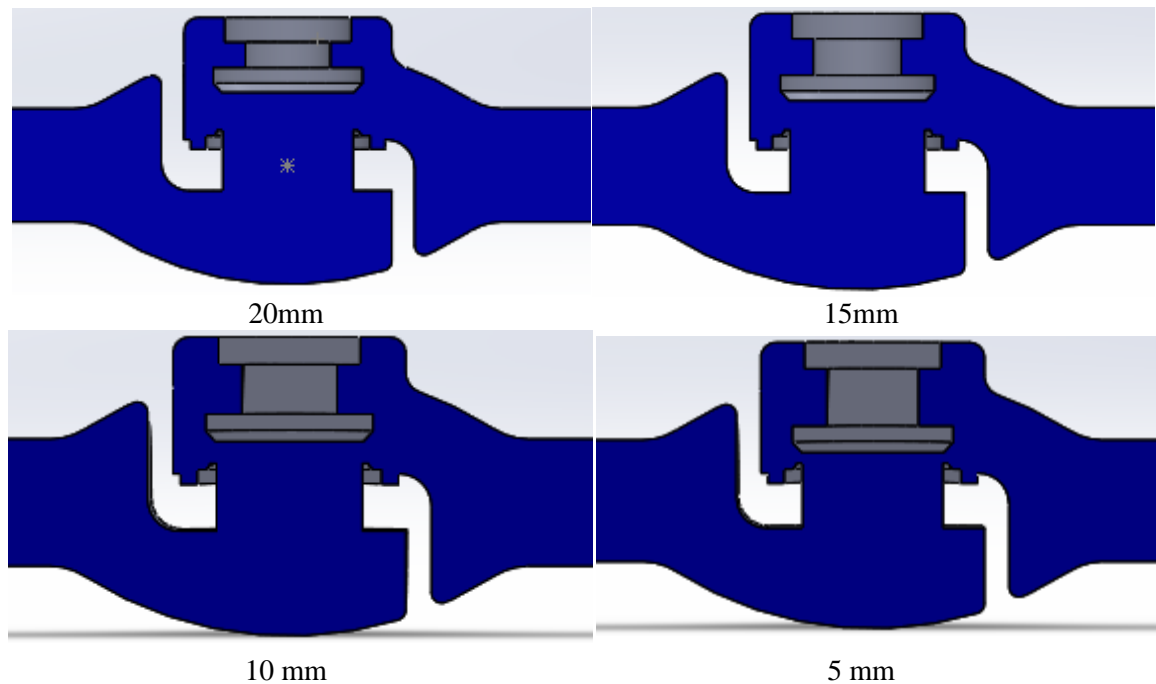
Εικόνα 65. Ολοκληρωμένο υπολογιστικό χωρίο

Οι διαμορφώσεις κοντά στην έδραση αποτυπώθηκαν όπως ήταν και με μεγάλη έμφαση στις ακριβείς διαστάσεις, γιατί είναι περιοχές που επηρεάζουν άμεσα την εξέλιξη του φαινομένου και πιθανές περιοχές σπηλαίωσης, όπως θα φανεί σε επόμενο κεφάλαιο. (Εικόνα 66)



Εικόνα 66. Η διαμόρφωση του ανοίγματος

Επειδή η εργασία αφορά μια δισκοβαλβίδα (globe valve), η μελέτη έγινε σε διαφορές θέσεις του εμβόλου, από την πλήρως ανοικτή έως λίγο πριν την πλήρως κλειστή. Η διαδρομή είναι 20 mm οπότε μελετήθηκαν τέσσερις θέσεις. Ξεκινώντας από την πλήρως ανοικτή και κατεβαίνοντας ανά 5mm (Εικόνα 67).



Εικόνα 67. Θέσεις υπολογισμού

4.3 2Δ Πλέγματα

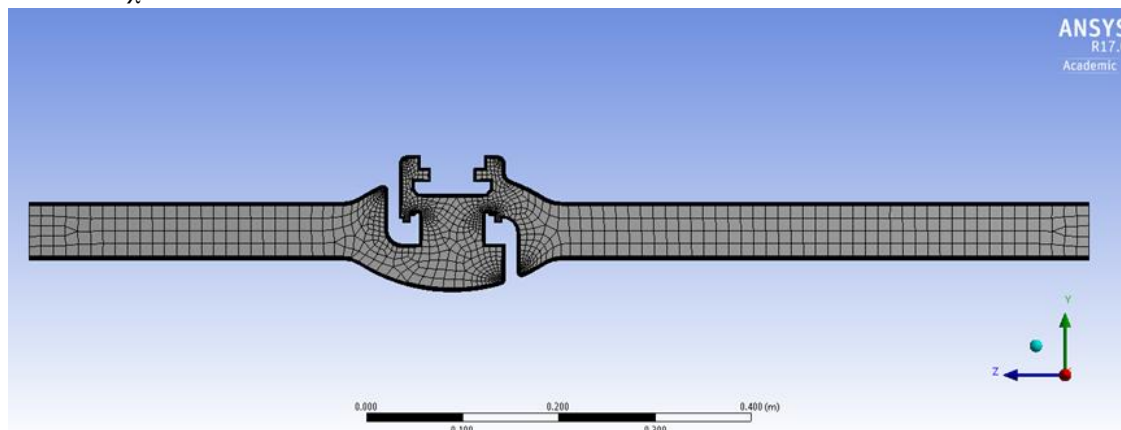
Τώρα που έχουμε στην διάθεση μας το υπολογιστικό χωρίο σειρά έχει η κατασκευή του πλέγματος. Το πλέγμα κατασκευάστηκε στο εργαλείο του ANSYS τον Mesh. Αρχικά φτιαχτήκαν 2Δ πλέγματα πάνω στην εγκάρσια τομή του χωρίου. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή τους διότι ένα καλό πλέγμα οδηγεί σε ακριβή και συμπαγή λύση χωρίς αυτή να ταλαντώνεται. Το πλέγμα που κατασκευάστηκε είναι μη δομημένο εκτός από την περιοχή τοπικής πύκνωσης κοντά στον τοίχο όπου είναι δομημένο. Ωστόσο ο αλγόριθμος που εφτιαξε το πλέγμα προσπάθησε να το κάνει όσο πιο δομημένο γίνεται. Κάτι που βοηθάει στην επίλυση ύστερα.

Τοπικά κοντά στο τοίχωμα έγινε πύκνωση των κελιών για να μπορέσει ο κώδικας επίλυσης να εντοπίσει τις πολύ μεγάλες κλίσεις των μεγεθών πράγμα που είναι απαραίτητο για την σύγκλιση. Με την εντολή του OpenFOAM ‘simpleFoam –postProcess –func yPlys’ γίνεται μια πρώτη εκτίμηση του y^+ . Με δοκιμές στα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν το y^+ παρέμεινε πάνω από 30 και στον χώρο αυτό τοποθετήθηκαν περίπου 10-15 κελιά ανάλογα σε κάθε πλέγμα. Με την δεδομένη τιμή του y^+ βρισκόμαστε στην λογαριθμική περιοχή του οριακού στρώματος. Οπότε χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις του τοίχου οι λεγόμενες wall functions που μοντελοποίησαν την ενδιάμεση περιοχή, το συνεκτικό υπόστρωμα και την μεταβατική περιοχή. Δεν υπήρξε ανάγκη για χαμηλότερο y^+ στην 2Δ ανάλυση μιας και ο κώδικας συνέκλινε ικανοποιητικά.

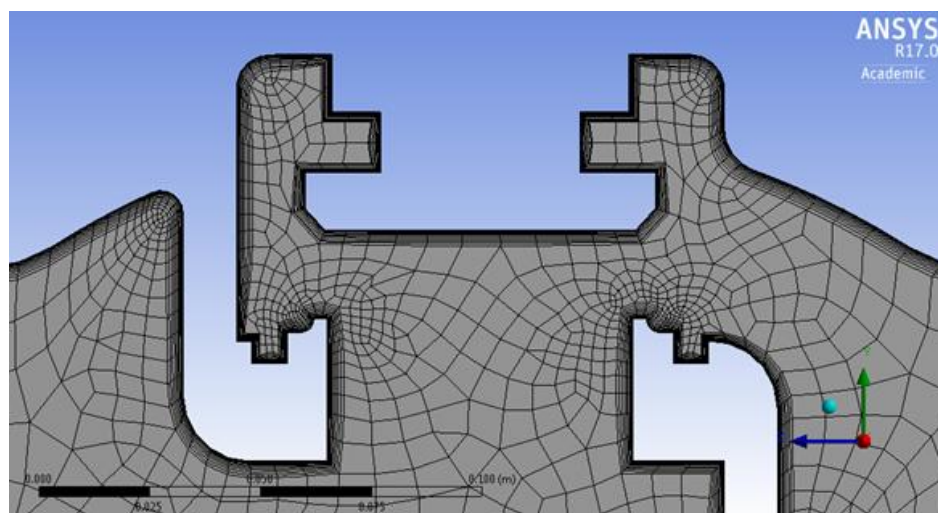
Για να αποφασιστεί το μέγεθος του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί σε όλες τις θέσεις, έγινε ανεξαρτησία αυτού στην πλήρως ανοικτή θέση. Κατασκευάστηκαν πλέγματα από 5.000 κελιά έως 90.000 κελιά. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται και συγκρίνονται, το πρώτο με 5.000 κελιά, αυτό με 40.000 κελιά, και το τελευταίο με 90.000 κελιά.

4.3.1 Πλέγματα στην πλήρως ανοικτή θέση των 20 mm.

5.000 στοιχεία



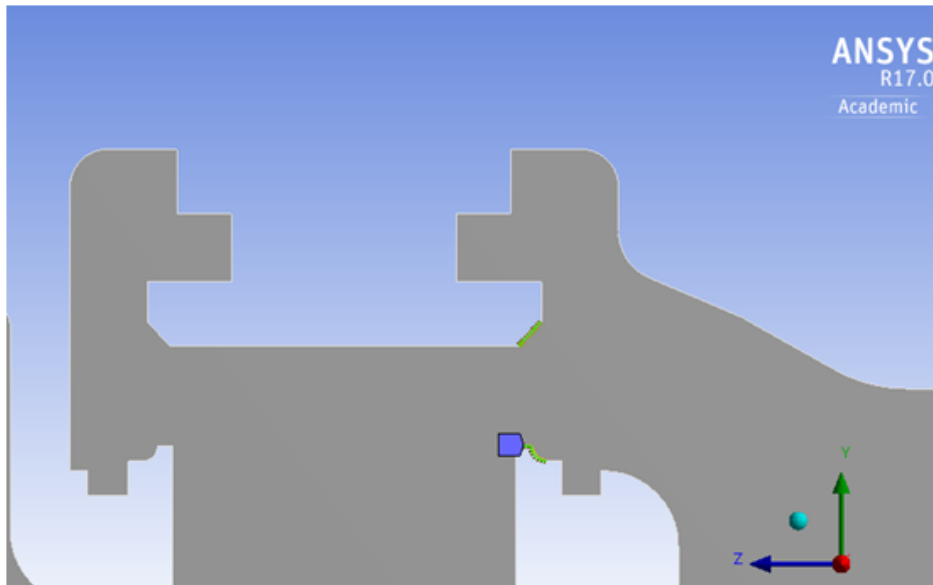
Εικόνα 68. Πλέγμα 5.000 στοιχείων



Εικόνα 69. Λεπτομέρεια πλέγματος 5.000

Αρχικά παρατηρείται η τοπική πύκνωση στην περιοχή του οριακού στρώματος. Τα κελιά έχουν γίνει πολύ πυκνά γιατί σε αυτή την περιοχή τα μεγέθη αλλάζουν απότομα.

Επίσης, παρατηρείται ότι το πλέγμα, στη ολότητά του, είναι αρκετά αραιό. Πρέπει λοιπόν να πυκνώσει και να προκύψει ένα πλέγμα περισσοτέρων κελιών και μικρότερων διαστάσεων. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στις περιοχές στο εσωτερικό της βαλβίδας, διότι σε αυτά τα σημεία ιδανικά πρέπει το μέγεθος των κελιών να πολύ μικρό, για να μπορέσει ο κώδικας να αντιληφθεί τις απότομες μεταβολές των φαινομένων. Προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω απαιτήσεις και χωρίς να αυξηθεί δραματικά ο αριθμός των κελιών, α) μειώνεται γενικά το μέγεθος των κελιών σε όλο το πλέγμα και β) στα πλέγματα από 40.000 στοιχεία και πάνω, εισάγεται επιπλέον τοπική πύκνωση, μόνο στην περιοχή στο χείλος της βαλβίδας. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι περιοχές των τοιχωμάτων όπου έγινε τοπική πύκνωση. Οι περιοχές αυτές έχουν σημειωθεί με πράσινο χρώμα.

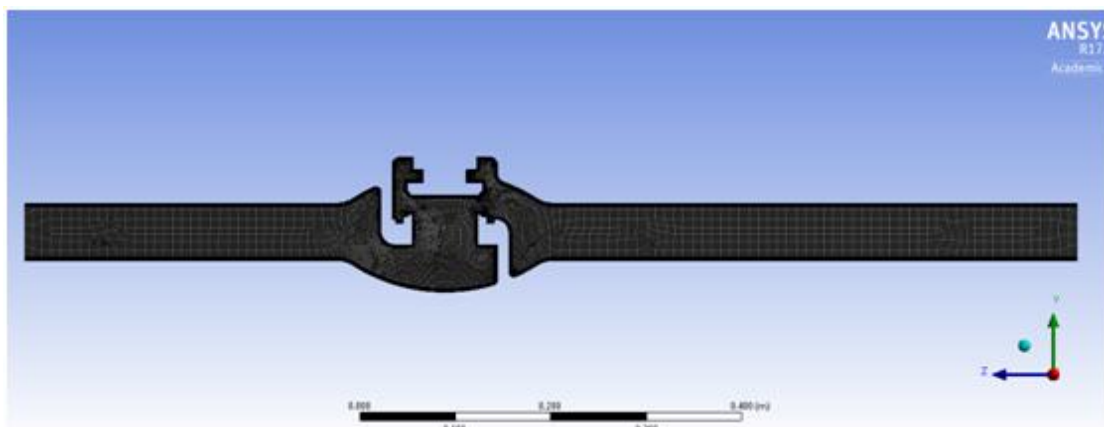


Εικόνα 70. Περιοχές τοπικής πυκνώσεως με πράσινο χρώμα

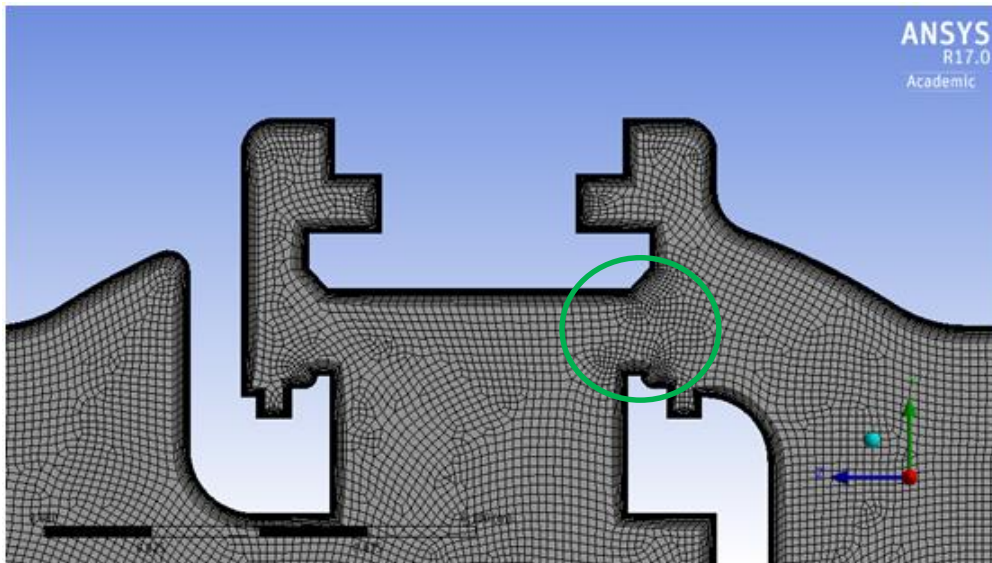
Φυσικά κατά την πυκνώση δόθηκε προσοχή να μην διαταραχθούν τα χαρακτηριστικά των κελιών τα οποία χαρακτηρίζουν την γενικότερη ποιότητα του πλέγματος. Ο δείκτης orthogonal quality που περιγράφει την απόκλιση ενός κελιού από το πλήρες ορθογώνιο περιορίζεται σε τιμές άνω του 0,08 στα περισσότερα κελιά και είναι υπεύθυνος για την διάχυση της αριθμητικής λύσης. Ο δείκτης skewness είναι ένας τρόπος ποσοτικοποίησης της στρέβλωσης των κελιών και κρατήθηκε κάτω από 0,97 στα περισσότερα κελιά του αριθμητικού χωρίου. Προσθέτει σφάλμα λόγω αριθμητικής διάχυσης στα αποτελέσματα και ταλαντώνει την λύση. Ο δείκτης aspect ratio περιγράφει τον λόγο των δυο πλευρών των ορθογώνιων στοιχείων. Αποκλίσεις αυτών των δεικτών από τα ανεκτά επίπεδα μπορούν να αποκλίνουν τη λύση και η πυκνώση να μην έχει καμία αξία ή χειρότερα να επιφέρει αντίθετα αποτελέσματα.

40.000 στοιχεία

Το επόμενο πλέγμα είναι το πλέγμα των 40.000 στοιχείων. Γίνεται αμέσως αντιληπτό πόσο πυκνότερο είναι σε σχέση με το προηγούμενο και πόσο μικρότερα είναι τα κελιά.



Εικόνα 71. Πλέγμα 40.000 στοιχείων

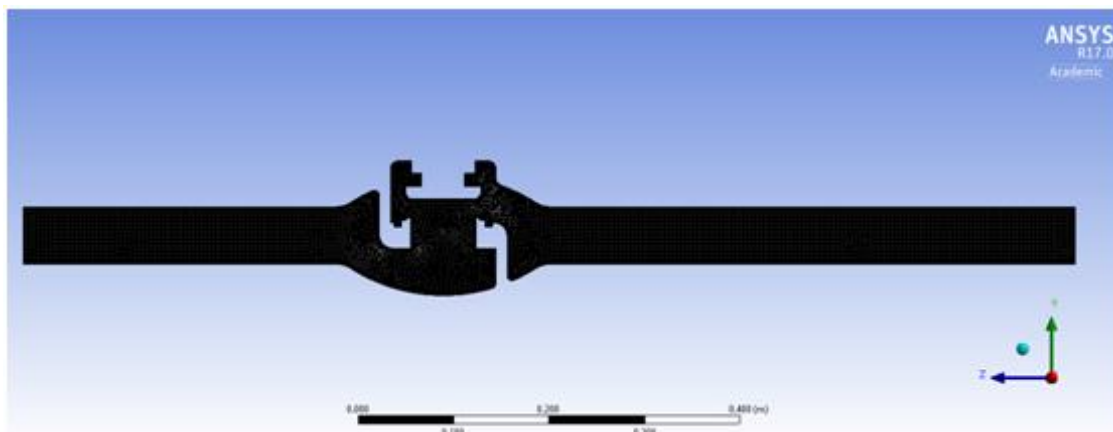


Εικόνα 72. Λεπτομέρεια πλέγματος 40.000 στοιχείων

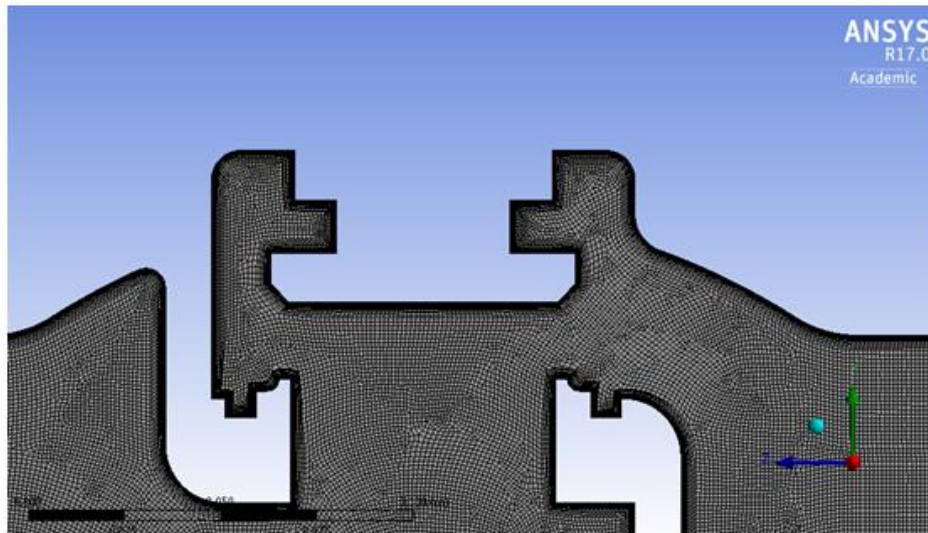
Από την λεπτομέρεια της Εικόνας 72 γίνεται αντιληπτή η τοπική πύκνωση και η επίδραση που έχει στο πλέγμα. Τα κελιά στον πράσινο κύκλο έχουν γενικά μικρότερο μέγεθος απο οτι τα υπόλοιπα κελιά του πλέγματος. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ακριβέστερη λύση του προβλήματος σε γενικά μικρότερο και ελαφρύτερο πλέγμα και σε λιγότερο χρόνο.

90.000 στοιχεία

Το επόμενο πλέγμα είναι το πλέγμα των 90.000 στοιχείων. Πρόκειται για ένα πάρα πολύ πυκνό πλέγμα. Τόση μεγάλη πύκνωση, ειδικά στην περιοχή των σωλήνων δεν είναι απαραίτητη επειδή η κλίση των μεγεθών της ροής είναι μικρότερη, επομένως η ακρίβεια των αποτελεσμάτων δεν απαιτεί πολύ πυκνό πλέγμα. Αντιθέτως αυξάνει το υπολογιστικό κόστος χωρίς λόγο.

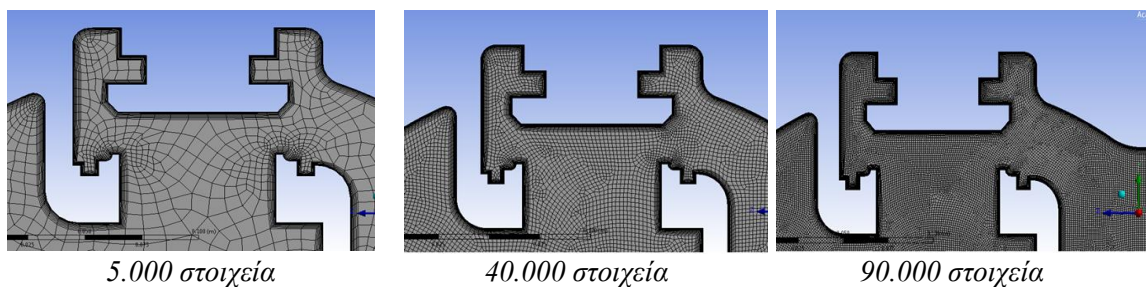


Εικόνα 73. Πλέγμα 90.000 στοιχείων



Εικόνα 74. Λεπτομέρεια πλέγματος 40.000 στοιχείων

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 75) παρουσιάζονται συγκριτικά και τα τρία πλέγματα, στην κρίσιμη περιοχή της βαλβίδας και μπορούν να γίνουν σαφείς οι διαφορές μεταξύ τους.



Εικόνα 75. Συγκριτική παρουσίαση 2Δ πλεγμάτων

Ο επόμενος πίνακας περιέχει συγκεντρωτικά τα στοιχεία και τους δείκτες ποιότητας κάθε πλέγματος.

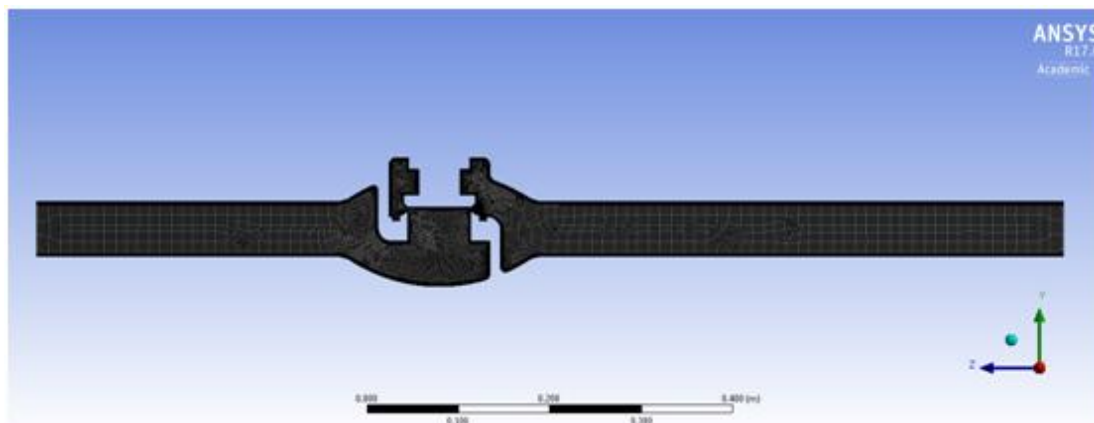
Πίνακας 1. Στοιχεία πλεγμάτων

αριθμός στοιχείων	5.000	40.000	90.000
Μέγεθος κελιών*	0,013 m	0.0019 m	0.0011 m
Μέγεθος κελιών στην τοπική πύκνωση (χείλος της βαλβίδας)	-	0.0007	0.0007
Πάχος περιοχής οριακού στρώματος	0.004	0,004 m	0,004 m
Αρ. κελιών στην περιοχή του οριακού στρώματος	10	15	15
Ρυθμός πύκνωσης	1,2	1,2	1,2
Max skewness	0,08593	0,8376	0,8477
Min orthogonal quality	0,16825	0,2566	0,2585
Max aspect ratio	106,5	73,3	47,2

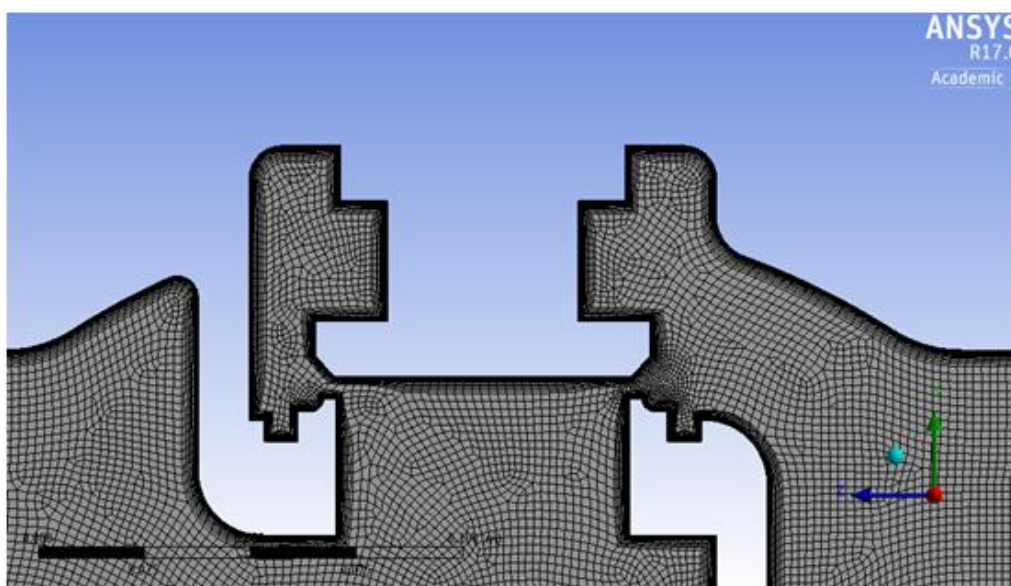
4.3.2 Πλέγμα στην θέση των 5 mm

Από τη μελέτη ανεξαρτησίας των αριθμητικών αποτελεσμάτων, από το πλέγμα, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο Κεφάλαιο 5, προέκυψε ότι το πλέγμα των 40.000 κελιών επιτυγχάνει ικανοποιητική ακρίβεια αποτελεσμάτων. Παρακάτω παρουσιάζεται το πλέγμα των 40.000 κελιών στην άλλη ακραία θέση του εμβόλου (βαλβίδα σχεδόν κλειστή).

40.000 στοιχεία



Εικόνα 76. Πλέγμα 40.000 στοιχείων στην σχεδόν κλειστή θέση



Εικόνα 77. Λεπτομέρεια πλέγματος 40.000 στοιχείων

Από την λεπτομέρεια της Εικόνας 77 φαίνεται η σημασία των κελιών στο χείλος της βαλβίδας. Επειδή το άνοιγμα είναι πολύ μικρό συμβαίνουν πολλά σύνθετα φαινόμενα στην ροή οπότε χρειάζεται πολύ λεπτό πλέγμα για να μπορέσει η λύση να οδηγήσει σε σωστά αποτελέσματα.

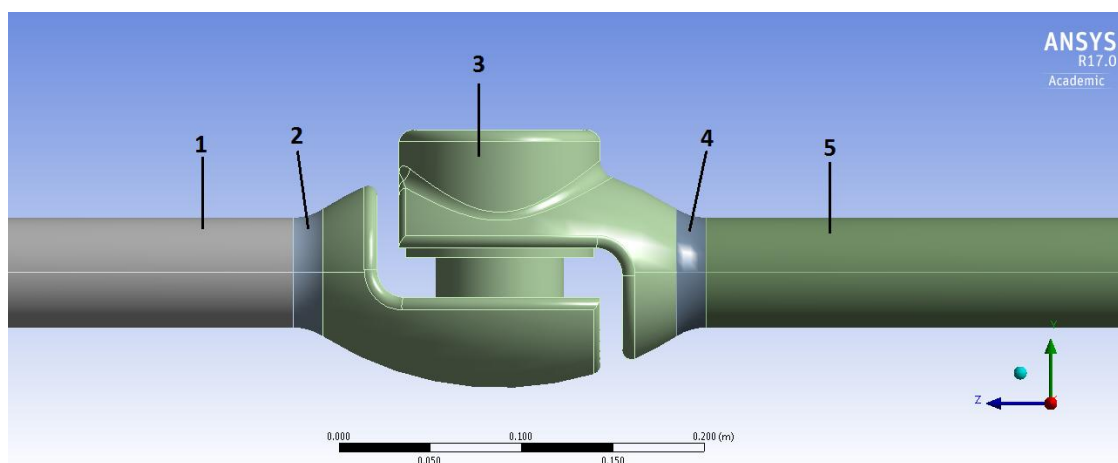
Ο επόμενος πίνακας περιέχει συνοπτικά τα χαρακτηριστικά και τα στοιχεία ποιότητας του παραπάνω πλέγματος.

Πίνακας 2. Στοιχεία πλέγματος 40.000 κελιών στην σχεδόν κλειστή θέση

αριθμός στοιχείων	40.000
Μέγεθος κελιών	0,0019m
Μέγεθος κελιών στην τοπική πύκνωση (χειλός της βαλβίδας)	0.0005 m
Πάχος περιοχής οριακού στρώματος	0,004
Αρ. κελιών στην περιοχή του οριακού στρώματος	15
Ρυθμός πύκνωσης	1,2
Max skewness	0,8329
Min orthogonal quality	0,2688
Max aspect ratio	80,0

4.4 Τρισδιάστατα Πλέγματα

Για την κατασκευή του τρισδιάστατου πλέγματος ακολουθήθηκε η εξής βασική αρχή. Έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί δομημένο πλέγμα όσο όπου αυτό είναι δυνατόν. Για τον σκοπό αυτόν το υπολογιστικό χωρίο διαιρέθηκε σε πέντε επιμέρους τμήματα (εικόνα 78). Στο τμήμα που είναι οι σωλήνες και το χειλός αυτών (1, 2, 4, 5) κατασκευάστηκε δομημένο πλέγμα ενώ στο κομμάτι που είναι η διαμόρφωση της βαλβίδας (3) δημιουργήθηκε μη δομημένο. Επίσης δομημένο πλέγμα κατασκευάστηκε και στην τοπική πύκνωση στον τοίχο. Το αποτέλεσμα που προέκυψε είναι ένα υβριδικό πλέγμα. Με αυτήν τη διαδικασία στις περιοχές του δομημένου πλέγματος μειώθηκε σημαντικά ο αριθμός των κελιών. Τα αποτελέσματα είναι: λιγότερος υπολογιστικός χρόνος γρηγορότερη σύγκλιση και καλύτερη ευστάθεια.



Εικόνα 78. Το 3Δ υπολογιστικό χωρίο

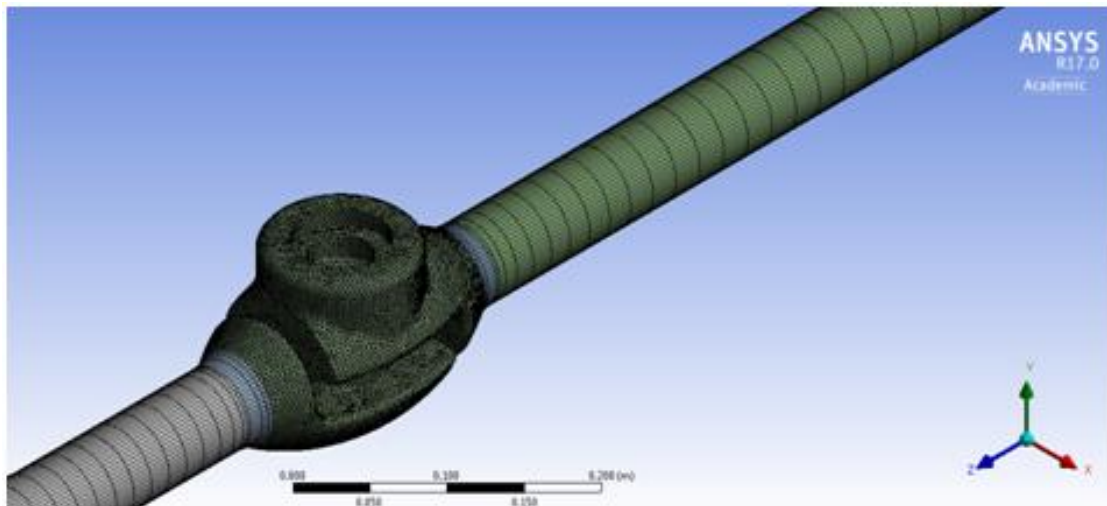
Όσον αφορά την τοπική πύκνωση το y^+ με την πρώτη προσέγγιση του OpenFOAM και με επιβεβαίωση μετά την προσομοίωση κρατήθηκε κάτω από ένα. Έτσι παρήχθη πυκνότερο πλέγμα γιατί σε μικρότερο χώρο τοποθετήθηκαν περισσότερα κελιά. Επίσης δεν χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις του τοίχου γιατί με το $y^+ < 1$ βρισκόμαστε στο συνεκτικό υπόστρωμα οπότε η ροή σε εκείνα τα σημεία λύνεται και δεν μοντελοποιείται. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη να γίνει γιατί η 3Δ ροή είναι ένα αρκετά περίπλοκο φαινόμενο

και χρειάστηκε αρκετή λεπτομέρεια στην κατασκευή του πλέγματος για να μπορέσουν να αναλυθούν τα φαινόμενα και να υπολογιστούν σωστά τα μεγέθη και όχι να τους επιβληθούν οι τιμές από τις συναρτήσεις του τοίχου.

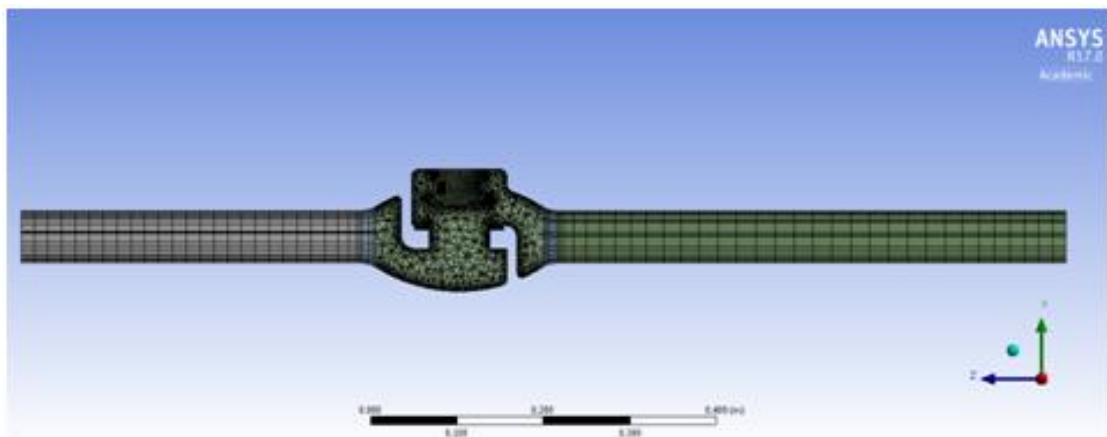
Παρακάτω ακολουθούν τα πλέγματα που κατασκευάστηκαν για την 3Δ ανάλυση και χρησιμοποιήθηκαν στην ανεξαρτησία και στην επίλυση των υπόλοιπων θέσεων.

4.4.1 Πλέγματα στην πλήρως ανοικτή θέση των 20 mm.

180.000 στοιχεία

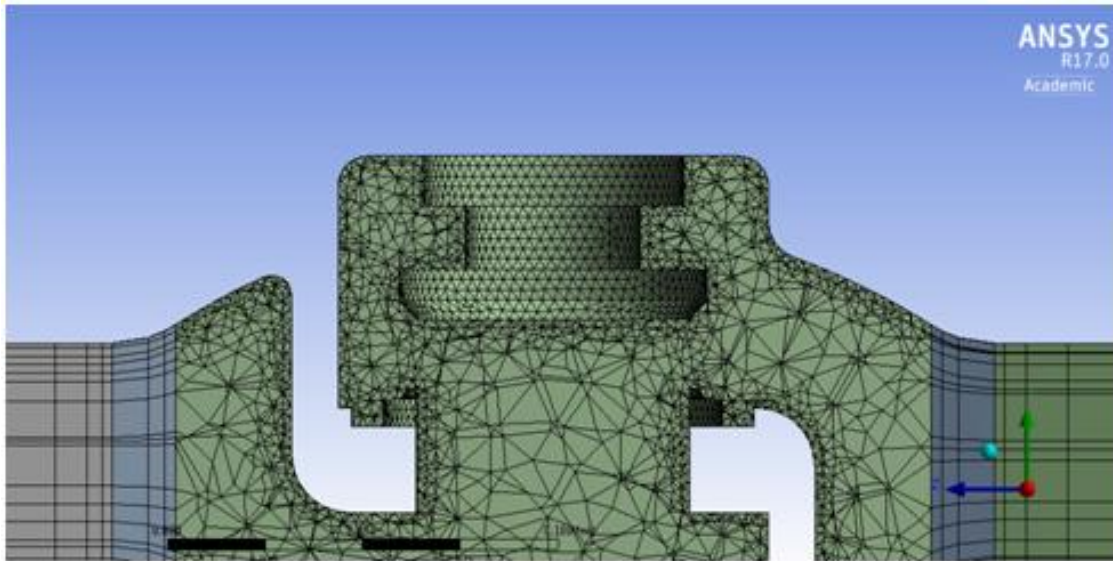


Εικόνα 79. Πλέγμα 180.000 κελιών



Εικόνα 80. Τομή πλέγματος 180.000 κελιών

Αρχικά παρατηρείται ότι το πλέγμα είναι δομημένο στον σωλήνα και μη δομημένο στην περιοχή της βαλβίδας.

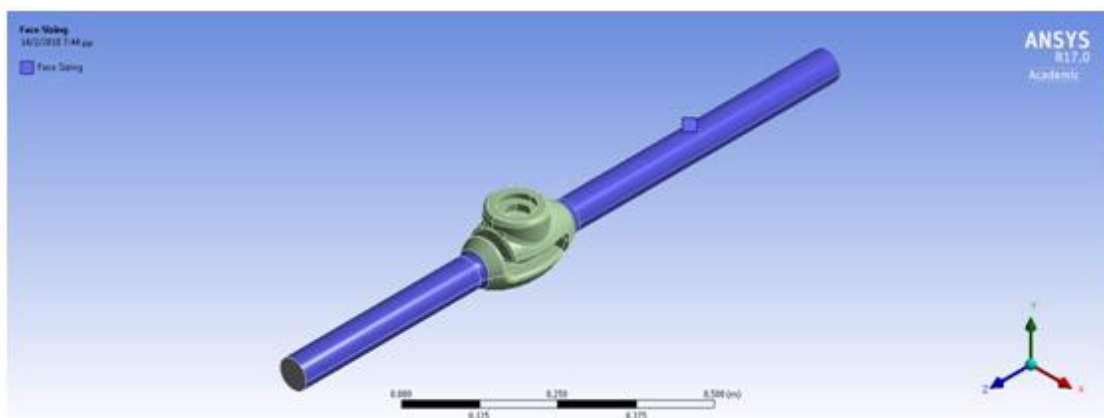


Εικόνα 81. Λεπτομέρεια πλέγματος 180.000 κελιών

Για το πλέγμα στο εσωτερικό της βαλβίδας παρατηρείται ότι στις περιοχές κοντά στα τοιχώματα είναι πιο πυκνό λόγω της ανάπτυξης του οριακού στρώματος ενώ στο εσωτερικό τα στοιχεία μεγαλώνουν αρκετά. Προκειμένου το πλέγμα να γίνει πυκνότερο, με μικρότερα στοιχεία και χωρίς να αυξηθεί δραματικά ο αριθμός των κελιών, ακολουθείται η εξής διαδικασία.

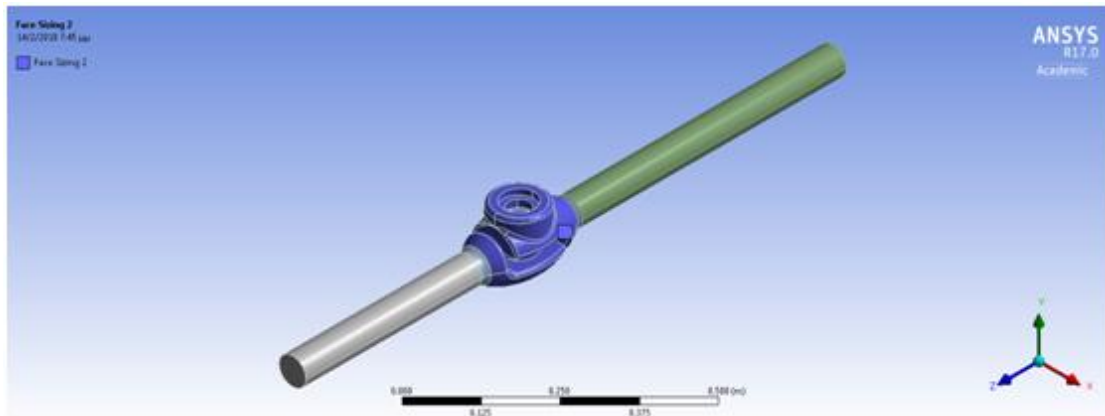
Η πυκνωση απο πλέγμα σε πλέγμα επετεύχθει με την αλλαγή του μεγέθους των κελιών στις πλευρές. Μικραίνοντας το μέγεθος αυξάνεται το πλέγμα και με οδηγό τα κελιά στις επιφάνειες παράγονται τα υπόλοιπα κελιά στο εσωτερικό. Στις περιοχές των σωλήνων (Εικόνα 82) κατά κανόνα ορίστηκε μέγεθος κελιών επιφάνειας (face element size) μεγαλύτερο από ότι στην περιοχή της βαλβίδας (Εικόνα 83) και αυτό επειδή η κλίση των μεγεθών της ροής είναι μικρότερη, επομένως η ακρίβεια των αποτελεσμάτων δεν απαιτεί πολύ πυκνό πλέγμα.

Στην περιοχή των αγωγών η παράμετρος είναι: *face element size 1*.



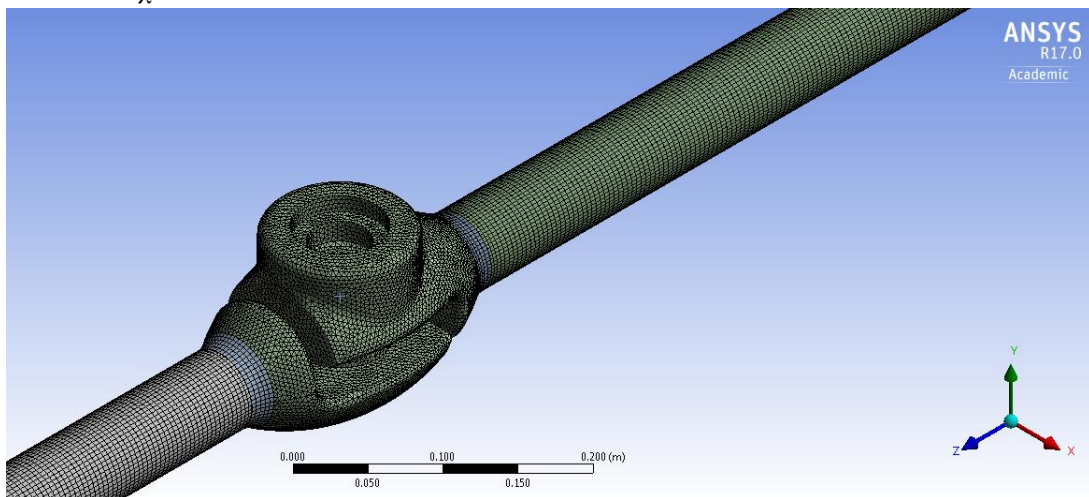
Εικόνα 82. Πύκνωση στο μήκος του αγωγού (Μωβ χρώμα)

Ενώ στην περίπτωση της βαλβίδας είναι: *face element size 2*.

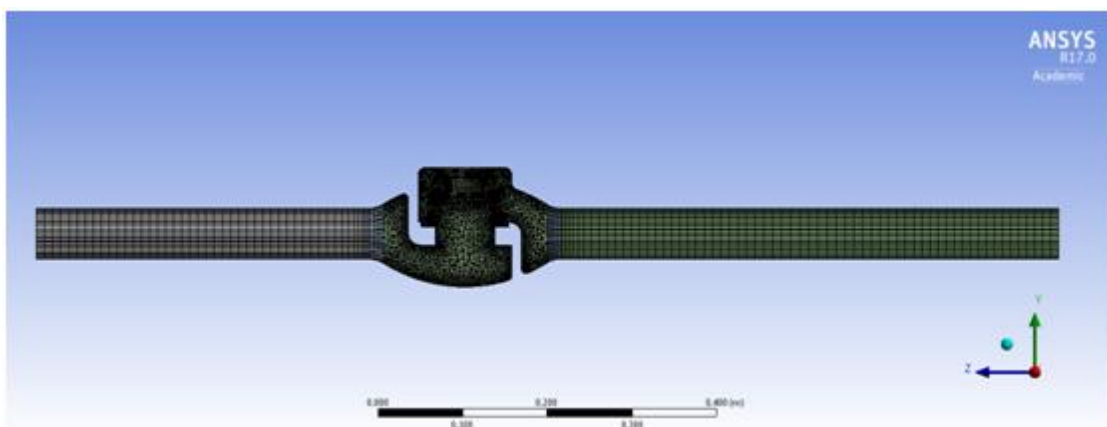


Εικόνα 83. Πύκνωση στην περιοχή της βαλβίδας (Μωβ χρώμα)

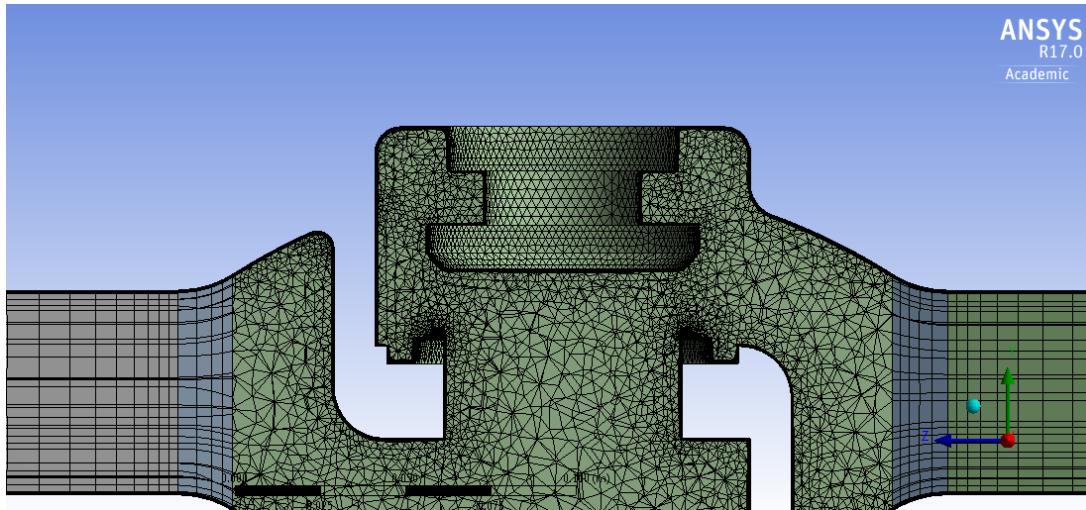
920.000 στοιχεία



Εικόνα 84. Πλέγμα 920.000 κελιών



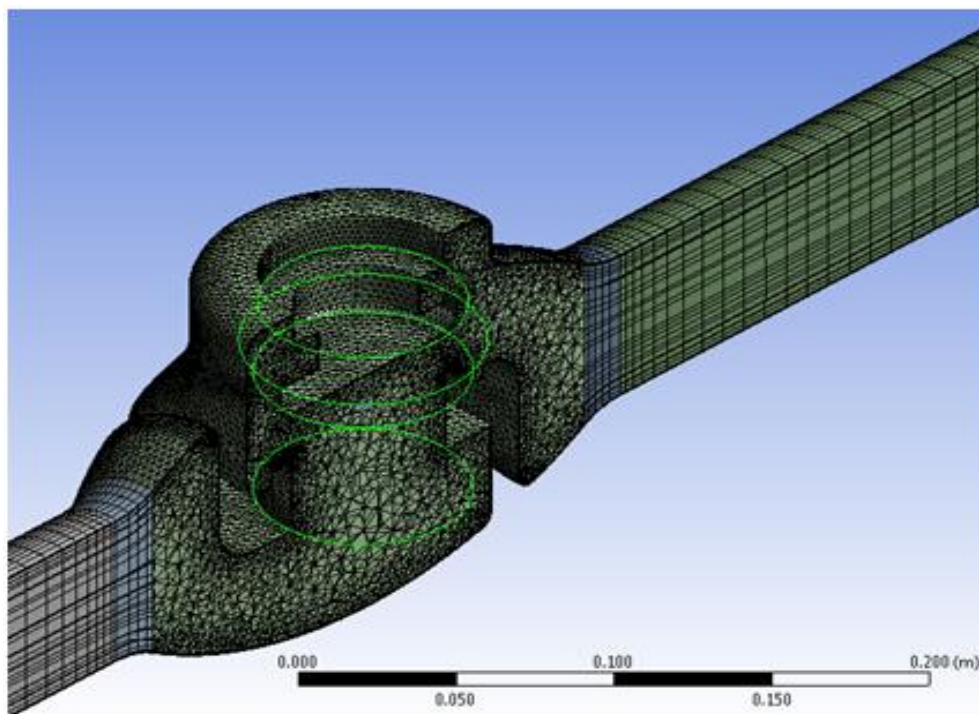
Εικόνα 85. Τομή πλέγματος 920.000 κελιών



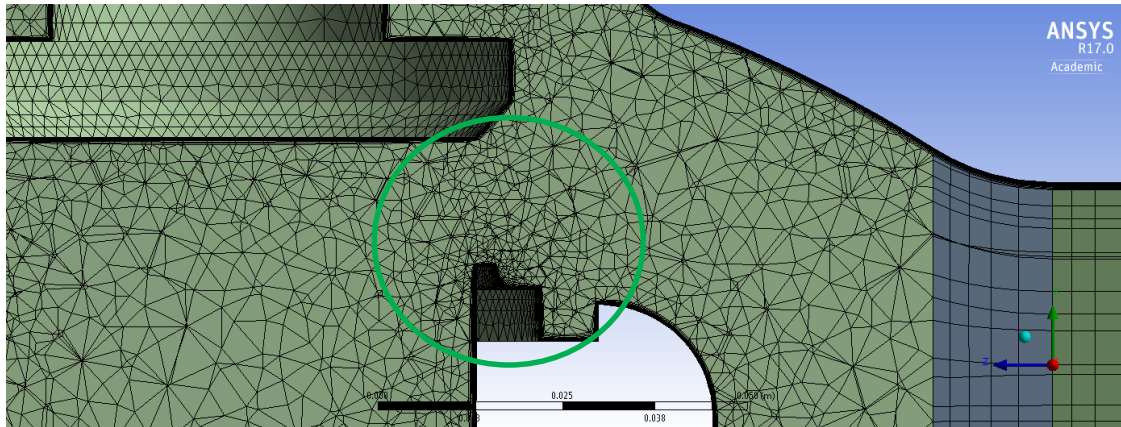
Εικόνα 86. Λεπτομέρεια πλέγματος 920.000 κελιών

Το πλέγμα αυτό είναι αρκετά πυκνότερο από το προηγούμενο, με μικρότερα στοιχεία στο σύνολό του. Η περιοχή του οριακού στρώματος έχει πυκνώσει πάρα πολύ και το συνολικό πάχος είναι μικρότερο από ότι στα προηγούμενα πλέγματα. Αυτό έγινε διότι, κατά την επίλυση στο πλέγμα αυτό, δεν χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις του τοίχου και έτσι η ροή λύθηκε και στα χαμηλότερα σημεία.

Επιπλέον στο συγκεκριμένο πλέγμα πυκνώνονται επιπλέον οι πράσινες ακμές με μέγεθος στοιχείων ακμής (*edge element size* = 0.002 m) λόγω του ότι είναι το χείλος της βαλβίδας και λαμβάνουν χώρο τα πιο σύνθετα φαινόμενα (Εικόνα 87). Χρειαζόμαστε λοιπόν ένα πλέγμα με πολύ μικρά στοιχεία για να μπορέσει να λυθεί η ροή με ακρίβεια.



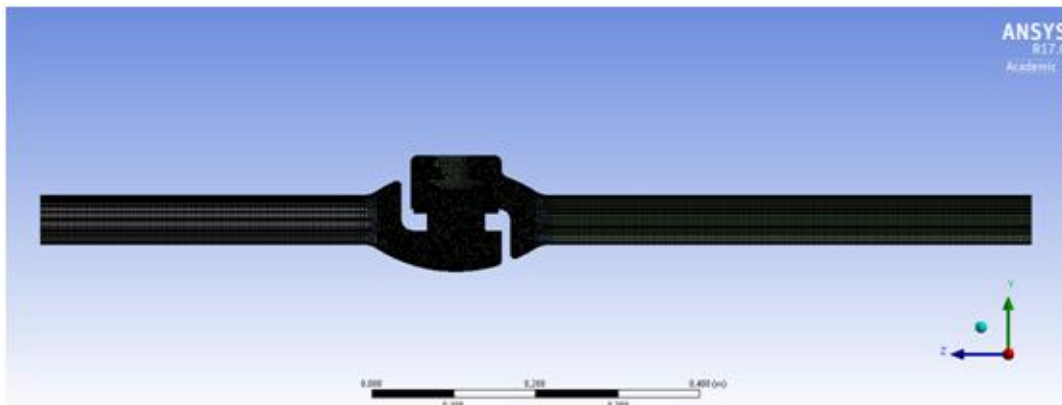
Εικόνα 87. Περιοχές τοπικής πυκνώσεως



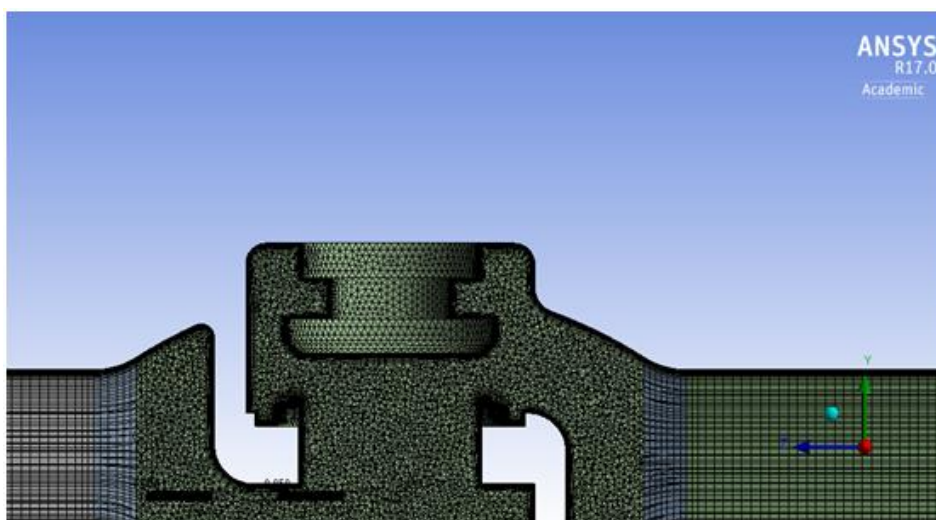
Εικόνα 88. Κελιά στην πυκνωμένη περιοχή

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 88 τα κελιά στην περιοχή που έχει υποστεί τοπική πύκνωση είναι αισθητά μικρότερα από τα υπόλοιπα. Και σε αυτή την περίπτωση δίνεται προσοχή να μην αλλοιωθούν οι δείκτες ποιότητας του πλέγματος.

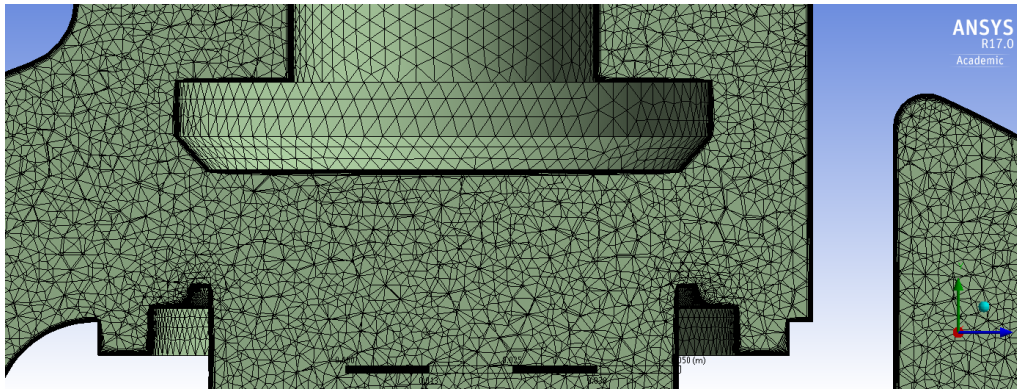
2.100.000 στοιχεία



Εικόνα 89. Πλέγμα 2.100.000 κελιών



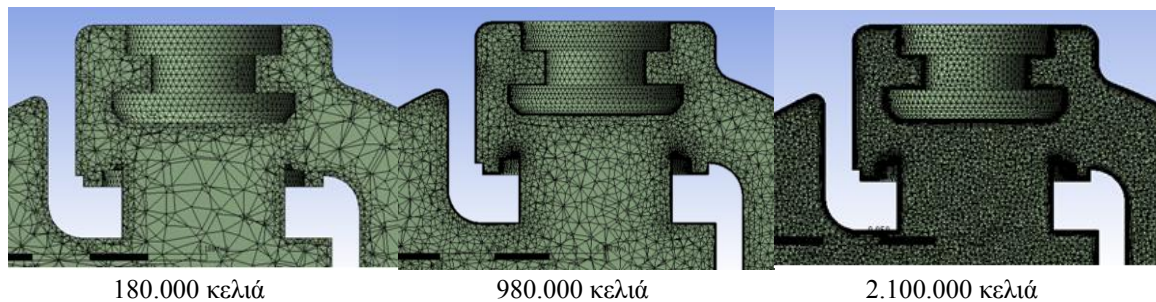
Εικόνα 90. Λεπτομέρεια πλέγματος 2.100.000 κελιών



Εικόνα 91. Μεγέθυνση του πλέγματος 2.100.000 κελιών

Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 89-91 το πλέγμα των 2.100.000 κελιών είναι ένα πολύ πυκνό πλέγμα και τα κελιά έχουν μικρό μέγεθος. Αυτό αυξάνει το υπολογιστικό κόστος κατά την επίλυση.

Η επόμενη Εικόνα 92, συγκρίνει τα τρία πλέγματα ως προς τα χαρακτηριστικά τους:



Εικόνα 92. Σύγκριση των 3Διαστατών πλεγμάτων

Ο Πίνακας 3 περιέχει συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά των παραπάνω πλεγμάτων:

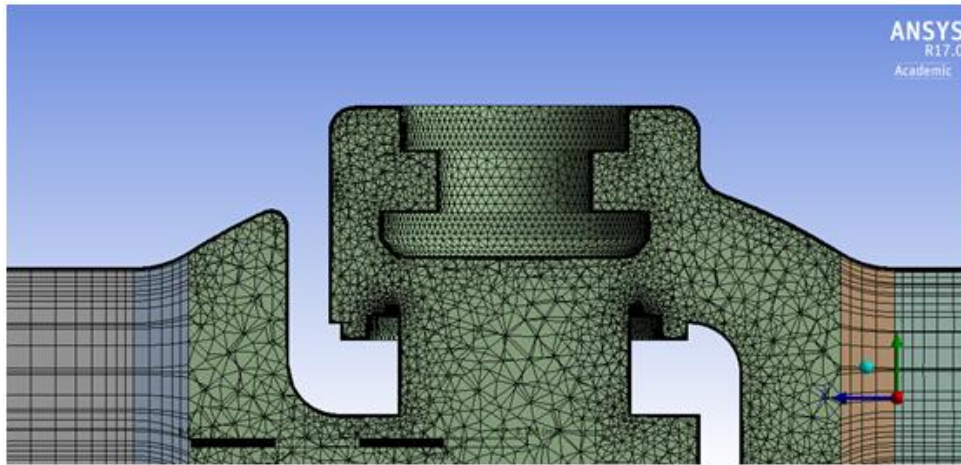
Πίνακας 3. Στοιχεία 3Διάστατων κελιών

Αριθμός κελιών	180.000	920.000	2.100.000
Μέγεθος κελιών	0,014 m	0,006	0,0025 m
Face element size 1	-	0,006 m	0,0035 m
Face element size 2	-	0,003 m	0,0028 m
Πάχος περιοχής οριακού στρώματος	0,004 m	0,001	0,001 m
Αρ. κελιών στην περιοχή του οριακού στρώματος	15	10	10
Ρυθμός πύκνωσης	1,2	1,2	1,2
Max skewness	0,8323	0,8949	0,8586
Min orthogonal quality	0,2321	0,0411	0,0564
Max aspect ratio	26,0	379,4	186,82

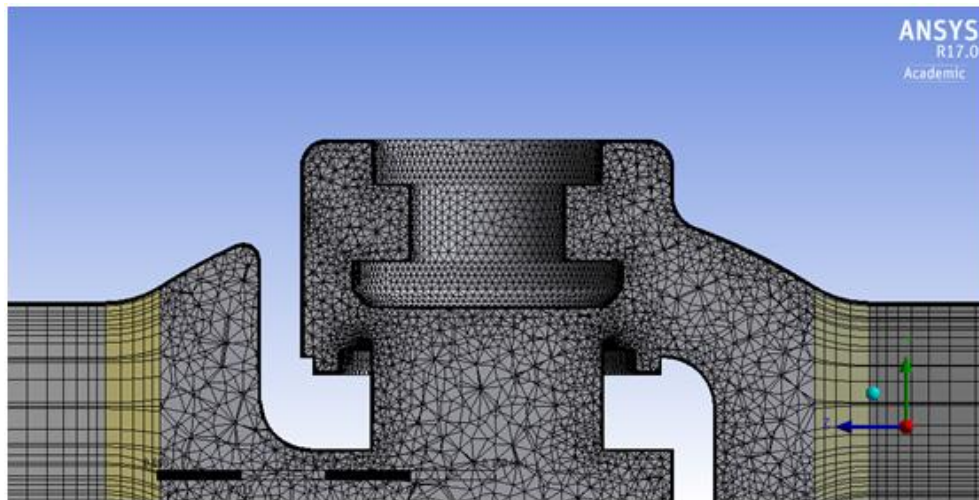
4.4.2 Πλέγματα στις υπόλοιπες θέσεις στην μερική ανοικτή θέση των 15 mm.

Η μελέτη της ανεξαρτησίας, όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο έδειξε ότι η ανεξαρτησία της αριθμητικής λύσης επιτυγχάνεται στο πλέγμα των 920.000 κελιών. Συνεπώς,

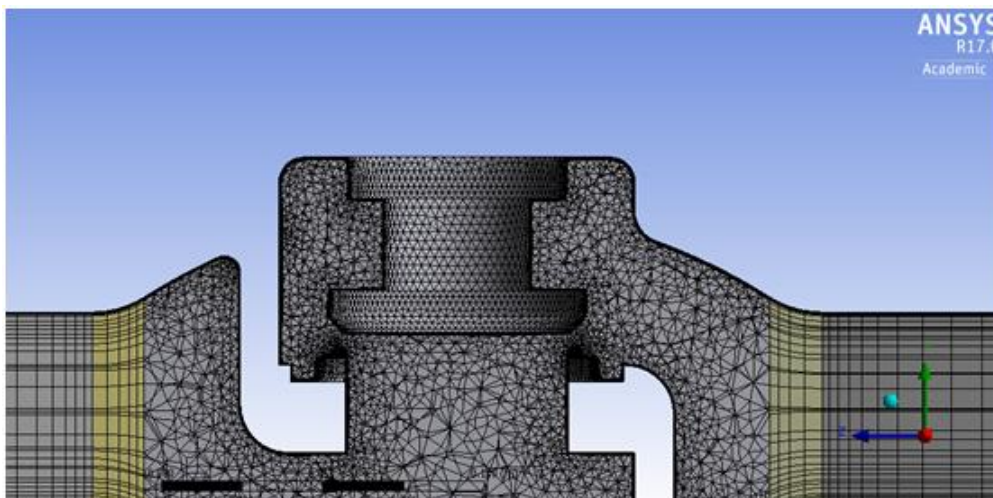
για τις υπόλοιπες θέσεις κατασκευάζονται πλέγματα με ίδιο αριθμό κελιών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 93. Πλέγμα στην θέση των 15 mm



Εικόνα 94. Πλέγμα στην θέση των 10 mm



Εικόνα 95. Πλέγμα στην θέση των 5 mm

Απο τις παραπάνω τομές είναι φανερό ότι τα κελιά κοντά στο χείλος είναι αρκετά μικρά γιατί σε εκείνη την περιοχή τοπικά τα μεγέθη αλλάζουν απότομα, επομένως χρειάζεται να υπολογίζονται σε πολύ κοντινές περιοχές. Με αυτό τον τρόπο περιορίζεται το αριθμητικό σφάλμα και αποφεύγεται η μη σύγκλιση.

Τέλος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά των πλεγμάτων στις τρεις θέσεις:

Πίνακας 4. Στοιχεία πλεγμάτων 15 mm, 10 mm 5 mm

	15 mm	10 mm	5 mm
Μέγεθος κελιών	<i>0,006 m</i>	<i>0,006 m</i>	<i>0,006 m</i>
Face element size 1	<i>0,006 m</i>	<i>0,06 m</i>	<i>0,006 m</i>
Face element size 2	<i>0,003 m</i>	<i>0,003 m</i>	<i>0,003 m</i>
Πάχος τοπικής πύκνωσης	<i>0,001 m</i>	<i>0,001 m</i>	<i>0,001 m</i>
Αριθμός κελιών στην τοπική πύκνωση	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>
Ρυθμός πύκνωσης	<i>1,2</i>	<i>1,2</i>	<i>1,2</i>
Max skewness	<i>0,8902</i>	<i>0,8949</i>	<i>0,8823</i>
Min orthogonal quality	<i>0,0343</i>	<i>0,04719</i>	<i>0,0409</i>
Max aspect ratio	<i>369,8</i>	<i>365,5</i>	<i>369,8</i>

Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα Δισδιάστατης Προσομοίωσης

5.1 Γενικά

Για την επίλυση του εν λόγω προβλήματος με το χαμηλότερο δυνατό κόστος πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ελαφρύτερο δυνατό υπολογιστικό πλέγμα το οποίο μπορεί να παράγει αριθμητικά αποτελέσματα με ικανοποιητική ακρίβεια. Γι' αυτόν τον λόγο, πριν την επίλυση γίνεται μελέτη ανεξαρτησίας των αποτελεσμάτων ως προς το πλέγμα. Στην αρχή κατασκευάζεται ένα σχετικά αραιό πλέγμα και σε αυτό επιλύεται η ροή. Ύστερα κατασκευάζεται ένα πυκνότερο, 1,5 φορές μεγαλύτερο από το προηγούμενο και ξαναλύεται η ροή. Αυτή η πρακτική ακολουθείται για να μπορέσει να υπάρξει μια γρήγορη εκτίμηση της ακρίβειας συναρτήσει του αριθμού των κελιών. Γι' αυτό τον λόγο τα πλέγματα κατασκευάζονται με αριθμό κελιών αρκετά μεγαλύτερο από το προηγούμενο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου η λύση που προκύπτει από το τελευταίο πλέγμα είναι πρακτικά ίδια με την λύση που έχει προκύψει από το προτελευταίο. Τότε δεχόμαστε ότι επετεύχθη ανεξαρτησία της αριθμητικής λύσης από το μέγεθος του πλέγματος. Εκλέγουμε λοιπόν το προτελευταίο πλέγμα και με αυτό προχωρούμε στη επίλυση.

Για να είμαστε σίγουροι ότι τα αποτελέσματα της ανεξαρτησίας είναι έγκυρα πρέπει να συγκριθούν με τα αντίστοιχα πειραματικά για την ίδια περίπτωση ή με άλλα υπολογιστικά από δημοσιεύσεις με ίδιες ή παραπλήσιες οριακές συνθήκες (validation).

5.2 Αποτελέσματα μελέτης ανεξαρτησίας αποτελεσμάτων

Το πρόβλημα αρχικά επιλύθηκε ως 2Δ. Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν είναι:

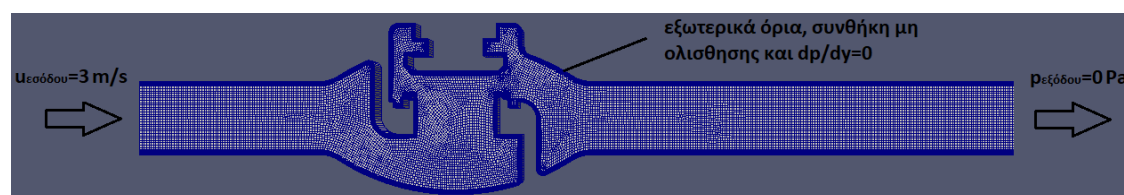
$$u_{\text{εισοδου}} = 3 \text{ m/sec} \text{ ομοιόμορφο προφίλ}$$

Εσωτερικά στερεά όρια = συνθήκη μη ολίσθησης

$$p_{\text{εξόδου}} = 0 \text{ Pa} \text{ (στατική πίεση)}$$

$$\frac{dp}{dy}_{\text{τοιχου}} = 0 \text{ Pa}$$

Και σχηματικά στην Εικόνα 96

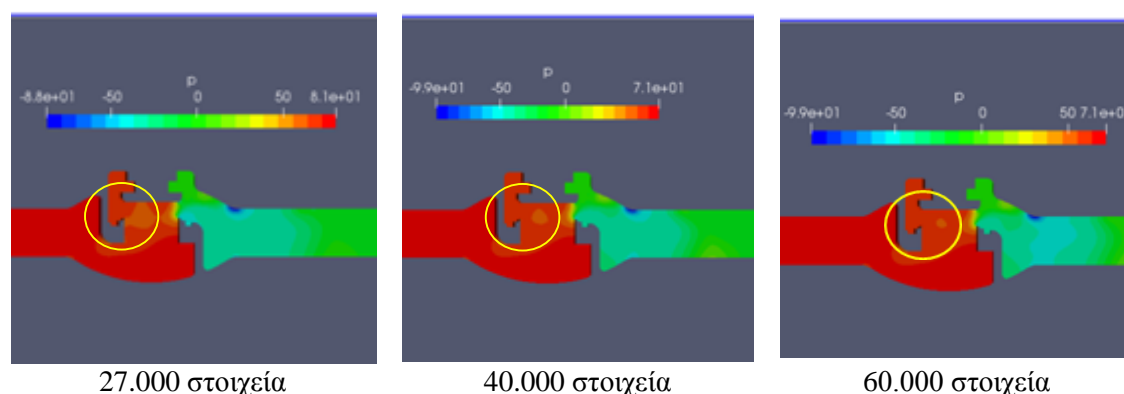


Εικόνα 96. Σχηματική απεικόνιση των οριακών συνθηκών

Για την 2Δ περίπτωση κατασκευάστηκαν μια σειρά πλεγμάτων ξεκινώντας από 2.200 κελιά και με προοδευτική αύξηση πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των κελιών επί 1,5 κατασκευάστηκαν και τα υπόλοιπα. Βρέθηκε ότι στα 40.000 κελιά επιτυγχάνεται η ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων στην πίεση και την ταχύτητα.

5.2.1 Αποτελέσματα πεδίου πιέσεων

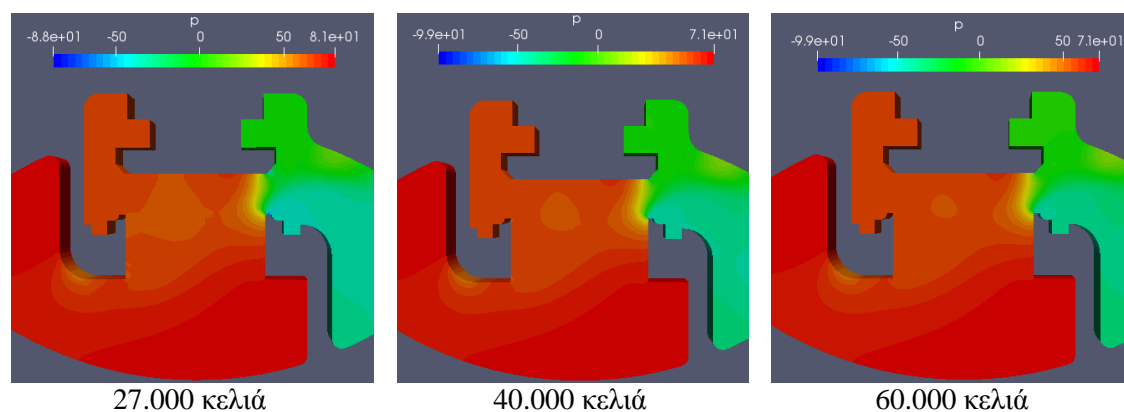
Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η ανεξαρτησία ως προς την πίεση. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πλεγμάτων των 40.000 κελιών, ένα πριν και ένα μετά. Γίνεται φανερή η διάφορα στην κλίμακα της πίεσης στα 27.000 και 40.000 κελιά και πως αυτή σταθεροποιείται από τα 40.000 στα 60.000 κελιά. Επίσης, γίνεται αντιληπτή η ομοιομορφία στις ισοϋψείς περιοχές στα πλέγματα όπως και η σταθεροποίηση τους στις δυο τελευταίες θέσεις.



Εικόνα 97. Ισοϋψείς στατικής πίεσης (Pa)

Συγκεκριμένα, στο πλέγμα των 27.000 στοιχείων το εύρος της πίεσης είναι από -88 με 81 kPa ενώ για τα πλέγματα των 40.000 στοιχείων και πάνω το εύρος σταθεροποιείται από -99 με 71 kPa. Αυτό μπορεί να συμβαίνει γιατί λόγω της χαμηλής πυκνωσης του πλέγματος, ο επιλυτής δεν μπορεί να αναλύσει επιπλέον φαινόμενα που κατεβάζουν περαιτέρω την τελική πτώση πίεσης όπως για παράδειγμα εσωτερικές δίνες ή περιοχές τοπικής ανακυκλοφορίας. Επίσης στις κυκλωμένες περιοχές παρατηρείται ομαλοποίηση των ισοϋψών και μια σταθεροποίηση της εικόνας από τα 40.000 στοιχεία και μετά (Εικόνα 97).

Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 98) παρουσιάζεται η λεπτομέρεια του κίτρινου κύκλου της παραπάνω εικόνας.



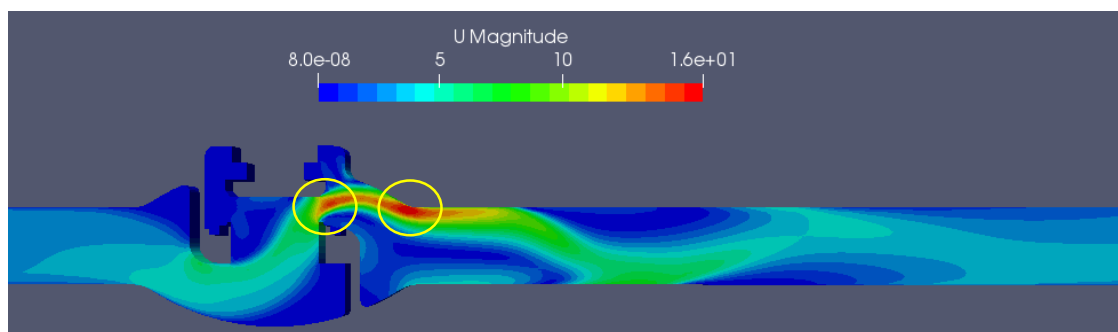
Εικόνα 98. Λεπτομέρεια ισοϋψών πίεσης

Εδώ έχουν εισαχθεί περισσότερες ισοϋψείς περιοχές απ' ό τι πριν, συγκεκριμένα σαράντα ισοϋψείς, ενώ πριν είκοσι. Έτσι γίνεται πιο λεπτομερής η παρουσίαση και καθίστανται

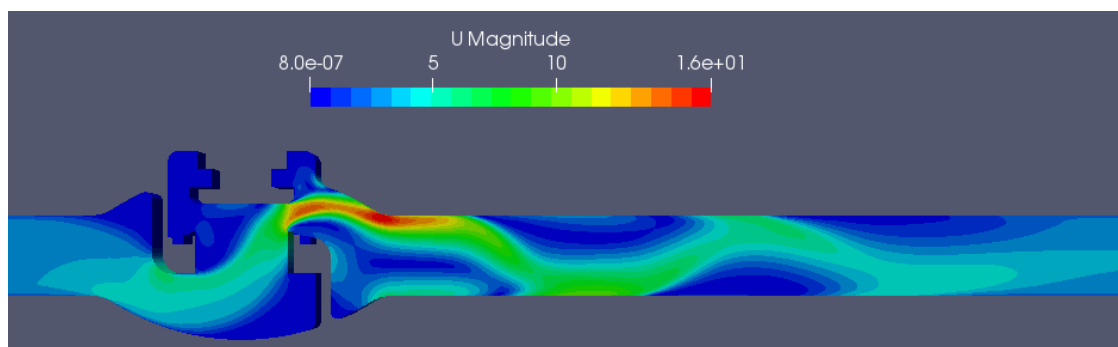
σαφέστερες οι περιοχές με κοινή πίεση. Επίσης γίνεται ακόμα πιο φανερή η ομοιότητα της πίεσης στα δύο τελευταία μεγάλα πλέγματα των 40.000 και 60.000 κελιών.

5.2.2 Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων

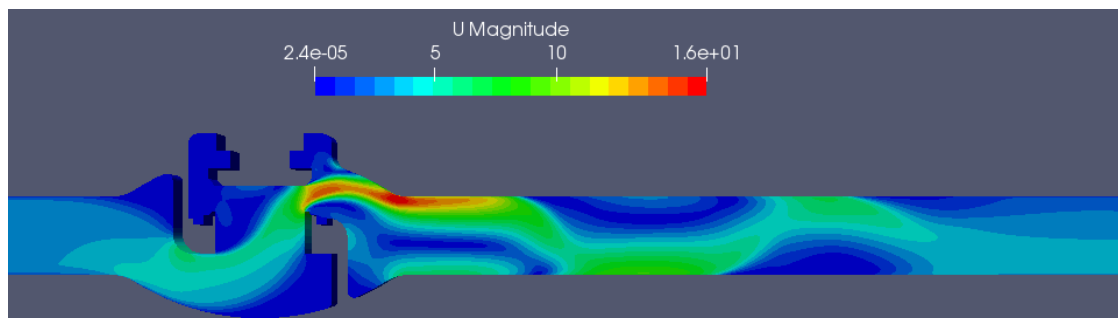
Στα παρακάτω σχήματα 99-101 φαίνονται τα αποτελέσματα της ταχύτητας. Παρατηρείται ότι, ενώ η ταχύτητα έχει ανεξαρτητοποιηθεί από το πλέγμα των 27.000 κελιών, το προφίλ της σταθεροποιείται από τα 40.000 κελιά. Το εύρος τιμών, από 0 m/s έως 16 m/s, είναι ίδιο για πλέγματα 27.000 κελιών και πάνω. Δεν είναι όμως ίδιο το πεδίο της ταχύτητας, που όπως φαίνεται στην εικόνα 100, έχει διαταραχές κατάντη της βαλβίδας οι οποίες παρουσιάζονται με την πράσινη κυματιστή γραμμή. Με το πλέγμα των 27.000 κελιών δεν μπορούν να γίνουν απολύτως αντιληπτές οι διαταραχές αυτές αρκετά μετά την βαλβίδα. Από τα 40.000 κελιά και πάνω οι διαταραχές γίνονται αντιληπτές και όσο αυξάνει το πλέγμα γίνονται όλο και πιο εμφανείς. Στην συγκεκριμένη μελέτη είναι η συνολική πτώση πίεσης και οι μέγιστες τιμές των ταχυτήτων στα κρίσιμα σημεία, τα οποία είναι το χείλος της βαλβίδας και το σημείο που χτυπάει η ροή κατάντη της βαλβίδας (κίτρινες λεπτομέρειες, εικόνα 99).



Εικόνα 99. Πεδίο ταχυτήτων στα 27.000 κελιά και κρίσιμα σημεία τη ροής



Εικόνα 100. Πεδίο ταχυτήτων στα 40.000 κελιά

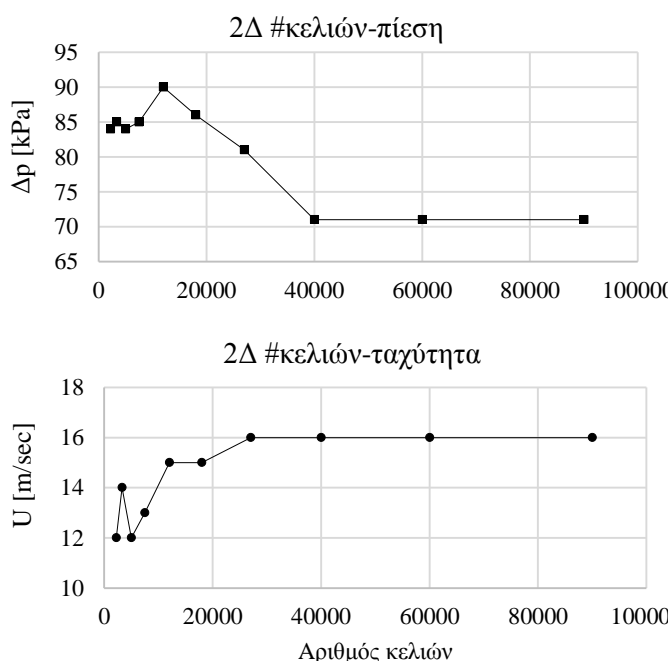


Εικόνα 101. Πεδίο ταχυτήτων στα 60.000 κελιά

Τα αποτελέσματα της ανεξαρτησίας για όλα τα πλέγματα παρουσιάζονται γραφικά στα παρακάτω διαγράμματα (Εικόνα 102). Παρατηρείται ότι στην αριθμητική ανεξαρτησία της πίεσης, υπάρχει μια διακύμανση έως ότου σταθεροποιηθεί, στο επίπεδο των 71 kPa. Αντίστοιχα και για την ταχύτητα, παρατηρείται και εκεί μια ταλάντωση στην αρχή. Αυξάνοντας το πλέγμα, το αποτέλεσμα σταθεροποιείται. Να σημειωθεί ότι η ανεξαρτησία της ταχύτητας έγινε ελέγχοντας την μέγιστη ταχύτητα στο χείλος της βαλβίδας επειδή είναι καλό σημείο αναφοράς και εύκολα παρατηρήσιμο. Από την στιγμή που τα τρία τελευταία πλέγματα συμφωνούν σε ίδια λύση και για τα δύο μεγέθη, κρατείται το πιο ελαφρύ.

Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε το πλέγμα των 40.000 κελιών, ως εκείνο που παράγει πρακτικά ανεξάρτητα αποτελέσματα.

Αρ. κελιών	Δp [kPa]	U [m/sec]
2200	84	12
3300	85	14
5000	84	12
7500	85	13
12000	90	15
18000	86	15
27000	81	16
40000	71	16
60000	71	16
90000	71	16



Εικόνα 102. Αποτελέσματα ανεξαρτησίας χωρικής διακρητοποίησης στην πτώση πίεσης και στην ταχύτητα

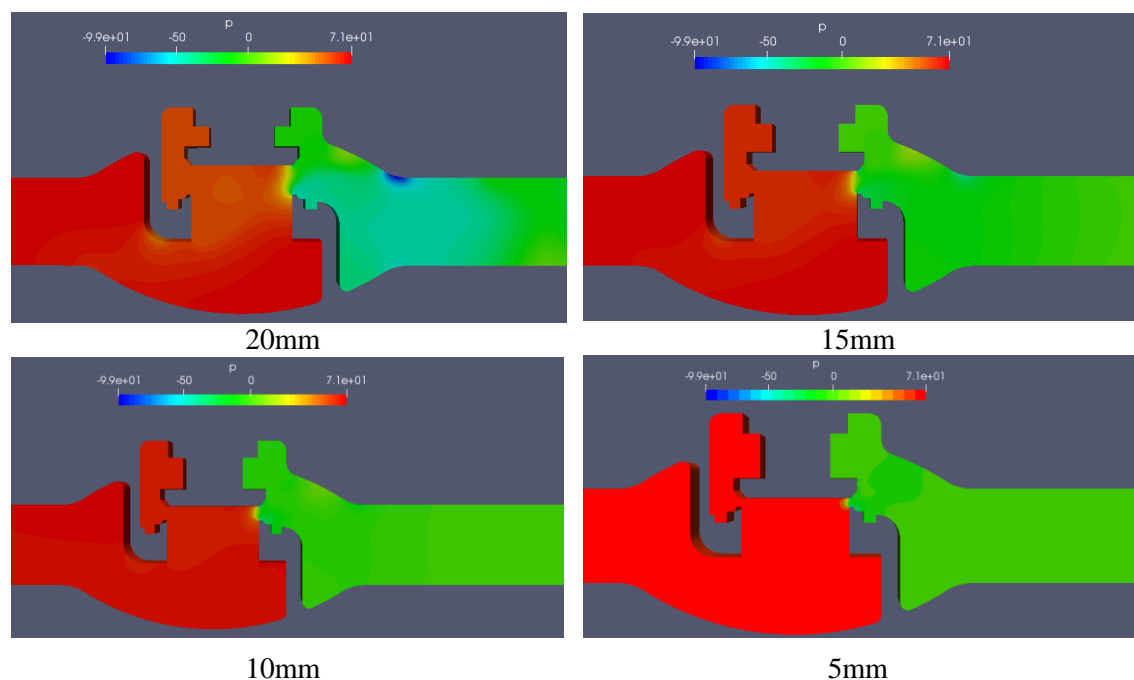
5.3 Μελέτη δισδιάστατου προβλήματος

Έχοντας ως δεδομένο ότι το πλέγμα των 40.000 κελιών παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα κατασκευάζονται τα πλέγματα για τις υπόλοιπες θέσεις. Τα πλέγματα έχουν παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο 4.3.2 Από την πρώτη θέση, την πλήρως ανοικτή υπολογίστηκε η πτώση πίεσης ανάντη και κατόντη της βαλβίδας και βρέθηκε ίση με $\Delta p = 71 \text{ kPa} = 0,71 \text{ bar}$. Αυτή τη πτώση πίεσης για τις υπόλοιπες θέσεις επιβάλλεται ως οριακή συνθήκη και υπολογίζεται η ταχύτητα στην είσοδο με την οποία η βαλβίδα παρουσιάζει αυτήν τη πτώση πίεσης. Έτσι κατασκευάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη της παροχής συναρτήσει του ποσοστού ανοίγματος. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πίεσης και της ταχύτητας για όλες τις θέσεις.

5.3.1 Ισοϋψείς καμπύλες της πίεσης

Η Εικόνα 103 δείχνει τις ισοϋψείς της πίεσης για όλες τις θέσεις. Στην πλήρως ανοικτή θέση των 20mm η ταχύτητα εισόδου είναι η μέγιστη από όλες τις άλλες θέσεις. Κατόντη της βαλβίδας και από την πάνω μεριά, σχηματίζεται μια περιοχή χαμηλής πίεσης (κίτρινη

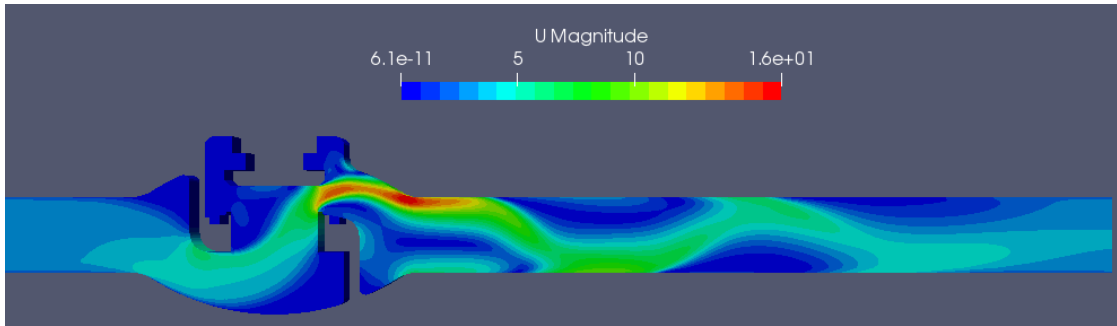
λεπτομέρεια). Η περιοχή αυτή σχηματίζεται διότι, όπως φαίνεται και απο την Εικόνα 100, σε εκείνο το σημείο η ταχύτητα είναι μεγάλη, επομένως με βάση την εξίσωση Bernoulli η πίεση πέφτει. Επίσης φαίνεται καθαρά η διακύμανση της τιμής της πίεσης καθώς μεταβαίνει απο τον έναν θάλαμο στον άλλον. Μειώνοντας προοδευτικά το άνοιγμα της βαλβίδας, παρατηρείται μικρότερη διακύμανση της πίεσης, ακόμα και με μικρή διακριτοποίηση ισοϋψών καμπυλών. Αυτό συμβαίνει διότι, όσο το άνοιγμα μικραίνει, αντίστοιχα μικραίνουν και οι ταχύτητες στην είσοδο. Έτσι δεν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας και με βάση την αρχή Bernoulli ούτε η πίεση μεταβάλλεται πολύ εντός του ενός θαλάμου, (Εικόνα 103) Η μεγάλη διακύμανση παρατηρείται στην περιοχή του χείλους διότι εκεί η μεταβολή της ταχύτητας συντελείται απότομα.



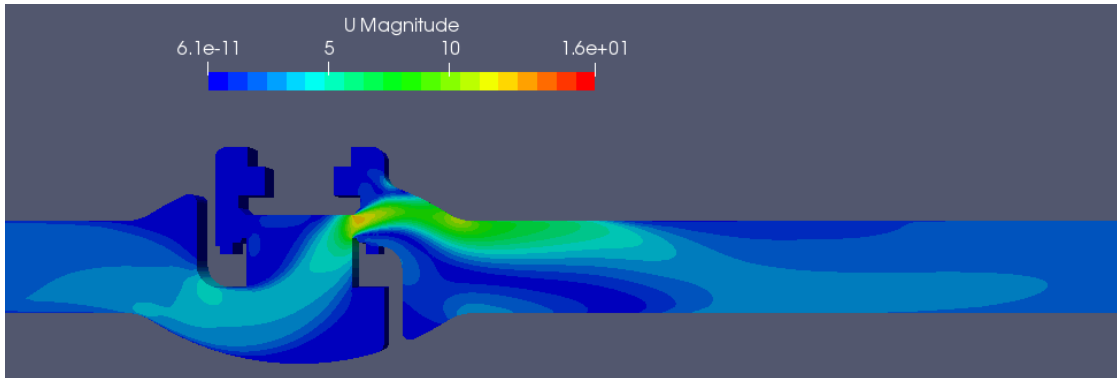
Εικόνα 103. Ισοϋψείς πίεσης για όλες τις θέσεις της βαλβίδας

5.3.2 Ισοϋψείς καμπύλες της ταχύτητας

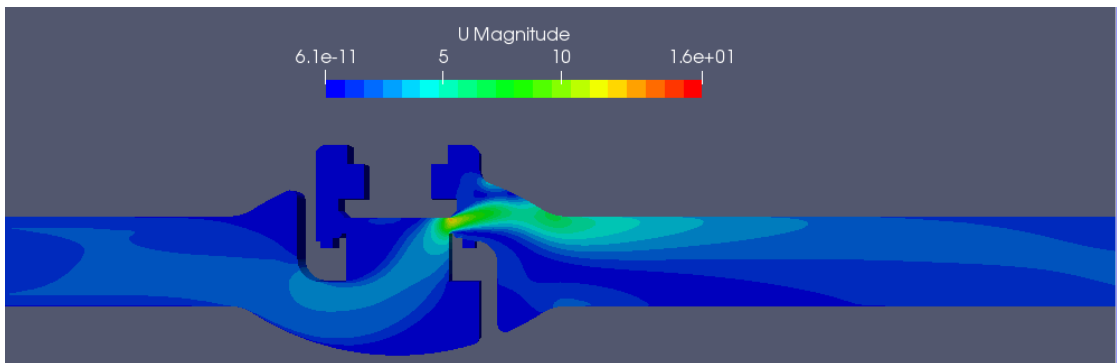
Από τις ισοϋψείς της ταχύτητας σε κάθε θέση φαίνεται καθαρά ότι με το κλείσιμο της βαλβίδας, η ένταση του πεδίου της ταχύτητας μειώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι με το κατέβασμα του εμβόλου, μειώνεται η ταχύτητα εισόδου και κατ' επέκταση οι ταχύτητες σε ολο το χωρίο. Παρατηρείται επιπλέον ότι η ταχύτητα παίρνει τις μέγιστες τιμές, στο χείλος και στην αρχή του αγωγού κατάντι της βαλβίδας. Σύμφωνα με την σχέση $A1u1=A2u2$, ως $A1$ θεωρούμε την παροχή πριν το χείλος, ενώ με $A2$ θεωρούμε την παροχή στο χείλος. Έτσι όσο η διατομή μειώνεται η ταχύτητα αυξάνεται. Επίσης μετα το άνοιγμα το ρευστό έχει αποκτήσει μεγάλη ορμή, με αποτέλεσμα στην περιοχή μετά το χείλος και μέχρι την αρχή του αγωγού, το ρευστό συνεχίζει να έχει υψηλή ταχύτητα. Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα για όλες τις θέσεις του ανοίγματος της βαλβίδας (Εικόνες 104, 105, 106, 107). Τέλος φαίνεται ότι η ανομοιομορφία της ροής κατάντη της βαλβίδας διατηρείται για αρκετές διαμέτρους.



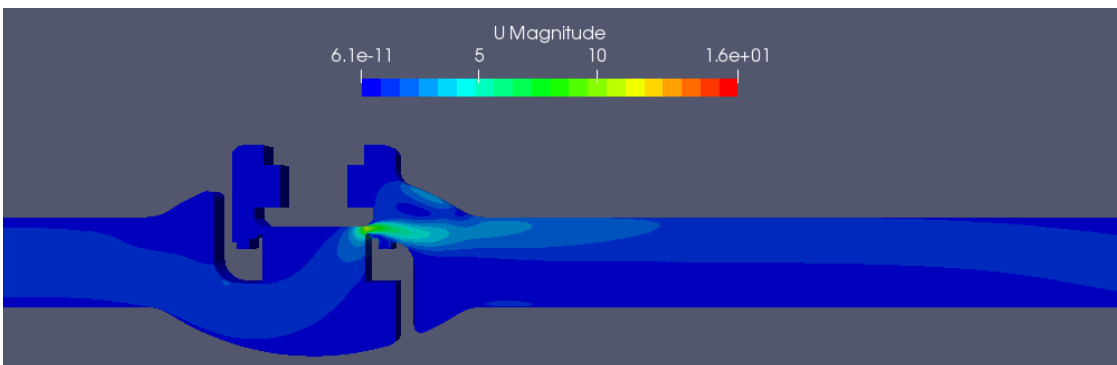
Εικόνα 104. Πεδίο ταχυτήτων 20 mm



Εικόνα 105. Πεδίο ταχυτήτων 15 mm



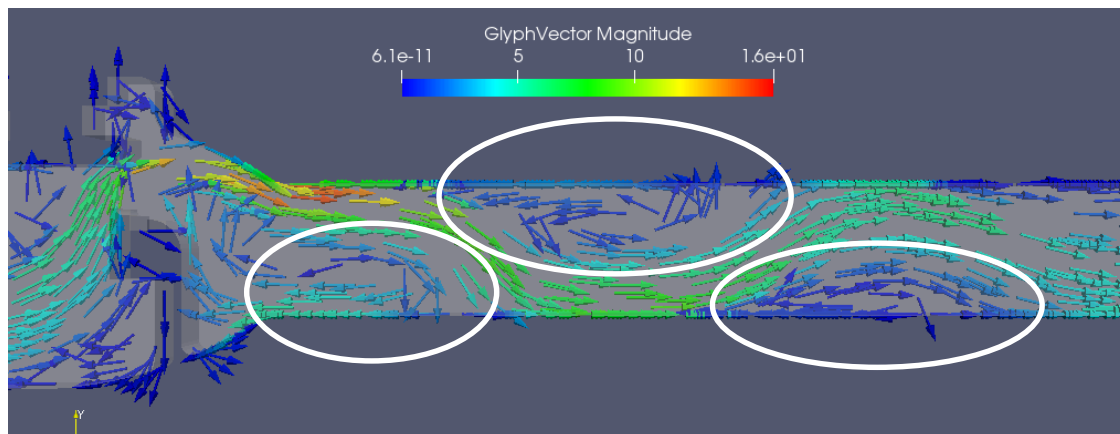
Εικόνα 106. Πεδίο ταχυτήτων 10 mm



Εικόνα 107. Πεδίο ταχυτήτων 5 mm

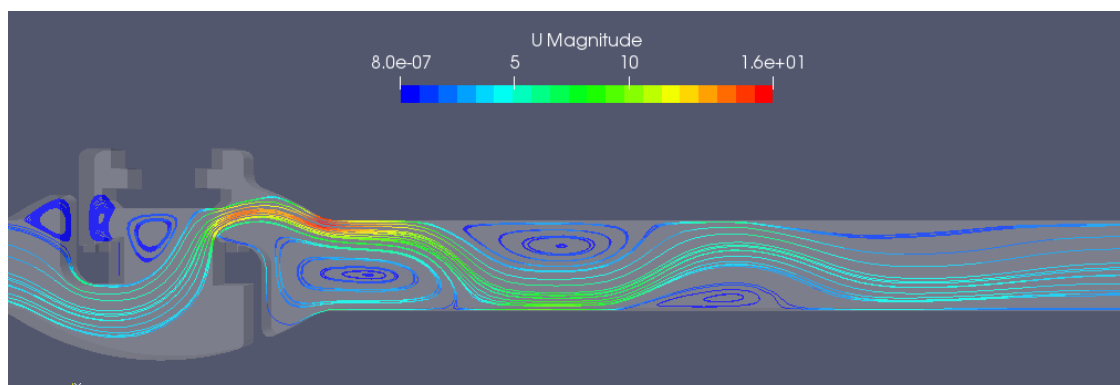
Παρατηρώντας καλύτερα τις ισοϋψεις της ταχύτητας, προκύπτει ένα επιπλέον φαινόμενο, το οποίο είναι η δημιουργία δινών κατάντη της ροής.

Προκειμένου να αποκαλυφθούν οι δίνες και να γίνει κατανοητή η έντασή τους, χρησιμοποιούνται τα διανύσματα της ταχύτητας και οι γραμμές ροής. Η Εικόνα 108 κάνει ορατές τις περιοχές ανακυκλοφορίας κατάντη της ροής στην θέση των 20mm. Φαίνεται ότι οι τρεις αυτές δίνες βρίσκονται εναλλάξ στο πάνω και κάτω τοίχωμα δρώντας ως στερεά, αναγκάζοντας την ροή, να αλλάζει πορεία.



Εικόνα 108. Δίνες ανακυκλοφορίας στν θέση των 20mm

Με τις γραμμές ροής στην Εικόνα 109, οι δίνες, φαίνονται ακόμα πιο καθαρά. Επίσης φαίνεται ότι περιοχές ανακυκλοφορίας υπάρχουν γενικότερα όπου υπάρχουν οξείες γωνίες.



Εικόνα 109. Δίνες σε σημεία απότομης γεωμετρίας

Οι δίνες αυτές, ιδίως στο κατω ρεύμα, επηρεάζουν πολύ την πτώση πίεσης, η οποία προκύπτει τόσο μεγάλη.

5.3.3 Χαρακτηριστικές παροχής και αντίστασης

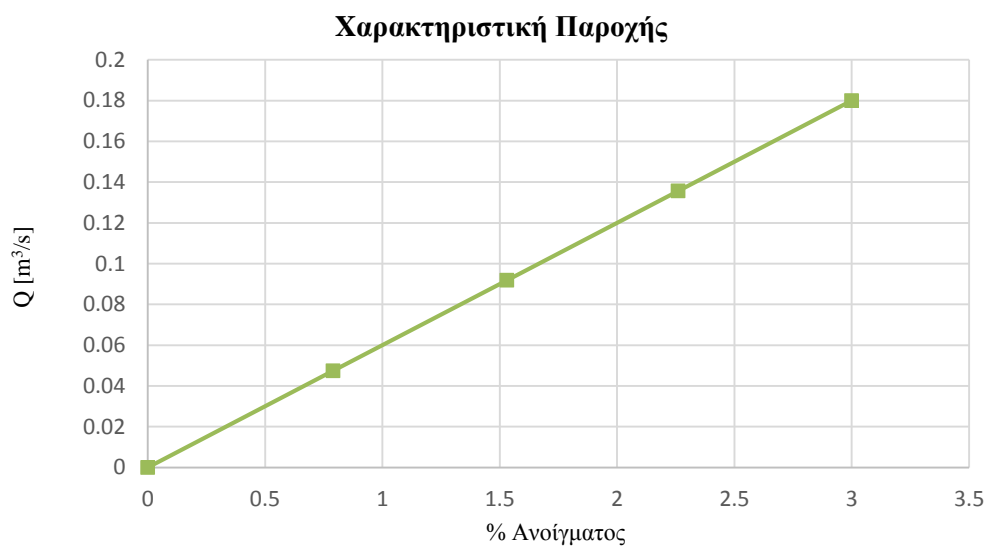
Ο επόμενος πίνακας (Πίνακας 5), δείχνει την ταχύτητα εισόδου στον αγωγό ανάντη, που προέκυψε μετά την προσομοίωση για κάθε θέση. Γίνεται φανερό, το συμπέρασμα που προέκυψε παρατηρώντας και τις ισοϋνεις της ταχύτητας. Δηλαδή, η ταχύτητα εισόδου μειώνεται όσο η βαλβίδα κλείνει. Για να κατασκευαστεί η καμπύλη της παροχής, η ταχύτητα στη είσοδο μετατράπηκε σε παροχή με την παρακάτω σχέση:

$$Q = uD \quad (5.1)$$

Πίνακας 5. Αποτελέσματα προσομοίωσης

% Ανοίγματος	u (m/sec)	Q (m ³ /sec)
100	3	0,18
75	2,26	0,1356
50	1,53	0,0918
25	0,79	0,0474
0	0	0

Η χαρακτηριστική καμπύλη που προκύπτει είναι η παρακάτω γραμμική συσχέτιση:



Εικόνα 110. Χαρακτηριστική καμπύλη παροχής

Για να βρεθεί ο συντελεστής αντίστασης ζ χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$\delta h = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (5.2)$$

Και η εξίσωση της υδροστατικής πίεσης:

$$\delta p = \rho g \delta h \quad (5.3)$$

Λύνοντας την (5.3) ως προς δh και αντικαθιστώντας την στην 1.8 προκύπτει ότι:

$$\zeta = \frac{2\delta p}{\rho u^2} \quad (5.4)$$

Με το δp σταθερό το ζ μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα. Για την πλήρως ανοικτή θέση ο συντελεστής υπολογίζεται $\zeta = 4,44$. Για όλες τις υπόλοιπες ο ζ προκύπτει από το διάγραμμα. Όσο το άνοιγμα μειώνεται μειώνεται και η ταχύτητα στην είσοδο. Επειδή στην σχέση 4.3 η ταχύτητα είναι στον παρονομαστή με το κλείσιμο της βαλβίδας συνεπάγεται

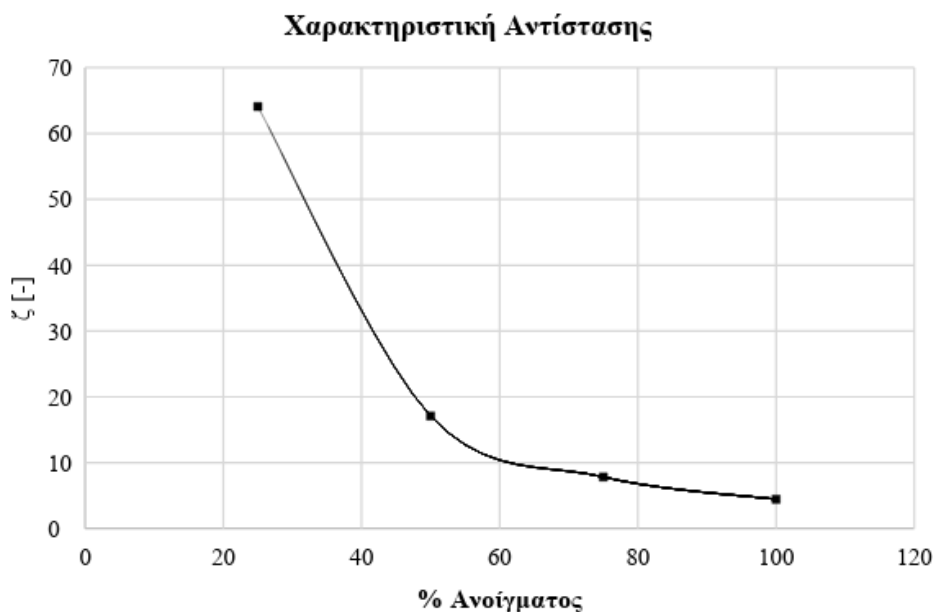
και αύξηση των απωλειών η οποία μάλιστα είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας εισόδου.

Ο Πίνακας 6 μαζί με τις τιμές για το ζ παίρνει την εξής μορφή:

Πίνακας 6. Ταχύτητα, παροχή, απώλειες συναρτήσει του ανοίγματος

% <i>Ανοίγματος</i>	<i>u (m/sec)</i>	<i>Q (m³/sec)</i>	ζ
100	3	0,18	4,44
75	2,26	0,1356	7,83
50	1,53	0,0918	17,08
25	0,79	0,0474	64,09
0	0	0	πολυ μεγαλο

Το επόμενο γράφημα της Εικόνας 111 δείχνει αυτήν την συσχέτιση:



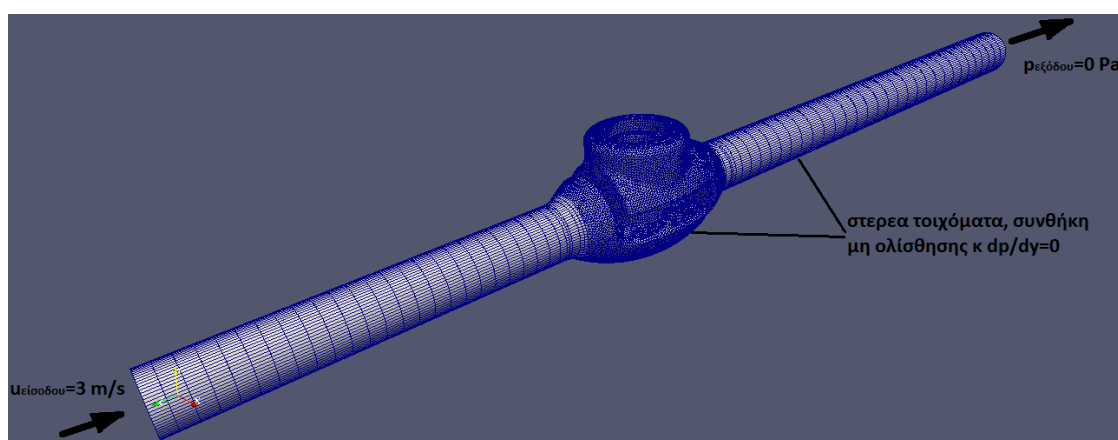
Εικόνα 111. Χαρακτηριστική καμπύλη της αντίστασης

Τόσο η χαρακτηριστική της παροχής όσο και η χαρακτηριστική της αντίστασης συμφωνούν ποιοτικά με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας. Η καμπύλη της αντίστασης είναι ίδια με αυτή που δίνουν οι κατασκευαστές για τις δισκοβαβίδες.

Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα Τρισδιάστατης Προσομοίωσης

6.1 Αποτελέσματα μελέτης ανεξαρτησίας αποτελεσμάτων

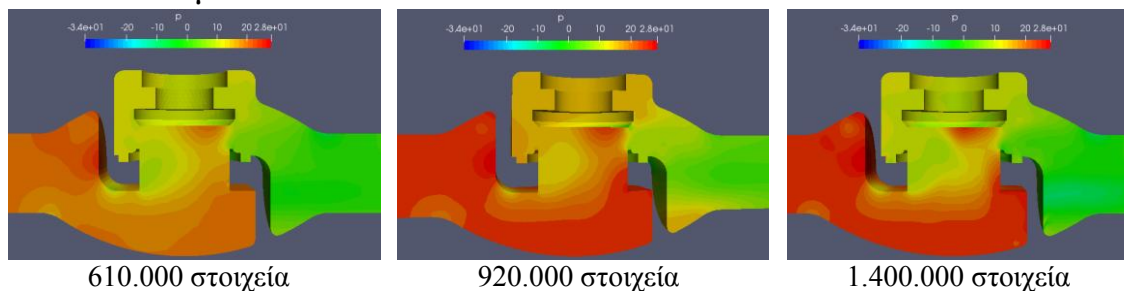
Για το 3D πρόβλημα η διαδικασία της ανεξαρτησίας που ακολουθήθηκε είναι παρόμοια με την 2D περίπτωση. Οι οριακές συνθήκες είναι ίδιες. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 112 η ταχύτητα στην είσοδο του αγωγού είναι $u_{\text{εισόδου}} = 3 \text{ m/s}$ και η πίεση στην έξοδο είναι μηδέν. Στα στερεά τοιχώματα του χωρίου, εφαρμόστηκε η συνθήκη μη ολίσθησης, δηλαδή η ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού είναι μηδενική. Επιπλέον χρειάστηκε να απαιτηθεί, η κλίση της πίεσης να είναι και αυτή ίση με μηδέν στα στερεά τοιχώματα.



Εικόνα 112. Οι οριακές συνθήκες του προβλήματος

Για το 3D πρόβλημα κατασκευάστηκαν πλέγματα ξεκινώντας από 180.000 στοιχεία και με αύξηση των στοιχείων επί 1,5 τα προηγούμενα φτιάχτηκαν πλέγματα έως 2.100.000 κελιά. Η ανεξαρτησία της αριθμητικής λύσης, για την πίεση και για την ταχύτητα επετεύχθη στα 920.000 κελιά. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριών πλεγμάτων, του κεντρικού, αυτού που επετεύχθει η ανεξαρτησία, δηλαδή ενός πριν και ενός μετά, για να γίνει φανερή η ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων του πεδίου πιέσεων και ταχυτήτων.

6.1.1 Αποτελέσματα πεδίου πιέσεων



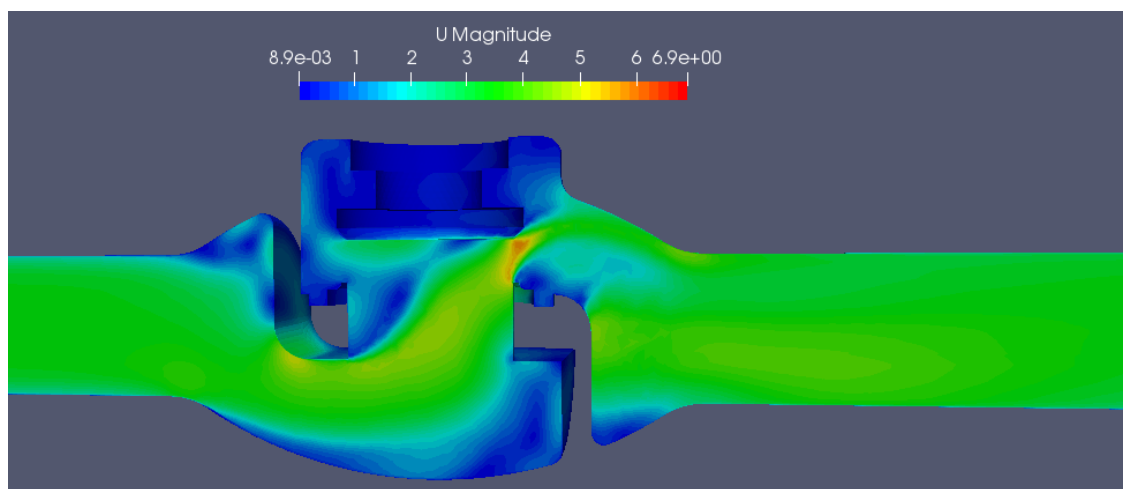
Εικόνα 113. Ισοϋψείς πίεσης

Αρχικά παρατηρείται ότι στο πλέγμα των 610.000 κελιών η πτώση της πίεσης είναι 20kPa. Στο

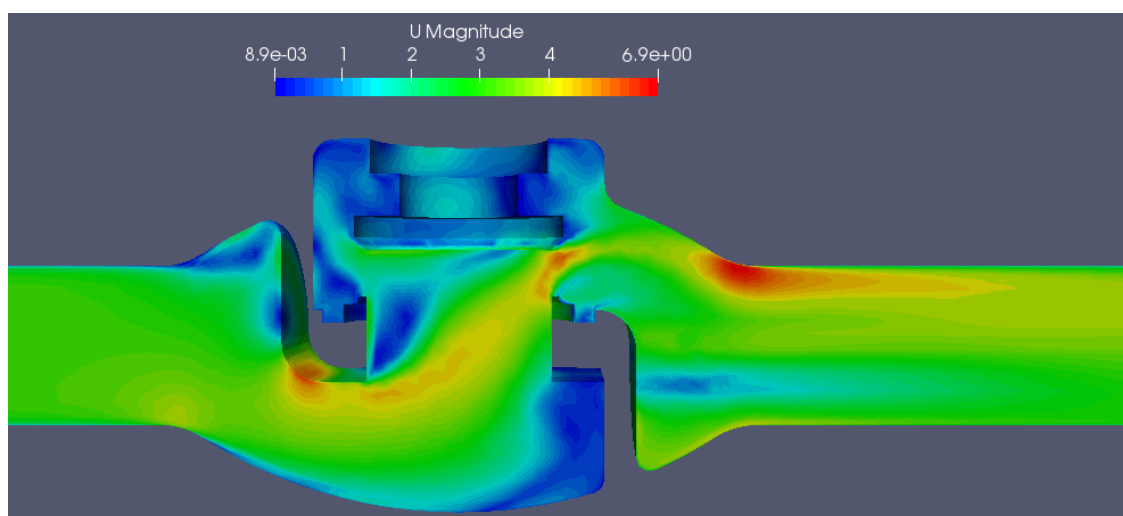
πλέγμα των 920.000 κελιών η πτώση πίεσης γίνεται 24 kPa και διατηρείται και στο επόμενο πλέγμα του 1.400.000 κελιών. Επίσης σταθεροποιείται η εικόνα των ισούσων περιοχών παίρνοντας μια συγκεκριμένη μορφή που δεν αλλάζει, ενώ αντίθετα στο πρώτο πλέγμα οι περιοχές αυτές είναι ακόμα υπό διαμόρφωση. Συνεπώς, η πίεση έχει ανεξαρτητοποιηθεί από το πλέγμα στα 920.000 στοιχεία.

6.1.2 Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων

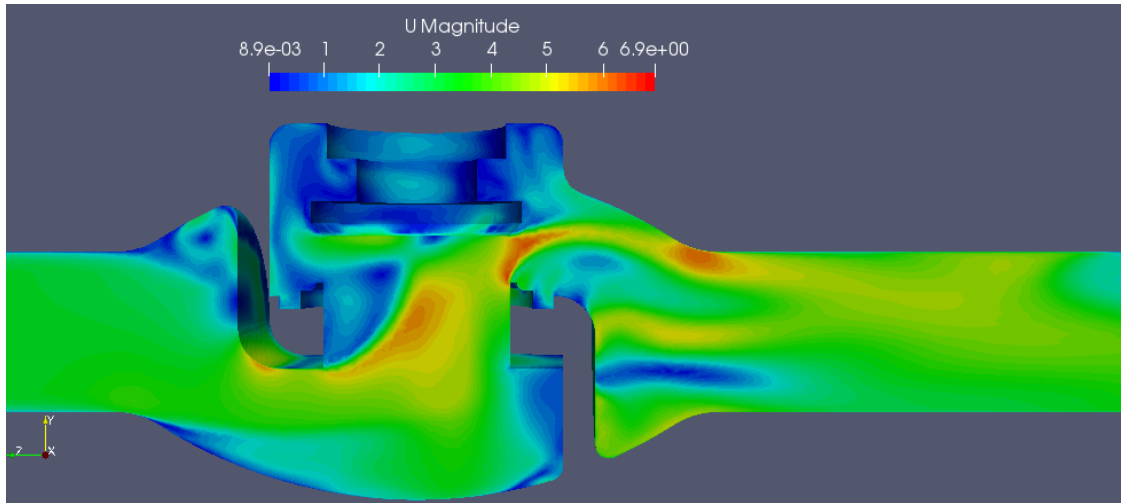
Τα αποτελέσματα της ταχύτητας έδειξαν ότι επιτυγχάνεται ποιοτική και ποσοτική ανεξαρτησία αυτής από το πλέγμα των 920.000 κελιών και πάνω. Στο πλέγμα των 610.000 κελιών το πεδίο της ταχύτητας δεν έχει προλάβει ακόμα να αναπτυχθεί πλήρως. Η ταχύτητα στο χείλος είναι λίγο μικρότερη από ότι η προκύπτουσα (Εικόνα 114). Επίσης το πεδίο κατάντη της βαλβίδας φαίνεται χωρίς σχεδόν καμία διαταραχή.



Εικόνα 114. Πεδίο ταχυτήτων στα 610.000 κελιά



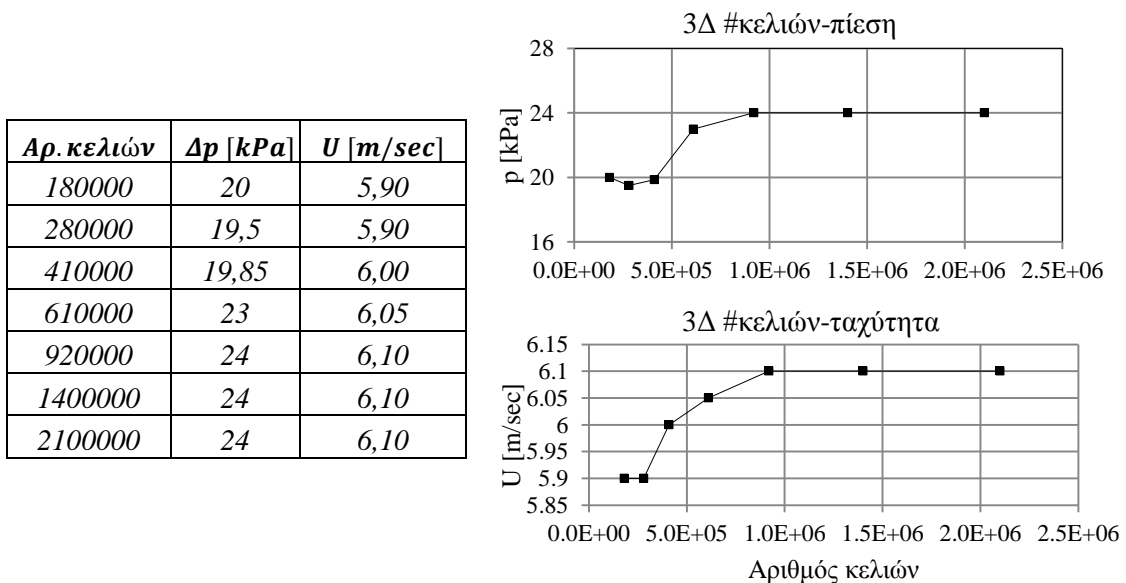
Εικόνα 115. Πεδίο ταχυτήτων στα 920.000 κελιά



Εικόνα 116. Πεδίο ταχυτήτων στα 1.400.000 κελιά

Αυτό όμως που γίνεται φανερό από τα επόμενα πλέγματα είναι, ότι υπάρχουν διαταράξεις και μάλιστα σημαντικές. Η αυξημένη ταχύτητα στο χείλος δικαιολογείται από την αρχή διατήρησης της μάζας και το γεγονός ότι η παροχή μένει σταθερή. Έτσι η μείωση της διατομής επιφέρει αύξηση της ταχύτητας. Η μεγάλη ταχύτητα αμέσως μετά το χείλος και στο πάνω μέρος της αρχής του σωλίνου εξηγείται από την αυξημένη ορμή που έχει το ρευστό έχοντας περάσει την στενή επιφάνεια (Εικόνες 114, 115, 116).

Τα αποτελέσματα της ανεξαρτησίας για όλα τα πλέγματα που κατασκευάστηκαν παρουσιάζονται γραφικά στα παρακάτω διαγράμματα (Εικόνα 117). Στην αριθμητική ανεξαρτησία της πίεσης, υπάρχει μια ελαφρά διακύμανση έως ότου σταθεροποιηθεί. Για την ανεξαρτησία της ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε η ταχύτητα του χείλους. Ο λόγος είναι ότι αποτελεί ένα σημείο εύκολα ελέγχξιμο, απο το γράφημα φαίνεται ότι η ταχύτητα συγκλίνει σταθερά, χωρίς διακυμάνσεις, στην τελική λύση. Από την στιγμή που τα τρία τελευταία πλέγματα συμφωνούν σε κοινή λύση και για τα δύο μεγέθη, κρατείται το πιο ελαφρύ. Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε το πλέγμα των 920.000 κελιών, ως εκείνο που παράγει πρακτικά ανεξάρτητα αποτελέσματα.



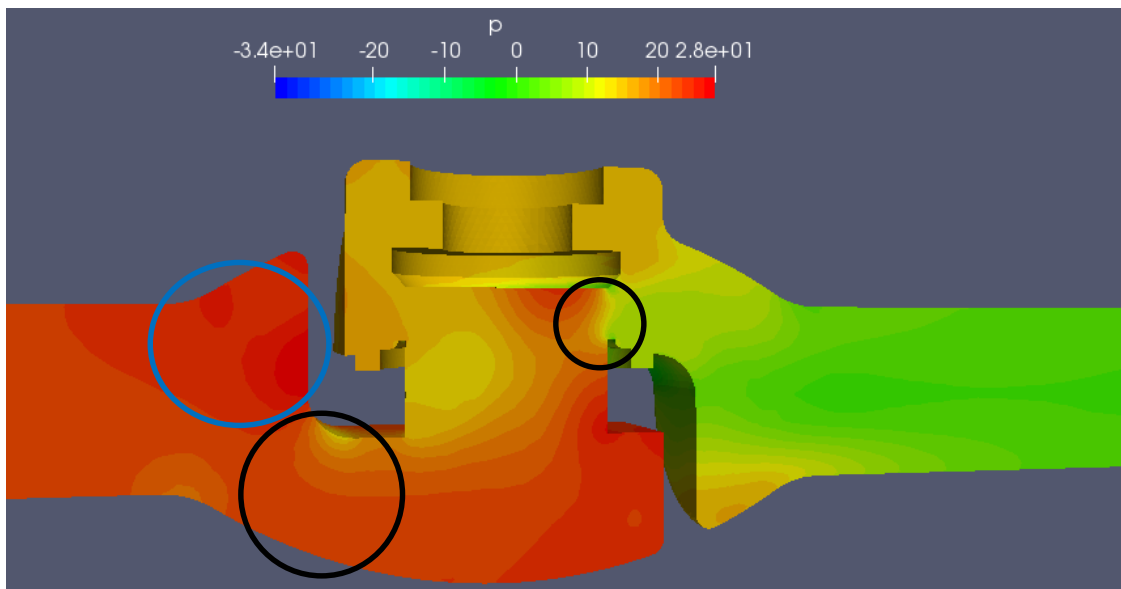
Εικόνα 117. Αποτελέσματα 3Δ ανεξαρτησίας πλέγματος

6.2 Μελέτη τρισδιάστατου προβλήματος

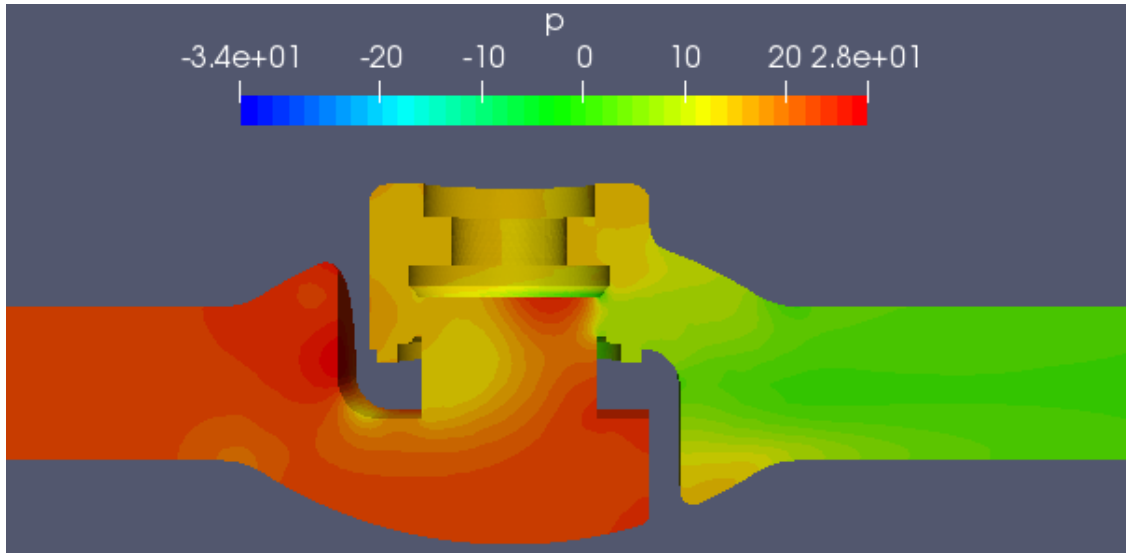
Με το πλέγμα των 920.000 κελιών επιλύεται η βαλβίδα στις υπόλοιπες θέσεις. Η πτώση πίεσης που υπολογίστηκε είναι με $\Delta p = 24 \text{ kPa} = 0,24 \text{ bar}$. Επιβάλλοντας αυτήν την πτώση πίεσης ως οριακή συνθήκη, έτσι ώστε να προκύπτει ταχύτητα περίπου 3 m/s στην πλήρως ανοικτή θέση της βαλβίδας, υπολογίζονται η ταχύτητα και η παροχή στην είσοδο με την οποία η βαλβίδα παρουσιάζει αυτήν τη πτώση πίεσης σε κάθε θέση (δηλαδή θεωρώντας σταθερή την στατική πίεση πριν τη βαλβίδα). Έτσι κατασκευάζουμε την χαρακτηριστική καμπύλη της παροχής συναρτήσει του ποσοστού ανοίγματος, όπως και στη δισδιάστατη περίπτωση (κεφ. 4). Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πίεσης και της ταχύτητας για όλες τις θέσεις. Για την πλήρως ανοικτή θέση των 20 mm τα αποτελέσματα έχουν ήδη παρουσιαστεί.

6.2.1 Ισοϋψείς καμπύλες της πίεσης

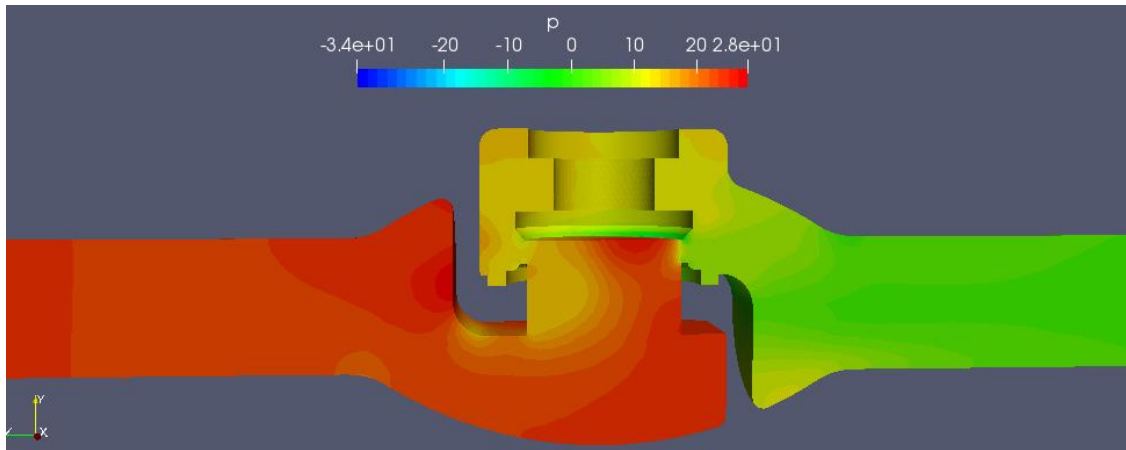
Στις επόμενες εικόνες (Εικόνες 118, 119, 120, 121) φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την πίεση σε όλες τις θέσεις. Παρατηρείται ότι το ρευστό εισέρχεται στην περιοχή της βαλβίδας με πίεση 24 kPa. Προκειμένου να βρεθεί με ακρίβεια η πτώση της πίεσης χρησιμοποιήθηκε μια εντολή του OpenFOAM η `//postProcess -func 'patchAverage (name=inlet,p)'` η οποία υπολογίζει τον μέσο όρο ενός μεγέθους, εν προκειμένω την πίεση στην είσοδο και αντίστοιχα στην έξοδο. Λίγο πριν εισέλθει στην βαλβίδα το ρευστό, στον μπλε κύκλο, η πίεση γίνεται μεγαλύτερη. Αυτό συμβαίνει διότι στην περιοχή αυτή η διάμετρος του αγωγού αυξάνει, επομένως με βάση την αρχή Bernulli η ταχύτητα μικραίνει και η πίεση αυξάνει. Το αντίστοιχο συμβαίνει και στην έξοδο από την βαλβίδα, όπου η πίεση προοδευτικά μικραίνει. Στο εσωτερικό της βαλβίδας, η πίεση μεταβάλλεται πτωτικά έως ότου περάσει στον επόμενο θάλαμο και γίνει ίση με την ατμοσφαιρική. Μεγάλη πτώση γίνεται στις περιοχές όπου υπάρχουν στενώσεις. Τέτοιες είναι, λίγο πριν εισέλθει στην βαλβίδα και στο χείλος. Οι δύο περιοχές σημειώνονται με τους μαύρους κύκλους στην Εικόνα 118. Με αυτόν τον τρόπο λοιπόν, προκύπτει η πτώση της πίεσης



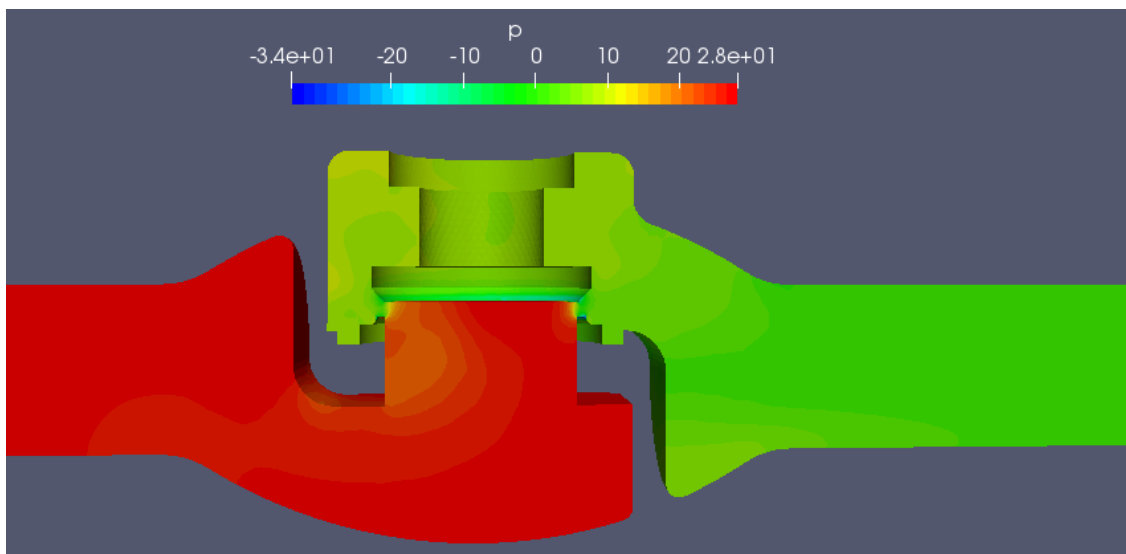
Εικόνα 118. Ισοϋψείς πίεσης για την θέση 20mm



Εικόνα 119. Ισοϋψείς πίεσης για την θέση 15mm



Εικόνα 120. Ισοϋψείς πίεσης για την θέση 10mm

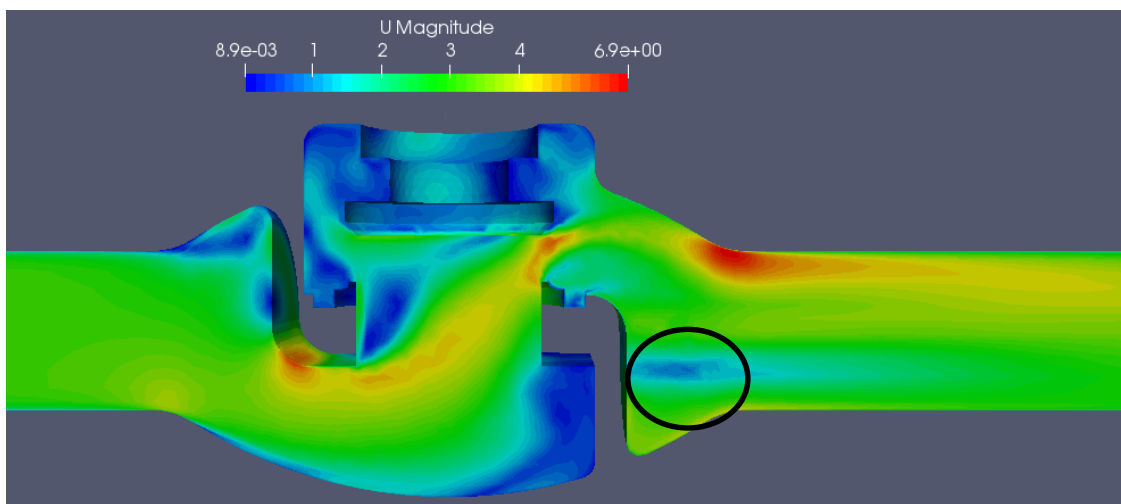


Εικόνα 121. Ισοϋψείς πίεσης για την θέση 5mm

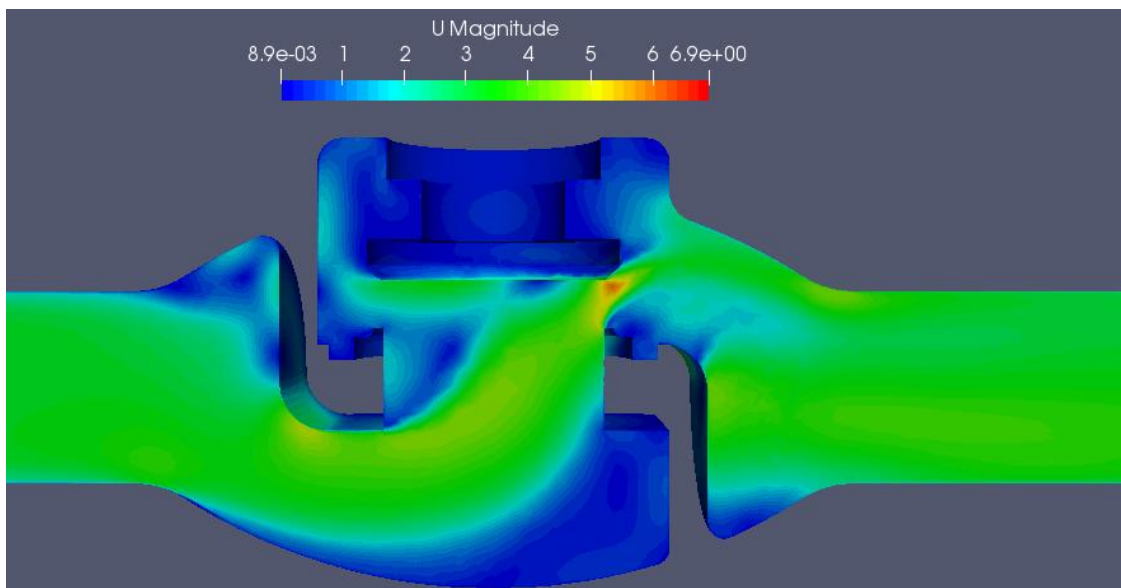
6.2.2 Ισοϋψείς καμπύλες ταχύτητας

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνες 122, 123, 124, 125) φαίνονται τα αποτελέσματα για το πεδίο ταχυτήτων στις διάφορες θέσεις. Αυτό που παρατηρείται γενικά για όλες τις θέσεις είναι ότι η ταχύτητα αυξάνεται στις μικρές διατομές του χωρίου. Για την πλήρως ανοιχτή θέση η ταχύτητα στο χείλος γίνεται περίπου δυο φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα στην είσοδο. Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με τα υπολογιστικά αποτελέσματα σε παρόμοια προσομοίωση για ίδιου τύπου βαλβίδα[25].

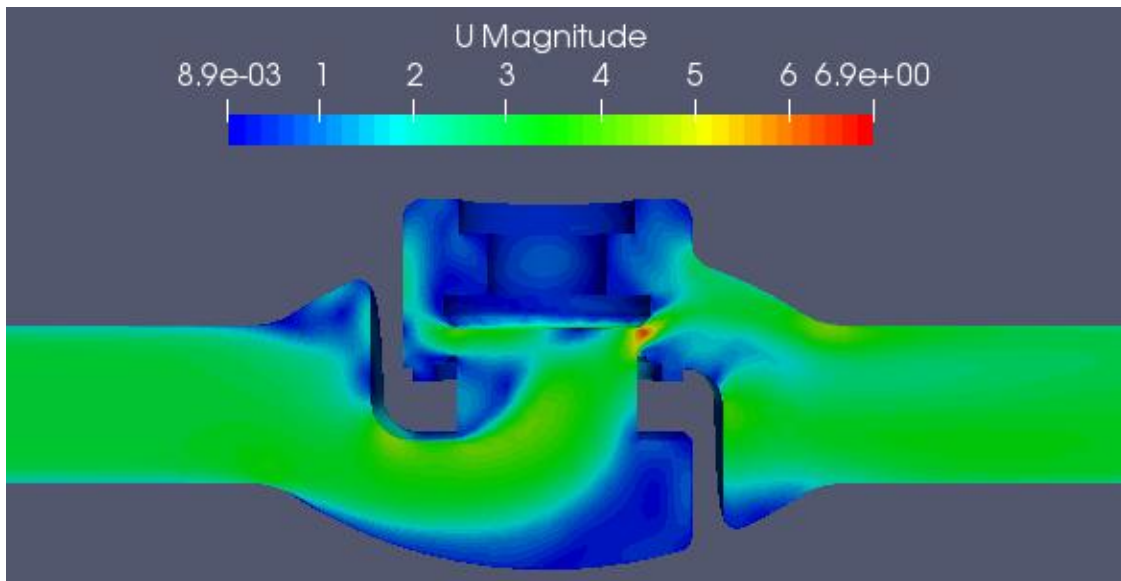
Η περιοχή κατάντη της βαλβίδας στο κάτω μέρος του σωλήνα (μαύρη λεπτομέρεια) δεν είναι περιοχή τοπικής ανακυκλοφορίας, όπως θα αναμένονταν με βάση τα αποτελέσματα της 2Διάστατης ανάλυσης. Προβάλλοντας τα διανύσματα των ταχυτήτων, προκύπτει ότι το ρευστό κινείται κατά μήκος των εγκάρσιων προφίλ της γεωμετρίας, δημιουργώντας έτσι ένα τελείως διαφορετικό φαινόμενο, αυτό της συστροφής, το οποίο θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.



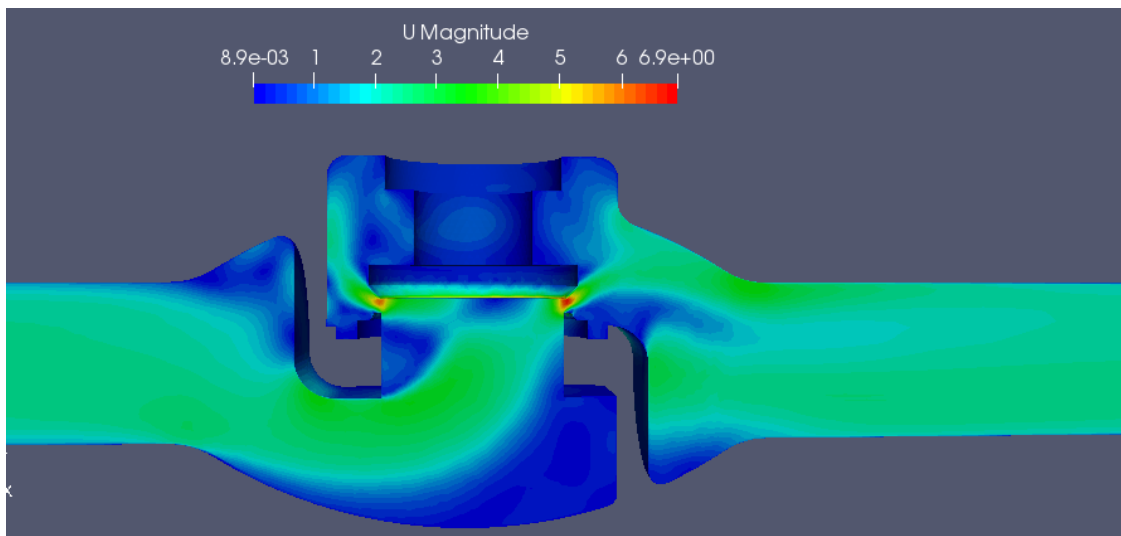
Εικόνα 122. Πεδίο ταχυτήτων 20mm



Εικόνα 123. Πεδίο ταχυτήτων 15mm



Εικόνα 124. Πεδίο ταχυτήτων 10mm



Εικόνα 125. Πεδίο ταχυτήτων 5 mm

Μειώνοντας το άνοιγμα της βαλβίδας, παρατηρείται το πεδίο των ταχυτήτων να γίνεται όλο και πιο ήπιο. Στην τελευταία θέση βλέπουμε ότι η ταχύτητα στο χείλος είναι αρκετά μεγάλη παρόλο που η ταχύτητα στη είσοδο έχει ελαττωθεί σημαντικά. Αυτό βέβαια εξηγείται από την πολύ μικρή διατομή που καλείται να περάσει το ρευστό, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα.

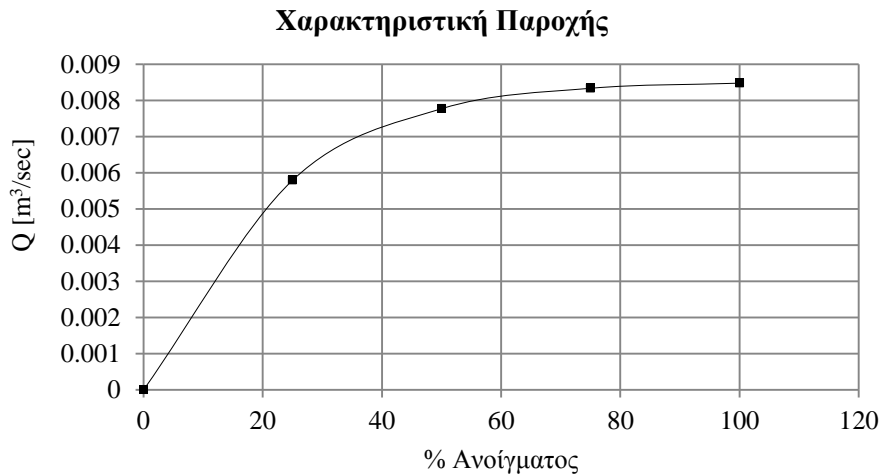
6.2.3 Χαρακτηριστικές παροχής και αντίστασης

Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα της προσομοίωσης καταρτίζεται ο παρακάτω Πίνακας 7 με τις ταχύτητες και τις αντίστοιχες τιμές της παροχής σε κάθε θέση στην είσοδο του αγωγού, που προέκυψαν ως λύση από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος.

Πίνακας 7. Αποτελέσματα προσομοίωσης

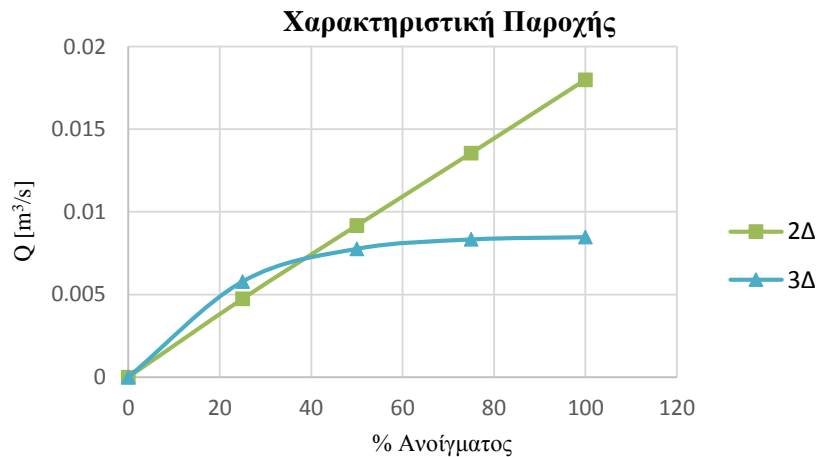
% Ανοίγματος	u (m/sec)	Q (m ³ /sec)
100	3	0,008478
75	2,95	0,008337
50	2,75	0,007772
25	2,05	0,005793
0	0	0

Τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα οπτικοποιούνται στο γράφημα της Εικόνας 126. Προκύπτει η χαρακτηριστική της παροχής. Το αποτέλεσμα αυτό είναι το αναμενόμενο και συμφωνεί με τις καμπύλες των κατασκευαστών για τέτοιου τύπου βαλβίδες. Η ανάλυση αφορά βαλβίδα γρήγορου ανοίγματος. Στις ανοικτές θέσεις κοντά στην πλήρως ανοικτή, η παροχή μεταβάλλεται λίγο σε σχέση με το άνοιγμα. Όσο το άνοιγμα μικραίνει, η παροχή ελαττώνεται πιο απότομα σε σχέση με πριν. Αυτό φαίνεται και απο την μορφή του δίσκου της βαλβίδας.



Εικόνα 126. Χαρακτηριστική καμπύλη παροχής

Συγκριτικά οι οι καμπύλες παροχής για το 2Δ και το 3Δ πρόβλημα φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 127. Σύγκριση χαρακτηριστικών 2Δ και 3Δ

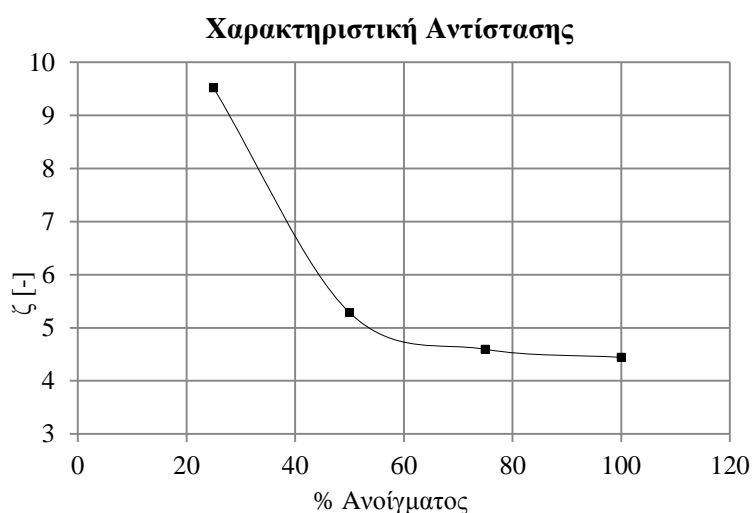
Από την σύγκριση φαίνεται ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά στις δύο προσεγγίσεις της ανάλυσης του προβλήματος. Από την δισδιάστατη ανάλυση προκύπτει ευθεία χαρακτηριστική, ενώ από την τρισδιάστατη, καμπύλη. Επιπλέον οι τιμές της παροχής για το δισδιάστατο πρόβλημα είναι μεγαλύτερες από αυτές του τρισδιάστατου και σε αυτό ωφείλεται ο τρόπος που ορίστηκε η παροχή στις δυο διαστάσεις. Αυτό όμως δεν έχει πολύ μεγάλο σημασία όσο η ποιοτική σύγκριση, από την οποία προκύπτει ότι η δισδιάστατη προσέγγιση αποτυγχάνει στο να προσομοιώσει σωστά το πρόβλημα.

Για τον καθορισμό της υδραυλικής αντίστασης ζ ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με αυτή του δισδιάστατου προβλήματος. Χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις 5.2, 5.3, 5.3 από όπου προέκυψε η έκφραση για το ζ σε συνάρτηση με την ταχύτητα. Στον επόμενο Πίνακα 8 γράφονται οι τιμές που προέκυψαν,

Πίνακας 8. Τιμές του ζ στις διάφορες θέσεις

% Ανοίγματος	ζ
100	4,44
75	4,86
50	5,34
25	9,61
0	Πολύ μεγάλο

Και εδώ για την πλήρως ανοικτή θέση ο συντελεστής υπολογίζεται $\zeta = 4,44$. Στις επόμενες θέσεις το ζ παίρνει πολύ μικρότερες τιμές από αυτές που έλαβε στην δισδιάστατη ανάλυση. Ο λόγος είναι ότι για τον υπολογισμό του ζ χρειάζεται η πτώση πίεσης, η οποία στην 3Δ ανάλυση είναι πολύ μικρότερη από ότι στην 2Δ. Έτσι η διαφορά που προκύπτει είναι μεγάλη. Γραφικά, η μεταβολή του ζ , καθώς το άνοιγμα μεταβάλλεται, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 128).

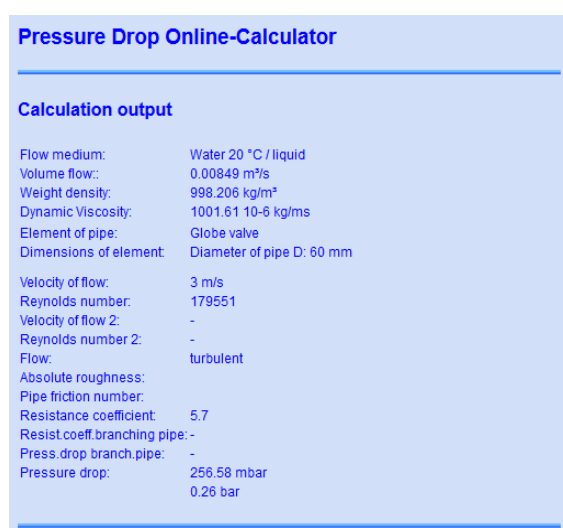


Εικόνα 128. Χαρακτηριστική καμπύλη απωλειών

6.3 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

6.3.1 Επικύρωση αποτελεσμάτων

Για την επικύρωση της ορθότητας των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρεις τρόποι. Αρχικά τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με εμπειρικές πειραματικές σχέσεις, τις οποίες χρησιμοποιεί η διαδικτυακή εφαρμογή το “Pressure Drop Online-Calculation” (Εικόνα 129). Είναι ένα αξιόπιστο υπολογιστικό εργαλείο της εταιρείας Software-Factory H. Schmitz το οποίο χρησιμοποιείται από μια πληθώρα εταιρειών στην βιομηχανία λόγω της εγκυρότητας του. Στην εφαρμογή εισήχθησαν η ταχύτητα εισόδου, η θερμοκρασία του ρευστού, η θερμοκρασία, το ιξώδες του μέσου, καθώς επίσης το είδος της βαλβίδας και την ονομαστική διάμετρο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στην πλήρως ανοικτή θέση η πτώση πίεσης ισούται με $\Delta p = 26 \text{ kPa} = 0.26 \text{ bar}$. Βασικό μειονέκτημα αυτού του προγράμματος είναι ότι υπολογίζει την πτώση πίεσης μόνο στην πλήρως ανοικτή θέση.



Pressure Drop Online-Calculator	
Calculation output	
Flow medium:	Water 20 °C / liquid
Volume flow:	0.00849 m³/s
Weight density:	998.206 kg/m³
Dynamic Viscosity:	1001.61 10-6 kg/ms
Element of pipe:	Globe valve
Dimensions of element:	Diameter of pipe D: 60 mm
Velocity of flow:	3 m/s
Reynolds number:	179551
Velocity of flow 2:	-
Reynolds number 2:	-
Flow:	turbulent
Absolute roughness:	
Pipe friction number:	
Resistance coefficient:	5.7
Resist. coeff. branching pipe:	-
Press. drop branch. pipe:	-
Pressure drop:	256.58 mbar 0.26 bar

Εικόνα 129. Αποτελέσματα ημιεμπειρικών σχέσεων

6.3.2 Σύγκριση με αποτελέσματα εμπορικού λογισμικού

Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν στην συνέχεια με αυτά του εμπορικού λογισμικού ANSYS που διαθέτει το ΕΜΠ. Το ANSYS κάνει ίδια δουλειά με το OpenFOAM, με την διαφορά ότι διαθέτει γραφικό περιβάλλον, πιο εύχρηστα εργαλεία και ο τρόπος που κατασκευάζει πλέγμα είναι σχετικά διαφοροποιημένος. Κατά τα άλλα, ο κώδικας επίλυσης που χρησιμοποιεί, και τα μοντέλα τύρβης, είναι παρόμοια.

Προκειμένου να γίνει η σύγκριση OpenFOAM και ANSYS, το πρόβλημα στο ANSYS στήθηκε με τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά του OpenFOAM.

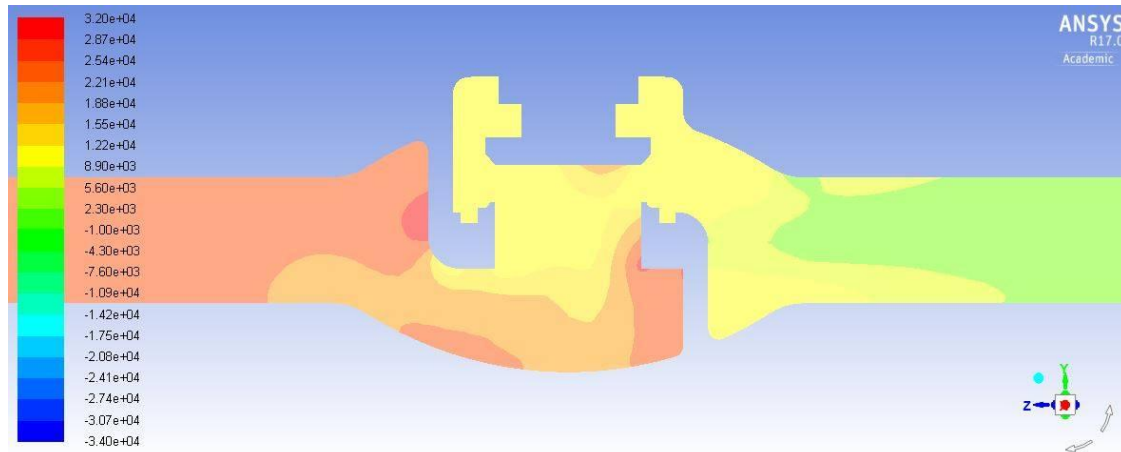
- Το πλέγμα επίλυσης είναι το ίδιο και στα δύο προγράμματα
- Το μοντέλο τύρβης είναι κοινό, το k-ε
- Ο κώδικας επίλυσης έχει την ίδια δομή και φιλοσοφία Simple (GAMG)

Τα σχήματα διακρητοποίησης, στο ANSYS, είναι όλα δεύτερης τάξης. Στο OpenFOAM, επειδή προέκυπταν προβλήματα με την σύγκλιση και την αστάθεια, χρησιμοποιήθηκαν

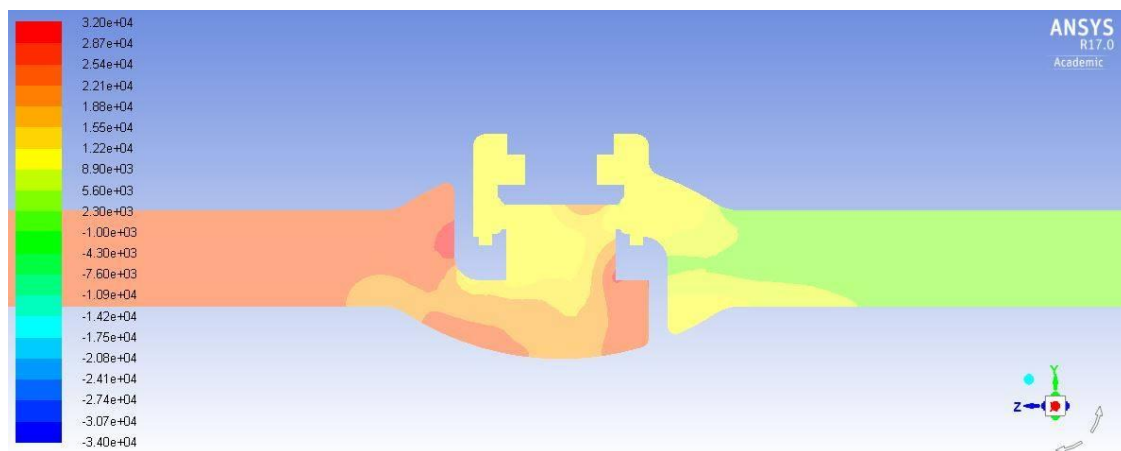
σχήματα δεύτερης τάξης μόνο για την ταχύτητα. Στα υπόλοιπα μεγέθη, χρησιμοποιήθηκαν σχήματα πρώτης τάξης, upwind, τα οποία έχουν γενικότερα καλύτερη συμπεριφορά στην σύγκλιση.

Κάνοντας τις προσομοιώσεις, για αρχική ταχύτητα 3m/sec και στην πλήρως ανοικτή θέση η πτώση πίεσης προέκυψε $\Delta p = 27\text{ kPa}$. Με δεδομένη αυτή την πτώση, η οποία επιβλήθηκε ως οριακή συνθήκη για τις υπόλοιπες θέσεις, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Εικόνες 130-134)

Ισοϋψείς πίεσης ANSYS

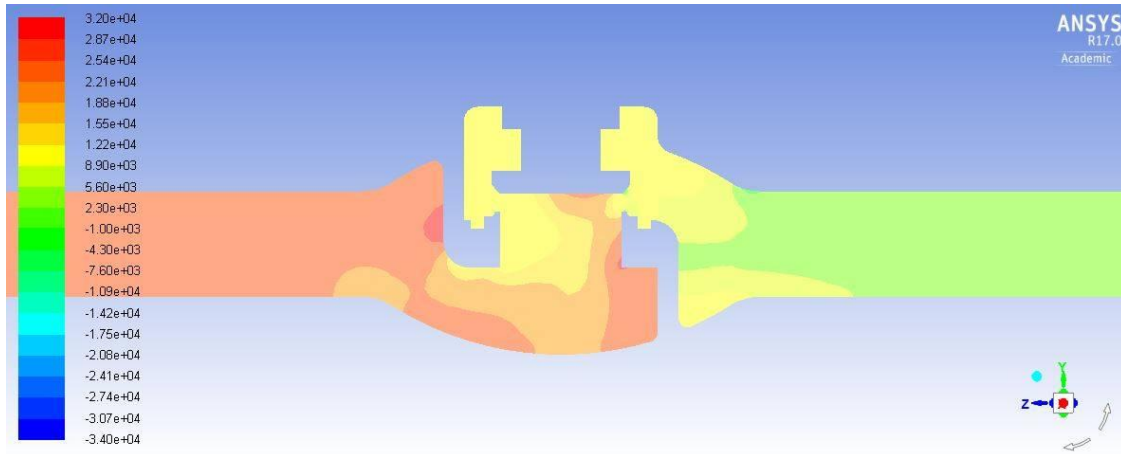


Εικόνα 130. Ισοϋψείς πίεσης για την θέση 20mm

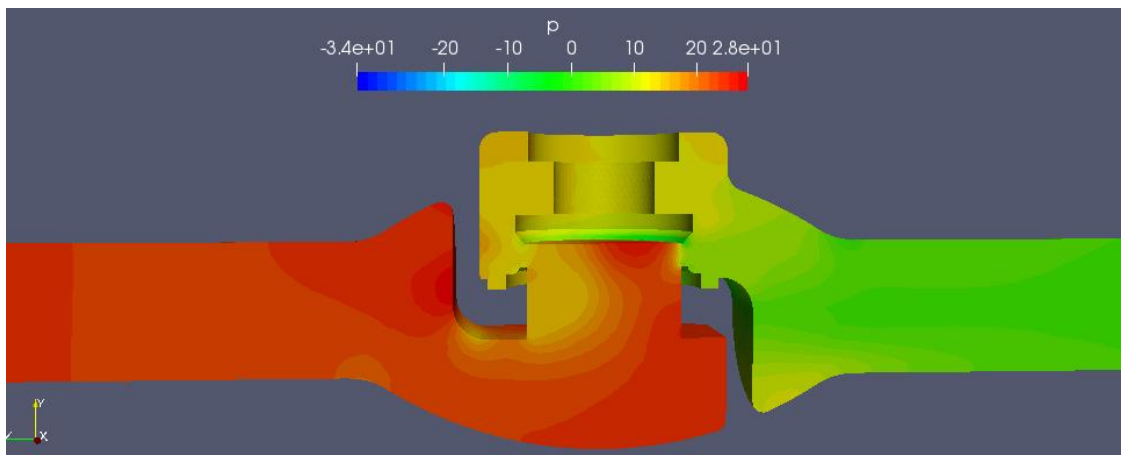


Εικόνα 131. Ισοϋψείς πίεσης για την θέση 15mm

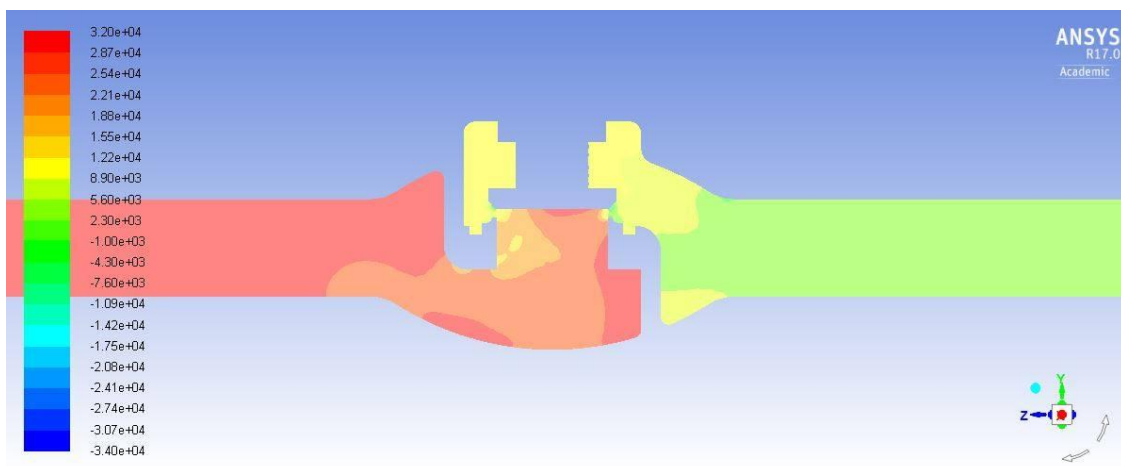
Για την θέση των 10 mm παρατίθενται και τα αποτελέσματα από το OpenFOAM για εποπτικότερη σύγκριση. Γίνεται φανερό ότι ποιοτικά τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Η πίεση μεταβαίνει από τον έναν θάλαμο στον άλλον προοδευτικά με τα πεδία των ισοϋψών των πίεσεων να είναι κοινά και στα δυο προγράμματα αποκτώντας έτσι μια σαφή ποιοτική εικόνα. Διαφέρουν σε κάποια σημεία στην μορφή χωρίς αυτό να επηρεάζει την λύση. Επίσης και η πτώση πίεσης Δp ανάντη και κατόντη της βαλβίδας προκύπτει πολύ κοντά.



Εικόνα 132. Ισοψείς πίεσης για την θέση 10mm

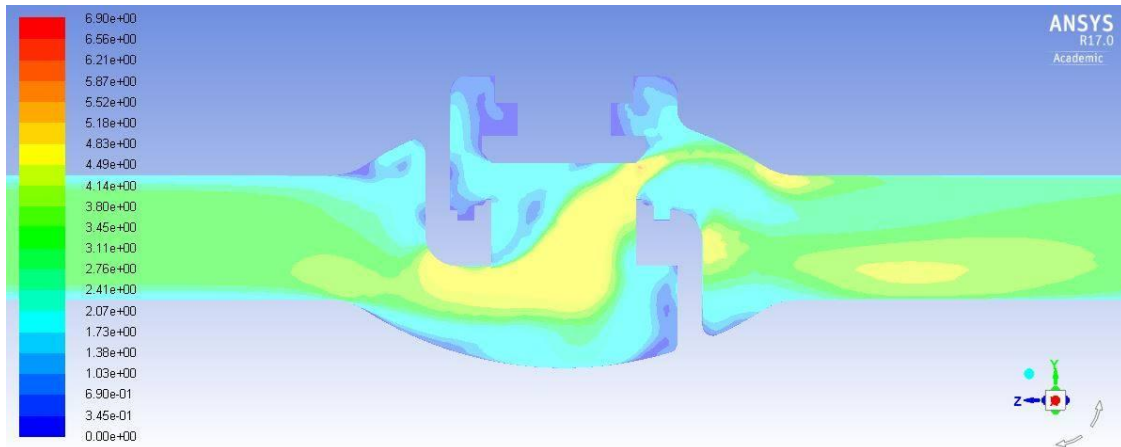


Εικόνα 133. Ισοψείς πίεσης για την θέση 10mm OpenFOAM

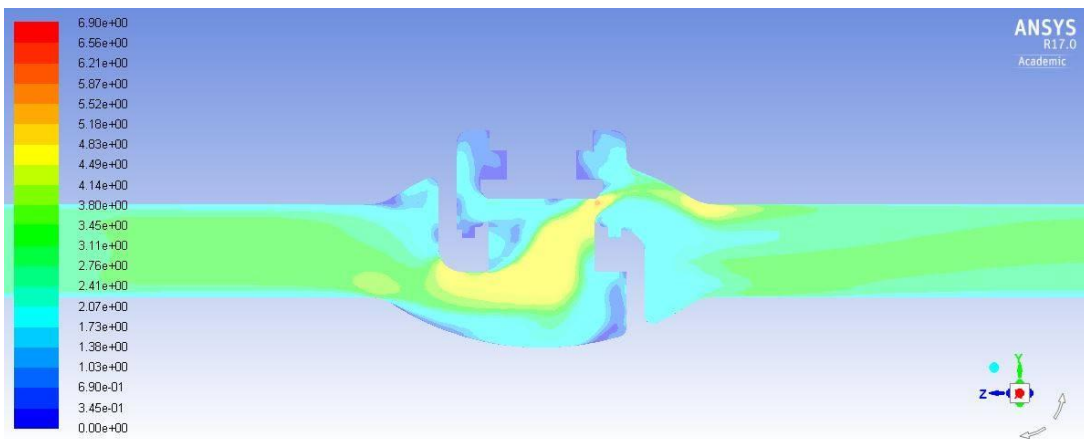


Εικόνα 134. Ισοψείς πίεσης για την θέση 5mm

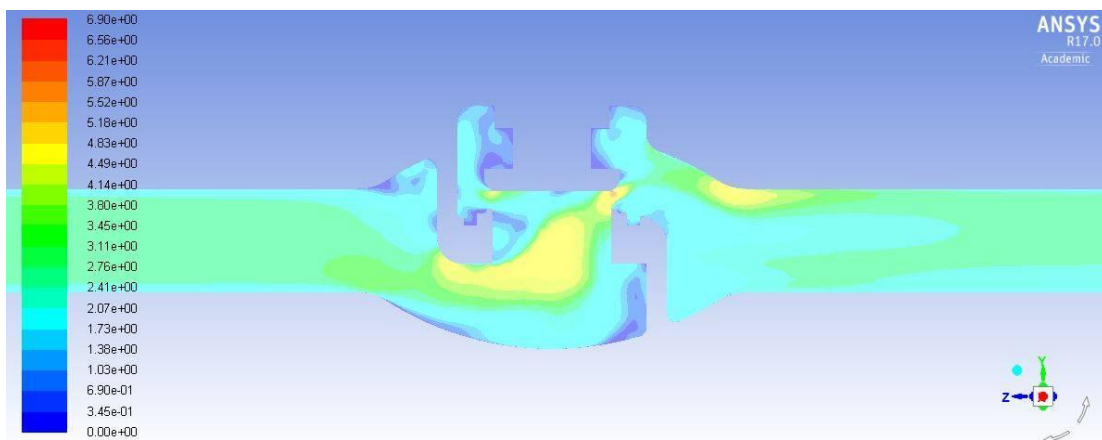
Ισοϋψείς ταχύτητας ANSYS



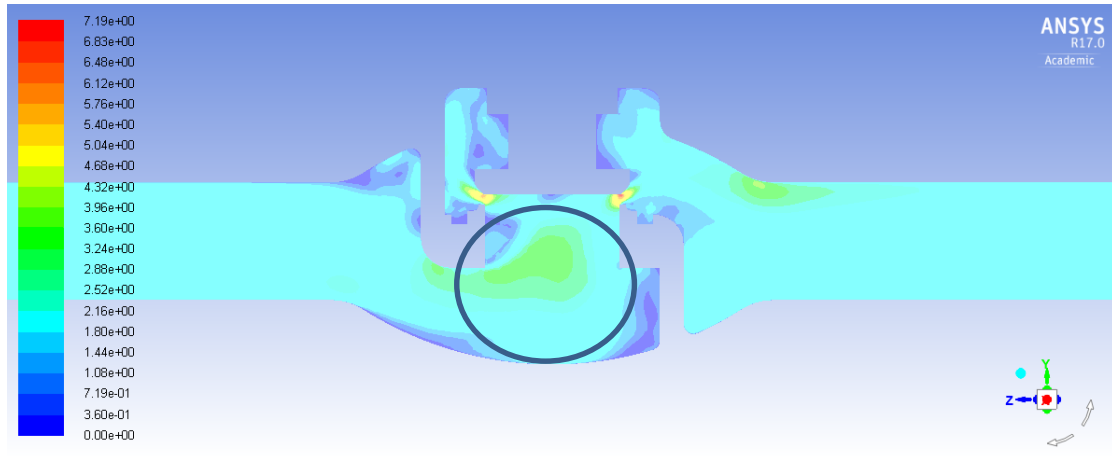
Εικόνα 135. Πεδίο ταχυτήτων για την θέση 20mm



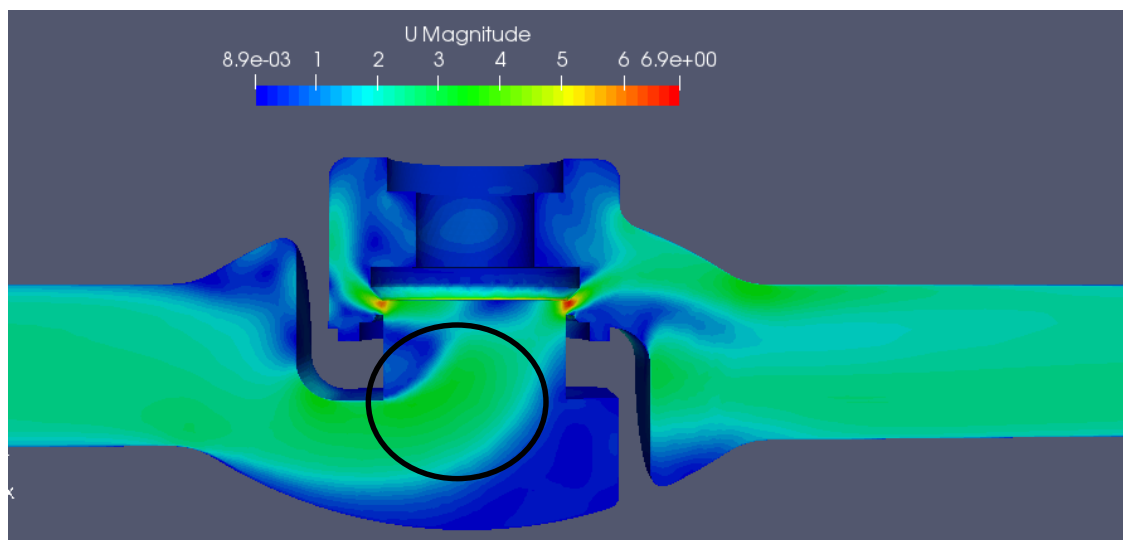
Εικόνα 136. Πεδίο ταχυτήτων για την θέση 15mm



Εικόνα 137. Πεδίο ταχυτήτων για την θέση 10mm



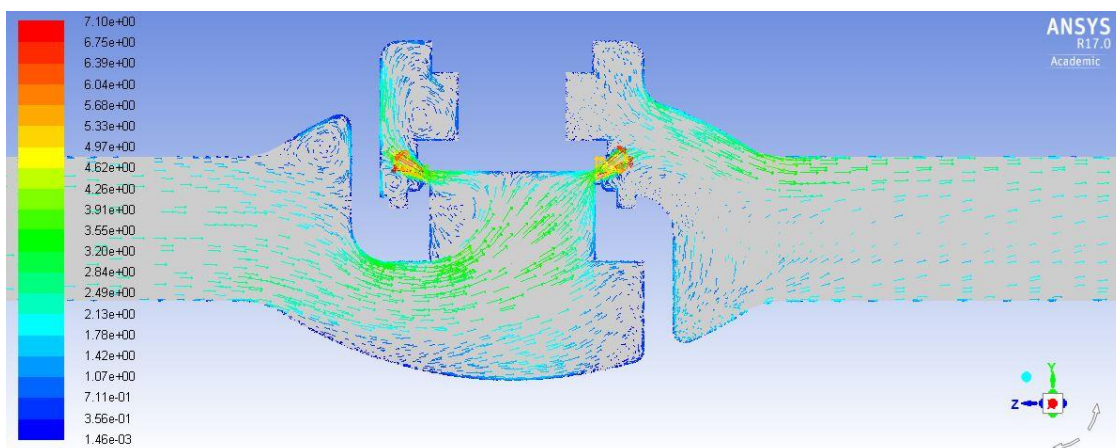
Εικόνα 138. Πεδίο ταχυτήτων για την θέση 5mm



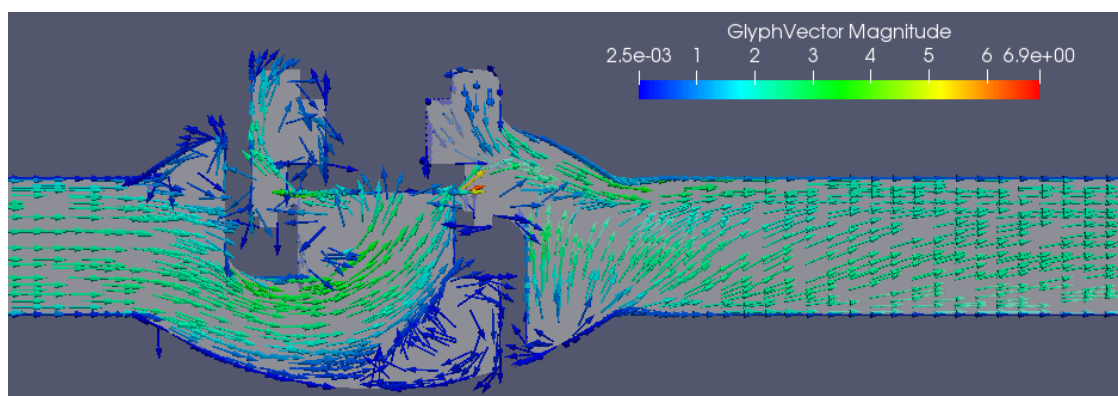
Εικόνα 139. Πεδίο ταχυτήτων για την θέση 5mm στο OpenFOAM

Απο την σύγκριση του πεδίου της ταχύτητας στην τελευταία θέση των 5mm (Εικόνες 138, 139) φαίνεται ότι υπάρχει ποσοτική ομοιότητα των αποτελεσμάτων. Στην περιοχή στο εσωτερικό της βαλβίδας η ταχύτητα και στις δύο περιπτώσεις είναι $u = 3.5 \text{ m/sec}$ και στο χείλος αυξάνεται και γίνεται στην περίπτωση του ANSYS, $u_{\text{χειλ_ANSYS}} = 7.1 \text{ m/sec}$ και στην περίπτωση του OpenFOAM, $u_{\text{χειλ_OF}} = 6.9 \text{ m/sec}$. Υπάρχει δηλαδή αρκετά καλή ταύτιση. Αλλά και ποιοτικά η λύση προσεγγίζεται καλά και στις δύο περιπτώσεις με την διαφορά ότι στο ANSYS οι ισοϋψείς περιοχές είναι πιο απλωμένες από ότι στο OpenFOAM (λεπτομέρειες εικόνων 126, 127). Αυτή η απόκλιση, στις ισοϋψεις, οφείλεται αφενός στις διαφορές των σχημάτων διακρητοποίησης των μεγεθών, αφετέρου σε μικροδιαφορές στον ίδιο τον κώδικα.

Η σύγκριση φαίνεται επίσης και από τα διανύσματα των ταχυτήτων σε αυτή την θέση στις Εικόνες 140, 141. Με τα διανύσματα μπορούν να γίνουν ορατές και οι περιοχές τοπικής ανακυκλοφορίας στις οξείες γωνίες της γεωμετρίας και η ακριβής πορεία που ακολουθούν τα στοιχειώδη σωματίδια του ρευστού. Επίσης φαίνεται και απο τα διανύσματα ότι τα πεδία των ταχυτήτων βρίσκονται πολύ κοντά ποιοτικά και ποσοτικά.



Εικόνα 140. Διανύσματα ταχυτήτων στο ANSYS για τα 5mm άνοιγμα



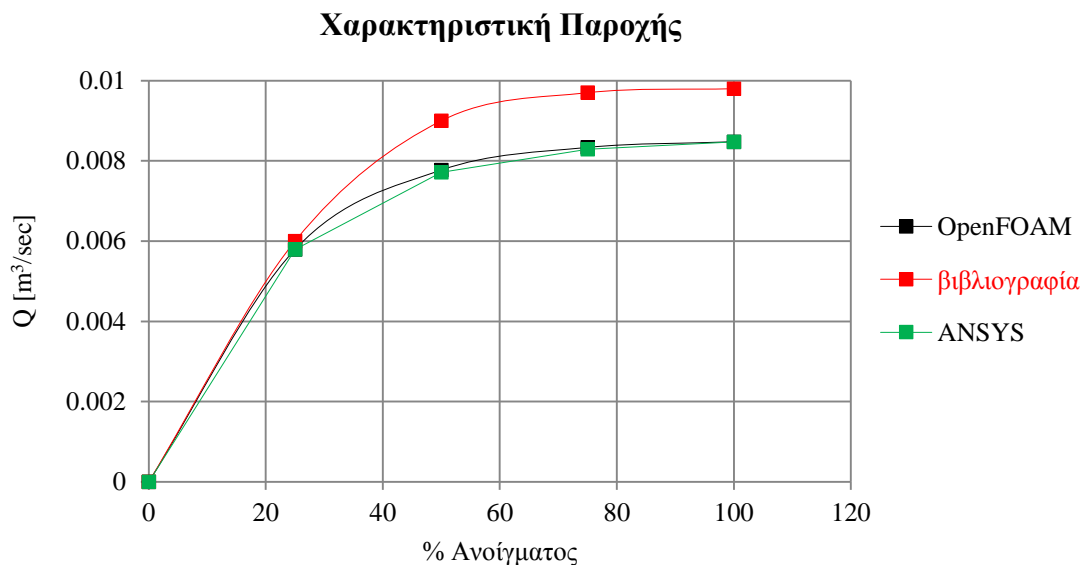
Εικόνα 141. Διανύσματα ταχυτήτων στο OpenFOAM για τα 5mm άνοιγμα

Τέλος τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πηγές από την διεθνή βιβλιογραφία, με μία δημοσίευση απο τους ερευνητές C. Gawade, V. Vajarinkar [24]. Η δημοσίευση αφορά μια δισκοβαλβίδα με ίδιο σύστημα οριακών συνθηκών, ροή με νερό 25 °C και παραπλήσιους αριθμούς Re . Συγκεκριμένα ο Re της βαλβίδας που εξετάστηκε στο OpenFOAM είναι: $Re_{OF} = 179.283$ ενώ ο Re στη εφαρμογή της δημοσίευσης είναι $Re_{lit} = 196.347$. Ο σκοπός αυτής της εργασίας ήταν να πάρει μια υπάρχουσα δικοβαλβίδα και να εξετάσει την πτώση πίεσης για διάφορους τύπους εμβόλων. Πάρθηκαν λοιπόν εκείνα τα αποτελέσματα που αφορούσαν σε έμβολο παρόμοιας γεωμετρίας με αυτή που μελετήθηκε στο OpenFOAM.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 9 και Εικόνα 144.

Πίνακας 9. Σύγκριση της πτώσης πίεσης στην πλήρως ανοικτή θέση

	<i>OpenFOAM</i>	Pressure Drop Online-Calculation	<i>ANSYS</i>	<i>literature</i>
Δp	24 kPa	26 kPa	27 kPa	25 kPa



Εικόνα 142. Αποτελέσματα ταυτοποίησης για όλες τις θέσεις

Από το διάγραμμα της Εικόνας 142 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Τα αποτελέσματα του OpenFOAM συμφωνούν σχεδόν απόλυτα με εκείνα του ANSYS και παρατηρούνται πολύ μικρές διαφορές. Αυτό εξηγείται από το ότι στα δυο λογισμικά εισήχθησαν ακριβώς οι ίδιες οριακές συνθήκες και η ροή επιλύθηκε στο ίδιο χώρο. Αποτελεί λοιπόν επιτυχία του OpenFOAM, των σχημάτων διακρητοποίησης και της μεθόδου που ακολουθήθηκε, η τόσο κοντινή σύγκλιση που επετεύχθει. Τα αποτελέσματα με την δημοσίευση δεν συμφωνούν απολύτως διότι, υπήρχαν ορισμένες διαφορές. Η πιο σημαντική είναι η διαφορά στον αριθμό Re. Μεγαλύτερος Re συνεπάγεται μεγαλύτερη ταχύτητα στην ροή και επομένως μεγαλύτερη παροχή σε όλες τις θέσεις. Επιπλέον, η δημοσίευση αφορούσε ροή αυστηρά στα όρια της βαλβίδας, ενώ στην διπλωματική η ροή μελετήθηκε και στους σωλήνες πριν και μετά.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα και από τις τρεις πηγές, συμφωνούν ικανοποιητικά και προβλέπουν με σχετικά μεγάλη ακρίβεια την συμπεριφορά της ροής.

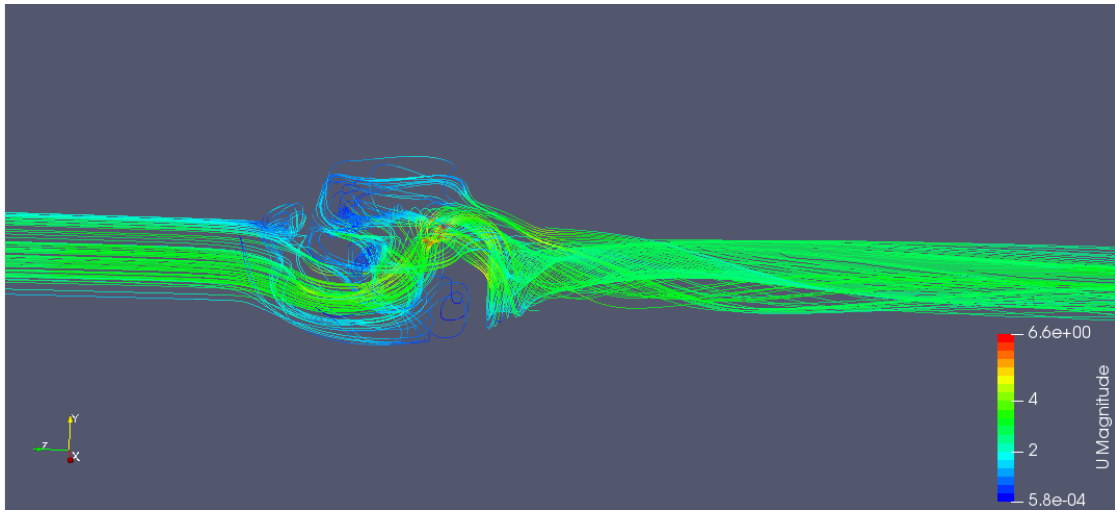
6.4 Ανάλυση του πεδίου ροής στη βαλβίδα

6.4.1 Συστροφή

Παρατηρώντας τις γραμμές ροής προκύπτει ένα ενδιαφέρον φαινόμενο. Μετά την έξοδο η ροή αποκτά συστροφή (Εικόνα 143). Δημιουργείται δηλαδή ένας στρόβιλος. Κοιτώντας την ροή μέσα στην γεωμετρία παρατηρείται έχει πολλά κοινά στοιχεία με την ροή σε ένα στοιχείο αλλαγής της ροής τύπου Γ. Η ροή μέσα στην βαλβίδα αλλάζει κατεύθυνση, χάνει την αξονική της συμμετρίας και οι γραμμές ροής καμπυλώνονται.

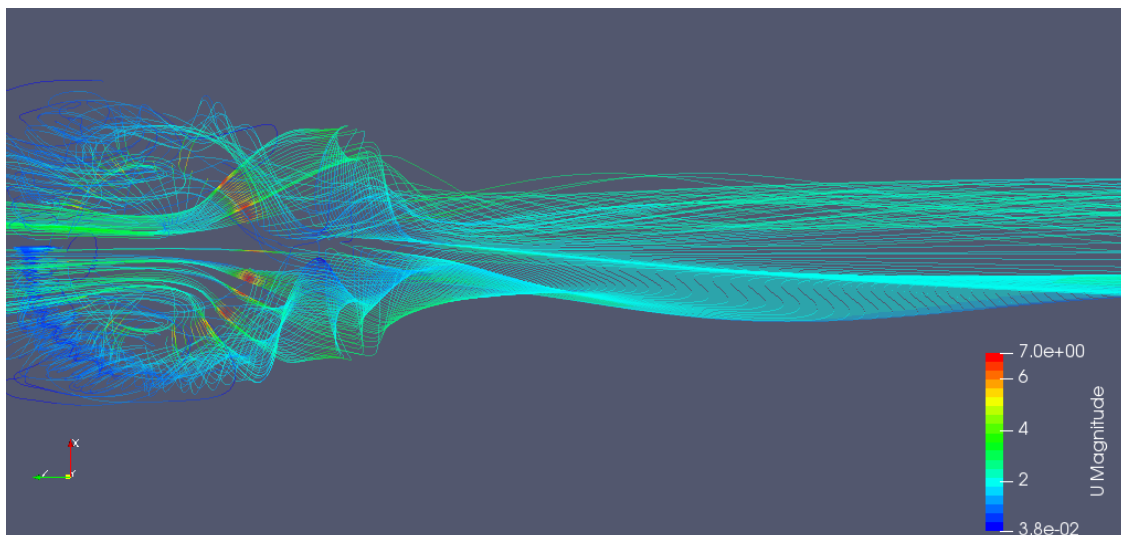
Οι δίνες αυτές που δημιουργούνται από την αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής ονομάζονται δίνες Dean και αναπτύσσονται γενικότερα σε στοιχεία και σωληνώσεις αλλαγής κατεύθυνσης. Οι μηχανισμοί οι οποίοι προκαλούν τις δίνες Dean και την διατάραξη της ροής είναι δυό. Στην αρχή της γωνίας του στοιχείου αλλαγής κατεύθυνσης και λόγω της επίδρασης των

φυγοκέντρων δυνάμεων στην εξωτερική μεριά, δημιουργείται αύξηση της πίεσης με αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας, ενώ στο τέλος του στοιχείου η ταχύτητα αυξάνεται. Το αντίθετο συμβαίνει στην εσωτερική μεριά όπου η ταχύτητα αρχικά αυξάνει και ύστερα ελαττώνεται. Από την θεωρία είναι γνωστό ότι όπου η ταχύτητα αυξάνεται υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αποκόλλησης. Η τυχόν αποκόλληση και η ανομοιομορφία του προφίλ της ταχύτητας δημιουργούν απώλειες στην ροή. Ο δεύτερος λόγος που συντελούνται απώλειες είναι η ανάπτυξη δευτερεύουσας ροής με έναν ή περισσότερους στροβίλους. Οι στροβίλοι αναπτύσσονται από την διαφορά πίεσης στο εσωτερικό και εξωτερικό τοίχωμα του καμπύλου σωλήνα σε μια διατομή η οποία εξαναγκάζει το ρευστό σε συστροφή.



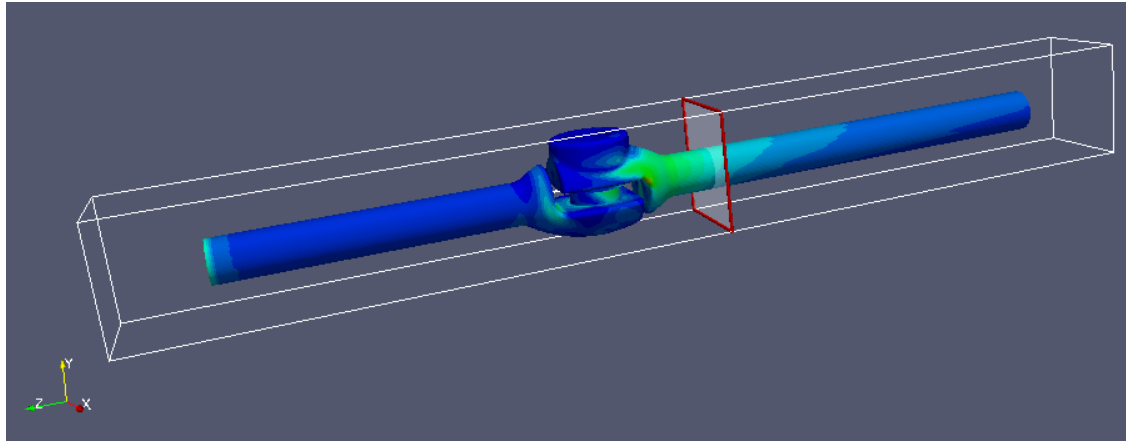
Εικόνα 143. Στροβιλισμός του ρευστού στην έξοδο

Στην επόμενη Εικόνα 144 φαίνονται σε κάτοψη οι γραμμές ροής του πεδίου της ταχύτητας. Στην έξοδο της βαλβίδας διακρίνονται οι δύο αντίρροπες δίνες, οι οποίες αναπτύσσονται κάθετα της αξονικής κατεύθυνσης της ροής.



Εικόνα 144. Κάτοψη των δινών Dean

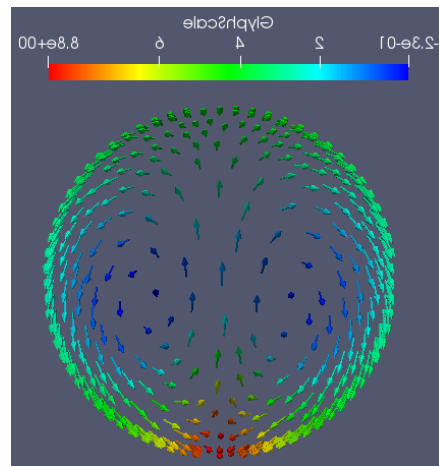
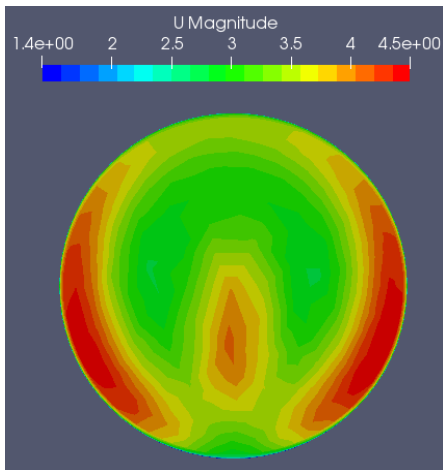
Το φαινόμενο γίνεται αντιληπτό επίσης, από τις ισοϋψείς και τα διανύσματα της ταχύτητας προβαλλόμενα σε τομή, λίγο μετά την έξοδο, με κάθετο επίπεδο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 145.



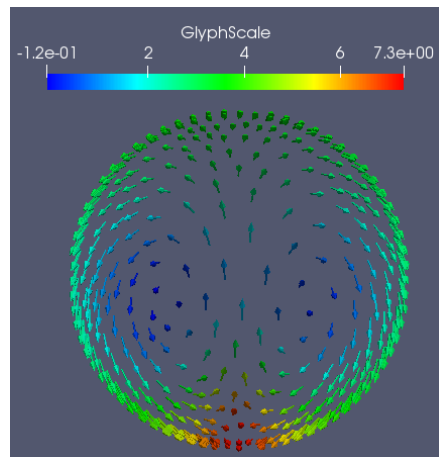
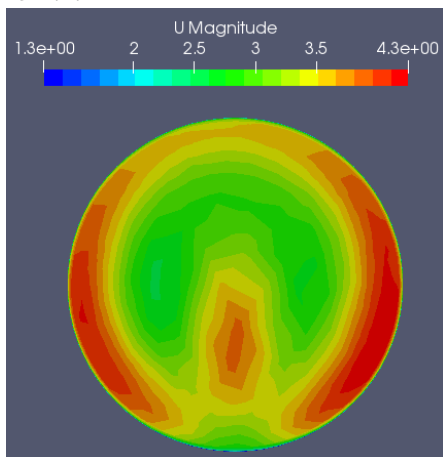
Εικόνα 145. Επίπεδο τομής

Στην Εικόνα 146 παρουσιάζονται τα προφίλ της ταχύτητας σε όλες τις θέσεις ανοίγματος στο επίπεδο που δείχνει η Εικόνα 133. Γίνεται λοιπόν φανερή η συστροφή του ρευστού αμέσως μετά την έξοδο. Στην αριστερή πλευρά είναι οι ισοϋψείς της ταχύτητας και στα δεξιά, τα διανύσματα που δείχνουν την κατεύθυνση της ροής. Η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στην περιφέρεια του σωλήνα και λίγο μικρότερη στο κέντρο. Αυτή η διαφορά σε σχέση με τις ταχύτητες στο κέντρο, είναι που προκαλεί στο ρευστό συστροφή.

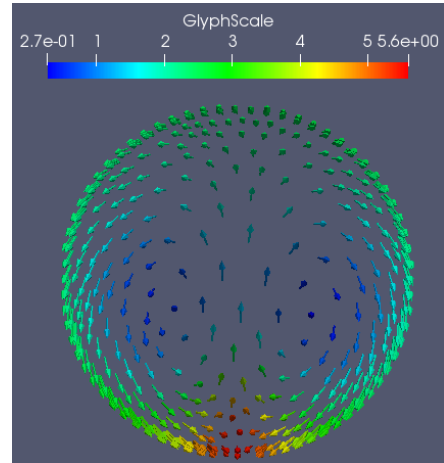
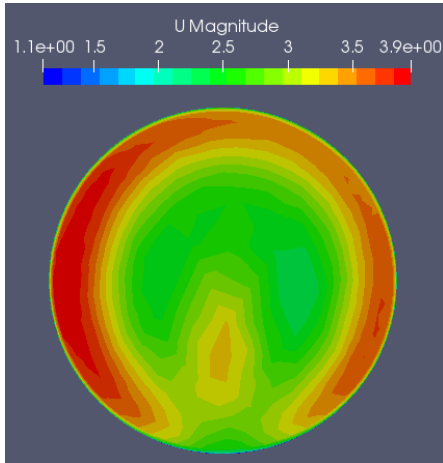
20 mm



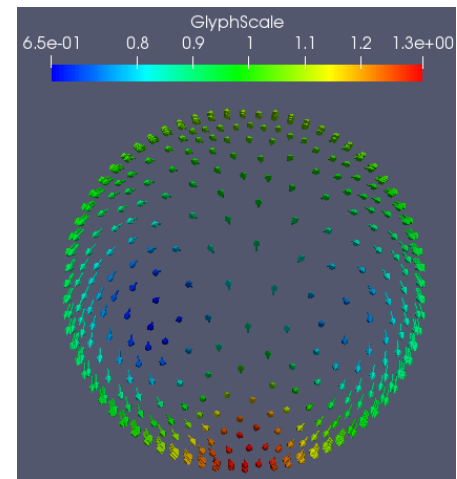
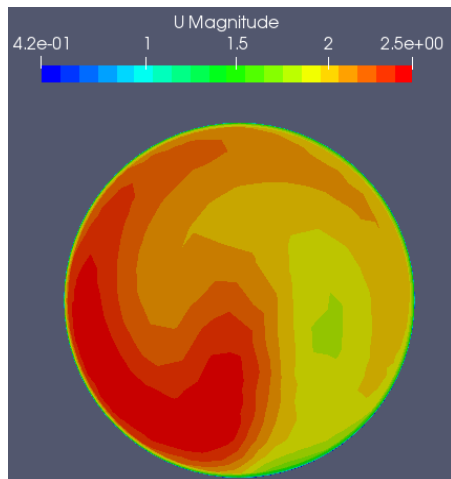
15 mm



10 mm



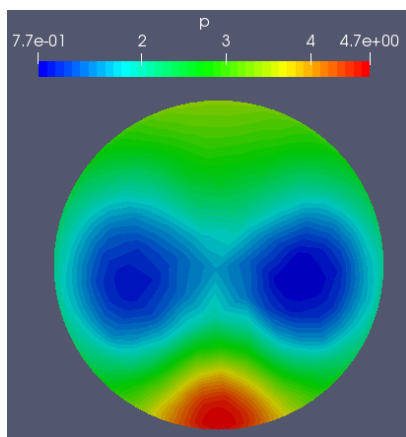
5 mm



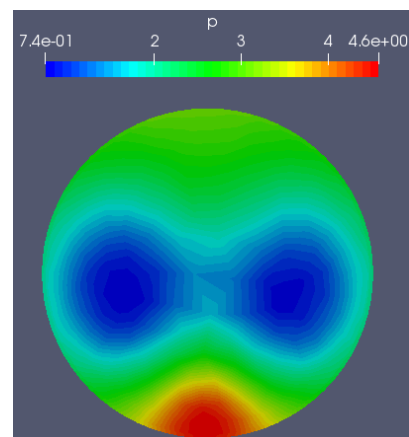
Εικόνα 146. Προφίλ ταχύτητας και τα αντίστοιχα διανύσματα κατόπιν της γεωμετρίας

Στη τελευταία θέση, στα 5mm ανοίγματος του εμβόλου, η συμμετρία των δύο δινών φαίνεται ότι χαλάει. Αυτό είναι πιθανό γιατί σε χαμηλές ταχύτητες ροής, χάνεται η συμμετρία των φαινομένων και οι δύο δίνες δεν μπορούν να συγκρατηθούν όμοιες.

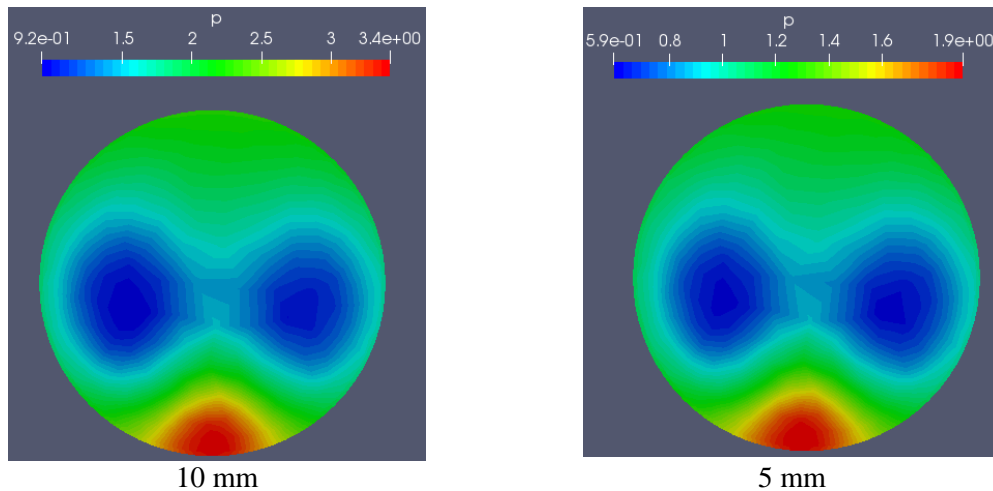
Κατά το ίδιο επίπεδο προβάλλονται και οι ισοϋψείς της πίεσης.



20 mm



15 mm



Εικόνα 147. Προφίλ πιέσεων σε εγκάρσιο επίπεδο τομής

Φαίνεται ότι ο τρόπος που είναι οι ισοϋψείς δικαιολογεί την ύπαρξη των δίνων.

6.4.2 Σύγκριση 2Δ-3Δ

Οι χαρακτηριστικές της παροχής που προέκυψαν για τις δύο περιπτώσεις (2Δ, 3Δ) είναι σαφώς διαφορετικές, ποιοτικά και ποσοτικά. Η πρώτη προς παρατήρηση διαφορά είναι στην μορφή. Στην δισδιάστατη αντιμετώπιση η καμπύλη που προκύπτει είναι ευθεία, ενώ στην τρισδιάστατη είναι καμπύλη.

Η αιτία έγκυται στην φύση της 2Δ γεωμετρίας, στην οποία η διατομή που καλείται να περάσει το ρευστό είναι πολύ μικρή. Αντίθετα στην 3Δ αντιμετώπιση η διατομή που καλείται να περάσει το ρευστό είναι ένα περιφερειακό δαχτυλίδι ανάμεσα στην έδραση και το έμβολο. Συνεπώς, η μορφή της χαρακτηριστικής αλλάζει. Το γεγονός αυτό επηρεάζει και την διαφορά στην πτώση της πίεσης. Η διατομή του χείλους είναι πολύ μεγαλύτερη στο 3Δ άρα και η πτώση πίεσης μικρότερη. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει και από τις τιμές της ταχύτητας στο χείλος. Στο μεν 2Δ, είναι της τάξης των 15-16 m/s ενώ στο 3δ είναι της τάξης των 5,5 – 6 m/s. Η πτώση πίεσης επηρεάζεται επίσης και από τις μεγάλες δίνες, που σχηματίζονται στο 2Δ πρόβλημα, μετά την βαλβίδα και εκτείνονται σε αρκετά μεγάλο μήκος.

Η αλλαγή στην πτώση της πίεσης μοιραία οδηγεί και σε αλλοίωση του συντελεστή απωλειών ζ, ο οποίος υπολογίζεται σε συνάρτηση του Δp και του u . Επομένως ούτε οι απώλειες εκτιμώνται σωστά στο 2Δ μοντέλο.

Φαίνεται λοιπόν ότι υπάρχει μια σειρά γεγονότων, αλληλοεξαρτούμενων, τα οποία καθιστούν το δισδιάστατο μοντέλο αδύνατο για την μοντελοποίηση του προβλήματος.

Κεφάλαιο 6 Σπηλαιώση

6.1 Γενικά

Η σπηλαιώση είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει στις βαλβίδες και σε όλες τις υδροδυναμικές μηχανές όταν σε κάποιο σημείο τοπικά η πίεση που επικρατεί κατέβει κάτω από την πίεση ατμοποίησης του υγρού. Τότε το υγρό τοπικά ατμοποιείται και όταν η πίεση ξανανέβει πάνω από την πίεση ατμοποίησης οι φυσαλίδες ατμού σκάνε. Είναι ένα φαινόμενο που προκαλεί θόρυβο και συνήθως είναι χαμηλής έντασης αλλά συνεχόμενο. Έτσι είναι πολύ καταστροφικό για το υλικό και με τον καιρό φθείρει το μέταλλο προκαλώντας του κόπωση και αστοχία. Η ένταση του ορίζεται από τον συντελεστή σπηλαιώσης σ που ορίζεται όπως στην εξίσωση 1.16

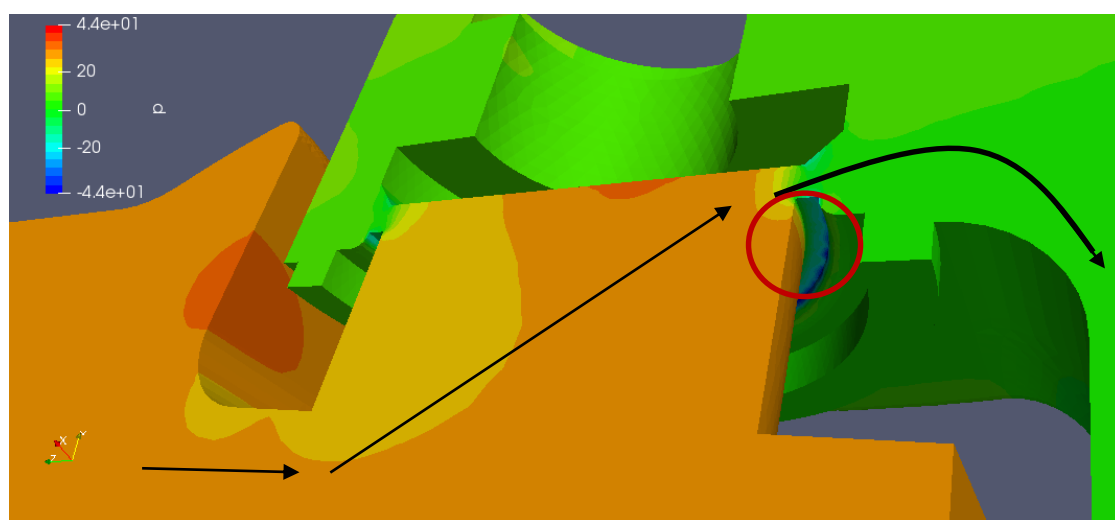
Στην υπό εξέταση βαλβίδα ο συντελεστής αυτός ισούται με:

$$\sigma = \frac{24 - 3,169}{24} = 0,8679$$

όπου $P_s = 3,169 \text{ kPa}$ για νερό στους $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Προκειμένου να μελετηθεί η σπηλαιώση υπάρχουν οι εξής τρόποι: α) με πείραμα, όπου διοχετεύεται υγρό στην βαλβίδα με συγκεκριμένες συνθήκες και ελέγχεται αν δημιουργούνται φυσαλίδες, β) με υπολογιστική προσομοίωση της ροής στην βαλβίδα και γ) με ακουστική ανάλυση όπου μετράται το επίπεδο του θορύβου που προκαλούν οι φυσαλίδες προκειμένου να βρεθεί η ένταση της σπηλαιώσης.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε υπολογιστική προσομοίωση. Η μελέτη της σπηλαιώσης έγινε με τον εξής τρόπο. Η πιο δυσμενής κατάσταση είναι η τελευταία θέση στην οποία η διατομή από την οποία διέρχεται το ρευστό είναι η μικρότερη με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ταχύτητα και να πέφτει η πίεση. Στην εικόνα 148 φαίνεται η πιθανή περιοχή σπηλαιώσης στον κόκκινο κύκλο και η πορεία της ροής με μαύρα βέλη.



Εικόνα 148. Περιοχή πιθανής σπηλαιώσης

6.2 Οριακές συνθήκες

Όπως αναφέρθηκε, η μελέτη έγινε για το μικρότερο άνοιγμα των 5mm. Η ταχύτητα στην είσοδο αυξάνονταν σταδιακά έως ότου η πίεση στο χείλος να πέσει κάτω από την πίεση ατμοποίησης του ρευστού. Στο πρόβλημα το διερχόμενο μέσο είναι νερό στους 25 °C και η πίεση ατμοποίησης είναι $p_v = 3,169 \text{ kPa}$. η σπηλαιώση λοιπόν προκύπτει σε πίεση

$$p_v - p_{atm} = 3.169 - 101,325 = -98,156 \text{ kPa}$$

Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας η βαλβίδα δεν σπηλαιώνει. Η χαμηλότερη πίεση παρουσιάζεται στο χείλος περιφερειακά και είναι $p = -51 \text{ kPa}$. Προκειμένου λοιπόν να βρεθεί το σημείο της σπηλαιώσης αυξάνεται προοδευτικά η ταχύτητα στη είσοδο έως ότου εμφανιστεί σε αυτήν την περιοχή πίεση κάτω των $-98,156 \text{ kPa}$.

Οι υπόλοιπες οριακές και αρχικές συνθήκες διατηρήθηκαν ίδιες, δηλαδή:

$$u_{\text{τοιχου}} = 0 \text{ m/sec} \quad \text{συνθήκη μη ολίσθησης}$$

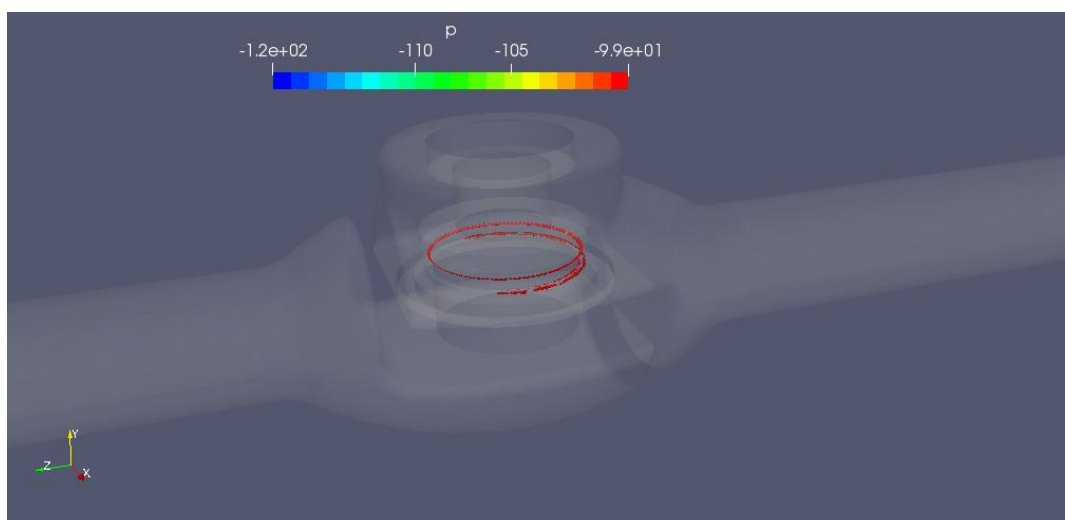
$$p_{\text{εξόδου}} = 0 \text{ Pa}$$

$$\frac{dp}{dy}_{\text{τοιχου}} = 0 \text{ Pa}$$

6.3 Αποτελέσματα σπηλαιώσης

Έχοντας γίνει αρκετές προσομοιώσεις, με προοδευτική αύξηση της ταχύτητας από $u = 2,05 \text{ m/sec}$ και με βήμα 0,10 προέκυψε τελικά ότι η βαλβίδα σπηλαιώνει για ταχύτητα εισόδου $u = 3 \text{ m/sec}$. Αυξάνοντας την ταχύτητα εισόδου σε μια θέση του βάρικου, στην συγκεκριμένη περίπτωση στην χαμηλότερη, το εύρος της πτώσης πίεσης αυξάνεται με αποτέλεσμα η κατώτερη πίεση να πέφτει κάτω από την πίεση ατμοποίησης του νερού. Σε εκείνη λοιπόν την περιοχή υπάρχει ενδεχόμενο πρόκλησης σπηλαιώσης. Στην Εικόνα 150 φαίνεται αυτή η πιθανή περιοχή.

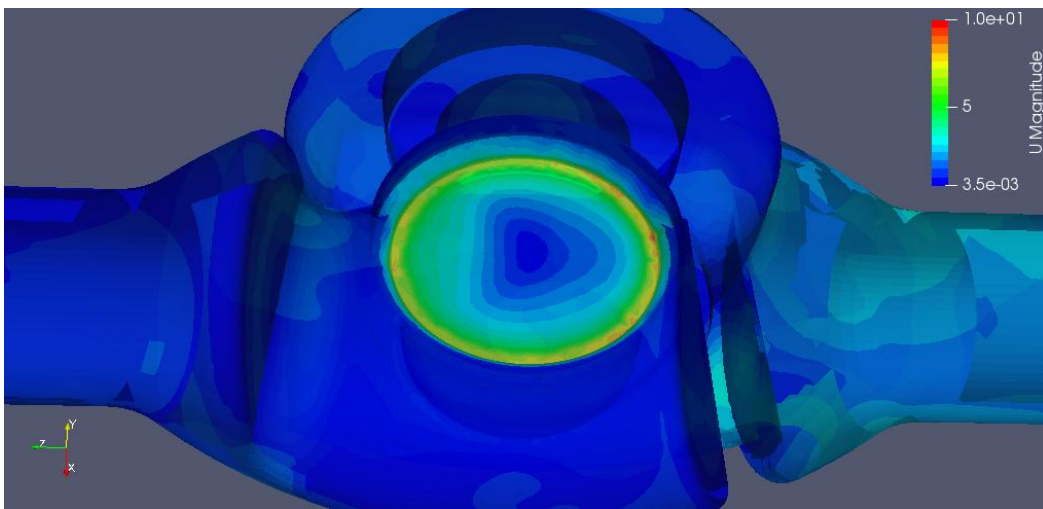
Για ταχύτητα εισόδου $u = 3 \text{ m/sec}$ η στατική πίεση στο χείλος φτάνει $p = -99.63 \text{ kPa}$



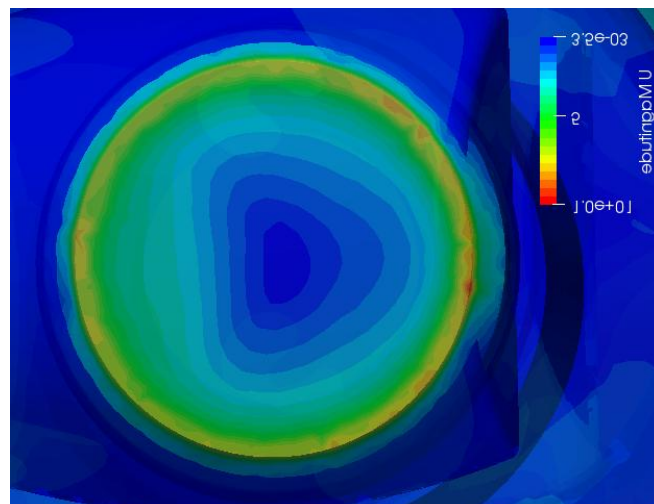
Εικόνα 149. Τα κελιά που παρουσιάζουν σπηλαιώση

Κανονικά η πίεση του νερού δεν πέφτει κάτω από $-98,156 \text{ kPa}$, που είναι η πίεση ατμοποίησης. Το γεγονός ότι στην προσομοίωση προκύπτουν πιέσεις χαμηλότερης αυτής είναι γιατί δεν έχει χρησιμοποιηθεί διαφασικό μοντέλο. Στο διαφασικό μοντέλο νερού-ατμού, η πίεση θα σταματούσε στα $-98,156 \text{ kPa}$. Στην περίπτωση όμως του μονοφασικού μοντέλου, το μοντέλο αδυνατεί να καταλάβει το ότι δεν υπάρχει φυσική σημασία της πίεσης κάτω από την δεδομένη τιμή.

Στην Εικόνα 149 φαίνονται οι περιοχές που παρουσιάζουν πίεση χαμηλότερη της κρίσιμης πίεσης σπηλαιώσης, για τις οριακές συνθήκες πίεσης που χρησιμοποιήθηκαν εδώ. Γίνεται φανερό ότι η περιοχή είναι η αναμενόμενη. Είναι δηλαδή η περιοχή περιφερειακά του δίσκου και στο δακτυλίδι της έδρασης. Όσον αφορά την έδραση η πίεση σπηλαιώσης εμφανίζεται από την μια μεριά μόνο και μάλιστα από την περιοχή όπου εξέρχεται η ροή. Ένας λόγος που μπορεί να συμβαίνει αυτό το φαινόμενο είναι επειδή από την άλλη μεριά του δακτυλιδιού η ταχύτητα δεν είναι τόσο μεγάλη, όπως δείχνουν και οι Εικόκες 150, 151.



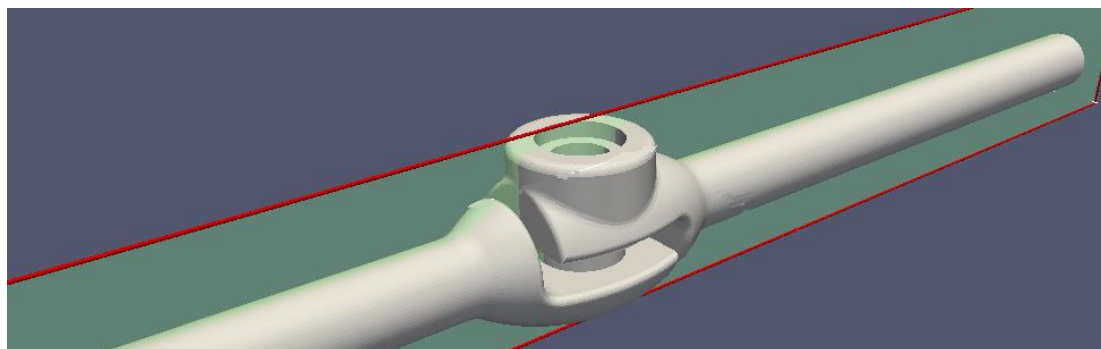
Εικόνα 150. Ισοϋψεις ταχύτητας στο χείλος στην θέση 5mm



Εικόνα 151. Λεπτομέρεια των παραπάνω ταχυτήτων

Ένας άλλος λόγος είναι η ποιότητα του πλέγματος. Το πλέγμα κατασκευάστηκε στο ANSYS και με τα κριτήριά του είναι ένα καλό πλέγμα με αποδεκτά στοιχεία ποιότητας. Επίσης και με τα κριτήρια του OpenFOAM είναι ένα σωστό πλέγμα.

Τέλος και από το γράφημα της Εικόνας 154 γίνεται φανερή η ύπαρξη σπηλαιώσης. Το γράφημα παριστά την πίεση περιμετρικά του προφίλ, το οποίο έχει προκύψει από την τομή του χωρίου, με το επίπεδο της εικόνας 152, κατά την έννοια του σχήματος 152.



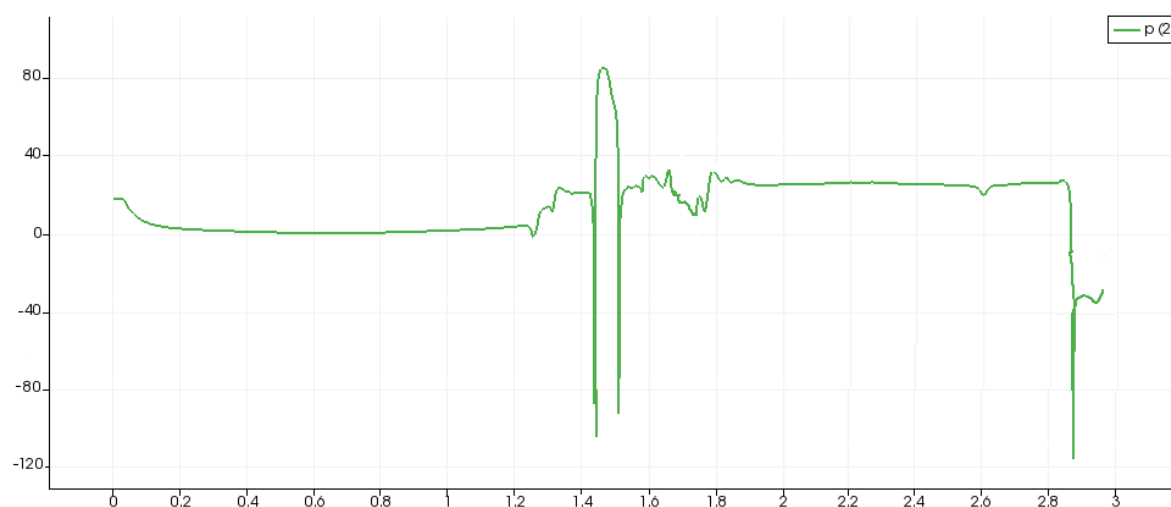
Εικόνα 152. Επίπεδο τομής του χωρίου

Στην ουσία έχει ξεδιπλωθεί η περίμετρος και πάνω σε κάθε σημείο έχει χαρακτηί η τιμή της πίεσης. Ο άξονας των x παριστά τα σημεία πάνω στην περίμετρο και ο άξονας των y την στατική πίεση. Το σημείο 0 είναι εκεί που φαίνεται στην εικόνα 153 λίγο μετά την βαλβίδα, με μία μαύρη βούλα, από την κάτω μεριά.



Εικόνα 153. Το περίγραμμα του χωρίου

Η περιοχή από το 0 μέχρι την θέση $x=1,4$ παριστά την περιοχή του αγωγού κατάντη της βαλβίδας. Γι'αυτό και η διαφορική πίεση είναι μηδέν. Τα σημεία 1,45 και 1,5 στο άξονα των x είναι τα σημεία στο χείλος της βαλβίδας, ένα από την κάτω μεριά, στην έδραση και ένα στην πάνω μεριά, στην περίμετρο του δίσκου. Σε αυτή την περιοχή υπάρχει σημαντική πτώση πίεσης και πιθανή σπηλαιώση.

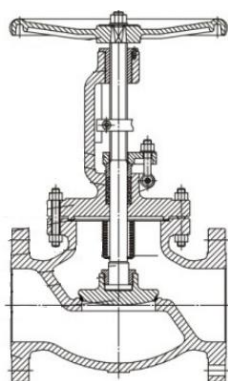


Εικόνα 154. Διάγραμμα στατικής πίεσης στην περίμετρο της βαλβίδας

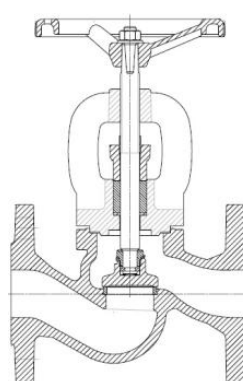
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα και Προτάσεις

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να μελετηθεί μια δισκοβαλβίδα παλαιού τύπου και να αναλυθεί η ροή στο εσωτερικό. Στην παρούσα εργασία έγινε μεγάλη προσπάθεια να λυθεί το πρόβλημα με τις ελάχιστες δυνατές απαιτήσεις, ώστε να μπορεί να λυθεί από έναν τυπικού μεγέθους μνήμης και επεξεργαστή υπολογιστή. Με την μελέτη που πραγματοποιήθηκε έγινε πλήρως κατανοητή η συμπεριφορά της βαλβίδας και ο τρόπος που λειτουργεί σε μια σωλήνωση. Η πτώση πίεσης που παρουσιάζει είναι σταθερή για δεδομένη ταχύτητα στην είσοδο στην πλήρως ανοικτή θέση και μεταβάλλοντας το άνοιγμά της μεταβάλλονται και οι εντοπισμένες απώλειες ζ. Έγιναν κατανοητές οι αιτίες που προκαλούν τις υδραυλικές απώλειες και αυτές είναι η σύνθετη γεωμετρία και η συστροφή του ρευστού. Επίσης εντοπίστηκαν οι περιοχές πιθανής εμφάνισης σπηλαιώσης.

Τέλος έγινε σαφές γιατί οι νέου τύπου βαλβίδες έχουν διαφορετική εσωτερική γεωμετρία από τις παλιές. Ο λόγος φυσικά είναι για να ακολουθείται όσο το δυνατόν η πορεία του διακινούμενου μέσου μειώνοντας έτσι περαιτέρω τις απώλειες.

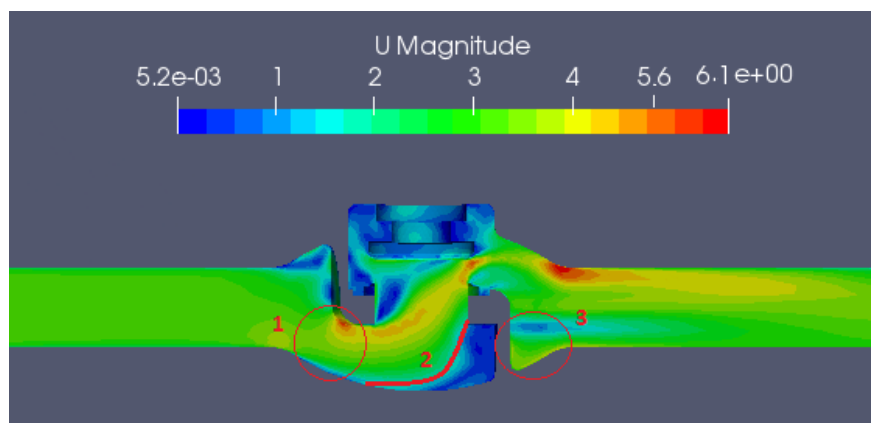


Εικόνα 155 Παλαιού τύπου βαλβίδα



Εικόνα 156 Σύγχρονου τύπου βαλβίδα

Στις εικόνες 155, 156, φαίνεται η αλλαγή της διαμόρφωσης στην περιοχή όπου γίνεται η μετάβαση από τον έναν θάλαμο στον άλλον. Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 157) φαίνονται οι δυνατές αλλαγές που μπορούν να γίνουν στην βαλβίδα που μελετήθηκε:



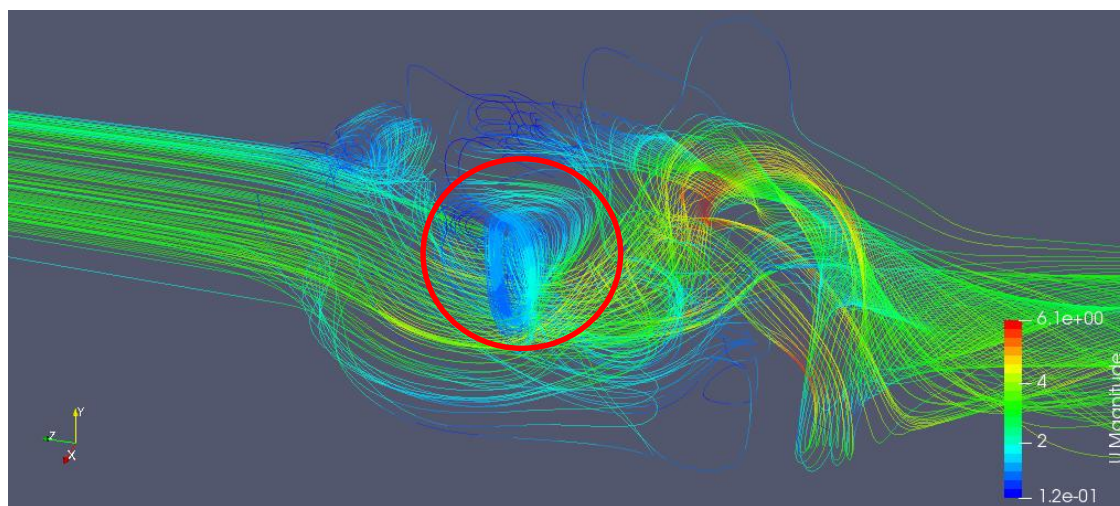
Εικόνα 157. Περιοχές βελτίωσης

Στην περιοχή 1, υπάρχει τοπική στένωση της γεωμετρίας προκαλώντας έτσι επιτάχυνση της ροής και τοπικές διαταραχές και πιθανές αποκολλήσεις. Θα μπορούσε η διάμετρος της διατομής να είναι ίδια με του σωλήνα όπως είναι στην βαλβίδα της εικόνας 156.

Στην περιοχή 2, θα μπορούσε η διαμόρφωση να είναι διαφορετική και να ακολουθεί τις γραμμές ροής του ρευστού. Δηλαδή, η περιοχή όπου οι ταχύτητες είναι χαμηλές και υπάρχουν τοπικές ανακυκλοφορίες, θα έπρεπε να μην υπάρχει καθόλου.

Επιπλέον, στην περιοχή 3, θα μπορούσε αυτό το κομμάτι να λείπει και να έρχεται ομαλά ο σωλήνας.

Κοιτώντας την επόμενη εικόνα (Εικόνα 158), στην περιοχή στο εσωτερικό του κόκκινου κύκλου, παρατηρούνται δίνες ανακύκλωσης, που προκαλούνται λόγω περίσσιας χώρου. Πρέπει λοιπόν, να ακολουθηθεί ένας σχεδιασμός σαν την βαλβίδα σύγχρονου τύπου της Εικόνας 156, όπου κάτω από το έμβολο δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου περίσσεια χώρου.



Εικόνα 158. Δίνες στην περιοχή κάτω από το έμβολο

Κλείνοντας, από την παραπάνω εργασία μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Χρειάζεται να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στις αριθμητικές παραμέτρους του προβλήματος, όπως η κατασκευή του πλέγματος, τα σχήματα διακριτοποίησης, και ο αλγόριθμος επίλυσης, προκειμένου να οδηγηθούμε στην βέλτιστη λύση.
- Το πρόβλημα της βαλβίδας δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί και να επιλυθεί ως δισδιάστατο, γιατί προκύπτουν ρελεϊώς διαφορετικά αποτελέσματα.
- Κατανοήθηκε η συμπεριφορά της βαλβίδας και η αρχή λειτουργίας της.
- Έγινε σαφές πως οι νέου τύπου δισκοβαλβίες είναι καλύτερες, παρουσιάζουν ομαλότερη υδροδυναμική συμπεριφορά και έχουν λιγότερες απώλειες.
- Κατανοήθηκαν οι μηχανισμοί της σπηλαιώσης και τότε αυτή προκύπτει.

Όπως γίνεται φανερό, το πρόβλημα ακόμα και μιας απλής βαλβίδας είναι αρκετά σύνθετο στην πράξη και πρέπει να εξεταστούν πολλές σχεδιαστικές παράμετροι πριν αυτή κριθεί κατάλληλη για μια εγκατάσταση. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία ανταποκρίνεται στις αρχικές μας επιδιώξεις και στόχους που ήταν η μελέτη της ροής και η κατασκευή της χαρακτηριστικής σε ελεύθερο λογισμικό. Επίσης μελετήθηκε και η

σπηλαιώση. Ωστόσο υπάρχουν ακόμα αρκετά πράγματα που μπορούν να γίνουν για να ολοκληρωθεί πλήρως η μελέτη μιας τέτοιας βαλβίδας.

Αρχικά κρίνεται χρήσιμο να κατασκευαστεί πλέγμα σε ελεύθερο λογισμικό και να υπάρξει πλήρης ανεξαρτησία από το ANSYS. Ως εναλλακτικές προτείνονται: το cfMesh και το ενσωματωμένο εργαλείο του OpenFOAM το snappyHexMesh. Επίσης για την κατασκευή της γεωμετρίας προτείνονται τα παρακάτω ελεύθερα CAD λογισμικά: Salome και FreeCAD.

Μπορούν επιπλέον να γίνουν πειράματα για να επαληθευτούν τα αριθμητικά αποτελέσματα της εργασίας. Τα πειράματα μπορούν να αφορούν την παραγωγή της χαρακτηριστικής της καμπύλης ή την σπηλαιώση με μέτρηση κραδασμών ή θορύβου και σύγκριση με τα αριθμητικά αποτελέσματα της πίεσης.

Για την πληρότητα του θεωρητικού μοντέλου θα ήταν ενδιαφέρον να γίνουν προσομοιώσεις μεταβλητής καταστάσης (transient), τόσο για την χαρακτηριστική καμπύλη όσο και για την σπηλαιώση. Επιπλέον, για ορθότερη και ακριβέστερη προσομοίωση της σπηλαιώσης μπορεί να εφαρμοστεί και κατάλληλο διφασικό μοντέλο. Τέλος προτείνεται μελέτη για αριθμητική βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της βαλβίδας, με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών σε πλήρως ανοικτή θέση και τη βελτίωση της συμπεριφοράς της ως προς τη σπηλαιώση, αποτρέποντας περιοχές και σημεία μεγάλης πτώσης της στατικής πίεσης, σε ενδιάμεσες θέσεις λειτουργίας.

Παράρτημα

Παρακάτω, στο τέλος της εργασίας επισυναπτονται τα κατασκευαστικά σχέδια των εξαρτημάτων της βαλβίδας, καθώς και το τελικό συναρτημολόγημα.

Τα μέρη είναι:

- Σώμα βαλβίδας
- Δαχτυλίδι έδρασης
- Έβόλο
- καπάκι

Βιβλιογραφία

- [1] Ajay Kumar Debnath, Plant P&ID Discussions Chapter III Swapan Basu, 2014
- [2] ANSI FLANGES pdf catalogue, 2013
- [3] Δ. Μαθιουλάκης, Ι. Αναγνωστόπουλος, Δ Τουζόπουλος, Βιομηχανική ρευστομηχανική Σημειώσεις Ε.Μ.Π., 2006
- [4] Computational Fluid Dynamic Simulations of Pipe Elbow Flow - Gregory F. Homicz, 2004
- [5] ASME B16.5 -2003 Pipe Flanges and Flange Fittings
- [6] ASME B31.3-1 -2002 Process Piping
- [7] API-Spec-6A Wellhead and Christmas tree Equipment, 2004
- [8] API-Spec-6d Pipeline Valves
- [9] Dafram catalogue, 2007
- [10] Δ. Παπαντώνης, Υδροδυναμικές εγκαταστάσεις, 2015
- [11] PJV product catalogue, 2013
- [12] Engineering Toolbox
- [13] HIFLUX High Pressure Products, 2017
- [14] ABZ valve Technical Brochure, 2015
- [15] Ρακόπουλος, ΜΕΚ ΙΙ Εμβάθυνση στην κατασκευαστική λειτουργία, 2000
- [16] Johnson Controls Section Vb1, 2006
- [17] VAL-MATIC VALVE AND MANUFACTURING CORP, 2006
- [18] Jin-YuanQian, Experimental and numerical analysis of spring stiffness on flow and valve core movement in pilot control globe valve, 2017
- [19] A.Masjedian JaziH.Rahimzadeh Detecting cavitation in globe valves by two methods: Characteristic diagrams and acoustic analysis, 2013
- [20] MingxingHan, Yinshui Liu, A numerical investigation in characteristics of flow force under cavitation state inside the water hydraulic poppet valves, 2015
- [21] K. Versteeg, Malasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics, 2007
- [22] Ali Javadi, Mahmoud Pasandideh Fard Modification of $k - \epsilon$ Turbulent Model Using Kinetic Energy–Preserving Method, 2015
- [23] Wolf Dynamics, OpenFOAM Training Material, 2015
- [24] C. Gawade, V. Vajarinkar, Design and analysis of a globe valve using CFD software, 2015

[25] Qin Yang, Zhiguo Zhang, Numerical Simulation of Fluid Flow Inside the Valve, 2011