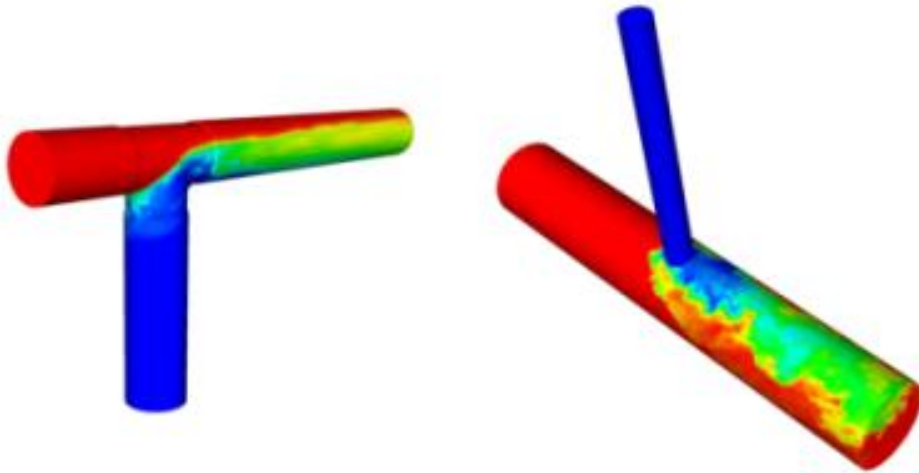


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΙΞΗ ΖΕΣΤΟΥ-ΚΡΥΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΓΩΓΟ
ΤΥΠΟΥ T ΜΕ ΕΙΣΟΔΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ
ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΖΟΥΖΟΥΛΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Α.Μ. 6642)
 ΔΗΜΗΤΡΟΚΑΛΛΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ (Α.Μ. 6551)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΣΚΟΥΡΑΣ ΕΥΓΕΝΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην υπολογιστική προσομοίωση ροής ρευστών με διαφορετικές θερμοκρασίες εντός γεωμετρίας όπου στη βιβλιογραφία ονομάζεται tee-junction. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για μονοφασική ροή νερού που εισέρχεται στο T-junction από δύο διαφορετικές εισόδους. Επιπλέον, εξετάστηκε και η είσοδος του θερμού ρευστού από είσοδο με μικρότερη διάμετρο εισόδου. Τα παραπάνω δεδομένα λήφθηκαν από δημοσιευμένη εργασία με πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα. Η δική μας προσέγγιση προχώρησε και ένα βήμα περισσότερο στον υπολογιστικό κλάδο αφού πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με δύο διαφορετικά ρευστά (νερό – ατμός).

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ένα από τα καλύτερα πακέτα υπολογιστικής ρευστομηχανικής που κυκλοφορούν και είναι το ANSYSFluent 16.0 και προσομοιώνει τα επιθυμητά ροϊκά φαινόμενα.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά οι βασικές αρχές της ρευστών σε αγωγούς κυλινδρικής ή μη διατομής. Περιγράφεται συνοπτικά η στρωτή και η τυρβώδης ροή καθώς και το προφίλ ταχύτητας που λαμβάνει το ρευστό μέσα στον αγωγό μεταφοράς. Τελος, αναφέρονται μεγέθη όπως ο συντελεστής Reynolds. Στη συνέχεια παρουσιάζεται και η βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στο αντικείμενο με εργασίες που χρησιμοποιήθηκαν για γνώση και ως μέτρο σύγκρισης των δικών μας αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το βασικό θεωρητικό-μαθηματικό υπόβαθρο που πρέπει να γνωρίσει ένας CFD χρήστης καθώς επίσης και η μεθοδολογία ανάλυσης προβλημάτων που χρησιμοποιεί ένας κώδικας CFD.

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται οι δύο γεωμετρίες και τα βήματα που έχει οριστεί το πρόβλημα από την κατασκευή της γεωμετρίας, στη διακριτοποίηση σε μορφή πλέγματος και τέλος στις οριακές συνθήκες στο πρόγραμμα Fluent. Έπειτα ακολουθούν τα αποτελέσματα και ο σχολιασμός αυτών.

Ευχαριστούμε θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μας κ. Σκούρα Ευγένιο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας.

Ιούλιος 2017

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

Ζούζουλας Γεώργιος

Δημητροκάλλης Εμμανουήλ

.....

.....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται υπολογιστικά με το εμπορικό πακέτο υπολογιστικής ρευστομηχανικής (ComputerFluidDynamics – CFD) η προσομοίωση ροής ρευστών με διαφορετικές θερμοκρασίες εντός γεωμετρίας-αγωγού που στη βιβλιογραφία ονομάζεται tee-junction. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για μονοφασική ροή νερού που εισέρχεται στο T-junction από δύο διαφορετικές εισόδους. Επιπλέον, εξετάστηκε και η είσοδος του θερμού ρευστού από είσοδο με μικρότερη διάμετρο εισόδου. Τα παραπάνω δεδομένα λήφθηκαν από δημοσιευμένη εργασία με πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα. Η δική μας προσέγγιση προχώρησε και ένα βήμα περισσότερο στον υπολογιστικό κλάδο αφού πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με δύο διαφορετικά ρευστά (νερό – ατμός).

Τη σημερινή εποχή οι βιομηχανίες προσπαθούν να παράγουν γνωρίζουν εκ των προτέρων τα φαινόμενα ροής ρευστών σε αγωγούς μεταφοράς θερμών ρευστών, πετρελαίου, φυσικού αερίου και άλλων πολυφασικών μιγμάτων. Ένα χρήσιμο εργαλείο για αυτό το σκοπό είναι το πακέτο AnsysFuent για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά οι βασικές αρχές της ρευστών σε αγωγούς κυλινδρικής ή μη διατομής. Περιγράφεται συνοπτικά η στρωτή και η τυρβώδης ροή καθώς και το προφίλ ταχύτητας που λαμβάνει το ρευστό μέσα στον αγωγό μεταφοράς. Τέλος, αναφέρονται μεγέθη όπως ο συντελεστής Reynolds. Στη συνέχεια παρουσιάζεται και η βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στο αντικείμενο με εργασίες που χρησιμοποιήθηκαν για γνώση και ως μέτρο σύγκρισης των δικών μας αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το βασικό θεωρητικό-μαθηματικό υπόβαθρο που πρέπει να γνωρίσει ένας CFD χρήστης καθώς επίσης και η μεθοδολογία ανάλυσης προβλημάτων που χρησιμοποιεί ένας κώδικας CFD. Γίνεται αναφορά στη μεθοδολογία πεπερασμένων όγκων και τα βήματα που ορίζουν το πρόβλημα από την κατασκευή της γεωμετρίας, στη διακριτοποίηση σε μορφή πλέγματος και τέλος στις οριακές συνθήκες στο πρόγραμμα Fluent.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο κλάδος των πολυφασικών ροών, τα είδη της πολυφασικής ροής μέσα σε αγωγούς, βιβλιογραφική ανασκόπηση αντίστοιχων μελετών και τομείς εφαρμοσιμότητας του tee-junction.

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται οι δύο γεωμετρίες και τα βήματα που έχει οριστεί το πρόβλημα από την κατασκευή της γεωμετρίας, στη διακριτοποίηση σε μορφή πλέγματος και τέλος στις οριακές συνθήκες στο πρόγραμμα Fluent. Έπειτα ακολουθούν τα αποτελέσματα και ο σχολιασμός αυτών. Επίσης γίνεται εισαγωγή και συνοπτική περιγραφή των μοντέλων τύρβης που χρησιμοποιούνται από το Fluent για επίλυση τέτοιων προβλημάτων.

Τα συμπεράσματα ταξινομούνται ανά σχετική κατηγορία, δηλαδή προσομοιώσεις που μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους. Συνοπτικά, αξιολογούνται τα αποτελέσματα της μονοφασικής ροής με κριτήριο τη διαφορετική διάμετρο εισόδου του ζεστού ρευστού όσο αυξάνεται ο λόγος ταχυτήτων. Αντίστοιχα, για τα διφασικά πειράματα γίνεται αξιολόγηση και παρατήρηση του πως η αύξηση του λόγου ταχυτήτων προκαλεί συγκέντρωση ατμού σε συγκεκριμένα σημεία εντός του αγωγού. Τέλος, αναφέρονται περιπτώσεις με μεγάλες διαφορές πιέσεων ή θερμοκρασίας που αξίζουν ιδιαίτερη προσοχή σε βιομηχανικές εφαρμογές.

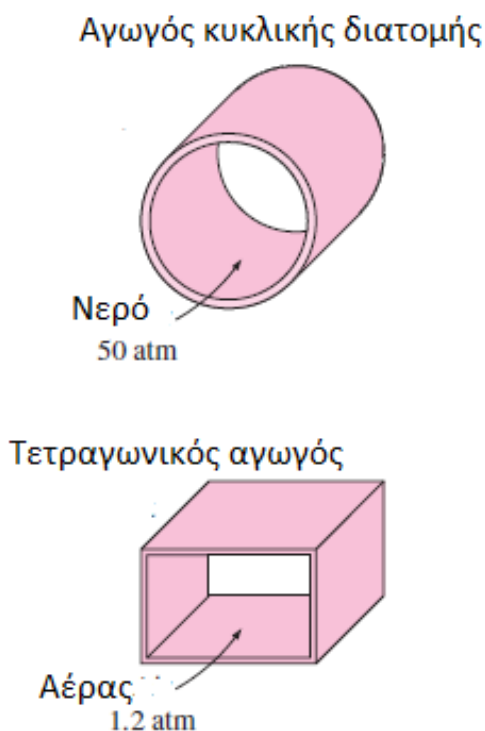
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ	1
1.1 ΣΤΡΩΤΗ ΚΑΙ ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ.....	2
1.2 ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ – ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ.....	4
1.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΡΟΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ.....	11
2.1 ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟ.....	11
2.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΡΟΗΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ..	11
2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ ΤΥΠΟΥ T ΓΙΑ ΡΟΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	16
3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ.....	16
3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ.....	18
3.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΕ ΚΩΔΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ (FLUENT 16).....	19
3.3.1 Μεθοδολογία πεπερασμένων όγκων	20
3.4 ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΟΜΟΝΤΕΛΟ VOLUME OF FLUID (VOF)	21
3.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΡΒΗΣ.....	21
3.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	22
3.6.1 Γεωμετρία 1 – Διακλάδωση διαμέτρου 25mm.....	23
3.6.2 Γεωμετρία 2 – Διακλάδωση διαμέτρου 15mm.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΦΑΣΙΚΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ.....	47
4.1 ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	47
4.4.1 Γεωμετρία 1 – Διακλάδωση διαμέτρου 25mm	47
4.4.2 Γεωμετρία 2 – Διακλάδωση διαμέτρου 15mm	63
4.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ

Η ροή ρευστών σε αγωγούς κυκλικής ή μη διατομής συνήθως συναντάται σε πολύ καθημερινά πρακτικά θέματα. Το ζεστό και κρύο νερό που χρησιμοποιείται για οικιακή χρήση διανέμεται μέσω σωληνώσεων. Στις πόλεις μάλιστα τα δίκτυα ύδρευσης είναι περίπλοκα με διάφορες γεωμετρίες με διαφορετικούς προσανατολισμούς. Η μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου πραγματοποιείται με αγωγούς μεγάλου μήκους. Επίσης, μια μικρογραφία ενός συστήματος σωληνώσεων αποτελεί το πολύπλοκο σύστημα των φλεβών στο ανθρώπινο σώμα.

Η ροή υγρών ή αερίων μέσω σωλήνων ή αγωγών χρησιμοποιείται συνήθως για τη θέρμανση, για εφαρμογές ψύξης και δίκτυα διανομής υγρών. Το υγρό σε τέτοιες εφαρμογές συνήθως αναγκάζεται να ρέει με ανεμιστήρα ή αντλία μέσω τμήματος ροής. Δίδουμε ιδιαίτερη προσοχή στην τριβή, η οποία σχετίζεται άμεσα με την πτώση πίεσης κατά τη ροή μέσω σωλήνων και αγωγών. Στη συνέχεια, η πτώση πίεσης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της απαίτησης ισχύος άντλησης. Ένα τυπικό σύστημα σωληνώσεων περιλαμβάνει σωλήνες διαφόρων διαμέτρων που συνδέονται μεταξύ τους με διάφορα εξαρτήματα ή αγκώνες για τη δρομολόγηση του υγρού, των βαλβίδων για τον έλεγχο της παροχής και των αντλιών για την πίεση του υγρού.



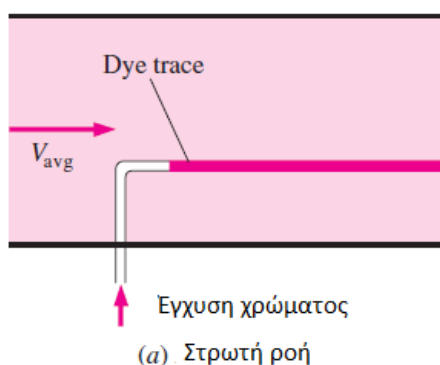
Σχήμα 1: Διαφορά ικανότητας αγωγού κυκλικής διατομής με ορθογωνικό σε διαφορά πίεσης.

Αξίζει να γίνει η επεξήγηση για το λόγο που η μεταφορά των ρευστών γίνεται σε αγωγούς κυκλικής διατομής – σωλήνες. Αυτό γίνεται διότι η κυκλική διατομή μπορεί να αντέξει μεγάλες διαφορές στην πτώση πίεσης μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας χωρίς να υποστεί σημαντική παραμόρφωση. Μη κυκλικής διατομής αγωγοί χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως θέρμανση ή ψύξη σε κτήρια όπου δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά πίεσης και δεν είναι αναγκαία η προσαρμογή σε κάθετες γεωμετρικές κυκλικών σωληνώσεων, στοιχείο που αυξάνει το κόστος.

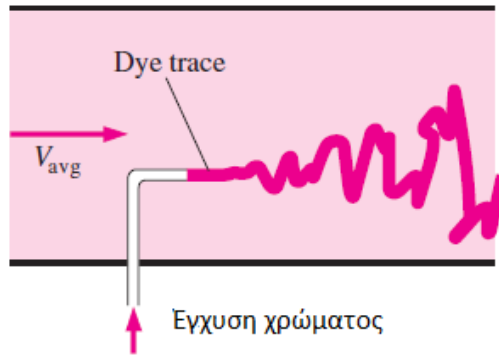
1.1 ΣΤΡΩΤΗ ΚΑΙ ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ

Αν έχετε περάσει γύρω από τους καπνιστές, πιθανότατα έχετε παρατηρήσει ότι ο καπνός σιγάρων αυξάνεται σε ένα ομαλό “σύννεφο” για τα πρώτα λίγα εκατοστά και στη συνέχεια αρχίζει να κυμαίνεται τυχαία προς όλες τις κατευθύνσεις καθώς συνεχίζει την άνοδό του. Ομοίως, ένας προσεκτικός έλεγχος της ροής σε ένα σωλήνα αποκαλύπτει ότι η ροή του ρευστού εκτοξεύεται σε χαμηλές ταχύτητες, αλλά μεταβάλλεται χασοτικά καθώς η ταχύτητα αυξάνεται πάνω από μια κρίσιμη τιμή, όπως φαίνεται στο Σχ. 8-4. Η κατάσταση ροής στην πρώτη περίπτωση λέγεται ότι είναι στρωτή (Εικόνα 2), χαρακτηριζόμενη από ομαλές γραμμές ροής και εξαιρετικά διατεταγμένη κίνηση και στροβιλώδης στη δεύτερη περίπτωση (Εικόνα 3), όπου χαρακτηρίζεται από διακυμάνσεις ταχύτητας και έντονα διαταραγμένη κίνηση. Η μετάβαση από τη στρωτή σε τυρβώδη ροή δεν εμφανίζεται ξαφνικά. Μάλλον, εμφανίζεται σε κάποια περιοχή στην οποία η ροή κυμαίνεται μεταξύ στρωτή και τυρβώδους ροής πριν γίνει πλήρως τυρβώδης. Οι περισσότερες ροές που συναντώνται στην πράξη είναι ταραχώδεις. Στρωτή ροή συναντάται όταν τα υψηλά ιξώδη υγρά όπως τα έλαια ρέουν σε μικρούς σωλήνες ή στενά περάσματα.

Μπορούμε να επαληθεύσουμε την ύπαρξη αυτών των στρωτών, μεταβατικών και τυρβωδών συνθηκών ροής με την έγχυση κάποιων ραβδώσεων χρωμάτων στη ροή σε γυάλινο σωλήνα, όπως έκανε πριν από έναν αιώνα ο Βρετανός μηχανικός Osborne Reynolds (1842-1912). Παρατηρούμε ότι η ράβδος βαφής σχηματίζει μια ευθεία και ομαλή γραμμή με χαμηλές ταχύτητες όταν η ροή είναι στρωτή (μπορεί να δούμε κάποια θόλωση λόγω μοριακής διάχυσης), έχει ριπές διακυμάνσεων στο μεταβατικό καθεστώς και ζιγκ-ζαγκ γρήγορα και τυχαία όταν η ροή γίνεται πλήρως ταραχώδης. Αυτά τα ζιγκ-ζαγκ και η διασπορά της χρωστικής είναι ενδεικτικά των διακυμάνσεων της κύριας ροής και της ταχείας ανάμιξης σωματιδίων ρευστού από γειτονικές στρώσεις.



Σχήμα2: Στρωτή ροή σε αγωγό



(b) Τυρβώδης ροή

Σχήμα3: Τυρβώδης ροή

Η έντονη ανάμιξη του ρευστού σε τυρβώδη ροή ως αποτέλεσμα των ταχέων διακυμάνσεων ενισχύει τη μεταφορά ορμής μεταξύ υγρών σωματιδίων, γεγονός που αυξάνει τη δύναμη τριβής στην επιφάνεια και επομένως την απαιτούμενη ισχύ άντλησης. Ο συντελεστής τριβής φτάνει το μέγιστο όταν η ροή γίνεται πλήρως τυρβώδης.

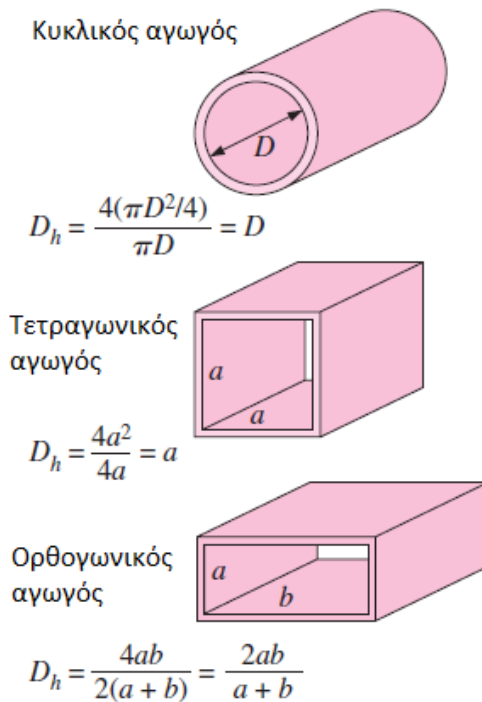
ΑΡΙΘΜΟΣ REYNOLDS

Η μετάβαση από τη στρωτή σε τυρβώδη ροή εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από τη γεωμετρία, την τραχύτητα της επιφάνειας, την ταχύτητα ροής, τη θερμοκρασία επιφάνειας και τον τύπο του υγρού. Μετά από εξαντλητικά πειράματα στη δεκαετία του 1880, ο Osborne Reynolds ανακάλυψε ότι το καθεστώς ροής εξαρτάται κυρίως από το λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις ιξώδεις δυνάμεις στο ρευστό. Αυτή η αναλογία ονομάζεται αριθμός Reynolds και εκφράζεται για εσωτερική ροή σε κυκλικό σωλήνα ως:

$$Re = \frac{\text{Αδρανειακές δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Ιξώδους}} = \frac{V_{avg}D}{\nu} = \frac{\rho V_{avg}D}{\mu} \quad (1)$$

Όπου V_{avg} = μέση ταχύτητα ροής (m / s), D = χαρακτηριστικό μήκος της γεωμετρίας (διάμετρος σε αυτή την περίπτωση, σε m) και $\nu = \mu/\rho$ = κινηματικό ιξώδες του υγρού (m^2/s). Σημειώστε ότι ο αριθμός Reynolds είναι μια αδιάστατη ποσότητα. Επίσης, το κινηματικό ιξώδες έχει τη μονάδα m^2/s και μπορεί να θεωρείται ως ιξώδης διάχυση ή διάχυση για ορμή.

Ο αριθμός Reynolds στον οποίο η ροή γίνεται τυρβώδης ονομάζεται κρίσιμος αριθμός Reynolds, Re_{cr} . Η τιμή του κρίσιμου αριθμού Reynolds είναι διαφορετική για διαφορετικές γεωμετρίες και συνθήκες ροής. Για εσωτερική ροή σε κυκλικό σωλήνα, η γενικά αποδεκτή τιμή του κρίσιμου αριθμού Reynolds είναι $Re_{cr} = 2300$. Για τη ροή μέσω μη κυκλικών σωλήνων, ο αριθμός Reynolds βασίζεται στην υδραυλική διάμετρο D_h που ορίζεται ως (Εικόνα 4).



Σχήμα4: Υπολογισμός υδραυλικής διαμέτρου

Είναι σίγουρα επιθυμητό να έχουμε ακριβείς τιμές των αριθμών Reynolds για στρωματοειδείς, μεταβατικές και τυρβώδεις ροές, αλλά αυτό δεν συμβαίνει στην πράξη. Αποδεικνύεται ότι η μετάβαση από τη στρωτή σε τυρβώδη ροή εξαρτάται επίσης από το βαθμό διαταραχής της ροής από την τραχύτητα της επιφάνειας, τις δονήσεις των σωληνώσεων και τις διακυμάνσεις της ροής. Υπό τις περισσότερες πρακτικές συνθήκες, η ροή σε έναν κυκλικό σωλήνα είναι στρωτή για $Re \leq 2300$, τυρβώδης για $Re \geq 4000$ και μεταβατική μεταξύ τους. Συνοπτικά:

$Re \leq 2300$	Στρωτή ροή
$2300 \leq Re \leq 4000$	Μεταβατική ροή
$Re \geq 4000$	Τυρβώδης ροή

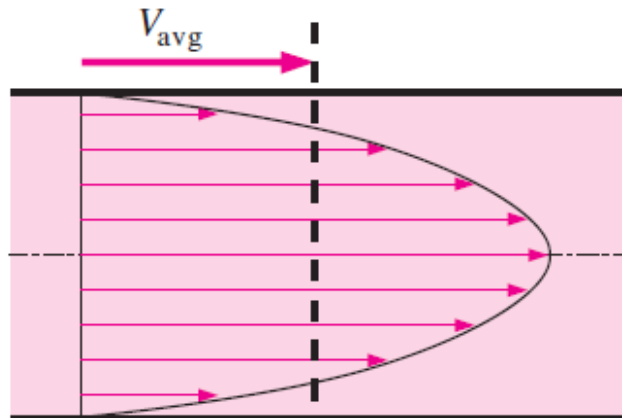
Κατά τη μεταβατική ροή, η ροή μεταβάλλεται τυχαία μεταξύ στρωτής και τυρβώδους. Θα πρέπει να έχουμε κατά νου ότι η στρωτή ροή μπορεί να διατηρηθεί σε πολύ μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds σε πολύ λείους σωλήνες αποφεύγοντας τις διαταραχές της ροής και τις δονήσεις των σωληνώσεων. Σε τέτοια προσεκτικά ελεγχόμενα πειράματα, η στρωτή ροή διατηρήθηκε σε αριθμούς Reynolds μέχρι 100.000.

1.2 ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ – ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

Αν και η θεωρία της ροής ρευστών είναι εύκολο να γίνει κατανοητή, θεωρητικές λύσεις λαμβάνονται μόνο για λίγες απλές περιπτώσεις, όπως η πλήρως ανεπτυγμένη στρωτή ροή σε κυκλικό σωλήνα. Επομένως, πρέπει να στηριχθούμε σε

πειραματικά αποτελέσματα και εμπειρικές σχέσεις για τα περισσότερα προβλήματα ροής ρευστού και όχι σε αναλυτικές λύσεις κλειστής μορφής. Σημειώνοντας ότι τα πειραματικά αποτελέσματα λαμβάνονται υπό προσεκτικά ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες και ότι κανένα σύστημα δεν είναι ακριβώς το ίδιο, συνεπώς δεν πρέπει να είμαστε τόσο αφελείς ώστε να βλέπουμε τα αποτελέσματα που ελήφθησαν ως "ακριβή". Ένα σφάλμα 10 % (ή περισσότερο) σε συντελεστές τριβής είναι ο "κανόνας" παρά η "εξαίρεση".

Η ταχύτητα του ρευστού σε έναν αγωγό αλλάζει από μηδενική στην επιφάνεια του σωλήνα εξαιτίας της συνθήκης μη ολίσθησης έως μια μέγιστη τιμή στο κέντρο. Σε ροές ρευστών είναι βολικό να χρησιμοποιείται μια μέση τιμή της ταχύτητας V_{avg} , η οποία παραμένει σταθερή σε ασυμπίεστη ροή (δεν αλλάζει η πυκνότητα) και όταν η διατομή του αγωγού παραμένει σταθερή. Η μέση ταχύτητα σε εφαρμογές θέρμανσης ή ψύξης μπορεί να μεταβάλλεται λίγο λόγω αλλαγών στην πυκνότητα εξαιτίας της θερμοκρασίας. Πρακτικά όμως, χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες των ρευστών σε μέσες σταθερές τιμές θερμοκρασίας. Η χρήση σταθερών τιμών μειώνει το σφάλμα στην ακρίβεια.



Σχήμα5: Η μέση ταχύτητα V_{avg} καθορίζεται ως η μέση τιμή σε μια διατομή. Για πλήρως ανεπτυγμένη ροή σε στρωτή ροή, η μέση ταχύτητα είναι το μισό της μέγιστης

Η τιμή της μέσης ταχύτητας V_{avg} σε μια διατομή καθορίζεται από την αρχή διατήρησης μάζας:

$$\dot{m} = \rho V_{avg} A_c = \int_{A_c} \rho u(r) dA_c \quad (2)$$

Όπου, \dot{m} είναι η παροχή μάζας, ρ η πυκνότητα, A_c η διατομή και $u(r)$ το προφίλ της ταχύτητας. Συνεπώς, η μέση ταχύτητα για ασυμπίεστη ροή σε αγωγό με ακτίνα R εκφράζεται ως εξής:

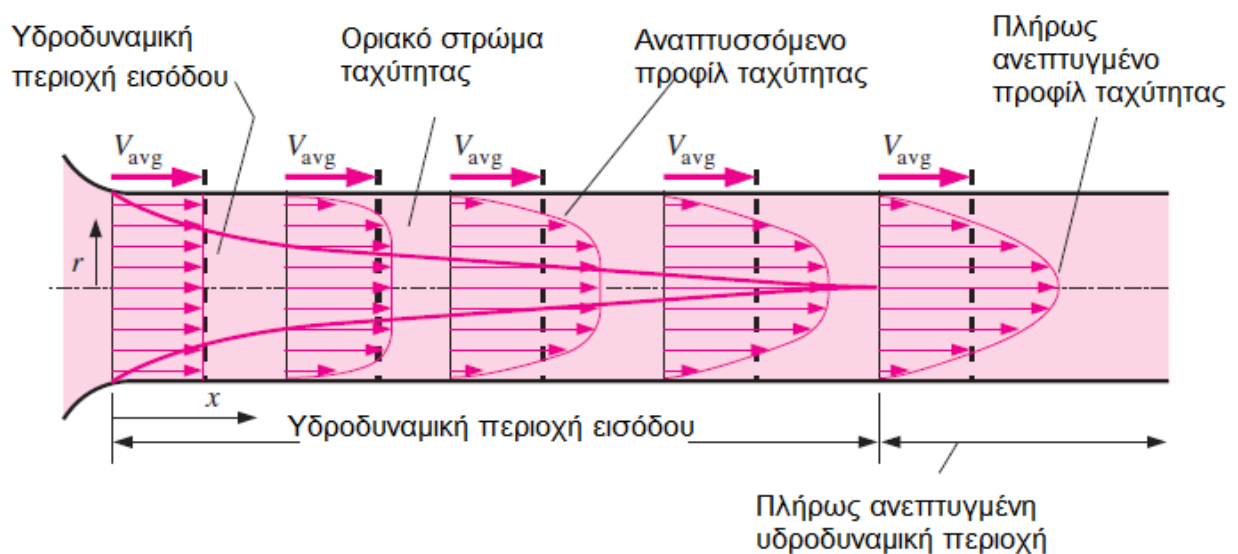
$$V_{avg} = \frac{\int_{A_c} \rho u(r) dA_c}{\rho A_c} = \frac{\int_0^R \rho u(r) 2\pi r dr}{\rho \pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r) r dr \quad (3)$$

Συνεπώς, αν είναι γνωστή η παροχή ή το προφίλ της ταχύτητάς είναι εύκολο να υπολογιστεί η μέση ταχύτητα.

Θεωρήστε ένα ρευστό να εισέρχεται σε έναν κυκλικό σωλήνα με ομοιόμορφη ταχύτητα. Λόγω της κατάστασης ολίσθησης, τα σωματίδια υγρού στο στρώμα που έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια του σωλήνα φτάνουν σε πλήρη στάση. Αυτό το στρώμα επίσης προκαλεί στα σωματίδια ρευστού στα παρακείμενα στρώματα να επιβραδυνθούν βαθμιαία ως αποτέλεσμα της τριβής. Για να αντισταθμιστεί αυτή η μείωση ταχύτητας, η ταχύτητα του ρευστού στο μεσαίο τμήμα του σωλήνα πρέπει να αυξηθεί για να διατηρηθεί σταθερή η παροχή μάζας διαμέσου του σωλήνα. Ως αποτέλεσμα, αναπτύσσεται μια κλίση ταχύτητας κατά μήκος του σωλήνα.

Η περιοχή της ροής στην οποία γίνονται αισθητές οι επιδράσεις των ιξωδών δυνάμεων διάτμησης που προκαλούνται από το ιξώδες του ρευστού ονομάζεται οριακό στρώμα ταχύτητας ή απλά το οριακό στρώμα. Η υποθετική οριακή επιφάνεια διαιρεί τη ροή σε έναν σωλήνα σε δύο περιοχές: την περιοχή του οριακού στρώματος, στην οποία τα ιξώδη αποτελέσματα και οι μεταβολές της ταχύτητας είναι σημαντικά, και την περιοχή ροής χωρίς πυρήνα, στην οποία τα αποτελέσματα τριβής είναι αμελητέα και η ταχύτητα Παραμένει ουσιαστικά σταθερή στην ακτινική κατεύθυνση.

Το πάχος αυτής της οριακής στρώσης αυξάνεται κατά την κατεύθυνση ροής έως ότου το οριακό στρώμα φθάσει στο κέντρο του σωλήνα και έτσι γεμίσει ολόκληρο το σωλήνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6. Η περιοχή από την είσοδο του σωλήνα μέχρι το σημείο στο οποίο το οριακό στρώμα συγχωνεύεται στην κεντρική γραμμή ονομάζεται υδροδυναμική περιοχή εισόδου και το μήκος αυτής της περιοχής ονομάζεται υδροδυναμικό μήκος εισόδου L_h . Η ροή στην περιοχή εισόδου ονομάζεται υδροδυναμικά αναπτυσσόμενη ροή, καθώς αυτή είναι η περιοχή όπου αναπτύσσεται το προφίλ ταχύτητας. Η περιοχή πέρα από την περιοχή εισόδου στην οποία αναπτύσσεται πλήρως το προφίλ ταχύτητας και παραμένει αμετάβλητη ονομάζεται υδροδυναμική πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή. Η ροή λέγεται ότι αναπτύσσεται πλήρως όταν το κανονικοποιημένο προφίλ θερμοκρασίας παραμένει αμετάβλητο επίσης. Η υδροδυναμικά ανεπτυγμένη ροή είναι ισοδύναμη με την πλήρως ανεπτυγμένη ροή όταν το ρευστό στον σωλήνα δεν θερμαίνεται ή δεν ψύχεται καθώς η θερμοκρασία του ρευστού στην περίπτωση αυτή παραμένει σταθερή.



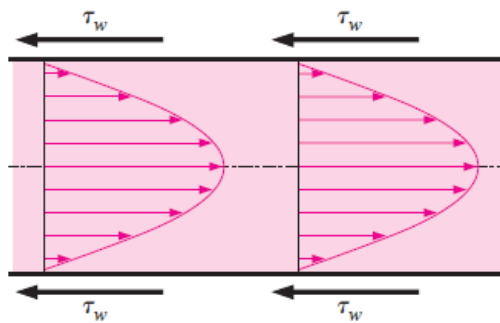
Σχήμα6: Προφίλ ταχύτητας

Το προφίλ ταχύτητας στην πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή είναι παραβολικό σε ελασματοειδή ροή και κάπως πιο επίπεδη (ή πληρέστερη) σε τυρβώδη ροή λόγω κυκλοφοριακής κίνησης και πιο έντονης ανάμιξης στην ακτινική κατεύθυνση. Το προφίλ της ταχύτητας με μέση ταχύτητα παραμένει αμετάβλητο όταν αναπτύσσεται πλήρως η ροή και επομένως:

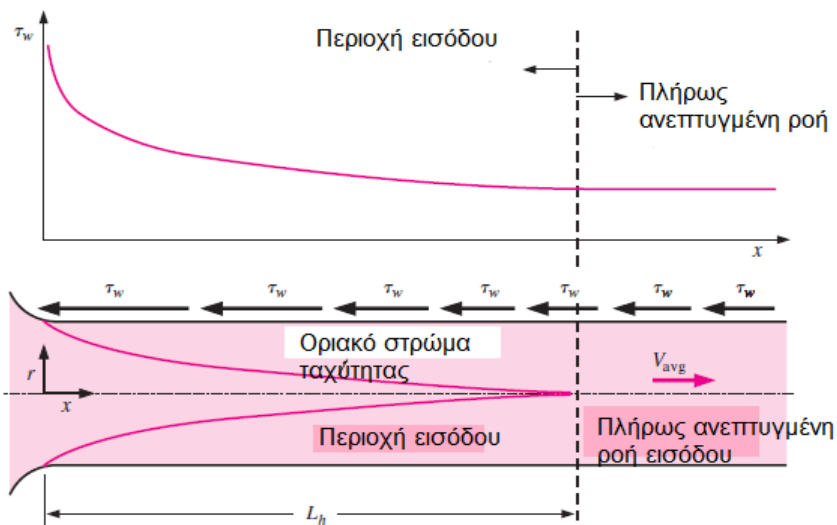
$$\frac{\partial u(r, x)}{\partial x} = 0 \rightarrow u = u(r)$$

(4)

Η διατμητική τάση στο τοίχωμα του σωλήνα τ_w σχετίζεται με την κλίση του προφίλ ταχύτητας στην επιφάνεια. Σημειώνοντας ότι το προφίλ ταχύτητας παραμένει αμετάβλητο στην υδροδυναμική πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή, η τάση διάτμησης τοιχώματος παραμένει επίσης σταθερή στην περιοχή αυτή (Σχ. 7). Η τάση διατμήσεως τοιχώματος είναι η υψηλότερη στην είσοδο του σωλήνα όπου το πάχος του οριακού στρώματος είναι μικρότερο και μειώνεται σταδιακά στην πλήρως ανεπτυγμένη τιμή, όπως φαίνεται στο Σχ. 8. Συνεπώς, η πτώση πίεσης είναι υψηλότερη στις περιοχές εισόδου ενός σωλήνα και η επίδραση της περιοχής εισόδου είναι πάντα να αυξάνεται ο μέσος συντελεστής τριβής για ολόκληρο το σωλήνα. Η αύξηση αυτή μπορεί να είναι σημαντική για μικρούς σωλήνες, αλλά είναι αμελητέα για μεγάλους σωλήνες.



Σχήμα7: Σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή αγωγού η διατμητική τάση παραμένει σταθερή.



Σχήμα8: Η διακύμανση της διατμητικής τάσης στη διεύθυνση της ροής στην περιοχή εισόδου και σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή

Το υδροδυναμικό μήκος εισόδου θεωρείται συνήθως η απόσταση από την είσοδο του σωλήνα όπου η τάση διάτμησης τοιχώματος (και συνεπώς ο συντελεστής τριβής) φθάνει σε περίπου 2% της πλήρως αναπτυγμένης τιμής. Στην στρωτή ροή, το υδροδυναμικό μήκος εισόδου δίνεται περίπου ως [βλέπε Kays and Crawford (1993) και Shah and Bhatti (1987)] :

$$L_{h,laminar} \approx 0.05ReD \quad (5)$$

Για $Re = 20$, το υδροδυναμικό μήκος εισόδου είναι περίπου το μέγεθος της διαμέτρου, αλλά αυξάνει γραμμικά με ταχύτητα. Στην περιοριστική στρωτή περίπτωση $Re = 2300$, το υδροδυναμικό μήκος εισόδου είναι $115D$. Σε στροβιλώδη ροή, η έντονη ανάμιξη κατά τη διάρκεια τυχαίων διακυμάνσεων συνήθως επισκιάζει τα αποτελέσματα της μοριακής διάχυσης. Το υδροδυναμικό μήκος εισόδου για τυρβώδη ροή μπορεί να προσεγγιστεί ως [βλέπε Bhatti and Shah (1987) και Zhi-qing (1982)]:

$$L_{h,turbulent} \approx 1,359DRe_D^{1/4} \quad (6)$$

Το μήκος εισόδου είναι πολύ μικρότερο σε τυρβώδη ροή, όπως αναμενόταν, και η εξάρτηση του από τον αριθμό Reynolds είναι ασθενέστερη. Σε πολλές ροές σωλήνων τεχνικού ενδιαφέροντος, τα αποτελέσματα εισόδου καθίστανται ασήμαντα πέρα από μήκος σωλήνα 10 διαμέτρων και το υδροδυναμικό μήκος εισαγωγής προσεγγίζεται ως:

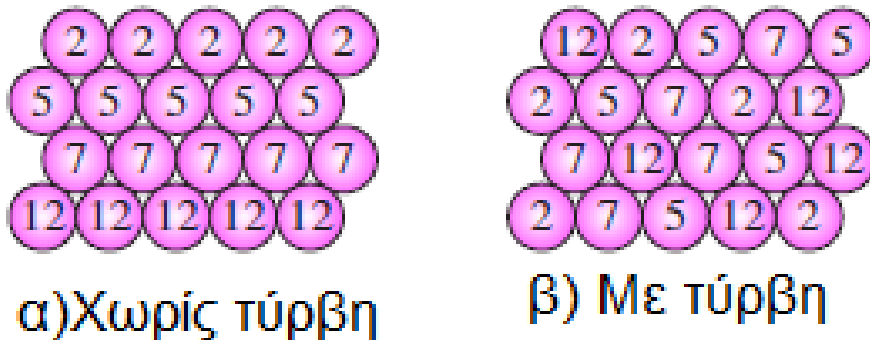
$$L_{h,turbulent} \approx 10D \quad (7)$$

Οι ακριβείς συσχετισμοί για τον υπολογισμό των απωλειών της πτώσης πίεσης λόγω τριβής στις περιοχές εισόδου είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, οι σωλήνες που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι συνήθως αρκετές φορές το μήκος της περιοχής εισόδου και επομένως η ροή μέσω των σωλήνων θεωρείται συχνά ότι έχει αναπτυχθεί πλήρως για όλο το μήκος του σωλήνα. Αυτή η απλοϊκή προσέγγιση δίνει εύλογα αποτελέσματα για μεγάλους σωλήνες, αλλά μερικές φορές φτωχά αποτελέσματα για μικρού μήκους, καθώς υποβιβάζει την τάση διάτμησης τοιχώματος και συνεπώς τον συντελεστή τριβής.

1.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ

Οι περισσότερες ροές που συναντώνται σε πρακτικές μηχανολογικές εφαρμογές είναι τυρβώδεις και επομένως είναι σημαντικό να κατανοήσουμε πώς οι αναταράξεις επηρεάζουν την τάση στο τοίχωμα. Ωστόσο, η τυρβώδης ροή είναι ένας πολύπλοκος μηχανισμός που κυριαρχείται από διακυμάνσεις και παρά τις τεράστιες προσπάθειες που έχουν γίνει σε αυτό το πεδίο από ερευνητές, η θεωρία της τυρβώδους ροής παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεπτυγμένη. Επομένως, πρέπει να βασιστούμε σε πειράματα και σε εμπειρικές ή ημι-εμπειρικές συσχετίσεις που αναπτύσσονται για διάφορες καταστάσεις. Η στροβιλώδης ροή χαρακτηρίζεται από τυχαίες και ραγδαίες διακυμάνσεις των περιοχών στροβιλισμού του ρευστού, που ονομάζονται δίνες, καθ' όλη τη ροή. Αυτές οι διακυμάνσεις παρέχουν έναν επιπλέον

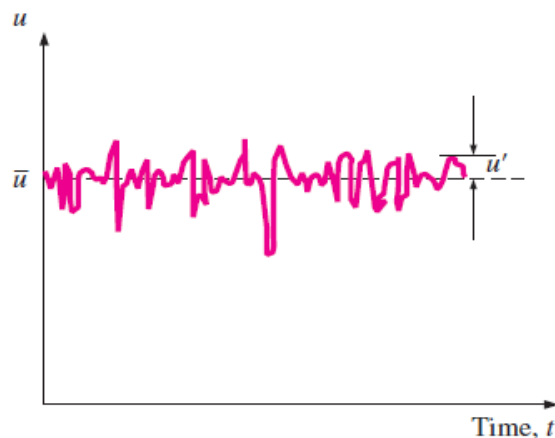
μηχανισμό για την ορμή και τη μεταφορά ενέργειας. Στη στρωτή ροή, τα σωματίδια του υγρού ρέουν κατά τρόπο ομαλό κατά μήκος των διαδρομών, και η ορμή και η ενέργεια μεταφέρονται διαμέσου των γραμμών ροής με μοριακή διάχυση. Σε στροβιλώδη ροή, οι περιστρεφόμενες δίνες μεταφέρουν μάζα, ορμή και ενέργεια σε άλλες περιοχές ροής πολύ πιο γρήγορα από τη μοριακή διάχυση, αυξάνοντας σημαντικά τη μάζα, την ορμή και τη μεταφορά θερμότητας. Ως αποτέλεσμα, η τυρβώδης ροή σχετίζεται με πολύ υψηλότερες τιμές τριβής, μεταφοράς θερμότητας και συντελεστών μεταφοράς μάζας (Σχ. 9).



Σχήμα9: Μηχανισμός τύρβης

Ακόμη και όταν η μέση ροή είναι σταθερή, η κίνηση της δίνης σε τυρβώδη ροή προκαλεί σημαντικές διακυμάνσεις στις τιμές της ταχύτητας, της θερμοκρασίας, της πίεσης και της ομοιόμορφης πυκνότητας (σε συμπιεστή ροή). Το Σχήμα 10 δείχνει τη μεταβολή της στιγμιαίας συνιστώσας ταχύτητας u με το χρόνο σε μια συγκεκριμένη θέση, όπως μπορεί να μετρηθεί με ένα αισθητήρα ανεμόμετρου θερμού σύρματος ή άλλη ευαίσθητη συσκευή. Παρατηρούμε ότι οι στιγμιαίες τιμές της ταχύτητας κυμαίνονται γύρω από μία μέση τιμή, πράγμα που υποδηλώνει ότι η ταχύτητα μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα μιας μέσης τιμής \bar{u} - και ενός κυμαινόμενου συστατικού u' .

$$u = \bar{u} + u' \quad (8)$$



Σχήμα10: Διακυμάνσεις συνιστώσα ταχύτητας u ως προς τον χρόνο σε τυρβώδη ροή

Αυτό ισχύει και για άλλες ιδιότητες όπως η συνιστώσα της ταχύτητας στην υδιεύθυνση: $v = \bar{v} + v'$ και η πίεση και η θερμοκρασία. Η μέση τιμή μίας ιδιότητας σε κάποια τοποθεσία προσδιορίζεται με τον υπολογισμό του μέσου όρου αυτού σε ένα χρονικό διάστημα που είναι αρκετά μεγάλο ώστε ο μέσος χρόνος να είναι σταθερός.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΡΟΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ

2.1 ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

Φάση ορίζεται μια από τις καταστάσεις της ύλης, η οποία μπορεί να είναι αέρια, υγρή και στερεή. Η ταυτόχρονη ροή περισσότερων από μιας φάσης, ονομάζεται πολυφασική ροή. Διφασική ροή, είναι η απλούστερη περίπτωση πολυφασικής ροής.

Η διφασική και γενικότερα η πολυφασική ροή είναι η πιο συνηθισμένη ροή στον φυσικό κόσμο, κάτι που μας αποδεικνύουν αμέτρητα παράδειγμα όπως η ροή του αίματος, η βροχή, η ομίχλη, τα σύννεφα και ο καπνός. Διφασική ροή συναντάται, επίσης, και στο χώρο της τεχνικής, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τις διεργασίες απόσταξης, ψύξης, κλιματισμού και επεξεργασίας αποβλήτων.

Στην περίπτωση διφασικής ροής νερού (υγρού) και πεπιεσμένου αέρα (αερίου) σε αγωγό, μπορεί να θεωρηθεί ότι κάθε μια από τις φάσεις καταλαμβάνει αναλογικά ένα ποσοστό της διατομής του αγωγού. Ο τρόπος με τον οποίο διανέμονται οι δύο φάσεις εντός του αγωγού ποικίλουν και οι διαμορφώσεις που προκύπτουν στη διφασική ροή είναι γνωστές ως είδη – μοντέλα ροής (flowpatterns – flowregimes). Συνεπώς, με γνωστές τις τιμές των ροϊκών παραμέτρων για τις οποίες παράγεται κάθε είδος ροής, μπορεί και να επιλεγθεί το κατάλληλο θεωρητικό μοντέλο.

Η διφασική ροή υπακούει σε όλους τους βασικούς νόμους της ρευστομηχανικής που προσδιορίζουν και τη μονοφασική ροή υγρού ή αερίου, με τη διαφορά ότι οι εξισώσεις που περιγράφουν τη διφασική ροή είναι περισσότερο πολύπλοκες. Αν και έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την πρόβλεψη του είδους της ροής, καμία δεν έχει αποδειχθεί αρκετά αξιόπιστη, λόγω της αλληλεπίδρασης των φάσεων και των ξεχωριστών ιδιοτήτων που τις χαρακτηρίζουν.

Για τον υπολογισμό των διαφόρων όρων απώλειας πίεσης σε μια διφασική ροή, οι περισσότερες μέθοδοι δεν λαμβάνουν υπόψη τους ποιο από τα είδη της ροής συμβαίνει στην πράξη κι έτσι στα αποτελέσματα εμφανίζονται σημαντικές ανακρίβειες. Το πρόβλημα αυτό περιορίζεται ικανοποιητικά με την εισαγωγή κατάλληλων διορθωτικών συντελεστών για διάφορες περιοχές τιμών των ροϊκών παραμέτρων, οι οποίες σχετίζονται άμεσα με το είδος της ροής.

2.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΡΟΗΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ

Ο πίνακας που απεικονίζεται στην Εικόνα 11 περιλαμβάνει συνοπτικά μια μεγάλη βιβλιογραφική ανασκόπηση, πειραματικών και υπολογιστικών ερευνών που αφορούν την υδροδυναμική συμπεριφορά γεωμετρίας τύπου – T.

Οι McFarland και Landy (1980) πραγματοποίησαν τεστ με ροή νερού με 3 διαφορετικές γεωμετρίες τύπου T. Ασχολήθηκαν και με σταθερή και με χρονικά εξαρτημένη ροή τόσο για δεδομένα πίεσης όσο και θερμοκρασίας του ρευστού και

έκαναν συγκρίσεις με οπτικές παρατηρήσεις της διαδικασίας μίξης σε T διαμορφώσεις. Συμπέραναν ότι η καλή μίξη μεταξύ όμοιων ρευστών μπορεί να επιτευχθεί με ένα λογικό μήκος ($L/D < 10$) χωρίς μεγάλες πτώσεις στην πίεση. Το 1981 οι Maruyamakai λοιποί συνεργάτες, πραγματοποίησαν πειραματική μελέτη δύο ροών που ενώνονται σε T-junction. Έλαβαν μια εμπειρική συσχέτιση για την τροχιά του τζετ που εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα διαμέτρων σωλήνων και αναλογίες ταχύτητας. Επίσης περιέγραψαν μια αναλυτική διαδικασία για την επιλογή της βέλτιστης συνθήκης μίξης. Το 1982 οι ίδιοι ερευνητές διαπίστωσαν τις συνθήκες ανάμιξης με βάση την κατανομή της θερμοκρασίας διατομής στον κύριο σωλήνα. Διερεύνησαν τις συνθήκες ανάμιξης για δύο ροές ρευστού σε πλάγια διακλάδωση ως συνάρτηση της γωνίας διακλάδωσης. Μελετούσαν επίσης την εξάρτηση του βαθμού ανάμιξης στη γωνία του τζετ με σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων για τη βέλτιστη αναλογία ταχύτητας. Οι βέλτιστες συνθήκες και η τροχιά του εκτοπισμένου πίδακα συσχετίστηκαν με την επέκταση των εξισώσεων για μια διασταύρωση T. Συμπέραναν ότι για γρήγορη ανάμειξη, ο λοξός κλάδος θα πρέπει να είναι υπό γωνία 45° ως προς τον κύριο σωλήνα.

Ο Andreopolus (1983) πραγματοποίησε πειράματα σε αεροδυναμική σήραγγα μελετώντας ένα θερμαινόμενο πίδακα σε ένα ψυχρό ρεύμα με αναλογίες ταχύτητας 0.25-2. Σημείωσε ότι σε χαμηλές αναλογίες ταχύτητας, η πρώιμη ανάμιξη μεταξύ του θερμού πίδακα και του ψυχρού σταυρού ρεύματος είχε ως αποτέλεσμα μη ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας. Ανέφερε ότι ο επιπλέον ρυθμός καταπόνησης που οφείλεται στην εξομάλυνση της καμπυλότητας και της κλίσης της θερμοκρασίας στις κανονικές και διαμήκεις κατευθύνσεις επηρέασε τον ρυθμό δημιουργίας διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Επίσης, ο ρυθμός δημιουργίας ροών στροβιλώδους θερμότητας διαπιστώθηκε ότι εξαρτάται από την κλίση της ταχύτητας και της θερμοκρασίας.

Οι Sherif και Pletcher (1989) διεξήγαγαν πειράματα εκκενώνοντας θερμαινόμενους τυρβώδεις πίδακες σε ένα ρεύμα διασταυρούμενης ροής σε ένα κανάλι ύδατος. Οι αναλογίες ταχύτητας 1, 4 και 7 χρησιμοποιήθηκαν και οι θερμοκρασίες εκκένωσης με πίδακα ήταν $28-42^\circ\text{C}$. Ανέφεραν ότι παρατηρήθηκε μια διπλή κορυφή στα προφίλ διακύμανσης της θερμοκρασίας. Συμπέραναν ότι η θερμοκρασία του τοιχώματος επηρεάστηκε από τη θερμοκρασία του πίδακα σε πίδακα χαμηλής ταχύτητας. Επίσης, για περιπτώσεις χαμηλής ταχύτητας, η ανάμειξη δεν ήταν τόσο καλή όσο σε περιπτώσεις υψηλής ταχύτητας.

Οι Zughbi και Khokhar (2003) διεξήγαγαν αριθμητικές και πειραματικές έρευνες για την ανάμιξη σε αγωγούς με διασταυρώσεις τύπου T. Το κρύο νερό που ρέει στον κύριο σωλήνα αναμειγνύεται με ζεστό νερό που ρέει μέσω του σωλήνα διακλάδωσης. Μέτρησαν τα πεδία θερμοκρασίας για να ποσοτικοποιήσουν το βαθμό ανάμιξης. Ανέφεραν ότι η γωνία με την οποία εγχύθηκε ο εκτοξευτήρας καθόριζε αν ο πίδακας προσκρούει στο αντίθετο τοίχωμα. Επίσης η γωνία του πίδακα επηρεάζει το μήκος ανάμιξης. Έδειξαν ότι το μήκος σωλήνα που απαιτείται για την επίτευξη μίξης 95% βρέθηκε να είναι συνάρτηση των Vh/Vc , d/D και της γωνίας έγχυσης.

Ο Igarashikai λοιποί (2003) διερεύνησαν την κατανομή της θερμοκρασίας και της ταχύτητας στο T ανάμειξης. Οι θερμοκρασίες υγρών και οι κατανομές της ταχύτητας ροής μετρήθηκαν με κινητά θερμοστοιχεία και ταχύμετρομετρία εικόνας σωματιδίων (PIV). Επίσης, εφάρμοσαν έναν κωδικό DNS (DINUS-3) για την κατανόηση του φαινομένου ανάμειξης. Στην περίπτωση τζετ τοίχου, η περιοχή δινών σχηματίστηκε πίσω από το πίδακα που εξέρχεται από το σωλήνα διακλάδωσης. Επίσης, οι υπολογισμοί για την θήκη τζετ τοίχου έδειξαν ότι οι δίνες στην περιοχή προκάλεσαν μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Τα αναλυτικά αποτελέσματα

αποκάλυψαν ότι δημιουργήθηκαν τρεις τύποι στροβίλων στην κατάντη περιοχή. Ο ένας ήταν ο στρόβιλος Karman, ο οποίος είχε έναν άξονα κάθετο στον κύριο άξονα του σωλήνα. Ο δεύτερος στρόβιλος είχε έναν άξονα παράλληλο προς τον κύριο σωλήνα και ο τρίτος είχε έναν άξονα κάθετο προς τους άλλους δύο στροβίλους. Αυτές οι δίνες περιλάμβαναν διαφορετικό υγρό θερμοκρασίας και αλληλεπιδράζαν μεταξύ τους.

Ο Noguchi και λοιποί (2003) διεξήγαγαν πειραματικές μελέτες θερμικού διαχωρισμού με μοντέλα κλίμακας T-κόμβων χρησιμοποιώντας ζεστό και κρύο νερό. Διερεύνησαν το μοτίβο ροής και τα χαρακτηριστικά των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας με τη βοήθεια της απεικόνισης της ροής και των μετρήσεων της θερμοκρασιακής διακύμανσης. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο φάσματος ισχύος (γρήγορος μετασχηματισμός Fourier), εκτιμούσαν τον ασταθές συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Σε αυτή τη μέθοδο, χρησιμοποίησαν λειτουργίες πυκνότητας φάσματος ισχύος των διακυμάνσεων θερμοκρασίας ρευστού και δομής. Συμπέραναν ότι ο λόγος ταχύτητας καθορίζει τη συμπεριφορά ροής και τη διακύμανση της θερμοκρασίας. Επίσης, ανάντη στοιχεία όπως η γωνία του αγωγού και η βαλβίδα είχαν μικρή επίδραση στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Οι Hu και Kazimi (2006) μελέτησαν τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που προκαλούνται από την θερμική ανάμιξη σε κόμβους T με τη χρήση μοντέλου τύρβης προσομοίωσης μεγάλων δινών (LES). Επίσης διεξάγονται διαφορετικά σύνολα πειραμάτων που αντιπροσωπεύουν δύο τύπους T-ανάμιξης, τύπου συν-ρεύματος και τύπου πρόσκρουσης. Τα θερμοστοιχεία τοποθετούνται σε διάφορες θέσεις κοντά στους τοίχους (3 mm μέσα στο τοίχωμα) των σωλήνων για καταγραφή της θερμοκρασίας. Μεγάλες εξομαλυντικές προσομοιώσεις (LES) πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ως αρχική κατάσταση το προηγούμενος συγκρινόμενο μοντέλο μοντέλου καταπόνησης Reynolds (RSM). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι υπολογισμένες μέγιστες θερμοκρασίες είναι κάπως υψηλότερες από τις μετρήσεις.

Οι Walker και λοιποί (2009) πραγματοποίησαν πειράματα διασταύρωσης T με αισθητήρες συρμάτινου πλέγματος. Οι ευθύγραμμοι και πλευρικοί κλάδοι τροφοδοτήθηκαν από νερό διαφορετικής θερμικής αγωγιμότητας που αντικατέστησε τη θερμοκρασία στην ανάμιξη με θερμότητα. Οι φασματικές πληροφορίες εξήχθησαν με υψηλή ανάλυση χρόνου με πυκνό δίκτυο θερμοευαίσθητων σημάτων. Μελετούσαν την παρεμβατική επίδραση των αισθητήρων συρμάτινου πλέγματος και παρατηρήθηκε μια ενίσχυση στην τυρβώδη ανάμιξη.

Οι προαναφερθείσες προηγούμενες εργασίες δείχνουν ότι έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες για τη μελέτη χαρακτηριστικών πεδίου ροής των διασταυρώσεων σε αγωγούς με T με τη βοήθεια πειραμάτων διασταυρούμενης ροής και ανάλυσης CFD. Οι προσομοιώσεις CFD πραγματοποιούνται με τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης φαινομένων τύρβης όπως, LES και DNS για να μελετηθεί η κατανομή θερμοκρασίας. Το κύριο ενδιαφέρον πίσω από αυτές τις αστάθμητες προσομοιώσεις ήταν η πρόβλεψη των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Δεν επιχειρήθηκε η χρήση της εξίσωσης μεταβολής της θερμοκρασιακής διακύμανσης για την πρόβλεψη διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στην περιοχή ανάμιξης. Επιπλέον, η εξίσωση μεταφοράς μεταβλητής θερμοκρασίας μπορεί να εφαρμοστεί σε προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης και μπορεί να δώσει αποτελέσματα σε πολύ λιγότερο υπολογιστικό χρόνο και ισχύ σε σύγκριση με το LES και το DNS.

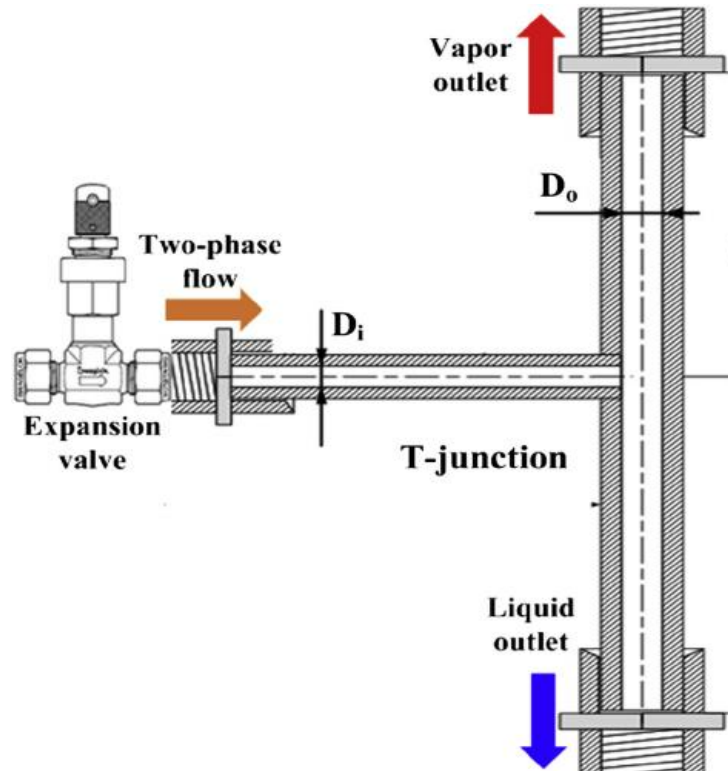
Πηγή	Είδος ροής	Κύρια φάση ροής	Ρευστό δευτέρου κλάδου	Διάμετρος αγωγού (m)	Διάμετρος δευτέρου κλάδου (m)	Λόγος ταχυτήτων	Αντικείμενα έρευνας					
							Expt.	CFD	V	V	T	T
McFarland and Landy (1980)	Cross	NaOH soln	Water (hot) with indicator	0.09	0.018	0.39–1.58	✓				✓	✓
Maruyama et al. (1981)	Cross	Air (35 °C)	Air (25 °C)	0.051	0.005–0.013	2–5	✓		✓		✓	
Maruyama et al. (1982)	Cross, tangential	Air, Water	Air, Water	0.1	0.0042–0.0113	3.5–12	✓		✓		✓	
Andreopoulos (1983)	Cross	Air	Air	Duct: 1.5 × 1.5	0.05	0.25–2	✓				✓	
Rzezonka and Kastl (1984)	Cross	Liquid Na (cold)	Liquid Na (hot)	0.30	0.15	0.5–2.65	✓				✓	
Sherif and Pletcher (1989)	Cross	Water	Water	Duct: 0.61 × 1.067	0.014	1–7	✓				✓	✓
Tang et al. (1993)	Cross	Air	Air	3.81	0.95	0.5–0.8	✓				✓	✓
Fukushima and Fukagata (2003)	Cross	Water (hot)	Water (cold)	0.1	0.05	2.0	✓		(DNS)		✓	✓
Zughbi and Khokhar (2003)	Cross, counter, multiple	Water (cold)	Water (hot)	0.0254	0.00635	2.5–25	✓	✓	✓		✓	✓
Igarashi and Tanaka (2003)	Cross	Water (hot)	Water (cold)	0.15	0.05	0.5–5	✓	✓			✓	✓
Noguchi and Tanimoto (2003)	Cross	Water (hot)	Water (cold)	0.102	0.0204	5–50	✓	✓			✓	✓
Ogawa et al. (2005)	Cross	Water (48 °C)	Water (33 °C)	0.15	0.05	0.7–4.35	✓	✓			✓	✓
Hu and Kazimi (2006)	Cross, impinging	Water (cold)	Water (hot)	0.102	0.102	4.7	✓	✓			✓	✓
Wang and Mujumdar (2007)	Cross	Water (22.7 °C)	Water (29.9 °C)	0.05	0.024	0.45, 0.61		✓	✓		✓	
Tilly and Sousa (2008)	Cross	Air (110 °C)	Air (30 °C)	Duct: 0.3 × 0.25 × 0.5	Jet slot: 0.25 × 0.015	0.01	✓					✓
Kamide et al., (2009)	Cross	Water (48 °C)	Water (33 °C)	0.15	0.05	0.5–4.5	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Walker et al. (2009)	Cross	Water	Water	0.051	0.051	0.4–1.67	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Frank et al. (2010) (For Experiments: cited Andersson et al. 2006)	Cross	Water (15 °C)	Water (30 °C)	0.14	0.1	1	✓		(LES)		✓	✓
Simoneau et al. (2010)	Cross	Liquid Na (cold)	Liquid Na (hot)	0.494	0.068	0.5	✓		(LES)		✓	✓
Kuczaj et al. (2010) (for experiments: cited Andersson et al., 2006)	Cross	Water (15 °C)	Water (30 °C)	0.14	0.1	4	✓		(LES)		✓	✓

Σχήμα 11: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ ΤΥΠΟΥ T ΓΙΑ ΡΟΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Ένας μηχανισμός διαχωρισμού φάσης που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι ο διαχωρισμός με διακλάδωση τύπου T (T-junction). Εντούτοις, υπάρχουν περιορισμένες πληροφορίες και σχεδιαστικές μεθοδολογίες. Έρευνες πάνω στο διαχωριστή T τα τελευταία χρόνια, έχουν δείξει ότι παρόλο που επιτυγχάνεται διαχωρισμός σε απόδοση έως και 85%, η μέθοδος είναι αρκετά ευαίσθητη σε κανονική ροή εισόδου. Η συγκριμένη διάταξη, όπως και η βαρυτική, βασίζεται στον παθητικό διαχωρισμό της ροής, οπότε θεωρείται ιδανική για υποθαλάσσια χρήση όπου ο απομακρυσμένος έλεγχος υστερεί. Η γεωμετρία της αποτελείται από το βασικό οριζόντιο αγωγό όπου ρέει το διασπαστικό μίγμα μέχρι το σημείο που ξεκινάει ο κάθετος κλάδος του T. Εκεί εισέρχεται το αέριο μαζί με υγρά σωματίδια. Σε περίπτωση που τα σωματίδια δεν πέσουν λόγω βαρύτητας στον οριζόντιο αγωγό, περισυλλέγονται σε ένα διευρυμένο οριζόντιο τμήμα, συνέχεια του κάθετου αγωγού. Εκεί, με επιπλέον κάθετο κλάδο επιστρέφουν στην κύρια ροή ενώ το αέριο συνεχίζει την πορεία του διαχωρισμένο από την υγρή φάση. Ένας διαχωριστής τύπου T-junction αποτελείται από τον κύριο αγωγό (mainpipe) και τις διακλαδώσεις (branches). Το τμήμα του κύριου αγωγού μέχρι την διακλάδωση αποτελεί το τμήμα εισόδου της ροής στο διαχωριστή (inlet) και το υπόλοιπο το τμήμα εξόδου της ροής από τον κύριο αγωγό (run). Έχουν μελετηθεί πειραματικά διαχωριστές με ίσες αλλά και με άνισες διαμέτρους κυρίου αγωγού και διακλάδωσης, μικρού ή μεγάλου

μεγέθους. Η απόδοση του διαχωρισμού σε ένα διαχωριστή εξαρτάται από το μέγεθος αυτών των διαμέτρων αλλά και από τον προσανατολισμό τους στο χώρο. Παρακάτω στο Σχήμα 12 φαίνεται ένας κατακόρυφος διαχωριστής υγρού-αερίου με οριζόντια είσοδο της διφασικής ροής.



Σχήμα 12: Τμήμα οριζόντιου διαχωριστή T Junction

(Πηγή:https://www.researchgate.net/profile/Hanfei_Tuo/publication/259096941/figure/fig4/AS:297310526427139@1447895761404/Fig-4-e-Detailed-schematic-of-the-T-junction-separator.png)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Για την κατασκευή της υπολογιστικής γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πακέτο Geometry που περιέχεται στο πρόγραμμα Ansys Workbench 16 και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον χρήστη είτε για εξαρχής σχεδιασμό είτε για εισαγωγή και τροποποίηση σχεδίων από τα περισσότερα εμπορικά σχεδιαστικά πακέτα CAD.

3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Η υπολογιστική γεωμετρία και οι διαστάσεις παρουσιάζονται στο Σχ. 3.1. Για καλύτερη κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος η γεωμετρία χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές ζώνες, zone 1, 2 και 3 όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 3.2. Ο κύριος οριζόντιος αγωγός έχει μήκος 0.025m και εσωτερική διάμετρο 0.05m. Το κρύο νερό εισέρχεται από τον κύριο αγωγό ενώ το ζεστό από τον αγωγό – διακλάδωση που βρίσκεται 0.6m οριζόντια από την είσοδο του κρύου ρευστού. Για την παραμετρική διερεύνηση του φαινομένου μίξης χρησιμοποιείται ο λόγος r , ο οποίος ορίζεται ως λόγος της ταχύτητας του ζεστού νερού (V_h) προς την ταχύτητα του κρύου (V_c) όπως παρουσιάζεται στην Εξ. 3.1.

$$r = \frac{V_h}{V_c} \quad (3.1)$$

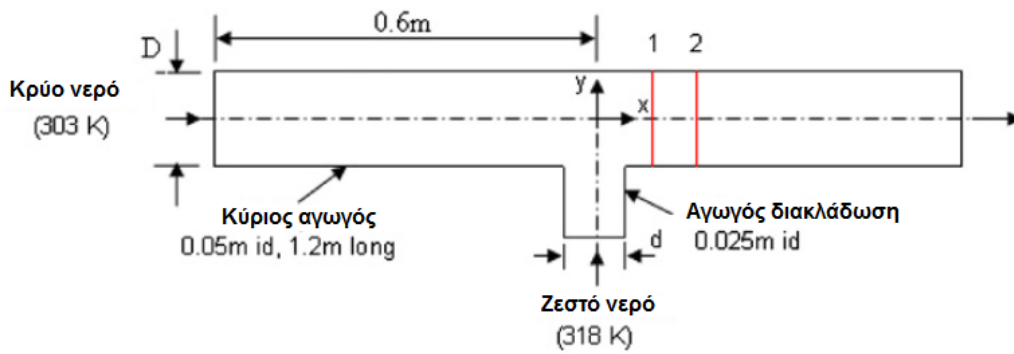
Οι αναλογίες που εξετάστηκαν είναι με λόγο γίσο με 0.5, 1, 2 και 4 όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Επίσης, η θερμοκρασία του ζεστού νερού είναι 318 K ενώ του κρύου είναι 303 K.

Πίνακας 1: Συνθήκες πειραμάτων

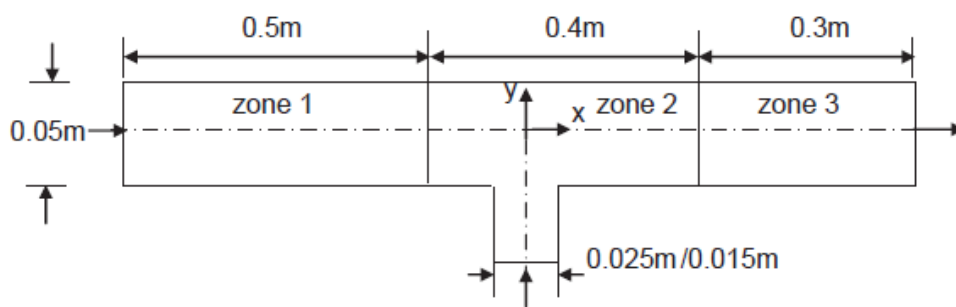
$r = V_h/V_c$	V_c (m/s)	T_c (K)	V_h (m/s)	T_h (K)
0.5	1	303	0.5	318
1	0.5	303	0.5	318
2	0.5	303	1	318
4	0.33	303	1.3	318

Επιπλέον σημειώνεται ότι εξετάστηκε η ροϊκή συμπεριφορά του διφασικού μίγματος για σταθερή διάμετρο κύριου αγωγού ίση με 0.05m και για διάμετρο διακλάδωσης 0.025m ($r = 0.5, 1$) και 0.015m ($r = 2$ και 4).

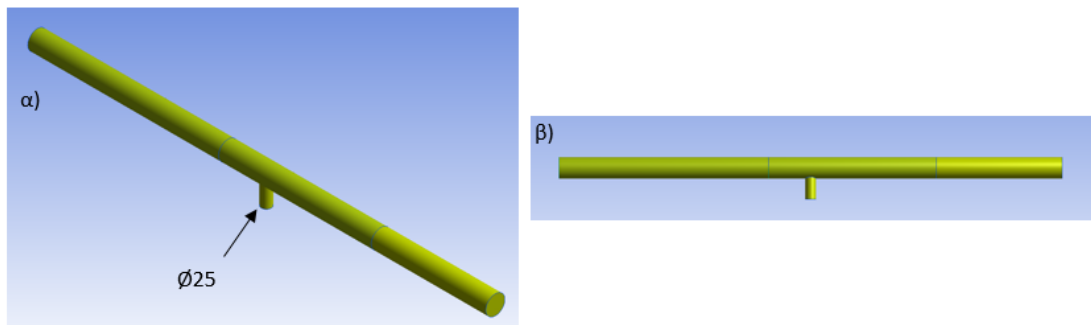
Στο Σχ. 3.2 απεικονίζονται οι 3 όγκοι στους οποίους διαιρέθηκε η υπολογιστική γεωμετρία για καλύτερη επεξεργασία στην κατασκευή του αριθμητικού πλέγματος. Στα Σχ. 3.3 και 3.4 απεικονίζεται η γενική και η πλάγια όψη των δύο γεωμετριών προς διερεύνηση από το πρόγραμμα Ansys Geometry.



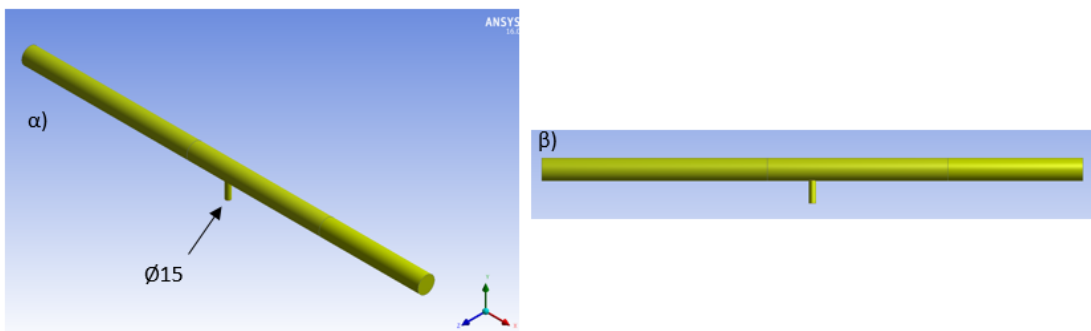
Σχήμα 3.1: Διαστάσεις γεωμετρίας προς διερεύνηση



Σχήμα 3.2: Υπολογιστική γεωμετρία σε 3 ζώνες για 3-Dπροσομοιώσεις



Σχήμα 3.3: Υπολογιστική γεωμετρία 1 με διάμετρο διακλάδωσης 25mm

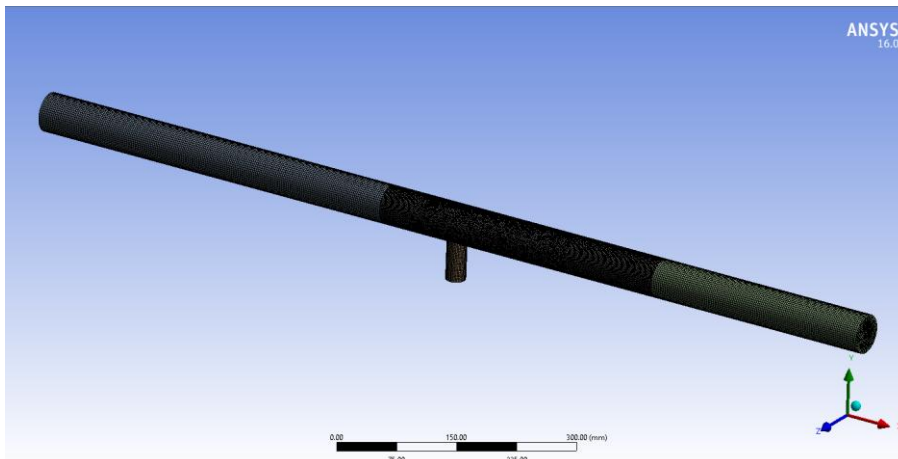


Σχήμα 3.4: Υπολογιστική γεωμετρία 2 με διάμετρο διακλάδωσης 15mm

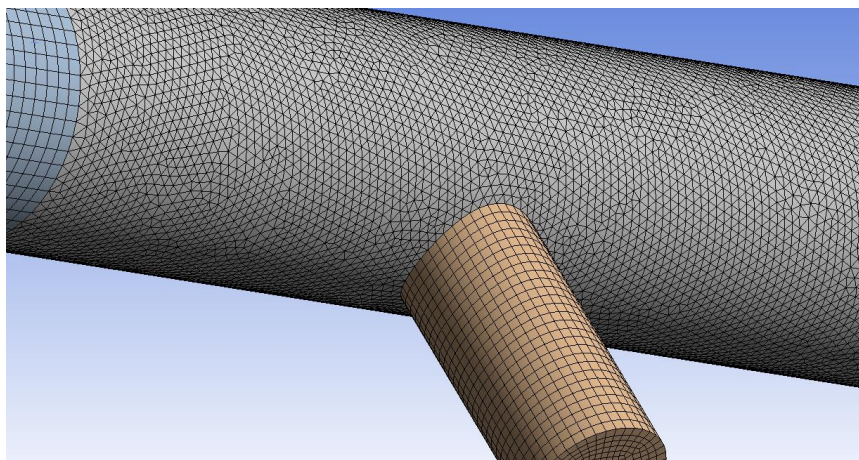
3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ

Η παρούσα γεωμετρία έχει επιλεγθεί με βάση την επιστημονική δημοσίευση “Thermal mixing in T-junctions” των V.S. Naik-Nimbalkar και λοιπών (2010). Στη δημοσιευμένη εργασία παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία μελέτης ανεξαρτητοποίησης πλέγματος. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη σε κάθε μελέτη που χρησιμοποιείται πακέτο υπολογιστικής ρευστομηχανικής ώστε να επιτυγχάνεται λύση που δεν επηρεάζεται από την πυκνότητα των κελιών που έχουν διαιρέσει το υπολογιστικό χωρίο και να εξασφαλίζεται το μικρότερο αριθμητικό σφάλμα.

Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε ένας συμβατικός προσωπικός υπολογιστής και όχι κάποιος σταθμός εργασίας ή σύστημα cluster υπολογιστικών. Ενδεικτικά αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του υπολογιστή (4 πυρήνες i7 χρονισμένος στα 3.6 GHz, 16 Gb RAM, 2 Gb κάρτα γραφικών). Το υπολογιστικό πλέγμα κατασκευάστηκε με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται στην παραπάνω εργασία. Πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές zone 1 και 3 αποτελούνται από εξάεδρα κελιά μέγιστου μεγέθους 3mm και η περιοχή zone 2 όπου συμβαίνει το φαινόμενο της μίξης και απαιτείται μεγαλύτερη λεπτομέρεια αποτελείται από τετράεδρα κελιά μεγέθους 1.5mm. Τέλος, ο αγωγός διακλάδωση αποτελείται από εξάεδρα κελιά μεγέθους 1.5mm.



Σχήμα 3.5: Αριθμητικό πλέγμα γεωμετρίας 2



Σχήμα 3.6: Αριθμητικό πλέγμα γεωμετρίας 2 – Περιοχή διακλάδωσης

Τέλος, στο Σχ. 3.7 παρουσιάζεται ο αριθμός των στοιχείων που αποτελούν τον πλέγμα. Ο αριθμός αυτός ισούται με 1,054,322 κελιά.

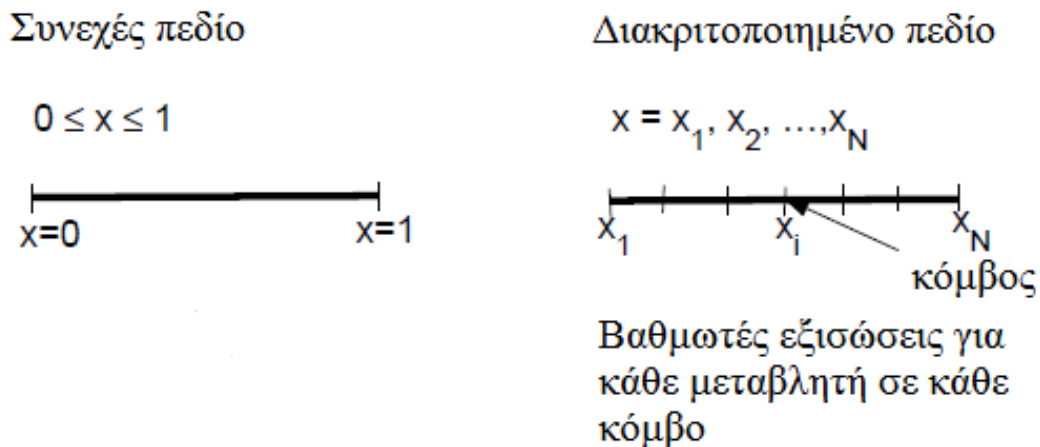
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	360151
<input type="checkbox"/> Elements	1054322

Σχήμα 3.7: Αριθμός κόμβων και κελιών αριθμητικού πλέγματος

3.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΕ ΚΩΔΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ (FLUENT 16)

Οι προσομοιώσεις που διεξήχθησαν θεωρούσαν μόνιμη ροή (steadystate) μέσα στον αγωγό τύπου T. Η μεθοδολογία του κώδικα CFD είναι να αντικαθιστά το συνεχές πεδίο με ένα διακριτοποιημένο πεδίο χρησιμοποιώντας την τεχνική της πλεγματοποίησης (mesh/grid). Για παράδειγμα στο διακριτοποιημένο πεδίο κάθε μεταβλητή καθορίζεται μόνο στους κόμβους του πλέγματος. Συνεπώς η μεταβλητή της πίεσης για ένα πλέγμα θα οριζόταν μόνο σε ένα πλήθος N κόμβων.

$$p_i = p(x_i), i = 1, 2, \dots, N$$



Σχήμα 3.8: Συνεχές και Διακριτοποιημένο πεδίο ροής

Σε λύση CFD, κάποιος θα λύσει άμεσα για τις συναφείς μεταβλητές ροής μόνο στα σημεία πλέγματος. Οι τιμές σε άλλες θέσεις προσδιορίζονται με παρεμβολή των τιμών στα σημεία πλέγματος. Οι μεταβλητές στο πλέγμα ορίζονται ως διακριτές μεταβλητές. Το διακριτοποιημένο σύστημα είναι ένα μεγάλο σετ βαθμωτών, αλγεβρικών εξισώσεων με διακριτές μεταβλητές. Η διαδικασία προβλήματος και η επίλυσή του είναι μια διαδικασία αντιστροφής ενός πίνακα και περιλαμβάνει πολλές

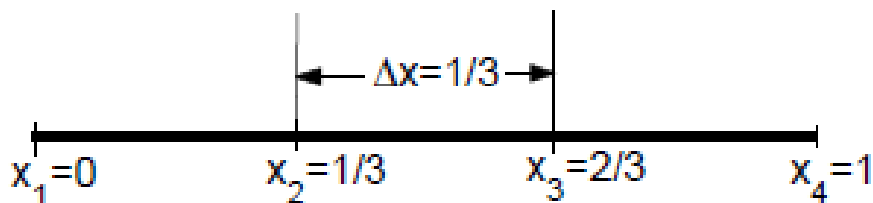
επαναληπτικές διαδικασίες που πραγματοποιούνται από τον υπολογιστή. Ο κώδικας FLUENT λύνει αυτές τις εξισώσεις με τη μεθοδολογία που είναι γνωστή ως μέθοδος πεπερασμένων όγκων (finite volume).

3.3.1 Μεθοδολογία πεπερασμένων όγκων

Έστω ένα απλό παράδειγμα με μία εξίσωση 1D:

$$\frac{du}{dx} + u = 0; \quad 0 \leq x \leq 1; \quad u(0) = 1 \quad (3.2)$$

Η παραπάνω εξίσωση διακριτοποιείται ως εξής με βάση το ακόλουθο πλέγμα:



Σχήμα 3.9: Διακριτοποίηση 1D πεδίου ροής

Το πλέγμα έχει 4 κόμβους που ισαπέχουν με την απόσταση μεταξύ των κόμβων να ονομάζεται Δx . Οι κυβερνώσες εξισώσεις για κάθε κόμβο είναι:

$$\left(\frac{du}{dx}\right)_i + u_i = 0 \quad (3.3)$$

Ο δείκτης i υποδηλώνει την τιμή σε κάθε κόμβο x_i .

Για να εξαχθεί μια έκφραση σε όρους του u για κάθε κόμβο χρησιμοποιείται μια σειρά Taylor:

$$u_{i-1} = u_i - \Delta x \left(\frac{du}{dx}\right)_i + O(\Delta x^2) \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{du}{dx}\right)_i = \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.5)$$

Το σφάλμα (du/dx) λόγω των όρων που έχουν αμεληθεί στη σειρά Taylor ονομάζεται σφάλμα περικοπής. Όταν το σφάλμα είναι μεγαλύτερο του $O(\Delta x)$, η διακριτοποίηση έχει ακρίβεια 1^{ης} τάξης.

Χρησιμοποιώντας της εξ. (3.6) στην (3.5) προκύπτει:

$$\frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} + u_i = 0 \quad (3.6)$$

Με αυτό τον τρόπο προκύπτει μια αλγεβρική εξίσωση από μια διαφορική.

Οι εξισώσεις μεταφοράς που χρησιμοποιεί ο κώδικας του AnsysFluent για το συγκεκριμένο ροϊκό πρόβλημα είναι οι εξής:

Εξίσωση διατήρησης της μάζας

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.7)$$

Εξίσωση διατήρησης της ορμής

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\left(\frac{\partial P}{\partial x_i}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho g \beta (\bar{T} - T_0) \quad (3.8)$$

Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

$$\left(u_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}\right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\alpha_t + \frac{\partial_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right] \quad (3.9)$$

Οι εξισώσεις μεταφοράς επιλύθηκαν με το FLUENT 16.0 με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (finitevolumemethod) με το μοντέλο τύρβης RNGk-ε καθώς και συνθήκες μη ολίσθησης στα τοιχώματα του αγωγού. Οι δύο είσοδοι ρευστού ορίστηκαν ως είσοδοι ταχύτητας (velocityinlets) και η έξοδος δεξιά ως έξοδος ροής (outflow). Τα τοιχώματα ορίστηκαν ως τοίχος (wall). Τέλος, οι εξισώσεις μεταφοράς διακριτοποιήθηκαν με σχήματα 2^{ης} τάξης και η σύζευξη πιέσεων – ταχυτήτων έγινε με τον αλγόριθμο SIMPLE. Τα σφάλματα σύγκλισης θεωρήθηκαν στο 1 x 10⁻⁴.

3.4 ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΟΜΟΝΤΕΛΟ VOLUME OF FLUID (VOF)

Η πρόοδος στην υπολογιστική ρευστομηχανική έδωσε τη βάση για περαιτέρω λεπτομέρεια στη δυναμική ανάλυση των πολυφασικών ροών. Ένα από τα μοντέλα προσέγγισης στην αριθμητική ανάλυση πολυφασικών ροών είναι και το μοντέλο VOF. Το VOF μοντέλο, είναι μία τεχνική ιχνηλάτησης επιφάνειας (surfacetracking), που εφαρμόζεται σε σταθερό πλέγμα Euler. Έχει σχεδιαστεί για δύο ή περισσότερα μη αναμιγνύόμενα ρευστά όπου μας ενδιαφέρει η θέση της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ των ρευστών. Στο VOF μοντέλο, τα ρευστά μοιράζονται ένα και μοναδικό σύστημα εξισώσεων ορμής και το κλάσμα όγκου κάθε ρευστού σε κάθε κελί υπολογισμού καταγράφεται σε όλο το εύρος του πεδίου ροής. Εφαρμογές αυτού του μοντέλου, αποτελούν στρωματοποιημένες ροές, ροές ελεύθερης επιφάνειας, ροές πλήρωσης, πιπίλισμα, κίνηση μεγάλων φυσαλίδων σε υγρό κτλ.

3.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΡΒΗΣ

Οι τυρβώδεις ροές χαρακτηρίζονται από «παλλόμενα» πεδία ταχυτήτων. Αυτές οι εναλλαγές αναμιγνύουν μεταφερόμενες ποσότητες όπως η ορμή, η ενέργεια και η συγκέντρωση φάσεων και τις κάνουν και αυτές να είναι εναλλασσόμενες. Αφού αυτές οι εναλλαγές μπορεί να είναι μικρού πλάτους και υψηλής συχνότητας, είναι εξαιρετικά

«υπολογιστικά δαπανηρό» να προσομοιωθούν άμεσα με πρακτικούς υπολογισμούς της μηχανικής των ρευστών. Αντί αυτού, οι ακριβείς (στιγμιαίες) εξισώσεις ροής, μπορούν να τροποποιηθούν σε «μέσες» εξισώσεις με διάφορους τρόπους. Ο στόχος είναι πάντα να απομακρυνθούν οι στιγμιαίες τιμές και οι τελικές εξισώσεις να είναι δυνατό να επιλυθούν με μικρότερη υπολογιστική ισχύ. Εντούτοις οι νέες εξισώσεις περιέχουν επιπρόσθετες άγνωστες μεταβλητές και είναι απαραίτητη η υιοθέτηση μοντέλων τύρβης ώστε να προσδιοριστούν αυτές οι μεταβλητές συναρτήσει άλλων γνωστών μεγεθών. Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής των κάτωθι μοντέλων τύρβης:

- Μοντέλο Spalart-Allmaras
- Κανονικό μοντέλο k-ε
- RNG k-ε μοντέλο (RenormalizationGroup – RNG)
- Ρεαλιστικό μοντέλο k-ε
- Μοντέλο τάσεων Reynolds (ReynoldsStressModel – RSM)
- Μοντελοποίηση μεγάλων δινών (LargeEddySimulation - LES)

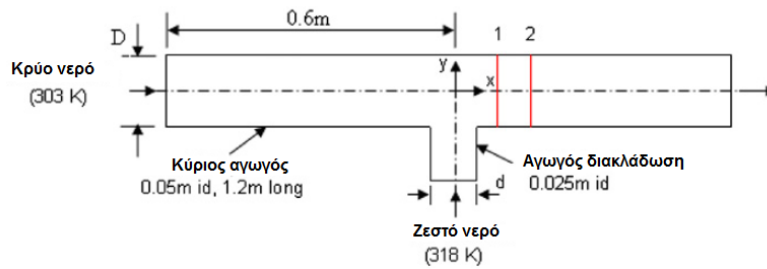
Είναι αναμφισβήτητο γεγονός ότι κανένα μοντέλο τύρβης δεν είναι αποδεκτό καθολικά σαν το καταλληλότερο για όλα τα είδη προβλημάτων. Η επιλογή μοντέλου τύρβης, θα βασιστεί σε δεδομένα όπως η φυσική του προβλήματος, η εμπειρία στην εφαρμογή μοντέλων σε συγκεκριμένα προβλήματα, η απαιτούμενη ακρίβεια, η διατιθέμενη υπολογιστική ισχύς, όπως και ο χρόνος που έχουμε στη διάθεσή μας. Για να γίνει λοιπόν η βέλτιστη επιλογή, πρέπει να γνωρίζουμε τις δυνατότητες αλλά και τους περιορισμούς που μας δίνει η κάθε επιλογή.

Το μοντέλο Standard k-ε

Τα απλούστερα «πλήρη μοντέλα» τύρβης είναι μοντέλα δύο εξισώσεων στα οποία η επίλυση δύο ξεχωριστών εξισώσεων μεταφοράς επιτρέπει τον ανεξάρτητο προσδιορισμό της κλίμακας μήκους και της τυρβώδους ταχύτητας. Το μοντέλο standard k-ε είναι από τα πλέον δημοφιλή από τη στιγμή που παρουσιάστηκαν από τους Jones και Launder [7]. Εύρωστο, οικονομικό, και σχετικά ακριβές σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, εξηγούν τη δημοφιλία του σε βιομηχανικές ροές και μεταφορά θερμότητας. Είναι ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο, και η εξέλιξη των εξισώσεων του μοντέλου βασίζεται στην εμπειρία και μελέτη των φαινομένων. Από τη στιγμή που έχουν γίνει γνωστά τα προτερήματα και οι αδυναμίες του μοντέλου k-ε έχουν γίνει αρκετές βελτιώσεις ώστε να βελτιωθεί η απόδοσή του. Δύο από αυτές τις παραλλαγές είναι διαθέσιμες στο FLUENT: το RNG k-ε μοντέλο [8] και το «ρεαλιστικό» k-ε μοντέλο [9].

3.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο υποκεφάλαιο 3.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε και ονομάζεται Γεωμετρία 1 με διακλάδωση διαμέτρου 25mm. Για καλύτερη παρακολούθηση των αποτελεσμάτων και για την παρατήρηση αλλαγής του θερμοκρασιακού πεδίου έχουν σχεδιαστεί 2 γραμμές, η γραμμή 1 (line 0.5d) και η 2 (line1.25d). Οι θέσεις των γραμμών αυτών παρουσιάζονται τόσο στο Σχήμα 3.1 όσο και στο 3.10.



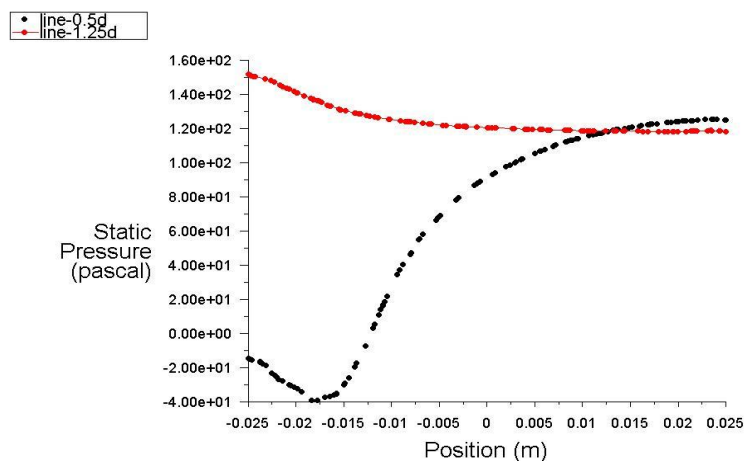
Σχήμα 3.10: Γεωμετρία 1 και γραμμές 1 και 2

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν την κατανομή της στατικής πίεσης, της στατικής θερμοκρασίας και της x-ταχύτητας κατά μήκος των γραμμών 1 και 2, δηλαδή κατά μήκος της κάθετης γραμμής που διέρχεται από τη διάμετρο του κυλινδρικού αγωγού.

3.6.1 Γεωμετρία 1 – Διακλάδωση διαμέτρου 25mm

- $r = 0.5$

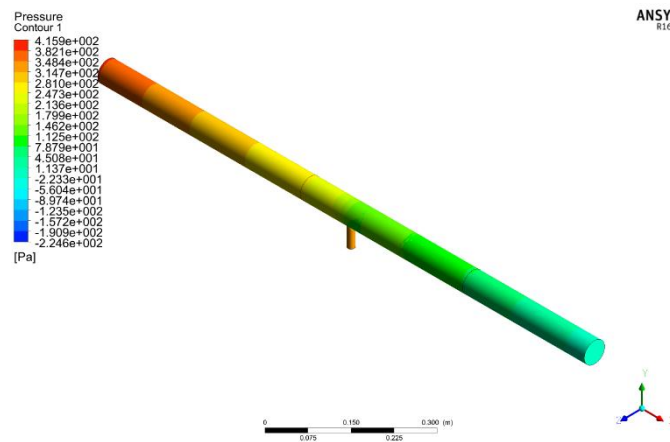
Στο Σχ. 3.6.1 παρουσιάζεται η κατανομή της στατικής πίεσης (Pa) κατά μήκος των γραμμών 1 και 2. Το αριστερό όριο του οριζόντιου άξονα (-0.025m) αφορά το κάτω σημείο της γραμμής 1, δηλαδή την κάτω επιφάνεια του αγωγού και αντίστοιχα το δεξιό όριο του άξονα αφορά τον ανώτατο σημείο της κάθε γραμμής, δηλαδή την πάνω επιφάνεια του αγωγού. Παρατηρείται ότι στην γραμμή 1 (line 0.5d) που βρίσκεται σε απόσταση 0.5 φορές την διάμετρο του αγωγού εισόδου του ζεστού ρευστού δημιουργείται περιοχή υποπίεσης κοντά στο κάτω τοίχωμα του αγωγού. Αντιθέτως, η πίεση στην γραμμή 2, που βρίσκεται 1.25 φορές μακρύτερα από τον αγωγό εισόδου του ζεστού ρευστού δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά πίεσης μεταξύ του κάτω και του άνω σημείου.



Static Pressure
ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, dp, pbns, ske)
Feb 09, 2017

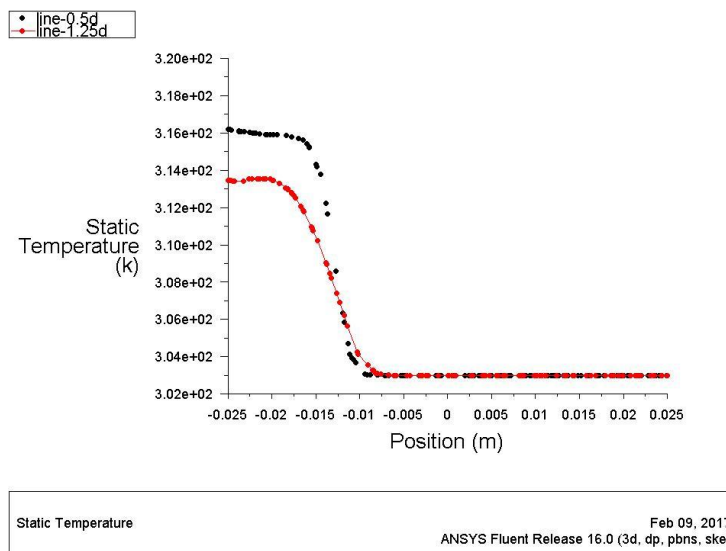
Σχήμα 3.6.1: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 0.5$

Παρατηρούνται περιοχές υψηλότερης στατικής πίεσης στις δύο εισόδους ρευστού και η στατική πίεση μειώνεται καθώς η ροή προχωρά προς την οριζόντια έξοδο.



Σχήμα 3.6.2: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 0.5$

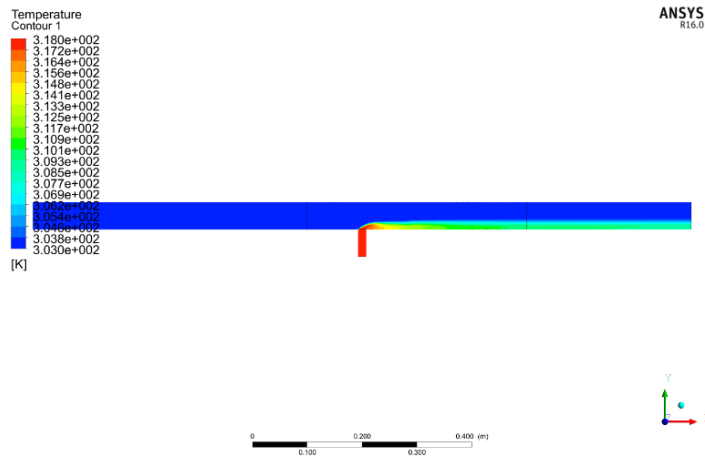
Η κατανομή της στατικής θερμοκρασίας αντιθέτως δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές καθώς απομακρυνόμαστε από το σημείο μίξης. Όπως είναι αναμενόμενο η θερμοκρασία είναι υψηλότερη στο κάτω μέρος της γραμμής 0.5d καθώς βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο όπου τα δύο ρευστά διαφορετικής θερμοκρασίας έρχονται σε επαφή. Αντιθέτως από το σημείο -0,01m από το κέντρο του αγωγού και πάνω παρατηρείται θερμική ισορροπία.



Σχήμα 3.6.3: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 0.5$

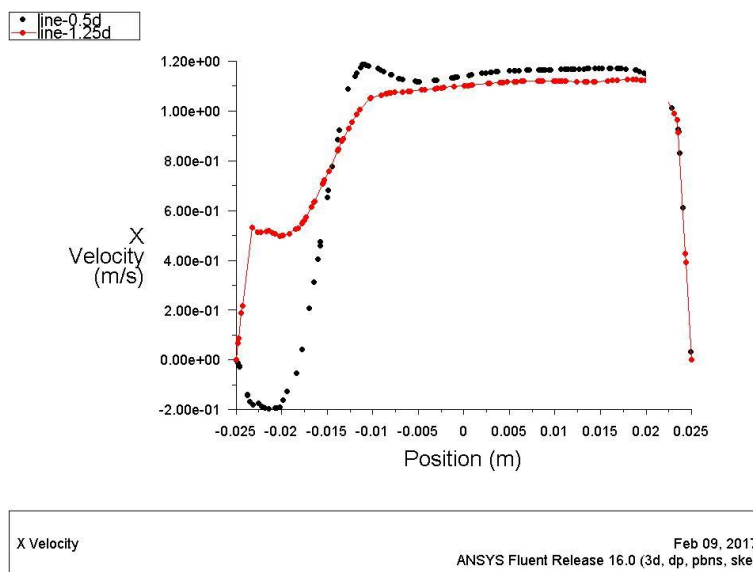
Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο διάγραμμα του Σχ. 3.6.3 γίνονται ορατά με την απεικόνιση της στατικής θερμοκρασίας σε επίπεδο XY (Σχ. 3.6.4). Παρατηρείται με κόκκινο χρώμα η επιφάνεια όπου το ρευστό έχει υψηλότερη

θερμοκρασία. Η περιοχή αυτή βρίσκεται στην κάτω επιφάνεια του αγωγού με υψηλότερες τιμές κοντά στο αγωγό εισόδου του ζεστού νερού.



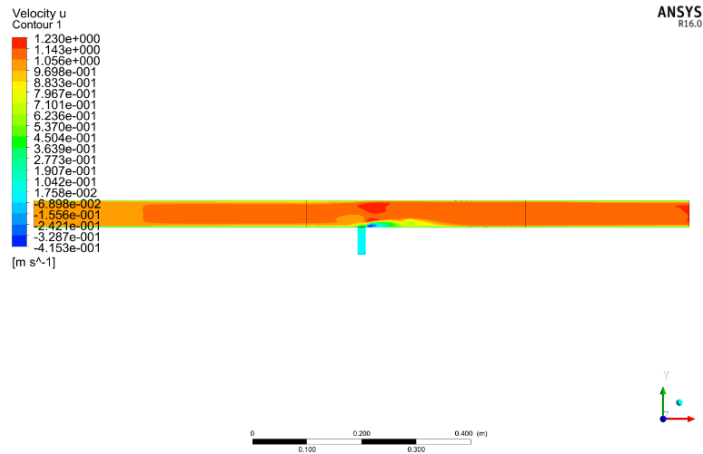
Σχήμα 3.6.4: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 0.5$

Η ταχύτητα στον άξονα παρουσιάζει μηδενικές τιμές στα τοιχώματα όπως είναι γνωστό από την κλασσική ρευστομηχανική και έχει μεγαλύτερη τιμή στην γραμμή 1.25dσε σχέση με την 0.5d. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι δύο φάσεις έχουν αναμειχθεί και αποκτούν μεγαλύτερη ταχύτητα μίγματος.



Σχήμα 3.6.5: Κατανομή ταχύτητας X – $r = 0.5$

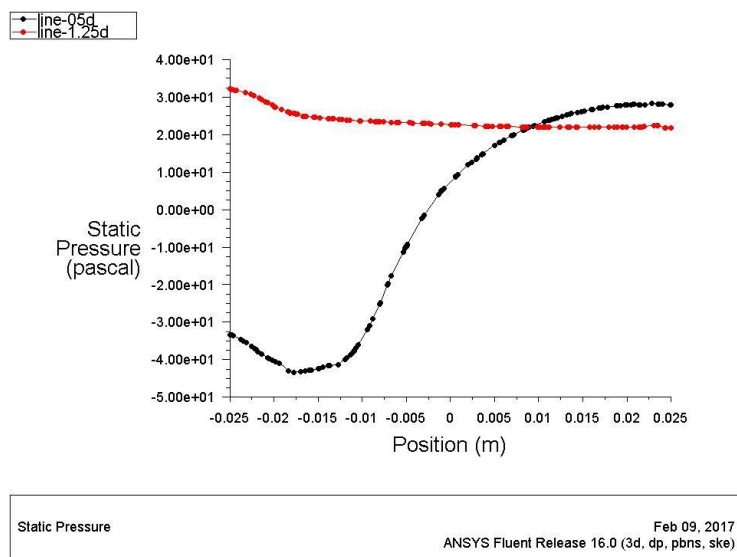
Τα παραπάνω αποτελέσματα ορατοποιούνται στο Σχήμα 3.6.6 όπου παρατηρείται η κατανομή της ταχύτητας στην συνιστώσα X. Κοντά στο σημείο μίξης προκαλείται μια περιοχή στάσιμου ρευστού με σχεδόν μηδενικές ταχύτητες (μπλε χρώμα) και στην συνέχεια η ταχύτητα αυξάνεται κοντά στο κάτω μέρος του αγωγού. Όσο πλησιάζουμε τα τοιχώματα η ταχύτητα είναι μειώνεται.



Σχήμα 3.6.6: Κατανομή ταχύτητας $X - r = 0.5$

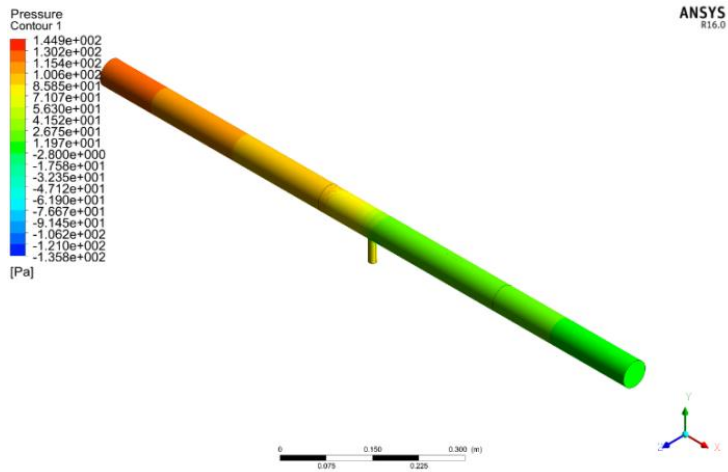
- $r = 1$

Όταν ο λόγος ταχυτήτων γίνει 1 τότε παρατηρείται διαφορετική κατανομή στατικής πίεσης στις 2 γραμμές. Συγκεκριμένα στην γραμμή 0.5d παρατηρείται ότι από το μέσο του αγωγού και προς το κάτω τοίχωμα η στατική πίεση λαμβάνει αρνητικές τιμές. Από τα 0.01m από το μέσο του αγωγού και άνω λαμβάνει αυξανόμενες τιμές και μάλιστα ξεπερνά τις αντίστοιχες της γραμμής 1.25d (Σχήμα 3.6.7).



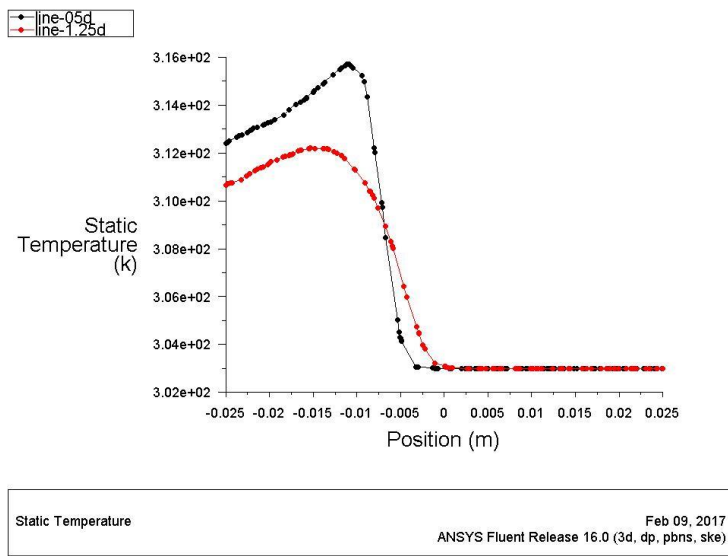
Σχήμα 3.6.7: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 1$

Στο Σχ. 3.6.8 παρουσιάζεται η κατανομή της στατικής πίεσης όπου παρατηρείται ξανά υψηλή πίεση στις 2 εισόδους. Συγκριτικά με την περίπτωση $r = 0$ παρατηρείται ότι η πίεση έχει υψηλότερες τιμές σε όλο το μήκος του αγωγού μέχρι την έξοδο.



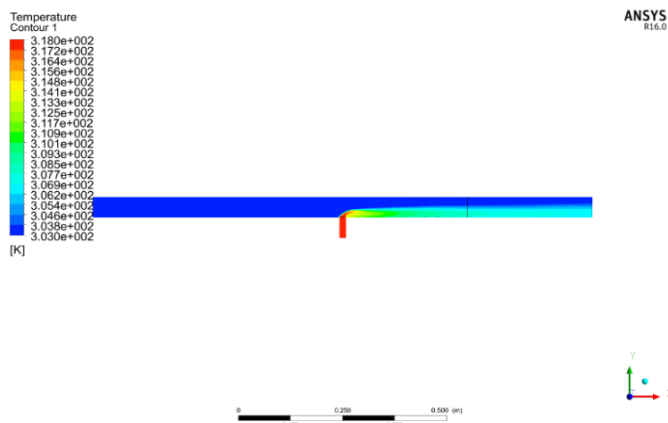
Σχήμα 3.6.8: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 1$

Αντίστοιχα, παρατηρούνται διαφορετικές κατανομές στατικών θερμοκρασιών όπου οι τιμές είναι μεγαλύτερες από την προηγούμενη περίπτωση και η θερμική ισορροπία έρχεται περίπου στο κέντρο του αγωγού.



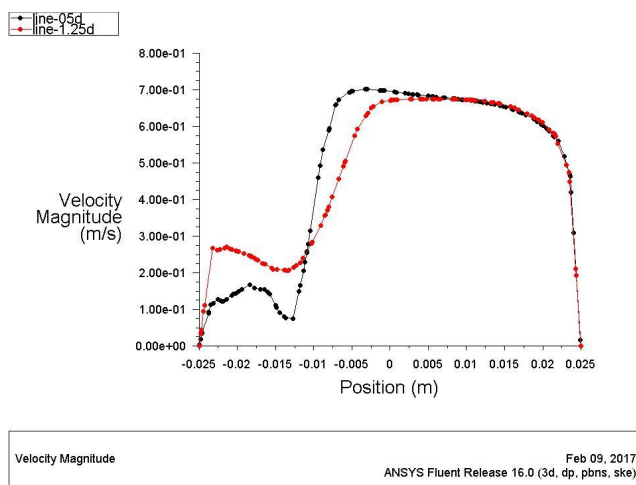
Σχήμα 3.6.9: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 1$

Η περιοχή όπου η μίξη των ρευστών διαφορετικής θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη και καταλαμβάνει το μισό κάτω μέρος του αγωγού. Συνεπώς, το διαγράμμα του Σχ. 3.6.9 επαληθεύεται.



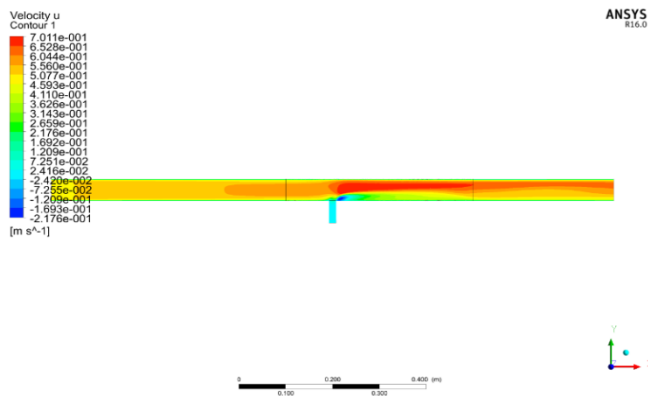
Σχήμα 3.6.10: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 1$

Η x -συνιστώσα της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη στη θέση 1.25d και παρατηρείται ότι από το μέσο του αγωγού και άνω οι ταχύτητα έχει την ίδια τιμή και στις 2 θέσεις.



Σχήμα 3.6.11: Κατανομή ταχύτητας $X - r = 1$

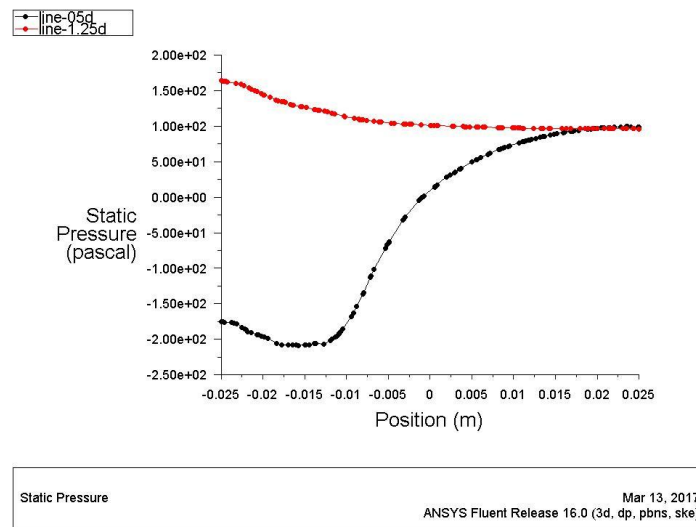
Και σε αυτή την περίπτωση ($r = 1$) παρατηρείται στο σημείο μίξης χαμηλή τιμή ταχύτητας (ανακυκλοφορία ροής) και από το μέσο του αγωγού η ταχύτητα του μίγματος λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές της τάξεως του 0.7 m/s.



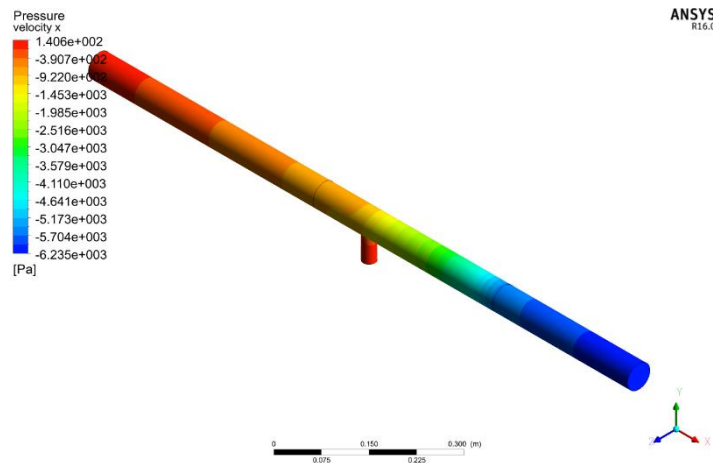
Σχήμα 3.6.12: Κατανομή ταχύτητας $X - r = 1$

- $r = 2$

Στην περίπτωση $r = 2$ όπου αυξάνεται η ταχύτητα εισόδου του ζεστού νερού (από 0.5 γίνεται 1 m/s) παρατηρείται διαφορετική κατανομή στατικής πίεσης στις 2 θέσεις ελέγχου. Κοντά στο σημείο μίξης (line 0.5d) και χαμηλά στον τοίχωμα παρατηρείται υποπίεση. Αντίθετα, στην γραμμή 1.25d η πίεση είναι θετική, με υψηλότερη τιμή στο κάτω τοίχωμα. Οι δύο πιέσεις γίνονται ίδιες στο άνω τοίχωμα (Σχ. 3.6.13).

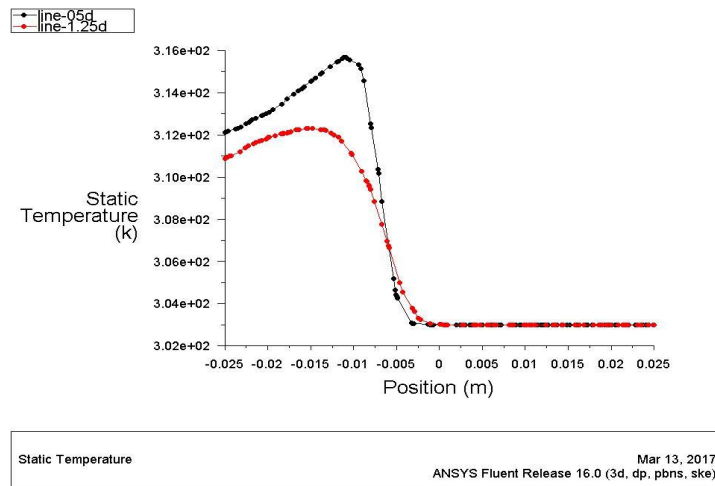


Σχήμα 3.6.13: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 2$



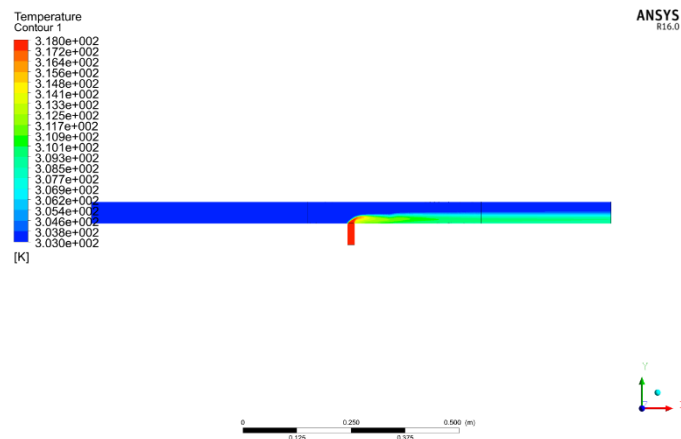
Σχήμα 3.6.14: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 2$

Ανάλογα αποτελέσματα με την προηγούμενη περίπτωση παρατηρούνται για την στατική θερμοκρασία. Στο κάτω μισό τμήμα του αγωγού και κοντά στο σημείο μίξης παρατηρείται μεγαλύτερη θερμοκρασία και από το μέσο και άνω επέρχεται θερμική ισορροπία (Σχ. 3.6.15).



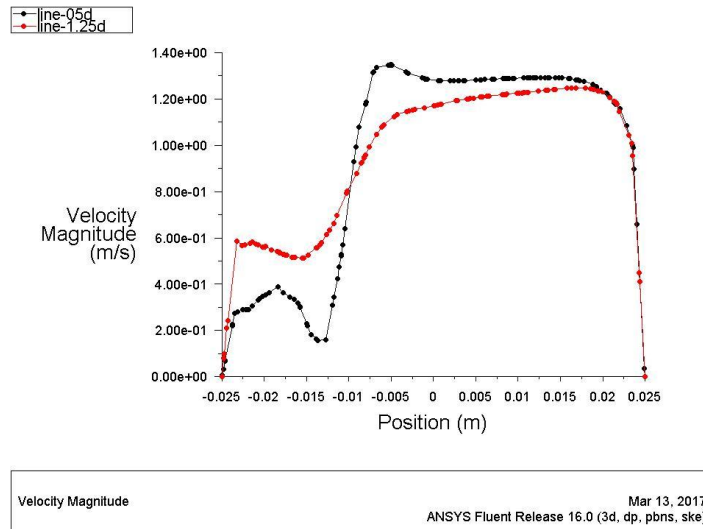
Σχήμα 3.6.15: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 2$

Τα διαγράμματα του Σχ. 3.4.15 επαληθεύονται από την ορατοποίηση της θερμοκρασίας όπου φαίνεται ότι όποια θερμοκρασιακή μεταβολή συμβαίνει λαμβάνει χώρα στο κάτω μισό της διατομής του αγωγού (Σχ. 3.6.16).



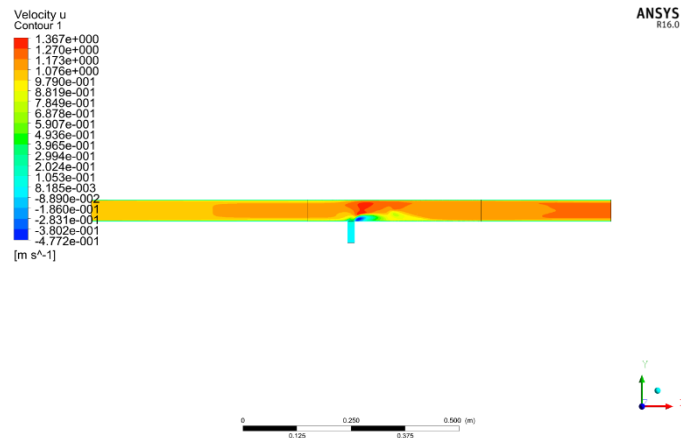
Σχήμα 3.6.16: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 2$

Παρατηρείται διαφορά στην κατανομή της ταχύτητας για $r = 2$ όπου στις όπως έχει συμβεί και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η ταχύτητα του μίγματος είναι μεγαλύτερη στη θέση 1.25d. Ωστόσο, η ταχύτητα από την απόσταση των 0.01m από το κάτω τοίχωμα και άνω λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές για την γραμμή 0.5d.



Σχήμα 3.6.17: Κατανομή ταχύτητας $X - r = 2$

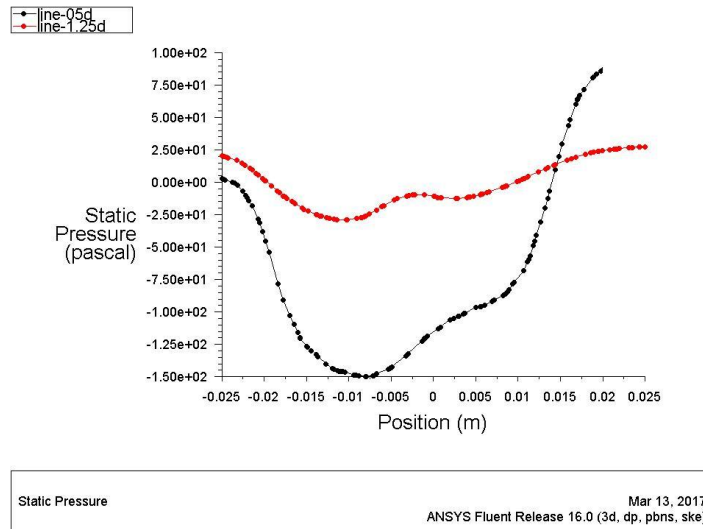
Η κατανομή της x-συνιστώσας της ταχύτητας επιβεβαιώνει τις καμπύλες του Σχ. 3.6.17 με χαμηλές τιμές κοντά στο σημείο μίξης (κάτω τοίχωμα) και αρκετά υψηλότερες από το μέσο και άνω.



Σχήμα 3.6.18: Κατανομή ταχύτητας $X - r = 2$

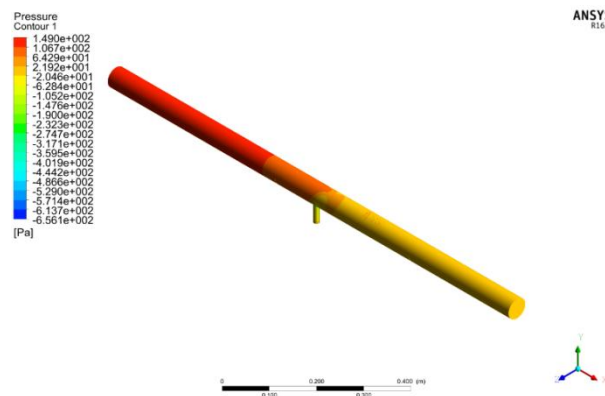
- $r = 4$

Στην τελευταία περίπτωση όπου η ταχύτητα του κρύου νερού είναι 0.33 και του ζεστού 1.32m/s παρατηρείται τελείως διαφορετική κατανομή στατική πίεσης. Στο κάτω τοίχωμα η πίεση έχει περίπου την ίδια τιμή και στις 2 γραμμές ωστόσο καθώς ανεβαίνουμε προς το άνω τοίχωμα η πίεση στην γραμμή 0.5d λαμβάνει αρνητικές τιμές ενώ στη γραμμή 1.25d παραμένει σταθερή.



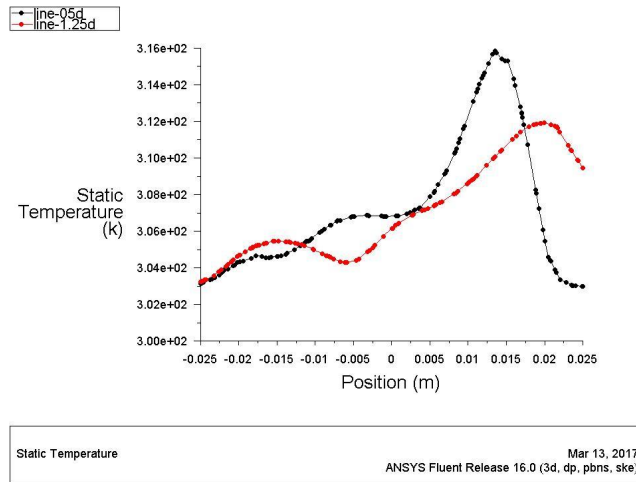
Σχήμα 3.6.19: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 4$

Η κατανομή των πιέσεων σε όλο το μήκος του αγωγού T είναι διαφορετική από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Πρόκειται για την περίπτωση με την μεγαλύτερη στατική πίεση εντός του αγωγού. Μετά το σημείο μίξης παρατηρείται πτώση της στατικής πίεσης που λαμβάνει μεγάλες τιμές στο εμπρός τμήμα του αγωγού ως το σημείο του αγωγού T (Σχ. 3.6.20).



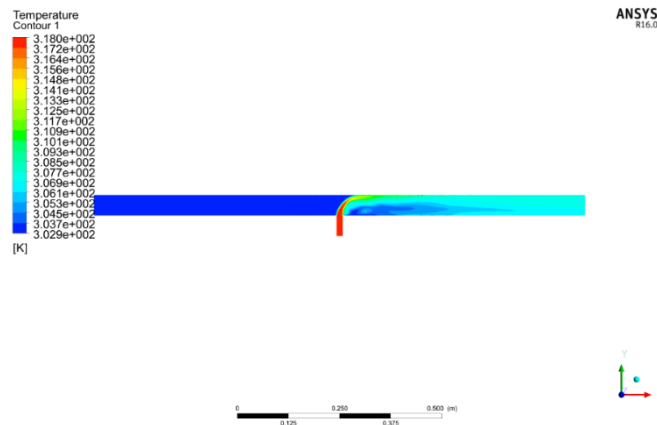
Σχήμα 3.6.20: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 4$

Διαφορετική είναι και η κατανομή της στατικής θερμοκρασίας όπου στη γραμμή 0.5d παρατηρείται μεγάλη θερμοκρασία στο κοντά στο άνω τοίχωμα.



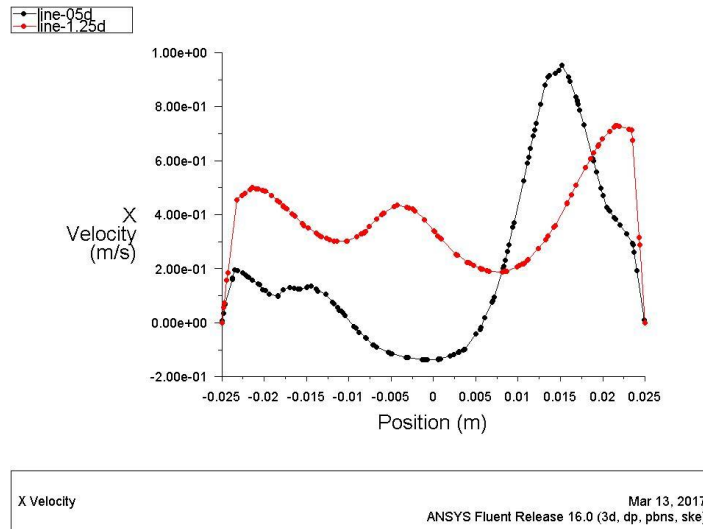
Σχήμα 3.6.21: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 4$

Η ορατοποίηση της στατικής θερμοκρασίας σε ΧΥ επίπεδο επιβεβαιώνει την κατανομή που παρουσιάζονται στο Σχ. 3.6.22 καθώς παρατηρείται ότι η φλέβα του θερμού ρευστού μόλις εισέρχεται τείνει προς το άνω τοίχωμα και στη συνέχεια επέρχεται θερμοκρασιακή ισορροπία σχεδόν στο μέσο του αγωγού.



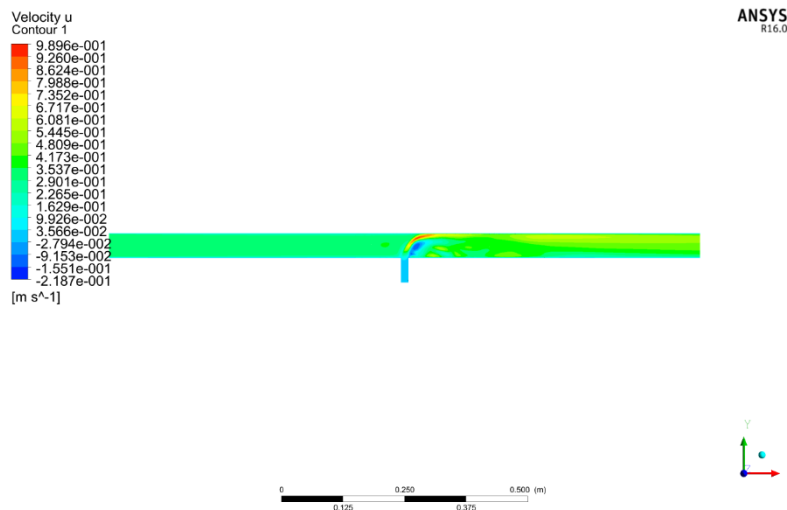
Σχήμα 3.6.22: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 4$

Τέλος, παρατηρείται διαφορετική διακύμανση ταχύτητας X στις 2 γραμμές ελέγχου. Η ταχύτητα είναι χαμηλότερη στην γραμμή 0.5d στο κάτω μέρος του αγωγού και λαμβάνει υψηλή τιμή κοντά στο άνω τοίχωμα όπου υπάρχει ανοδική φλέβα θερμού ρευστού. Η ταχύτητα στη γραμμή 1.25d παρουσιάζει ένα σχεδόν σταθερό προφίλ με ελαφρώς υψηλότερες τιμές στον άνω τοίχωμα.



Σχήμα 3.6.23: Κατανομή ταχύτητας X – $r = 4$

Στο Σχ. 3.6.24 παρουσιάζεται η μεγάλη ταχύτητα της φλέβας θερμού ρευστού που εισέρχεται στον κύριο αγωγό και δικαιολογεί το διάγραμμα του Σχ. 3.6.24.



Σχήμα 3.4.24: Κατανομή ταχύτητας X – $r = 4$

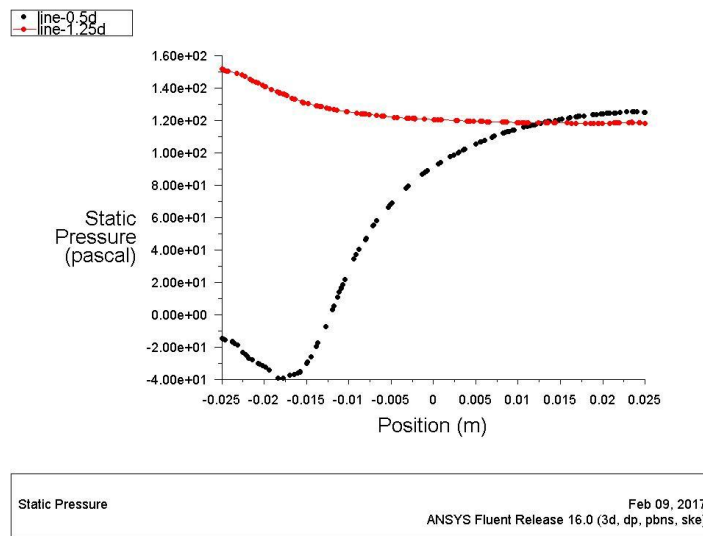
3.6.2 Γεωμετρία 2 – Διακλάδωση διαμέτρου 15mm

Η δεύτερη περίπτωση που εξετάστηκε για τους ίδιους λόγους ταχυτήτων αφορά μικρότερο σωλήνα εισόδου θερμού νερού με διάμετρο 15mm.

- $r = 0.5$
-

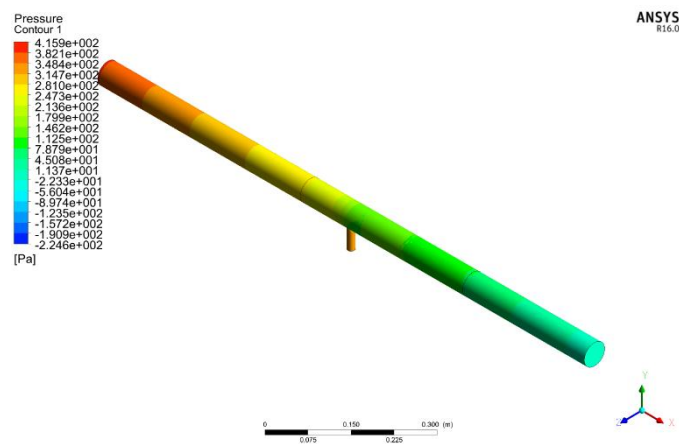
Παρατηρείται διαφορετική κατανομή για την περίπτωση $r: 0.5$ και $D: 15\text{mm}$. Συγκεκριμένα στη γραμμή 0.5d που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο εισόδου του

θερμού νερού παρατηρείται περιοχή υποπίεσης και από το μέσο του αγωγού και προς το άνω τοίχωμα η στατική πίεση παίρνει περίπου ίσες τιμές με την αντίστοιχη της γραμμής 1.25d (Σχ. 3.6.25).



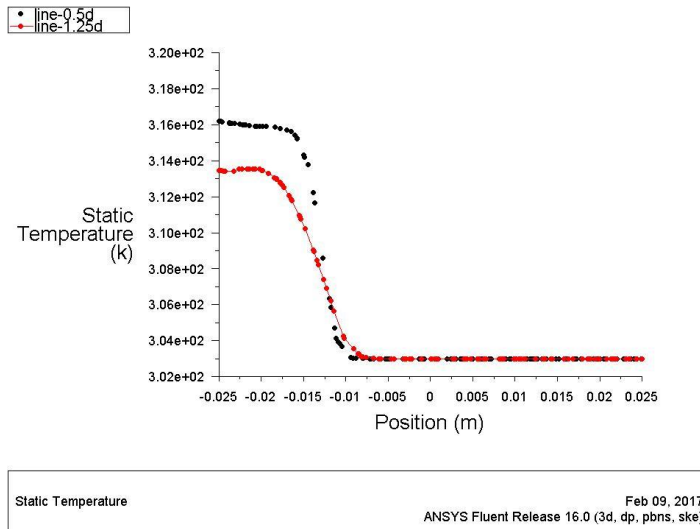
Σχήμα 3.6.25: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 0.5$

Η στατική πίεση λαμβάνει υψηλότερες τιμές στις δύο εισόδους και κατά την έξοδο μειώνεται όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.



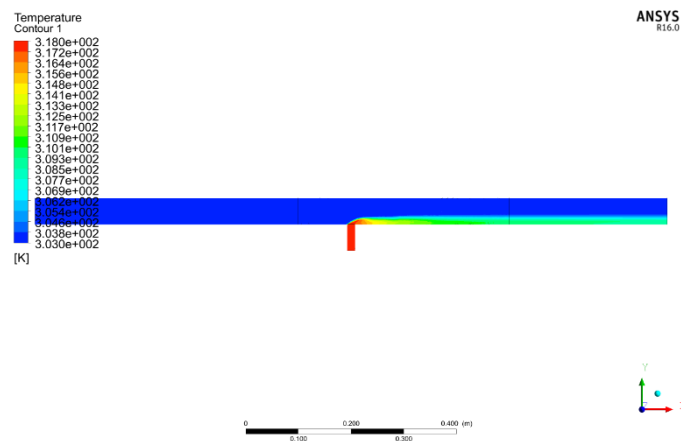
Σχήμα 3.6.26: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 0.5$

Όταν η αναλογία ταχυτήτων των δύο ρευστών είναι 0,5 τότε παρατηρείται πιο ομαλή κατανομή στατικής θερμοκρασίας και στα δύο σημεία ελέγχου. Συγκεκριμένα παρατηρείται πτώση θερμοκρασίας από κάτω προς το άνω τοίχωμα.



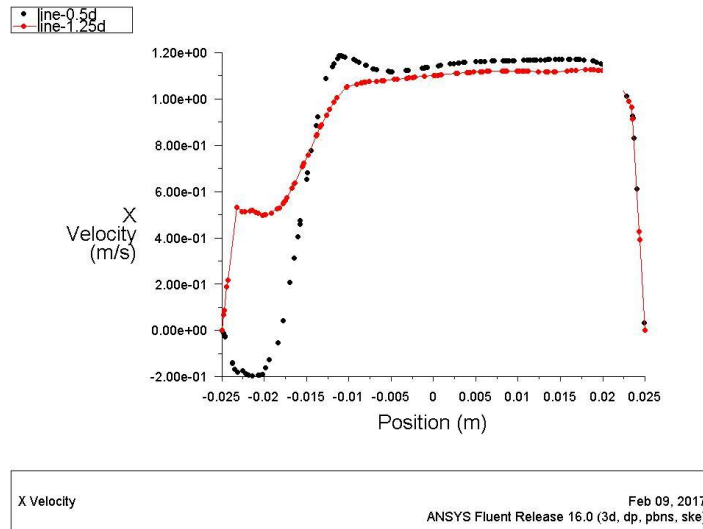
Σχήμα 3.6.27: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 0.5$

Η κατανομή της θερμοκρασίας στο επίπεδο XY επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα του διαγράμματος στο Σχ. 3.4.27 καθώς παρατηρείται θερμοκρασιακή διαφορά στο κάτω τοίχωμα του αγωγού.



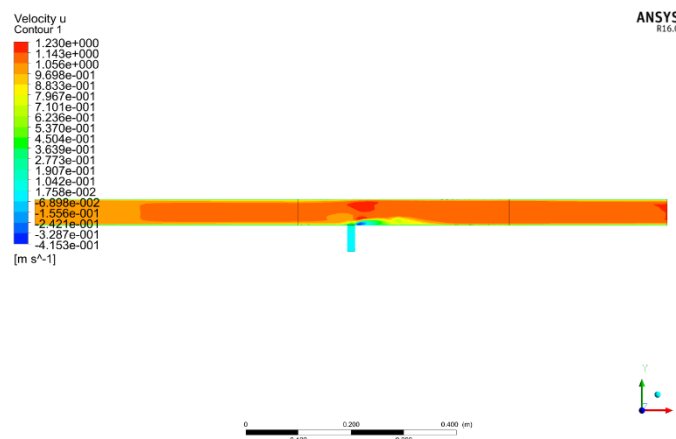
Σχήμα 3.6.28: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 0.5$

Η κατανομή της x-συνιστώσας της ταχύτητας απεικονίζεται στο Σχ. 3.6.29 και οι παρατηρήσεις και σε αυτή την περίπτωση αφορούν την περιοχή ροής στο κάτω τοίχωμα όπου όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο μίξης η ταχύτητα έχει μεγαλύτερες τιμές.



Σχήμα 3.6.29: Κατανομή ταχύτητας X – $r = 0.5$

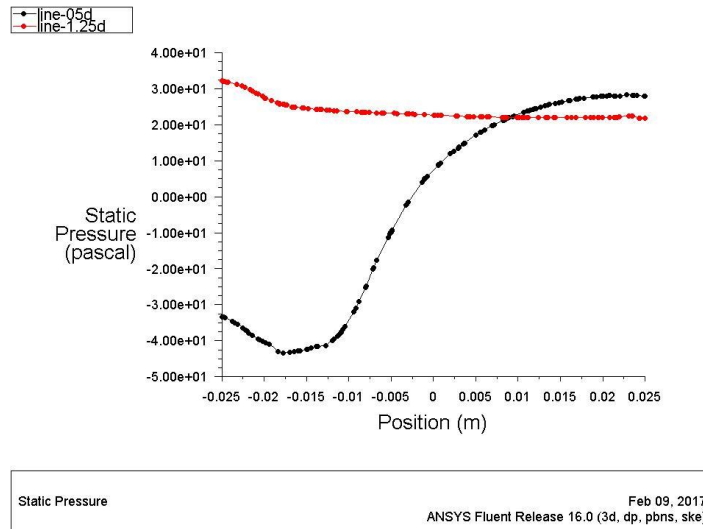
Όπως παρουσιάζεται και από τα διαγράμματα των ταχυτήτων, έτσι και στη χρωματική απεικόνιση φαίνεται ότι στο σημείο μίξης δημιουργείται περιοχή στάσιμου ρευστού με χαμηλή ταχύτητα και στη συνέχεια η ροή ομαλοποιείται και υπάρχει ενιαία ταχύτητα κατά τη διεύθυνση Y.



Σχήμα 3.6.30: Κατανομή ταχύτητας X – $r = 0.5$

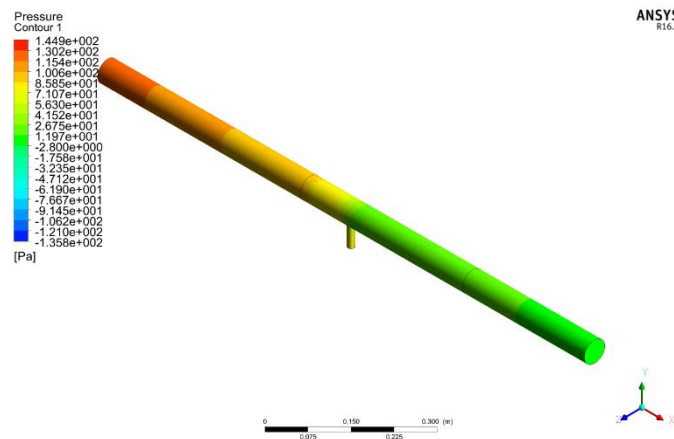
- $r = 1$

Στην περίπτωση $r = 1$ και $d = 15\text{mm}$ παρατηρείται ότι η μεταβολή της στατικής πίεσης από το κάτω τοίχωμα προς το άνω είναι σημαντική. Στο κάτω μέρος του αγωγού λαμβάνει αρνητικές τιμές και στη συνέχεια αυξάνεται προς το άνω τοίχωμα.



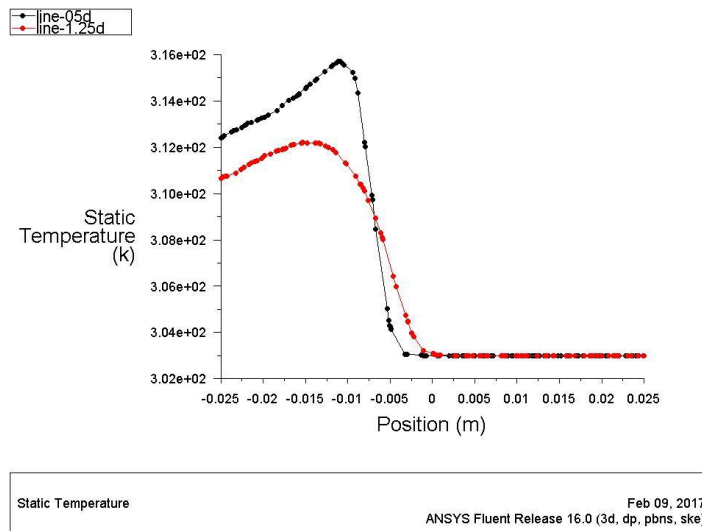
Σχήμα 3.6.31: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 1$

Η στατική πίεση και σε αυτή την περίπτωση έχει υψηλότερες τιμές στις εισόδους και μειώνεται προς την έξοδο.



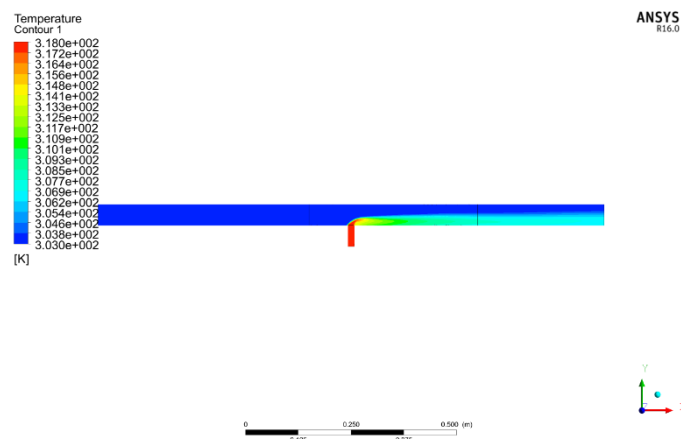
Σχήμα 3.6.32: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 1$

Η κατανομή της στατικής θερμοκρασίας στην περίπτωση αυτή ακολουθεί την ίδια κατανομή με την προηγούμενη περίπτωση με μεγαλύτερη θερμοκρασία κοντά στην περιοχή μίξης. Από το μέσο του αγωγού και πάνω είναι ίδιες οι τιμές της θερμοκρασίας και στις δύο γραμμές ελέγχου (0.5d και 1.25d).



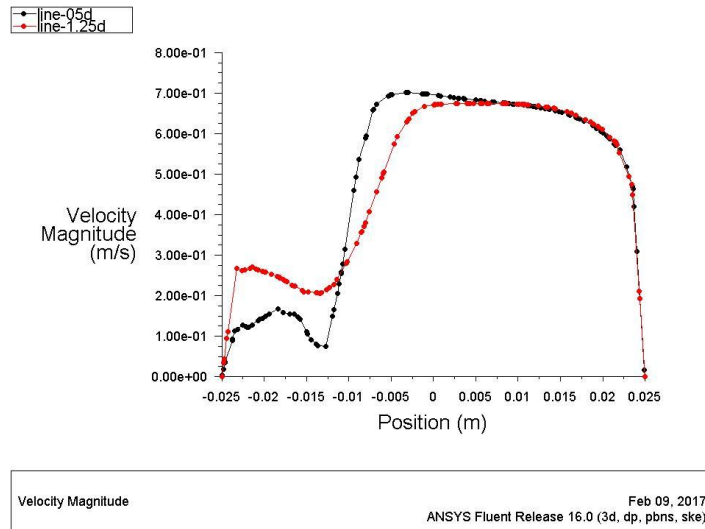
Σχήμα 3.6.33: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 1$

Η κατανομή της θερμοκρασίας σε XY επίπεδο απεικονίζεται στο Σχ. 3.6.34 και παρατηρείται θερμοκρασιακή κατανομή στο μισό κάτω μέρος του αγωγού.



Σχήμα 3.6.34: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 1$

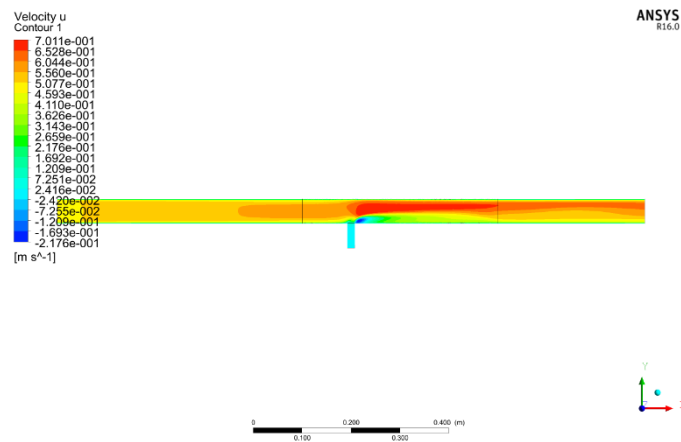
Η κατανομή της ταχύτητας για $r = 1$ απεικονίζεται για τις 2 γραμμές ελέγχου στο Σχ. 3.6.35. Παρατηρείται ότι στο κάτω μέρος του αγωγού και πιο κοντά στο σημείο μίξης η ταχύτητα είναι πιο χαμηλή. Στη συνέχεια κατά τον Y άξονα παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας. Το προφίλ της ταχύτητας τείνει να λάβει το παραβολικό προφίλ της θεωρίας.



Σχήμα 3.6.35: Κατανομή ταχύτητας $X - r = 1$

Η χρωματική απεικόνιση της κατανομής της ταχύτητας απεικονίζεται στο Σχ.3.6.36. Στο σημείο μίξης όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις παρατηρείται στάσιμο σημείο ρευστού που επιβεβαιώνει την ανωμαλία στην κατανομή της ταχύτητας στο Σχ. 3.6.35 για τη γραμμή 0.5d.

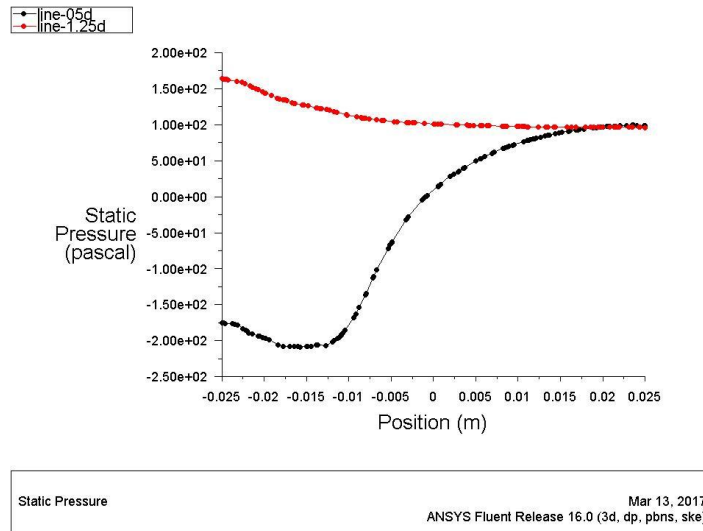
Από το μέσον του αγωγού και πάνω παρατηρείται ομαλοποίηση της ταχύτητας της ροής.



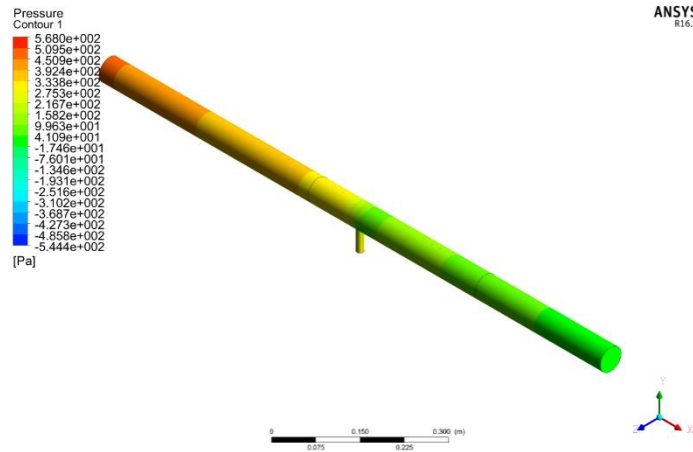
Σχήμα 3.6.36: Κατανομή ταχύτητας $X - r = 1$

- **$r = 2$**

Στην περίπτωση $r = 2$ και $d = 15\text{mm}$ η κατανομή πίεσης κατά την γραμμή 0.5d λαμβάνει αρνητικές τιμές κοντά στο τοίχωμα και αυξάνεται κατά τον Y άξονα καθώς τείνει η ροή προς το άνω τοίχωμα.

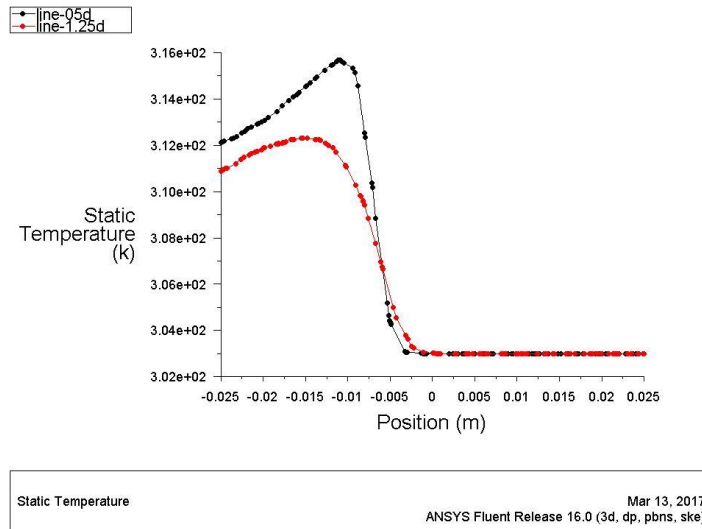


Σχήμα 3.6.37: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 2$



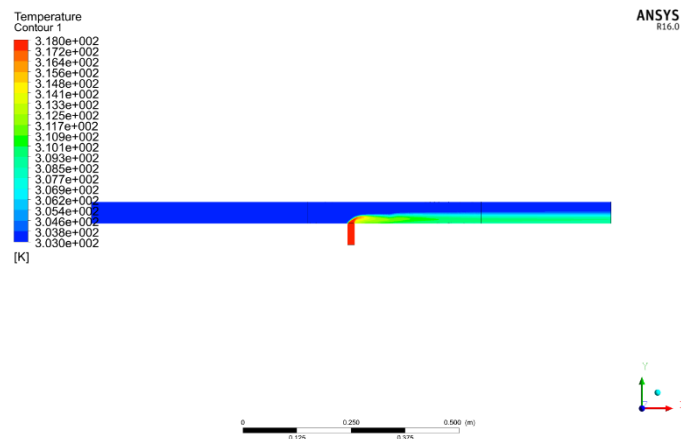
Σχήμα 3.6.38: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 2$

Για τη στατική θερμοκρασία παρατηρείται ότι λαμβάνει τιμές υψηλότερες στο χαμηλό τμήμα του αγωγού ειδικά για την γραμμή 0.5d και σχεδόν από το μέσο του αγωγού και προς τα άνω λαμβάνει την ίδια τιμή και στις 2 γραμμές.



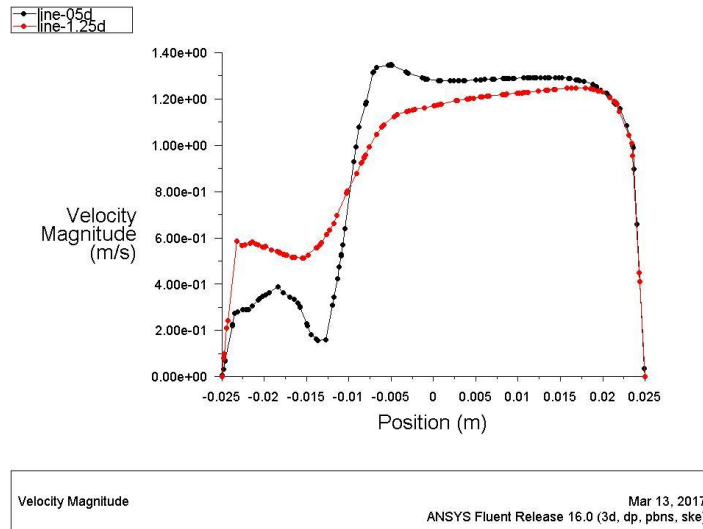
Σχήμα 3.6.39: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 2$

Παρατηρείται το φιλμ θερμοκρασίας στο κάτω μέρος του αγωγού. Με κόκκινο παρουσιάζονται οι περιοχές υψηλής θερμοκρασίας και καθώς το χρώμα τείνει στο μπλε το ρευστό τείνει σε θερμοκρασιακή ισορροπία.



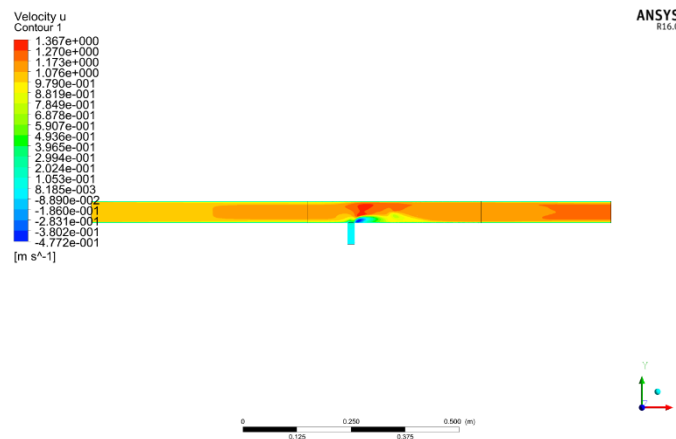
Σχήμα 3.6.40: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 2$

Στην εργασία που χρησιμοποιήθηκε ως οδηγός για τα πειράματα αναφέρετε ότι όταν η ροή του ρευστού με την υψηλή θερμοκρασία εισέρχεται στην κύρια ροή κοντά στο κάτω τοίχωμα ονομάζεται walljet. Όταν οι ταχύτητες είναι διαφορετικές και το θερμό ρευστό εισέρχεται στην κύρια ροή τότε η ροή ονομάζεται deflectingjet. Στην περίπτωση $r = 2$ παρατηρείται χαμηλή ταχύτητα χαμηλά στον αγωγό και στην συνέχεια η χυσιωστώσα της ταχύτητας αυξάνεται και στις δύο γραμμές.



Σχήμα 3.6.41: Κατανομή ταχύτητας $X - r = 2$

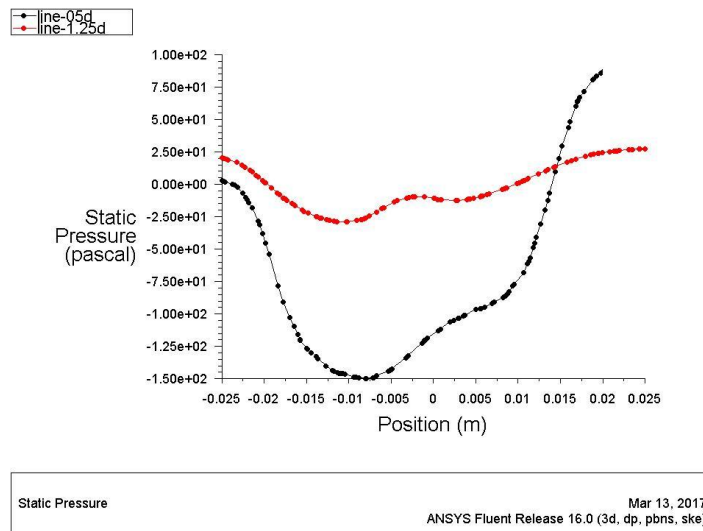
Τέλος παρατηρείται περιοχή χαμηλών ταχυτήτων στο σημείο μίξης και υψηλότερες θερμοκρασίας στο υπόλοιπο τμήμα της διατομής και καθώς η ροή τείνει προς την έξοδο παρατηρείται ομαλοποίηση της κατανομής της ταχύτητας.



Σχήμα 3.6.42: Κατανομή ταχύτητας $X - r = 2$

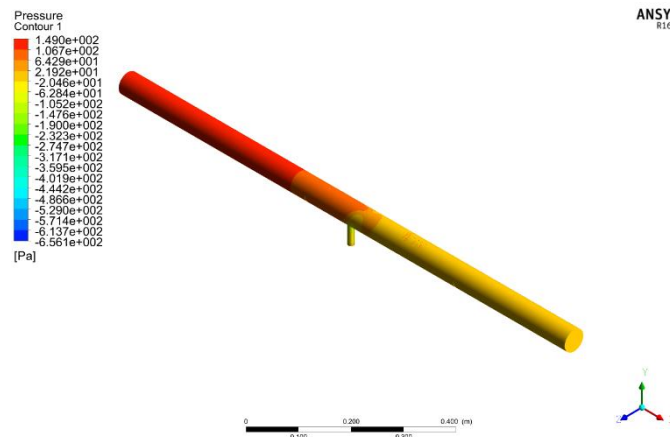
- $r = 4$

Η τελευταία περίπτωση που εξετάστηκε για $r = 4$ παρουσιάζει αποτελέσματα με μεγαλύτερες διακυμάνσεις στις μεταβλητές που εξετάζονται. Αρχικά παρατηρείται ότι καθώς μεγαλώνει η ταχύτητα του ρευστού παρατηρείται περιοχή υποπίεσεων στην περιοχή μίξης (γραμμή 0.5d) ενώ αντίθετα στη γραμμή 1.25d παρατηρείται σχεδόν σταθερή τιμή πίεσης.



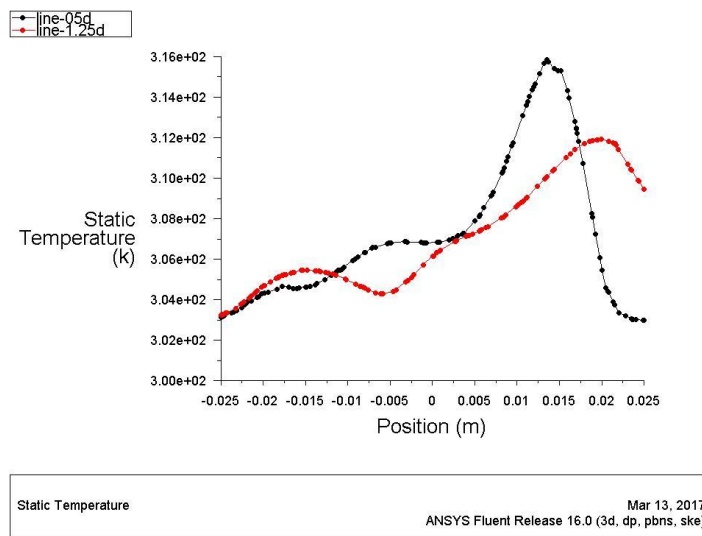
Σχήμα 3.6.43: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 4$

Η τρισδιάστατη απεικόνιση της στατικής πίεσης παρουσιάζεται στο Σχ. 3.6.44. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση παρατηρείται ότι για $r = 4$ η στατική πίεση είναι υψηλότερη σε όλο το μήκος του αγωγού. Μετά το σημείο μίξης που αναπτύσσονται υψηλότερες ταχύτητες η πίεση όπως είναι λογικό μειώνεται. Αυτό επιβεβαιώνεται με το θεώρημα Bernoulli, σύμφωνα με το οποίο σε μία ροή όταν αυξάνεται η ταχύτητα τότε μειώνεται η πίεση και αντίστροφα.



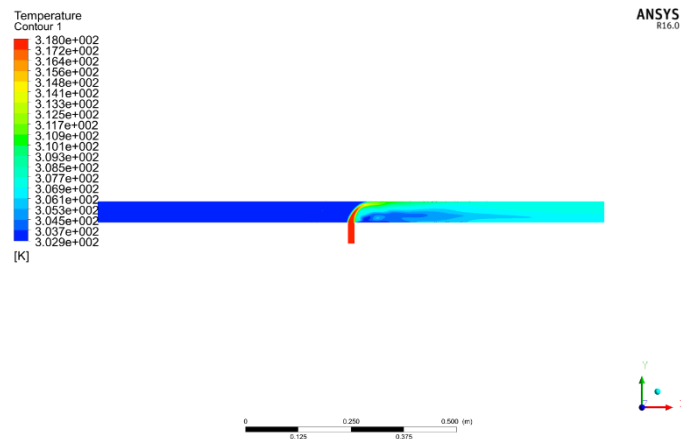
Σχήμα 3.6.44: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 4$

Η υψηλή ταχύτητα του θερμού ρευστού δίνει σαν αποτέλεσμα την ίδια θερμοκρασία και στις 2 γραμμές ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι το μήκος μίξης των ρευστών διαφορετικής θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερο. Επιπλέον, όπως είχε παρατηρηθεί και στην προηγούμενη περίπτωση $r = 4$ και $d = 25\text{mm}$ το θερμό ρευστό εισέρχεται υπό μορφή walljet αλλά στο πάνω τοίχωμα.



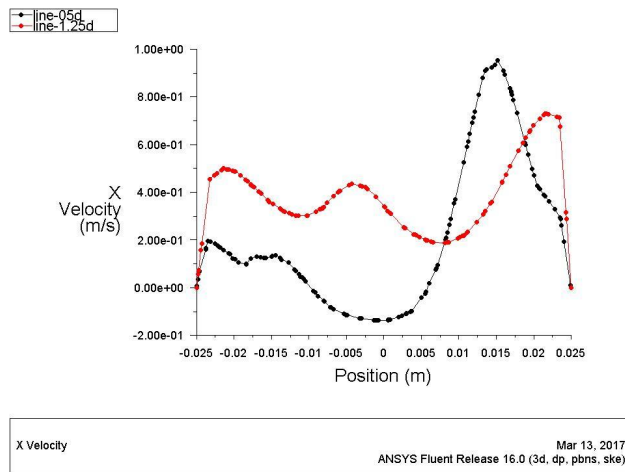
Σχήμα 3.6.45: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 4$

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 3.6.45 επιβεβαιώνονται με την ορατοποίηση της ροής της θερμοκρασίας καθώς το θερμό ρευστό εισέρχεται σαν walljet και τείνει στην άνω επιφάνεια του αγωγού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μεγαλύτερο απαιτούμενο μήκος θερμοκρασιακής ισορροπίας.



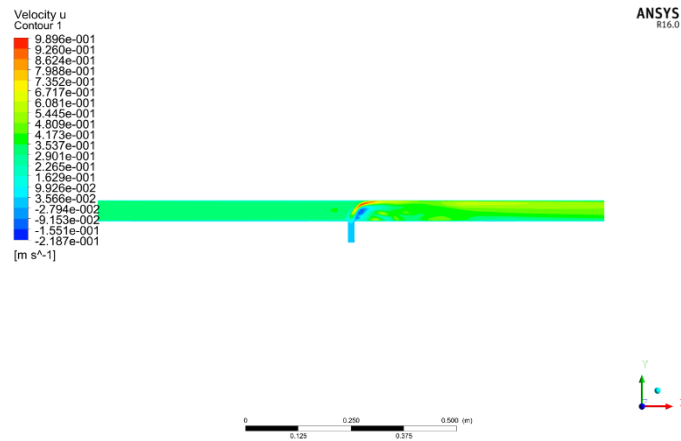
Σχήμα 3.6.46: XY Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 4$

Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και η συνιστώσα της ταχύτητας καθώς παρατηρείται ότι στο πάνω μέρος του αγωγού στο σημείο μίξης το θερμό ρευστό έχει μεγαλύτερη ταχύτητα.



Σχήμα 3.6.47: Κατανομή ταχύτητας $X - r = 4$

Ακολουθεί η κατανομή της X συνιστώσας ταχύτητας στο Σχ. 3.4.48.



Σχήμα 3.4.42: Κατανομή ταχύτητας $X - r = 4$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΦΑΣΙΚΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ

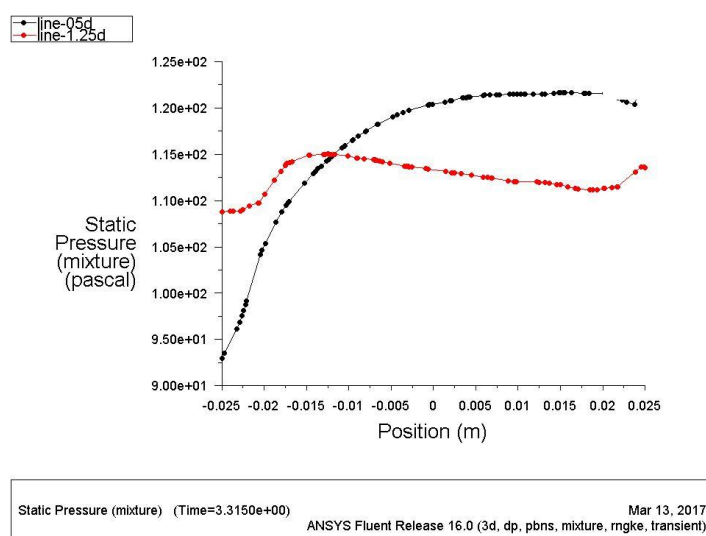
Εξετάστηκε και η ροϊκή συμπεριφορά (μίξη) δύο διαφορετικών ρευστών λειτουργίας. Συγκεκριμένα από την κύρια οριζόντια είσοδο εισέρχεται το ίδιο ρευστό, το νερό δηλαδή και από την είσοδο της διακλάδωσης εισέρχεται ατμός (water-vapor) με ποσοστό κλάσματος όγκου στην είσοδο 10%. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι στην είσοδο της διακλάδωσης εισέρχεται μίγμα με αναλογία 10% φυσαλίδες ατμού (διάμετρος φυσαλίδας: 1mm) και 90% νερό.

4.1 ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

4.4.1 Γεωμετρία 1 – Διακλάδωση διαμέτρου 25mm

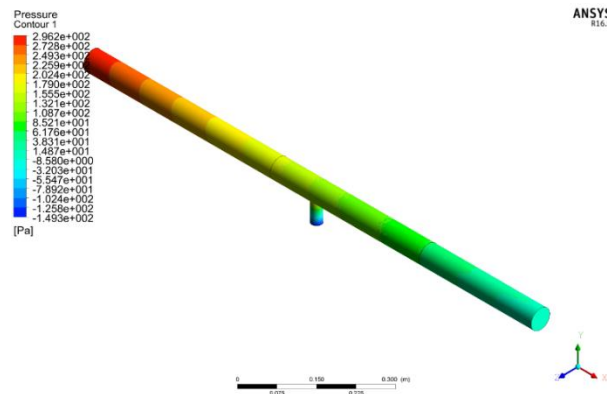
- $r = 0.5$

Στην αρχική περίπτωση $r = 0.5$ και $d = 25\text{mm}$ παρατηρείται ότι πλέον το θερμό μίγμα που εισάγεται έχει υψηλότερη πίεση στην γραμμή $0.5d$. Στο κάτω τμήμα του αγωγού πλέον δεν παρατηρείται αρνητική πίεση και καθώς η συνιστώσα Y τείνει προς το άνω τοίχωμα η πίεση αυξάνεται.



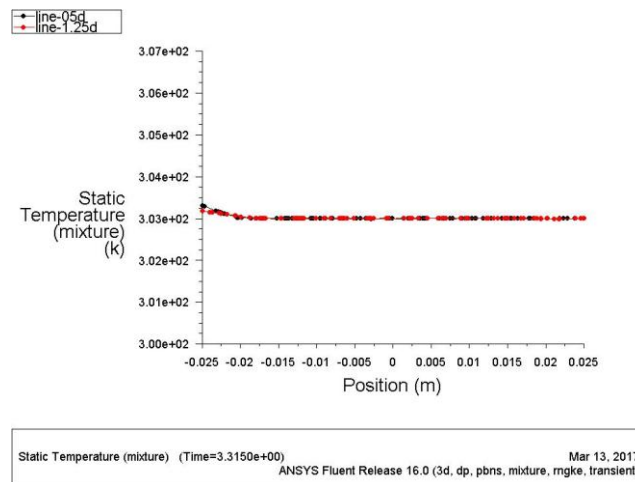
Σχήμα 4.4.1: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 0.5$

Η στατική πίεση έχει πλέον διαφορετική κατανομή καθώς παρατηρείται ότι έχει υψηλότερες τιμές μόνο στην είσοδο του κύριου ρευστού. Αντιθέτως, η πίεση στην είσοδο του θερμού μίγματος ατμού-νερού παρατηρείται χαμηλότερη τιμή πίεσης. Σταδιακά καθώς η ροή αναπτύσσεται η πίεση μειώνεται προς την κύρια έξοδο.



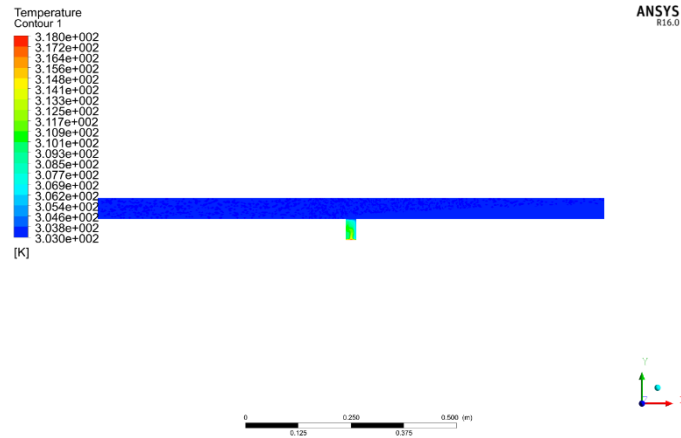
Σχήμα 4.4.2: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 0.5$

Η ύπαρξη διαφορετικών ρευστών δεν δημιουργεί θερμοκρασιακή διαφορά στις δύο γραμμές ελέγχου.



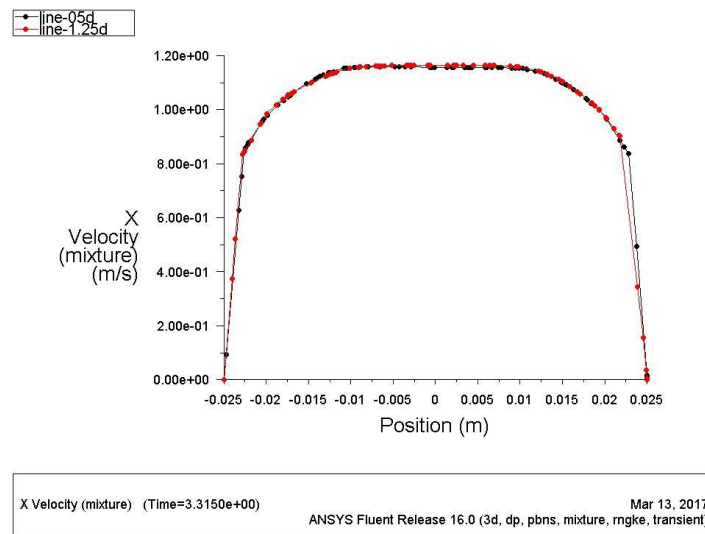
Σχήμα 4.4.3: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 0.5$

Υψηλότερη θερμοκρασία παρατηρείται μόνο στο εσωτερικό του αγωγού εισόδου του θερμού μίγματος.



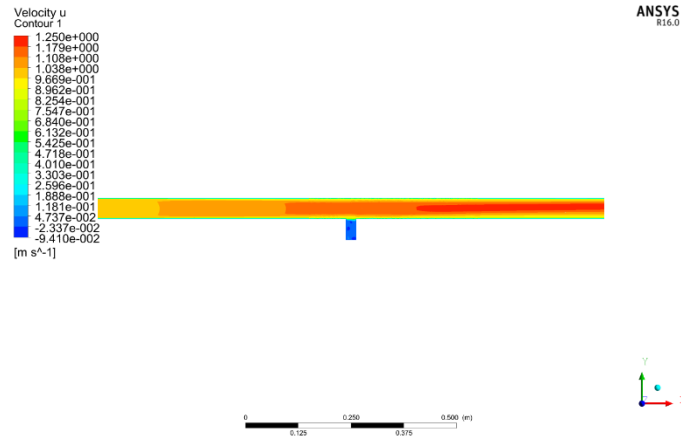
Σχήμα 4.4.4: XY Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 0.5$

Το προφίλ της x- συστατικής της ταχύτητας δεν επηρεάζεται πλέον από τη θερμοκρασιακή διαφορά και λαμβάνει τη θεωρητική μορφή της ροής ρευστού μέσα σε κύλινδρο.



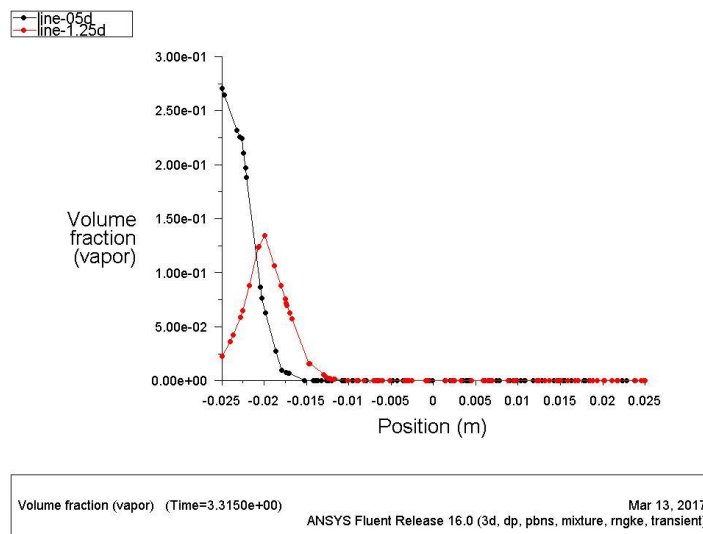
Σχήμα 4.4.5: Κατανομή ταχύτητας X – $r = 0.5$

Παρατηρείται ότι κατά μήκος του αγωγού η ταχύτητα λαμβάνει ομοιόμορφη κατανομή και στην είσοδο T έχει χαμηλότερες τιμές.



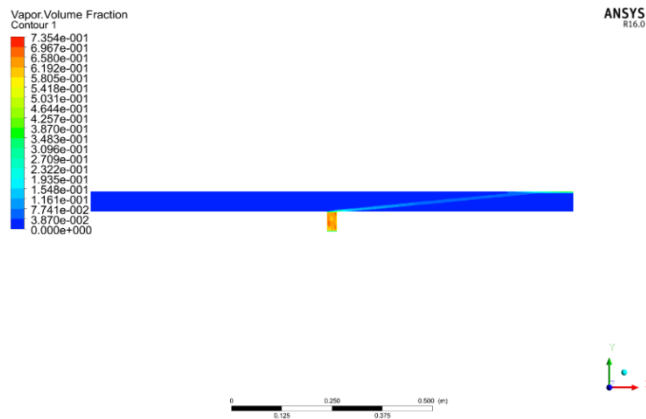
Σχήμα 4.4.6: XY Κατανομή ταχύτητας $X - r = 0.5$

Στην περίπτωση του διφασικού μίγματος μια χρήσιμη μεταβλητή είναι το κλάσμα όγκου της αέριας φάσης. Ως κλάσμα όγκου ορίζεται το ποσοστό της δευτερεύουσας φάσης μέσα στην διατομή σαν να έρεε τελείως μόνη της στον αγωγό. Έτσι, απεικονίζεται η κατανομή του κλάσματος όγκου της αέριας φάσης σε διάγραμμα και σε χρωματική απεικόνιση. Παρατηρείται ότι στη γραμμή 0.5d οι τιμές του κλάσματος όγκου του ατμού είναι μεγαλύτερες και στα -0.01m από το μέσο του αγωγού και προς το άνω τοίχωμα η ποσότητα του ατμού είναι η ίδια.

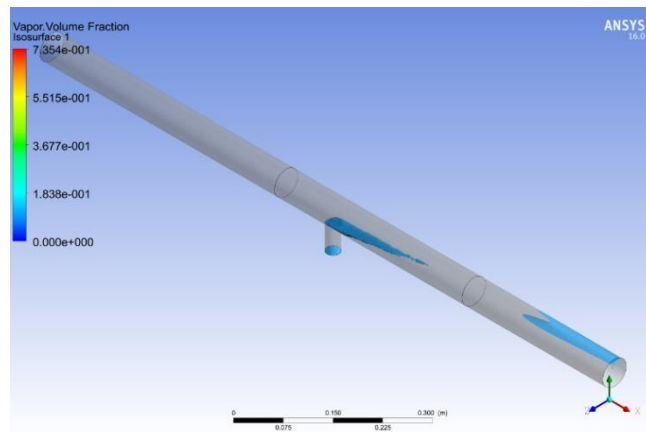


Σχήμα 4.4.6: Κατανομή κλάσματος όγκου ατμού $X - r = 0.5$

Στα δύο ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η XY κατανομή του κλάσματος όγκου του ατμού. Παρατηρείται ότι λόγω μικρότερης πυκνότητας καθώς ρέει το μίγμα ο ατμός τείνει και τελικά καταλαμβάνει το πάνω μέρος της διατομής κοντά στην έξοδο.

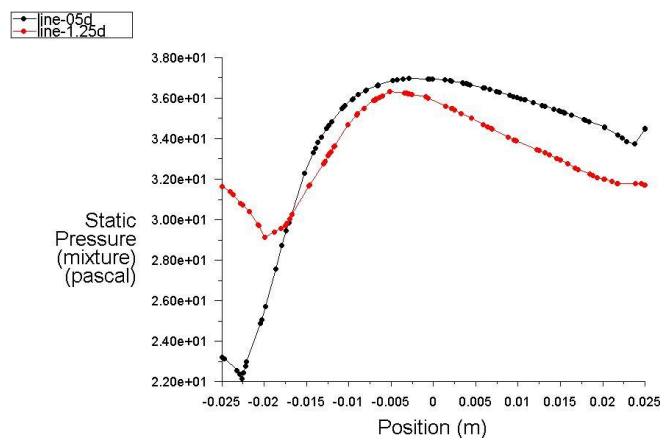


Σχήμα 4.4.7: ΧΥ κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 0.5$



Σχήμα 4.4.8: 3D κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 0.5$

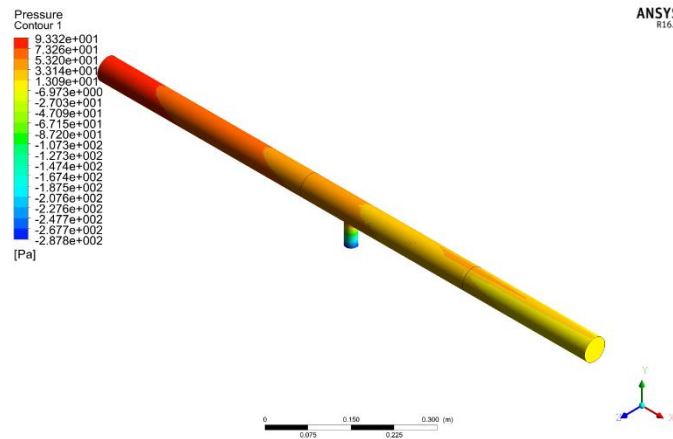
- $r = 1$



Static Pressure (mixture) (Time=3.8580e+00) Mar 13, 2017
ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, dp, pbns, mixture, mgke, transient)

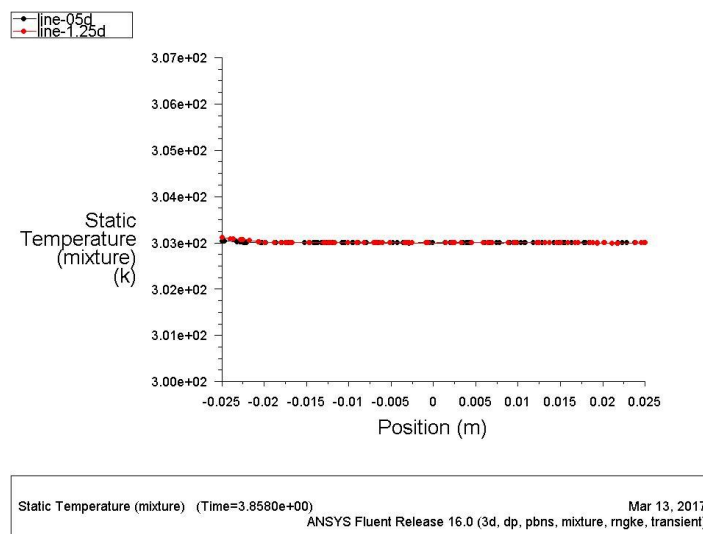
Σχήμα 4.4.8: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 1$

Η στατική πίεση στη γραμμή 0.5d, δηλαδή πιο κοντά στο σημείο μίξης λαμβάνει χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με την γραμμή 1.25d. Βέβαια, σε μικρό ύψος πάνω από το τοίχωμα του αγωγού οι τιμές των πιέσεων λαμβάνουν περίπου ίδιες τιμές.



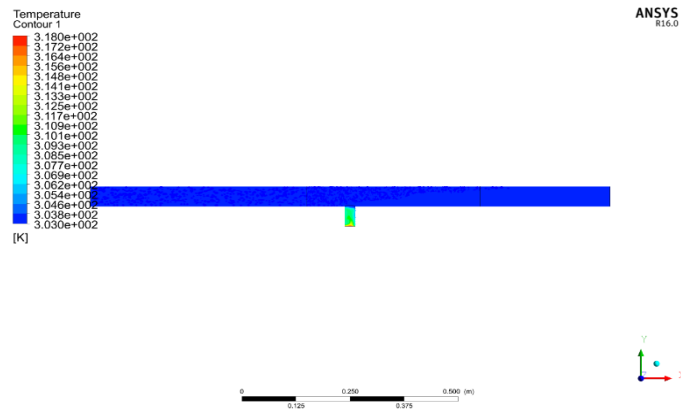
Σχήμα 4.4.9: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 1$

Παρατηρείται υψηλή πίεση στην είσοδο του αγωγού και υποπίεση στην είσοδο του μίγματος νερού – φυσαλίδων. Προς την έξοδο η πίεση αυξάνεται σε θετικές τιμές.



Σχήμα 4.4.10: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 1$

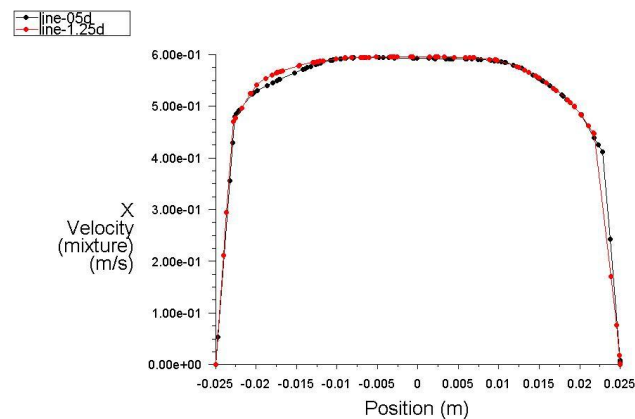
Αντιθέτως με το μονοφασικό πείραμα, παρατηρείται ότι η διφασική ροή συμβάλλει στο να μην υπάρχουν μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές. Οι τιμές στατικής θερμοκρασίας των 2 γραμμών σχεδόν ταυτίζονται. Στο Σχ. 4.4.11 επιβεβαιώνεται το διάγραμμα καθώς στο εσωτερικό του αγωγού δεν παρατηρούνται σημαντικές θερμοκρασιακές διαφορές.



Σχήμα 4.4.11: XY Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 0.5$

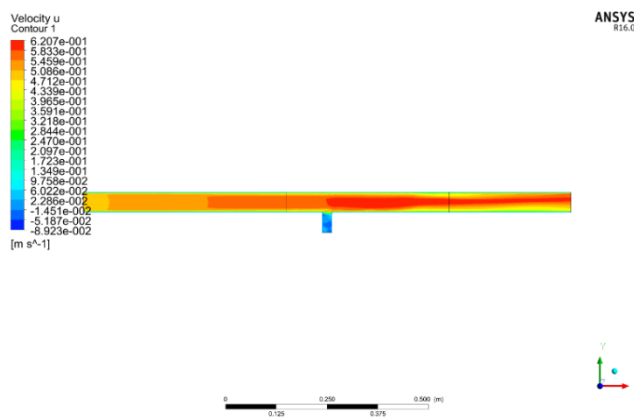
Το προφίλ της x- συνιστώσας της ταχύτητας δεν επηρεάζεται πλέον από τη θερμοκρασιακή διαφορά και λαμβάνει τη θεωρητική μορφή της ροής ρευστού μέσα σε κύλινδρο όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4.12.

Επίσης, στην τομή απεικόνισης της διακύμανσης της ταχύτητας X μέσα στον αγωγό παρατηρούνται μικρές ταχύτητες κοντά στα τοιχώματα και υψηλότερες τιμές στο κέντρο του αγωγού (Σχ. 4.4.12).



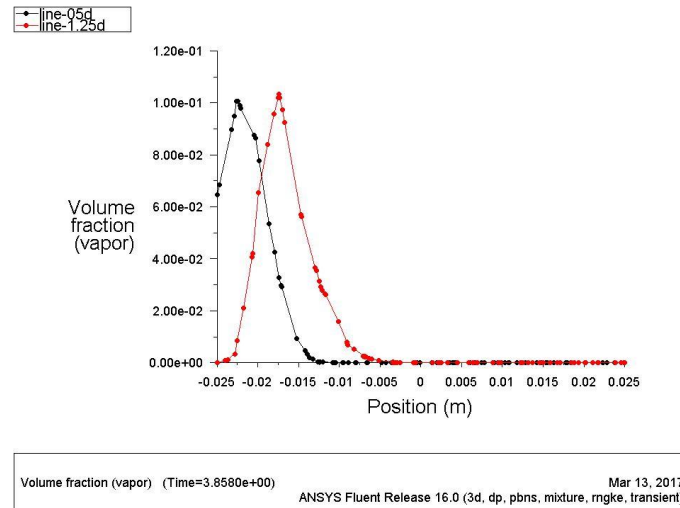
X Velocity (mixture) (Time=3.8580e+00) Mar 13, 2017
ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, dp, pbns, mixture, rngke, transient)

Σχήμα 4.4.12: Κατανομή ταχύτητας X = r = 1



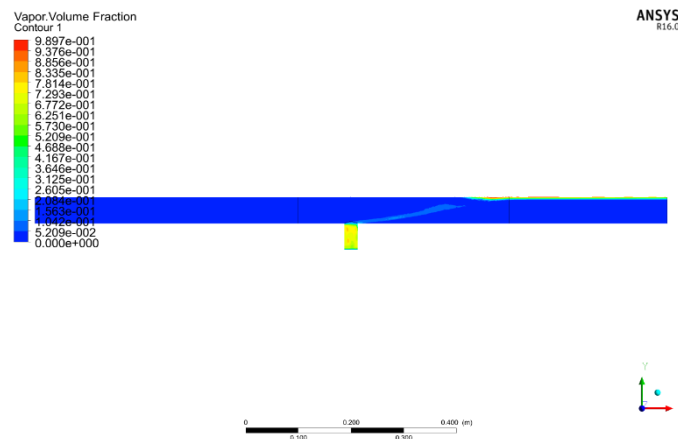
Σχήμα 4.4.13: XY Κατανομή ταχύτητας X – $r = 1$

Για τον κλάσμα όγκου του ατμού παρατηρείται υψηλότερη συγκέντρωση στη γραμμή 0.5d που βρίσκεται κοντά στο σημείο μίξης. Για τη γραμμή 1.25dη κατανομή είναι ίδια απλώς είναι μετατοπισμένη λίγο ψηλότερα προς το άνω τοίχωμα του αγωγού.

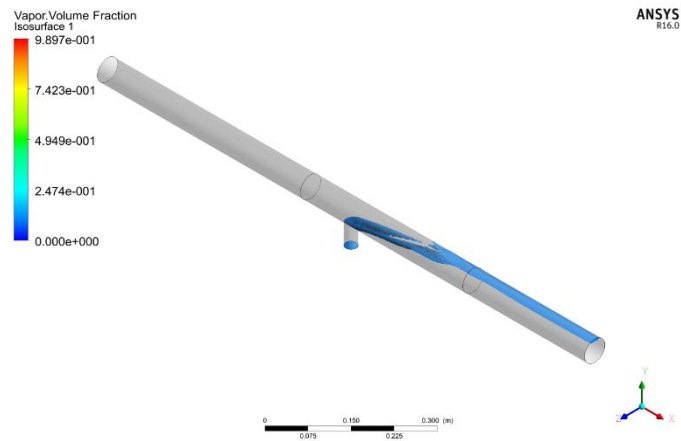


Σχήμα 4.4.14: Κατανομή κλάσματος όγκου ατμού $X - r = 1$

Στα δύο ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η XY κατανομή του κλάσματος όγκου του ατμού. Παρατηρείται ότι λόγω μικρότερης πυκνότητας καθώς ρέει το μίγμα, ο ατμός τείνει και τελικά καταλαμβάνει το πάνω μέρος της διατομής κοντά στην έξοδο.

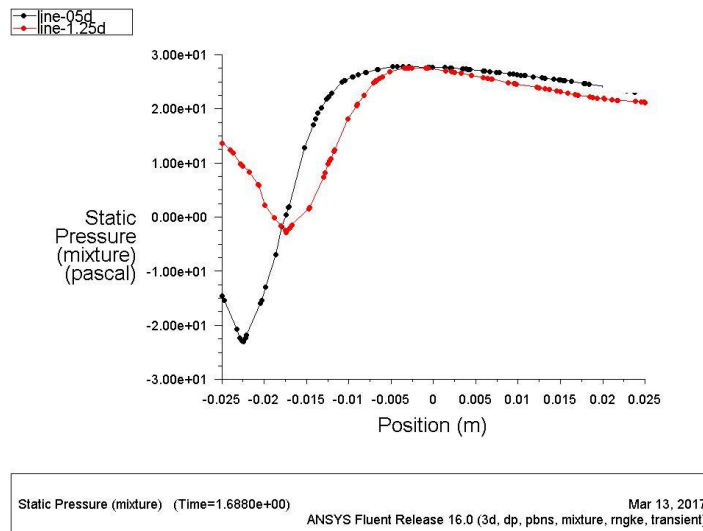


Σχήμα 4.4.15: XY κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 1$



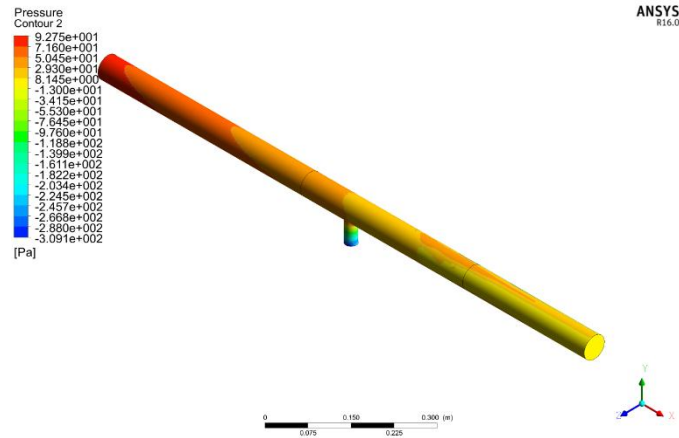
Σχήμα 4.4.16: 3D κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 1$

- $r = 2$



Σχήμα 4.4.17: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 2$

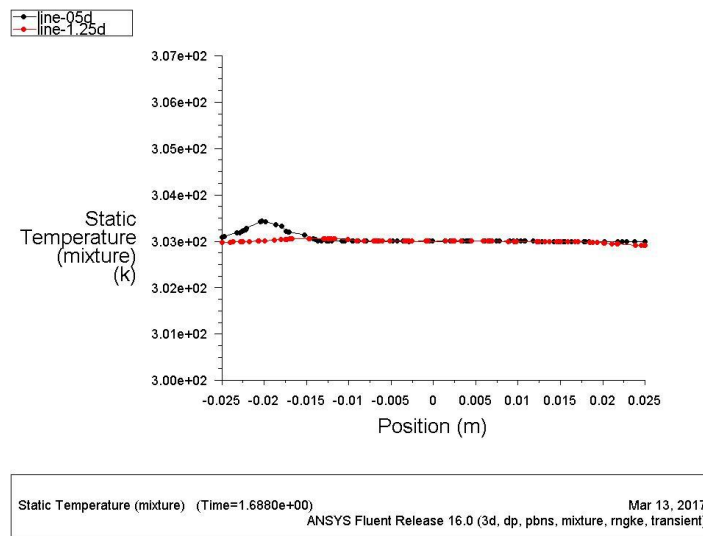
Η στατική πίεση στη γραμμή 0.5d, δηλαδή πιο κοντά στο σημείο μίξης λαμβάνει χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με την γραμμή 1.25d. Βέβαια, σε μικρό ύψος πάνω από το τοίχωμα του αγωγού οι τιμές των πιέσεων λαμβάνουν περίπου ίδιες τιμές.



Σχήμα 4.4.18: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 2$

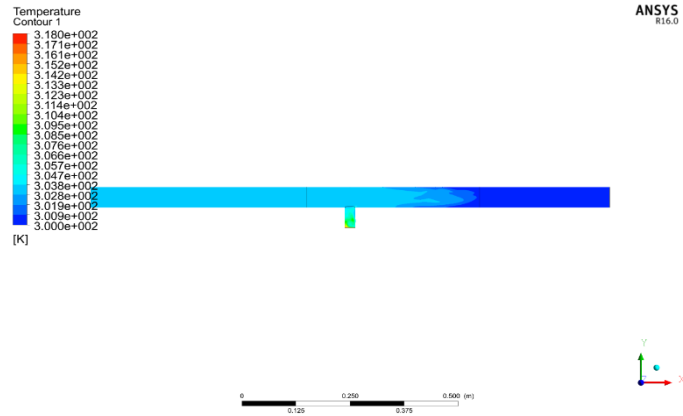
Παρατηρείται υψηλή πίεση στην είσοδο του αγωγού και υποπίεση στην είσοδο του μίγματος νερού – φυσαλίδων. Προς την έξοδο η πίεση αυξάνεται σε θετικές τιμές με σημεία υψηλότερης πίεσης στο άνω τοίχωμα.

Όσον αφορά τη στατική θερμοκρασία παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο λόγος ταχυτήτων r , η τιμή της θερμοκρασίας είναι λίγο υψηλότερη στο κάτω μέρος της γραμμής 0.5d, δηλαδή κοντά στο τοίχωμα στην περιοχή ανάμειξης των 2 ρευστών.



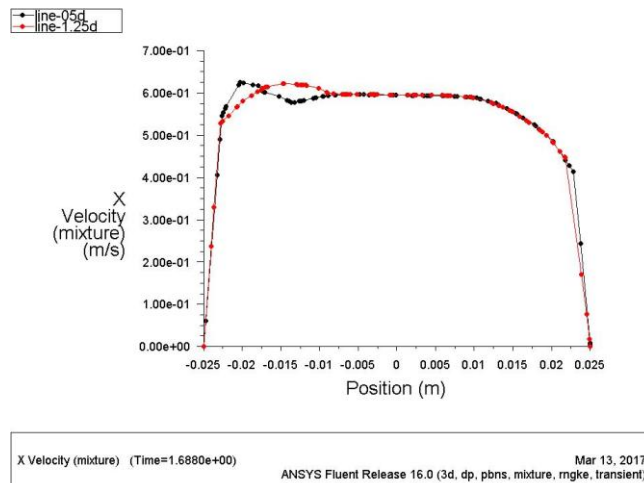
Σχήμα 4.4.19: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 2$

Στην τομή της στατικής θερμοκρασίας του Σχ. 4.4.20 παρατηρείται διαφορετική διακύμανση των τιμών. Συγκεκριμένα η θερμοκρασία από την είσοδο ως και μετά την 2^η είσοδο του ατμού είναι περίπου σταθερή. Προς την κύρια έξοδο οι τιμές μειώνονται απότομα.

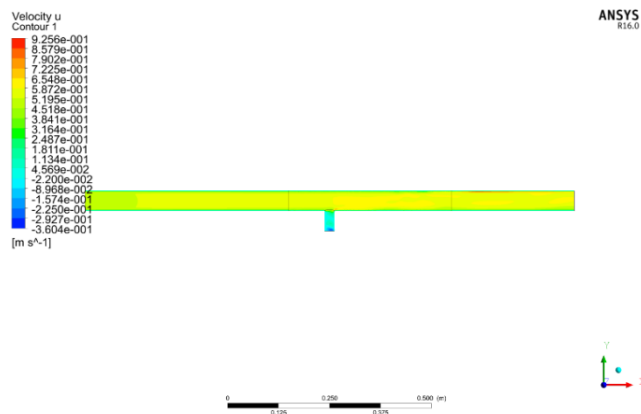


Σχήμα 4.4.20: XY Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 2$

Το προφίλ της συνιστώσας της X ταχύτητας είναι λίγο διαφορετικό από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές κοντά στο κάτω τοίχωμα και για τις 2 γραμμές 0.5 και 1.25d. Στη συνέχεια το προφίλ λαμβάνει την παραβολική μορφή (Σχήμα 4.4.21). Στο Σχήμα 4.4.22 παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας μέσα στον αγωγό.

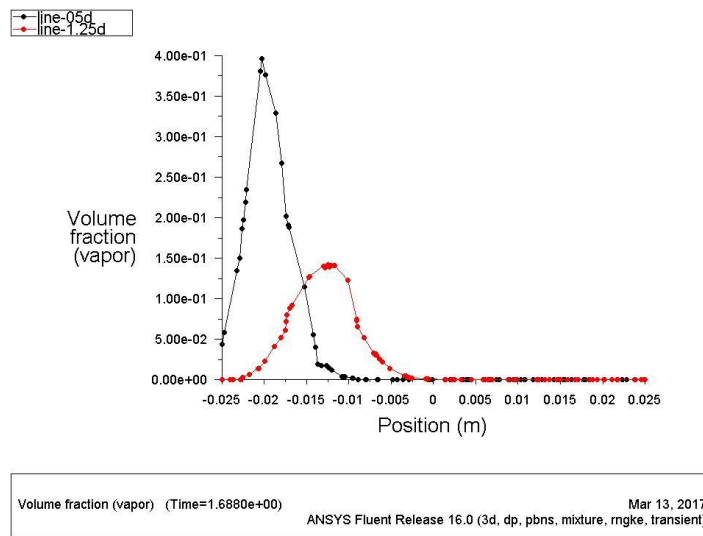


Σχήμα 4.4.21: Κατανομή ταχύτητας $X = r = 2$



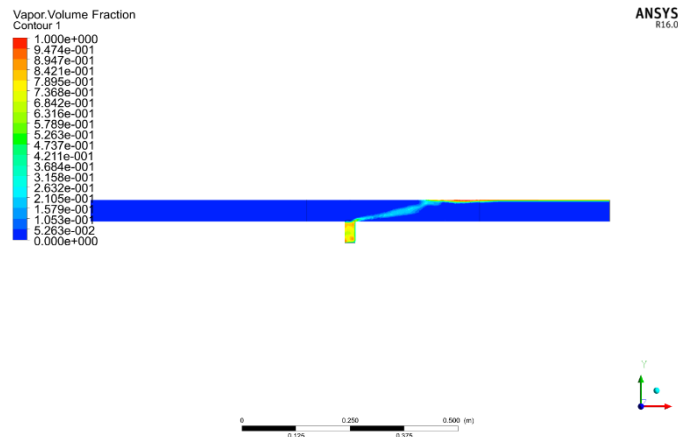
Σχήμα 4.4.22: XY Κατανομή ταχύτητας $X - r = 2$

Το κλάσμα όγκου του ατμού στη γραμμή 0.5d είναι αρκετά μεγαλύτερο κατά μήκος της γραμμής 0.5d. Αντιθέτως, στην γραμμή 1.25d παρουσιάζει μια μικρή περιοχή υψηλότερης περιεκτικότητας. Από το μέσο του αγωγού οι τιμές ταυτίζονται.



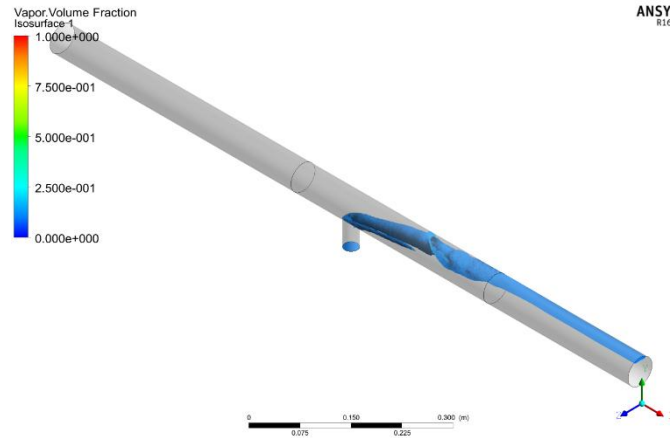
Σχήμα 4.4.23: Κατανομή κλάσματος όγκου ατμού $X - r = 2$

Η αύξηση του λόγου ταχυτήτων προκαλεί αξιοσημείωτα αποτελέσματα στην κατανομή της δεύτερης φάσης (Ατμού) μέσα στον αγωγό. Παρατηρείται στο Σχ. 4.4.24 ότι ένα jetφουσαλίδων εισέρχεται στον αγωγό και παρασύρεται με την ταχύτητα της ροής. Λόγω διαφοράς πυκνότητας παρατηρείται ότι λίγο μετά την είσοδο στον κύριο κλάδο, οι φουσαλίδες προσκολλώνται στην άνω επιφάνεια.



Σχήμα 4.4.24: XY κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 2$

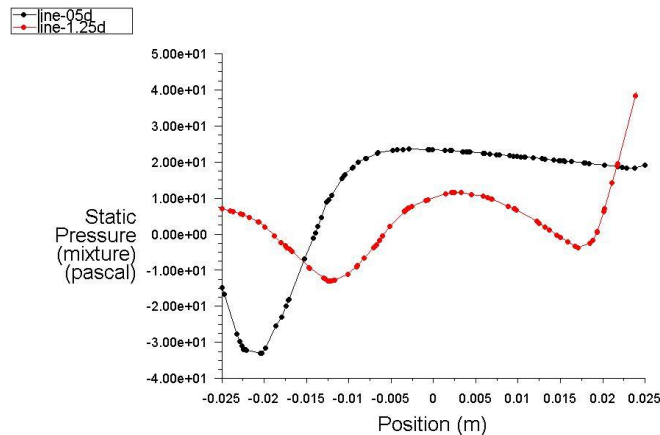
Τα ίδια αποτελέσματα αλλά με την απεικόνιση με την μορφή iso-surfaces απεικονίζονται στο Σχ. 4.4.25. Παρατηρείται η τυρβώδης περιοχή και στη συνέχεια η προσκόλληση στο άνω τοίχωμα.



Σχήμα 4.4.25: 3D κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 2$

- $r = 4$

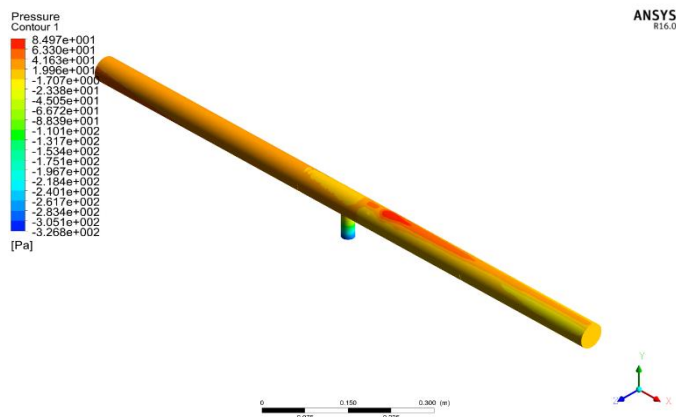
Η κατανομή των στατικών πιέσεων με την μέγιστη τιμή του λόγου r απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4.26 όπου αρχικά έχει υψηλότερες τιμές στην γραμμή 1.25d και στη συνέχεια από το μέσω του αγωγού και άνω έχει υψηλότερες τιμές κοντά στο σημείο μίξης. Αυτό οφείλεται στην ορμή την οποία έχει το jet που εισέρχεται και κατευθύνεται προς το άνω τοίχωμα και όχι στον πυρήνα της ροής.



Static Pressure (mixture) (Time=1.6215e+00) Mar 13, 2017
ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, dp, pbns, mixture, mgke, transient)

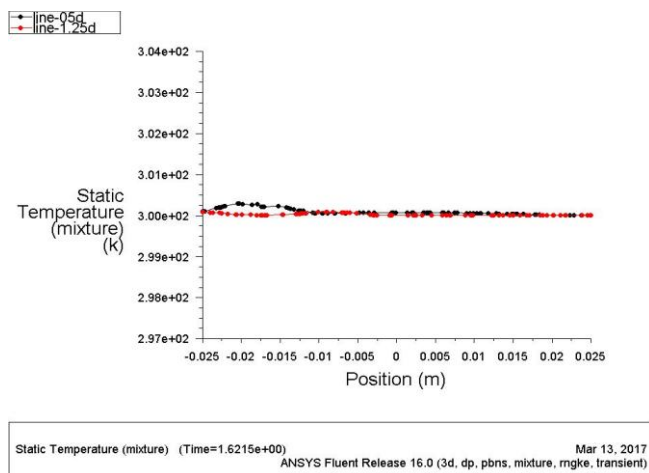
Σχήμα 4.4.26: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 4$

Η 3D κατανομή της πίεσης πιστοποιεί το παραπάνω διάγραμμα καθώς στο άνω μέρος του αγωγού παρατηρούνται υψηλές τιμές της στατικής πίεσης από το σημείο μίξης μέχρι και την έξοδο.



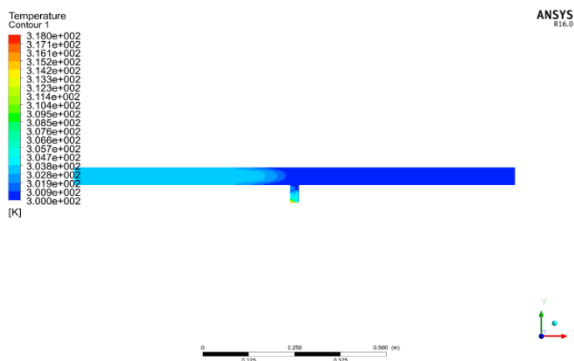
Σχήμα 4.4.27: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 4$

Όπως και στην περίπτωση $r = 2$ η θερμοκρασία είναι λίγο υψηλότερη στο κάτω μέρος της γραμμής 0.5δόπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4.28.



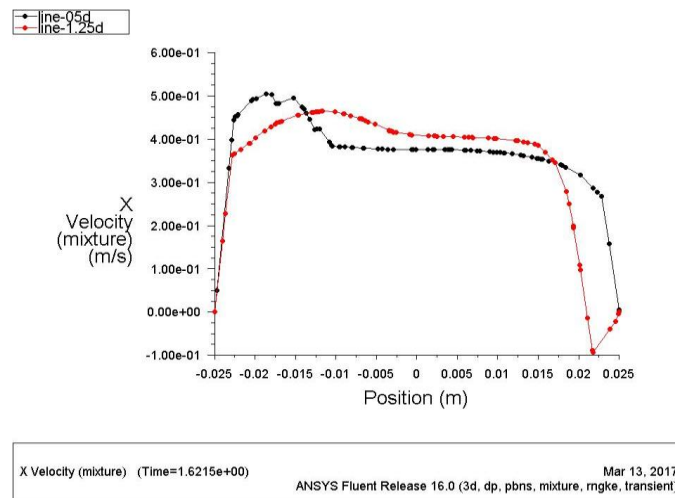
Σχήμα 4.4.28: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 4$

Διαφορετική είναι και η κατανομή της στατικής θερμοκρασίας. Οι τιμές της θερμοκρασίας μέσα στον αγωγό πέφτουν πριν καν γίνει η μίξη σε αυτή την περίπτωση.



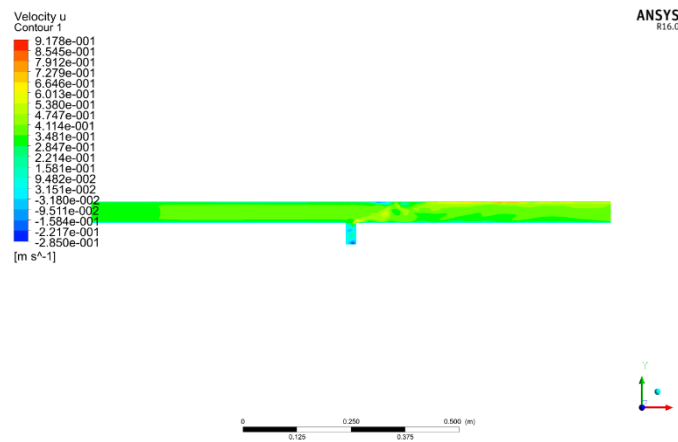
Σχήμα 4.4.29: XY Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 4$

Η τιμή της X συνιστώσας της ταχύτητας είναι υψηλότερη στη γραμμή 0.5d και στη συνέχεια στην γραμμή 1.25d.



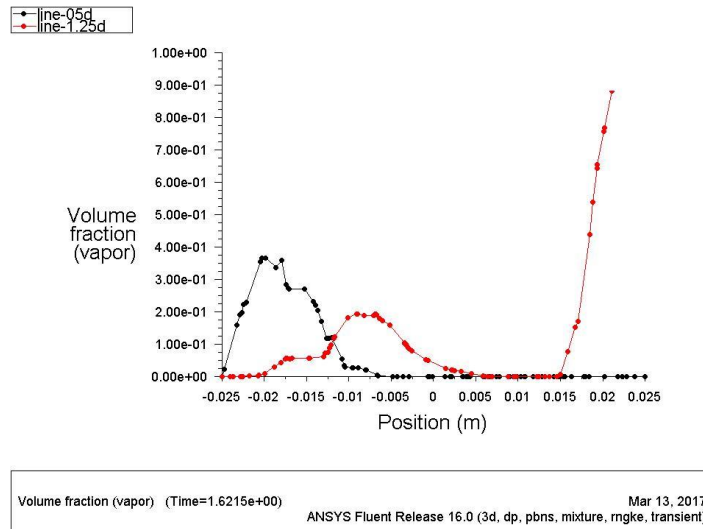
Σχήμα 4.4.30: Κατανομή ταχύτητας $X = r = 2$

Στο Σχήμα 4.4.31 απεικονίζεται η κατανομή της συνιστώσας X της ταχύτητας για λόγο μίξης $r = 4$.



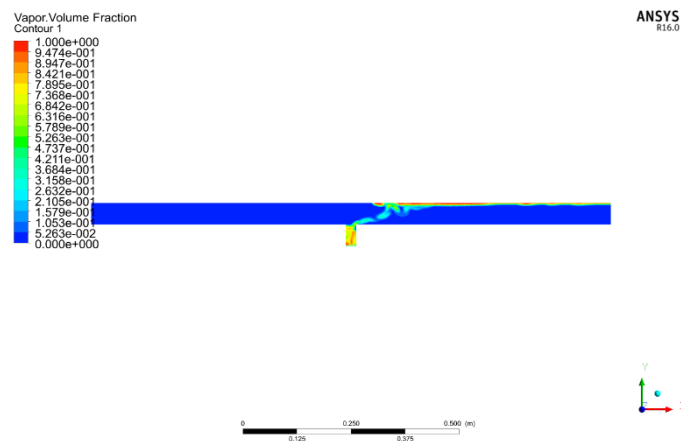
Σχήμα 4.4.31: XY Κατανομή ταχύτητας $X - r = 4$

Η κατανομή του κλάσματος όγκου του ατμού είναι αρκετά πολύπλοκη σε αυτή την περίπτωση. Αρχικά παρατηρείται μεγαλύτερη συγκέντρωση χαμηλά στο τοίχωμα στην γραμμή 0.5d και στη συνέχεια ραγδαία αύξηση έως τη μέγιστη τιμή 1 στην γραμμή 1.25d. Αυτό σημαίνει ότι έχει δημιουργηθεί περιοχή αποκλειστικά με φάση ατμού στο άνω μέρος του αγωγού.



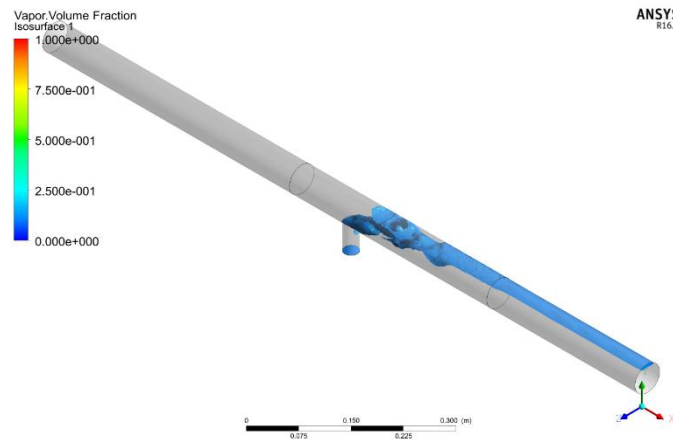
Σχήμα 4.4.32: Κατανομή κλάσματος όγκου ατμού $X - r = 4$

Η μεγάλη ταχύτητα και των 2 φάσεων προκαλεί το πιο εντυπωσιακό αποτέλεσμα μίξης μέχρι στιγμής. Παρατηρείται στο Σχήμα 4.4.33 η τυρβώδης μίξη των δύο φάσεων όπου στο άνω μέρος του αγωγού έχει σχηματιστεί φιλμ φυσαλίδων ατμού.



Σχήμα 4.4.33: XY κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 4$

Στο Σχ. 4.4.35 παρατηρείται η 3D μορφολογία των φυσαλίδων ατμού όπου ενώνονται σε ένα ενιαίο σύνολο και δημιουργούν περιοχή φάσης ατμού.

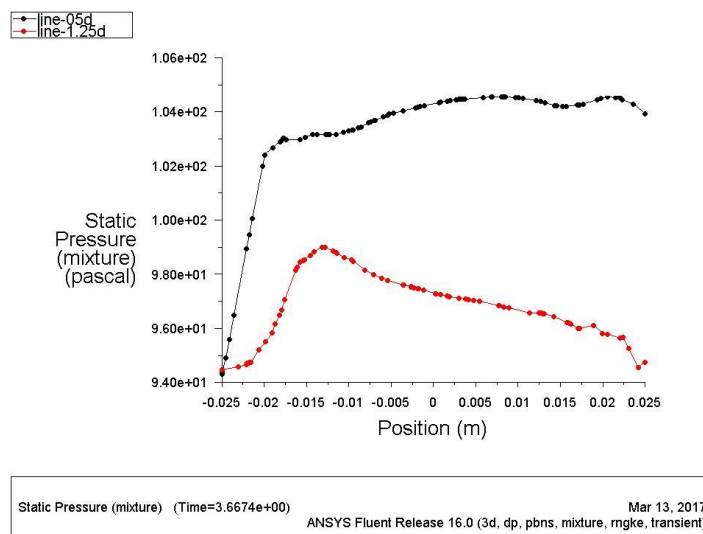


Σχήμα 4.4.34: 3D κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 4$

4.4.2 Γεωμετρία 2 – Διακλάδωση διαμέτρου 15mm

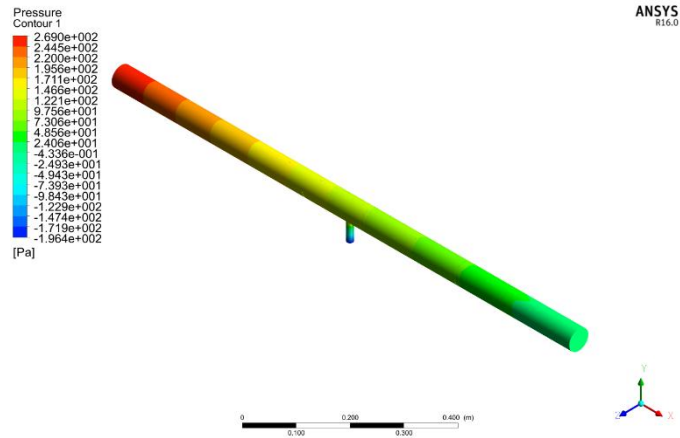
- $r = 0.5$

Όταν η είσοδος της 2^{ης} φάσης είναι μικρότερης διαμέτρου τότε η στατική πίεσης είναι πολύ μεγαλύτερη στην γραμμή 0.5d, δηλαδή κοντά στην περιοχή μίξης.



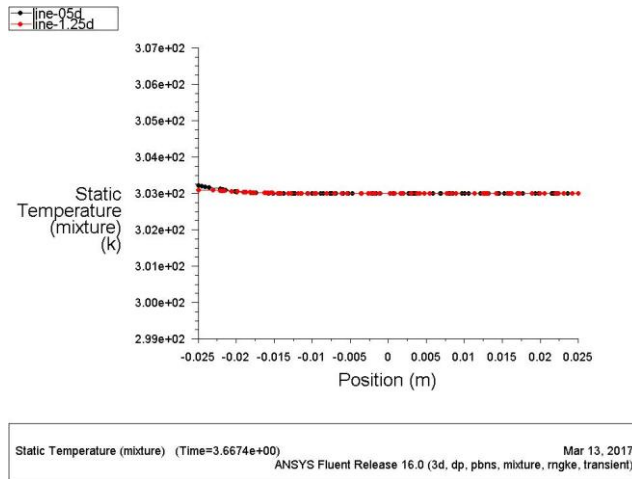
Σχήμα 4.4.35: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 0.5$

Στην 3D κατανομή της στατικής πίεσης παρατηρείται ότι στην είσοδο του κρούου ρευστού οι τιμές είναι υψηλότερες και κατά μήκος του αγωγού οι τιμές πέφτουν.

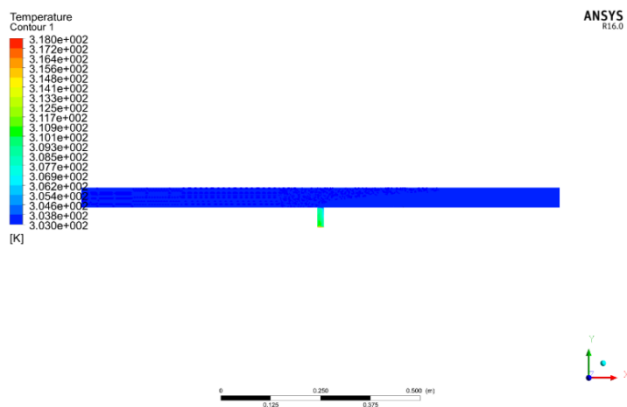


Σχήμα 4.4.36: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 0.5$

Δεν παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη παρατήρηση για την κατανομή της θερμοκρασίας στα 2 σημεία ελέγχου όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.4.37 και 38.

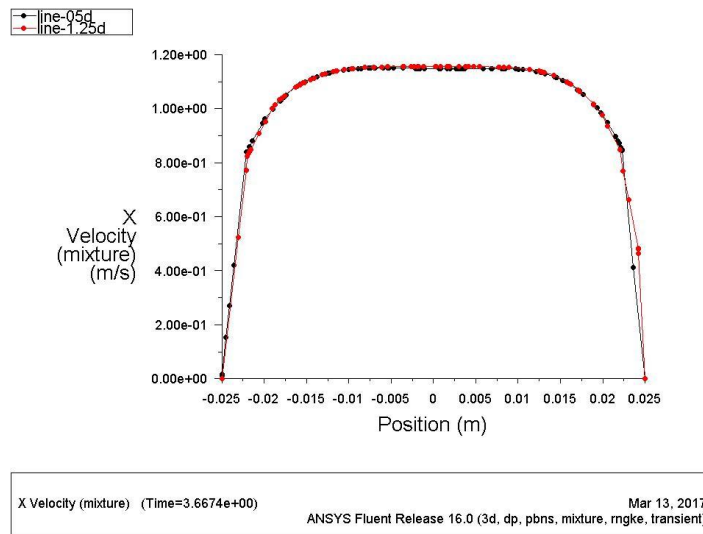


Σχήμα 4.4.37: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 0.5$

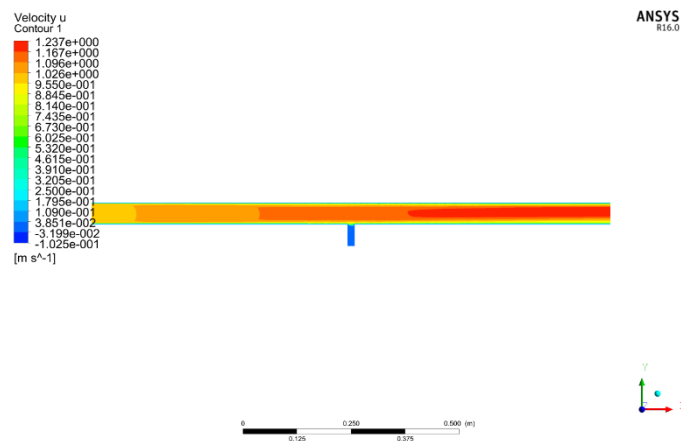


Σχήμα 4.4.38: XY Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 0.5$

Η συνιστώσα της x-ταχύτητας είναι ίδια και στις 2 γραμμές ελέγχου όπως απεικονίζεται στο Σχ. 4.4.39. Δεν προκαλείται αξιοσημείωτη μεταβολή στη ροή.

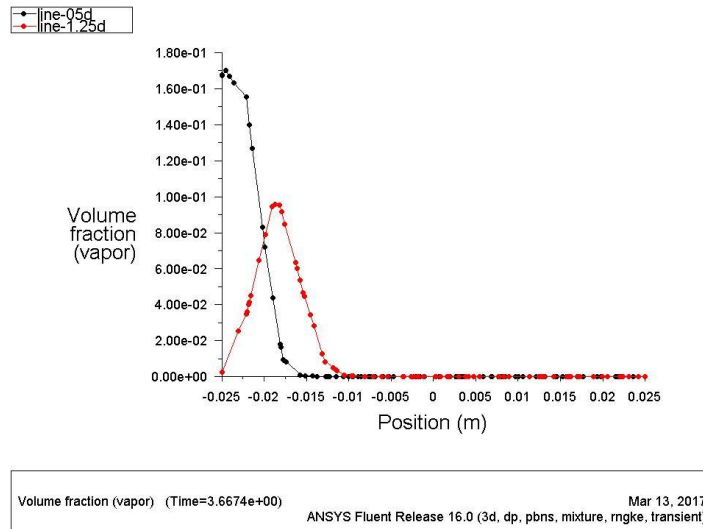


Σχήμα 4.4.39: Κατανομή ταχύτητας $X = r = 0.5$



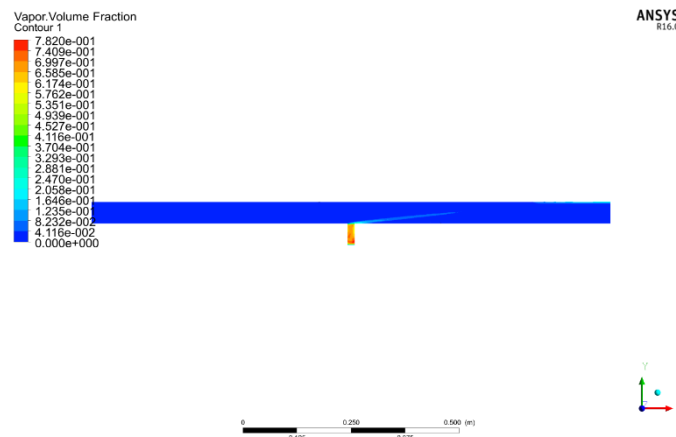
Σχήμα 4.4.40: XY Κατανομή ταχύτητας $X = r = 0.5$

Η σημαντικότερη μεταβολή της διφασικής ροής είναι η κατανομή του κλάσματος όγκου της δευτερεύουσας φάσης. Στο κάτω μέρος της γραμμής 0.5d, δηλαδή κοντά στο κάτω τοίχωμα στην περιοχή μίξης η περιεκτικότητά σε ατμό είναι αρκετά μεγάλη. Στη συνέχεια είναι υψηλότερη στην γραμμή 1.25d και κατά μήκος του άξονα X οι τιμές ταυτίζονται.



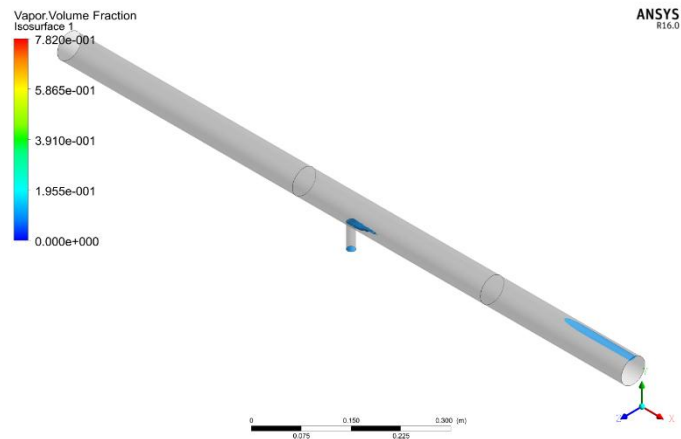
Σχήμα 4.4.41: Κατανομή κλάσματος όγκου ατμού $X - r = 0.5$

Στο Σχήμα 4.4.42 παρατηρείται η XY κατανομή του κλάσματος όγκου του ατμού. Αρχικά υπάρχει μεγάλη ποσότητα ατμού στο κάτω τοίχωμα και σιγά σιγά ο ατμός τείνει προς το άνω τοίχωμα παρασυρόμενος από την κύρια ροή.



Σχήμα 4.4.42: XY κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 0.5$

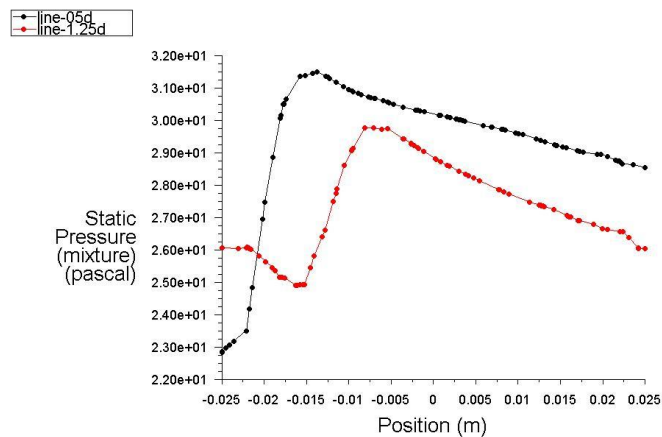
Παρατηρείται ότι λόγω μικρής ταχύτητας οι φυσαλίδες ατμού δεν μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους και παρασύρονται στην κύρια ροή. Μόνο στο σημείο εισόδου στον κύριο αγωγό και στο τελευταίο άνω μέρος του σωλήνα παρατηρούνται ενιαίες δομές ατμού.



Σχήμα 4.4.43: 3D κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 0.5$

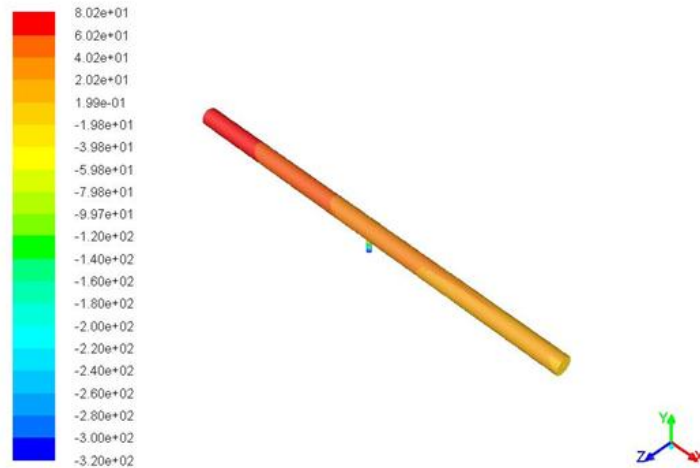
- $r = 1$

Η στατική πίεση στην γραμμή 0.5d λαμβάνει υψηλότερες τιμές απ’ ότι στην γραμμή 1.25d. Μόνο στο κάτω σημείο (κάτω τοίχωμα αγωγού) παρατηρείται υψηλότερη πίεση στη γραμμή 0.5d λόγω του ότι βρίσκεται κοντά στο σημείο μίξης.



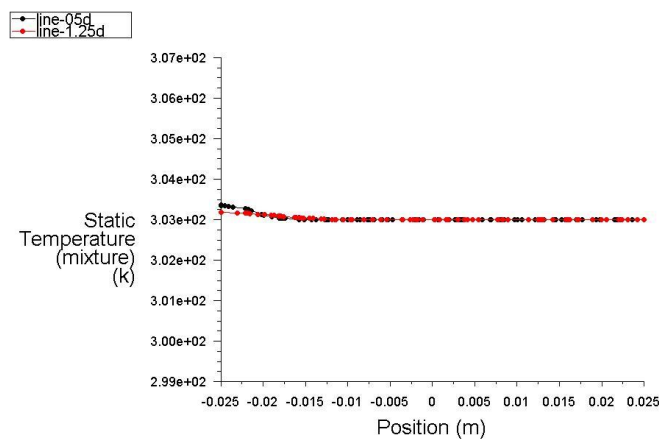
Static Pressure (mixture) (Time=3.9975e+00) Mar 13, 2017
 ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, dp, pbns, mixture, mgke, transient)

Σχήμα 4.4.44: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 1$



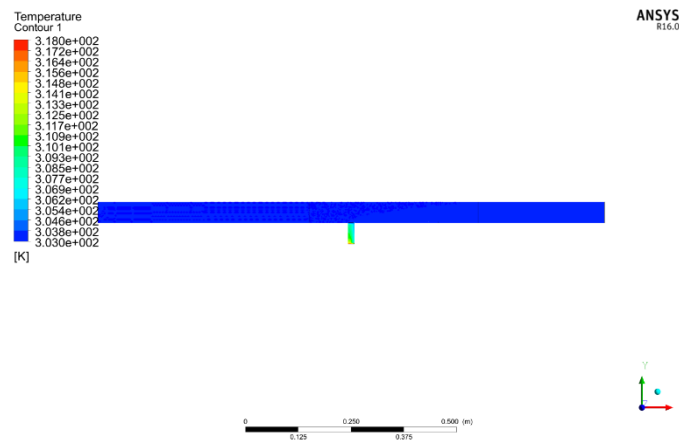
Σχήμα 4.4.45: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 1$

Ούτε σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται ιδιαίτερες θερμοκρασιακές διαφορές στα 2 σημεία ελέγχου. Μόνο στο κάτω μέρος του αγωγού παρατηρείται μια μικρή θερμοκρασιακή αύξηση στη γραμμή 0.5d.



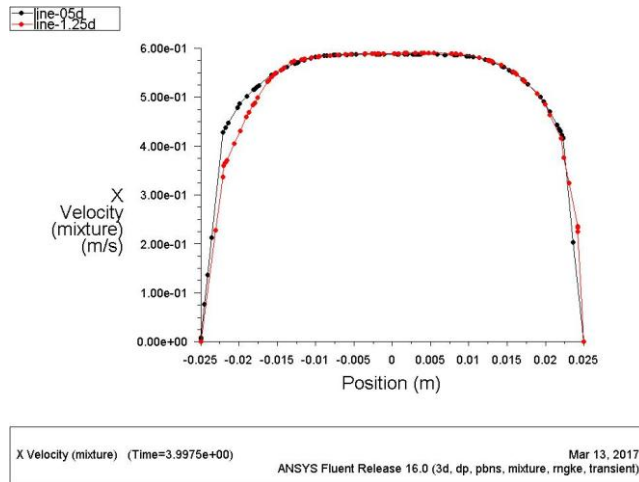
Static Temperature (mixture) (Time=3.9975e+00) Mar 13, 2017
ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, dp, pbns, mixture, rngke, transient)

Σχήμα 4.4.46: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 1$

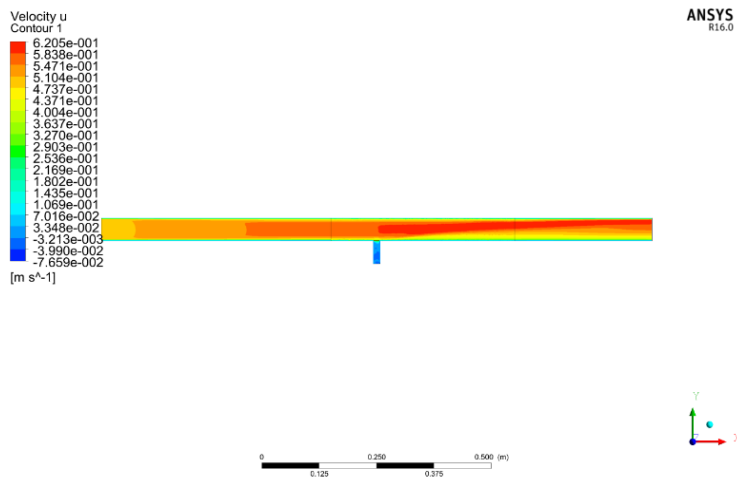


Σχήμα 4.4.47: XY Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 1$

Δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφορές ούτε στην κατανομή της x-συνιστώσας της ταχύτητας. Το προφίλ μοιάζει αρκετά με το παραβολικό θεωρητικό.

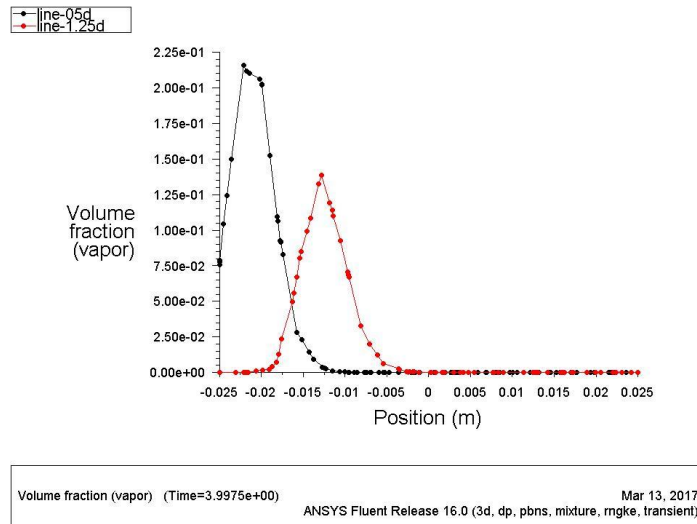


Σχήμα 4.4.48: Κατανομή ταχύτητας $X = r = 1$



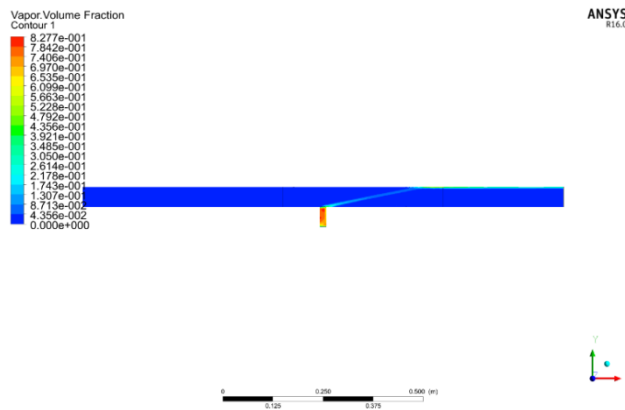
Σχήμα 4.4.49: XY Κατανομή ταχύτητας $X = r = 1$

Παρατηρείται υψηλή τιμή κλάσματος όγκου ατμού στο κάτω μέρος του τοιχώματος του αγωγού κοντά στο σημείο μίξης (γραμμή 0.5d). Λίγο υψηλότερα στο εσωτερικό του αγωγού στη γραμμή 1.25d παρατηρείται επίσης μεγαλύτερη συγκέντρωση. Τέλος, από το μέσο του αγωγού και προς τα άνω οι τιμές είναι μηδενικές.

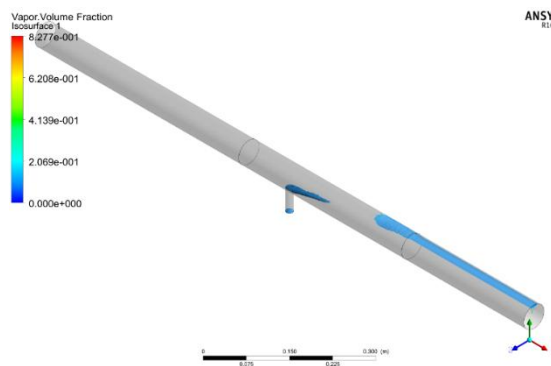


Σχήμα 4.4.50: Κατανομή κλάσματος όγκου ατμού $X - r = 1$

Παρατηρείται ένα μικρό jet φυσαλίδων ατμού να εισέρχεται διαγωνίως στην κύρια ροή και να προσκολλάται στο άνω τοίχωμα (Σχ. 4.4.51 και 4.4.52).



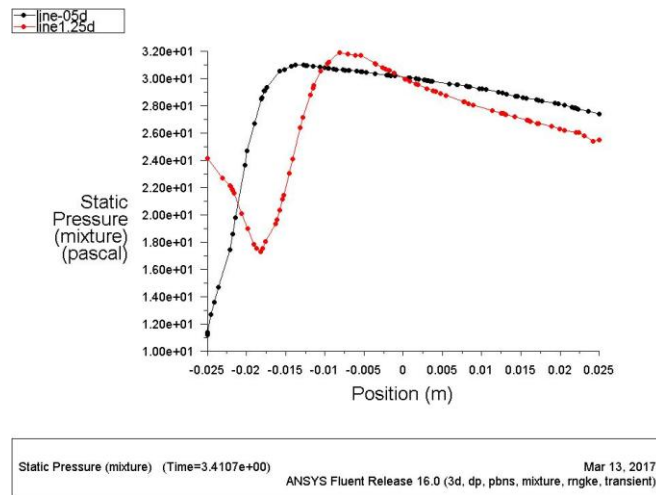
Σχήμα 4.4.51: XY κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 1$



Σχήμα 4.4.52: 3D κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 1$

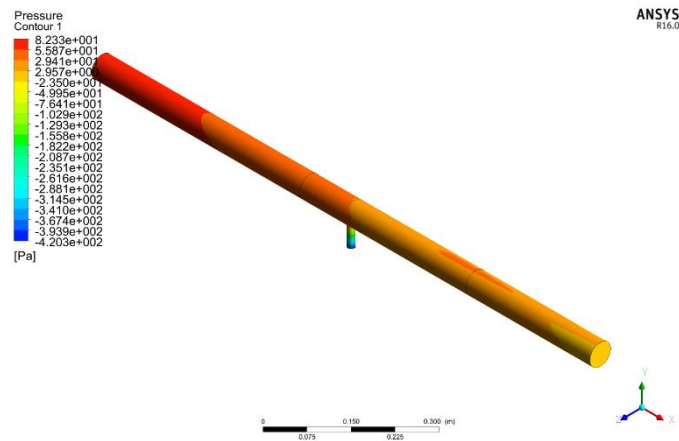
- $r = 2$

Στην περίπτωση του λόγου ταχυτήτων $r = 2$ παρατηρείται ότι υπάρχει υψηλότερη πίεση στο κάτω μέρος του τοιχώματος πιο μακριά από το σημείο μίξης (γραμμή 1.25d) και στη συνέχεια αυξάνεται η πίεση στο σημείο μίξης. Σχεδόν από το μέσο του αγωγού και προς το άνω τοίχωμα οι τιμές πίεσης είναι στο ίδιο εύρος.



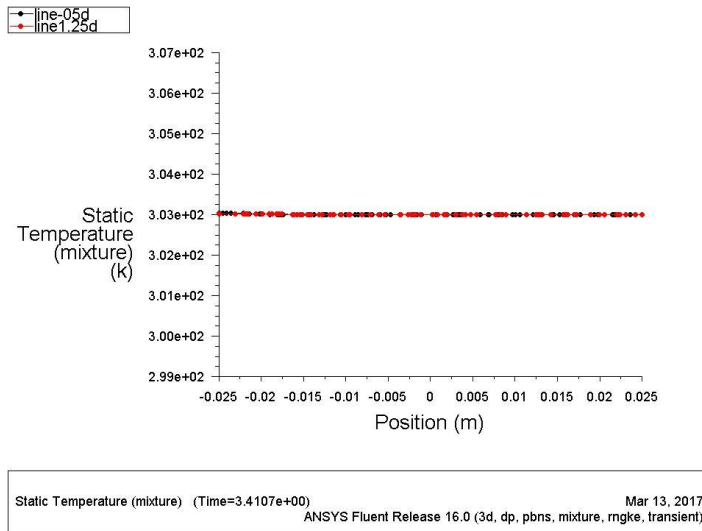
Σχήμα 4.4.53: Κατανομή στατικής πίεσης – $r = 2$

Παρατηρείται σε όλο το μήκος του αγωγού ότι η στατική πίεση λαμβάνει αρκετά υψηλές τιμές.

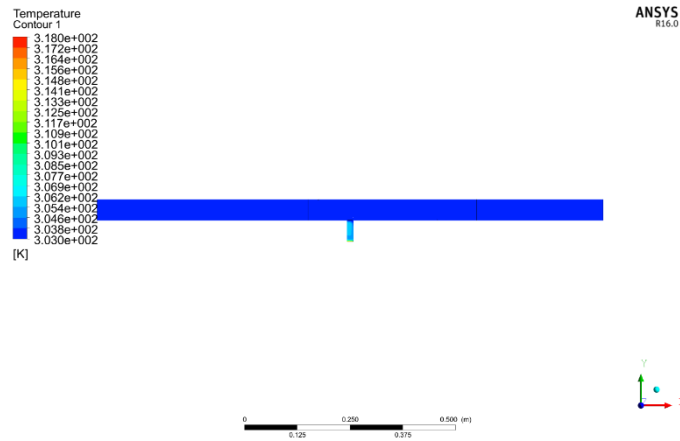


Σχήμα 4.4.54: Τρισδιάστατη κατανομή στατικής πίεσης – $r = 2$

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις η θερμοκρασιακή διαφορά είναι πολύ μικρή μεταξύ των 2 σημείων ελέγχου (Σχήματα 4.4.55 και 56).

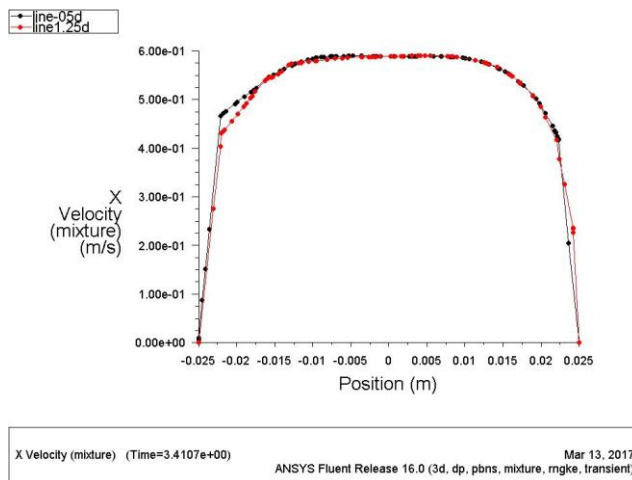


Σχήμα 4.4.55: Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 2$

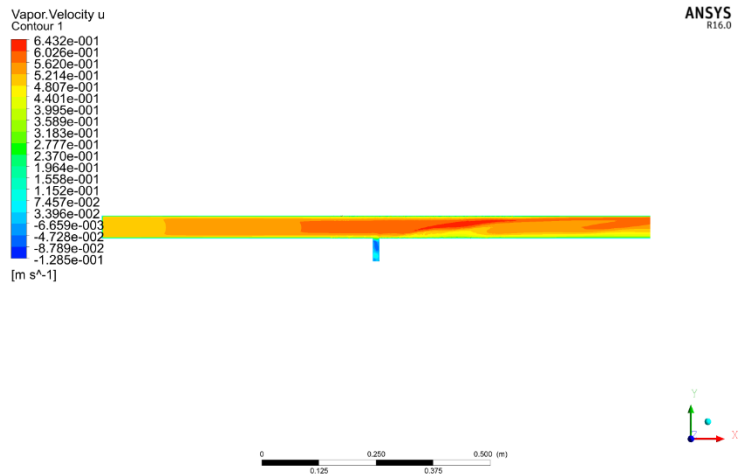


Σχήμα 4.4.56: XY Κατανομή στατικής θερμοκρασίας – $r = 2$

Το προφίλ ταχύτητας στο εσωτερικό του αγωγού δεν επηρεάζεται όσον αφορά την συνιστώσα της x-ταχύτητας (Σχήματα 4.4.57 και 58).

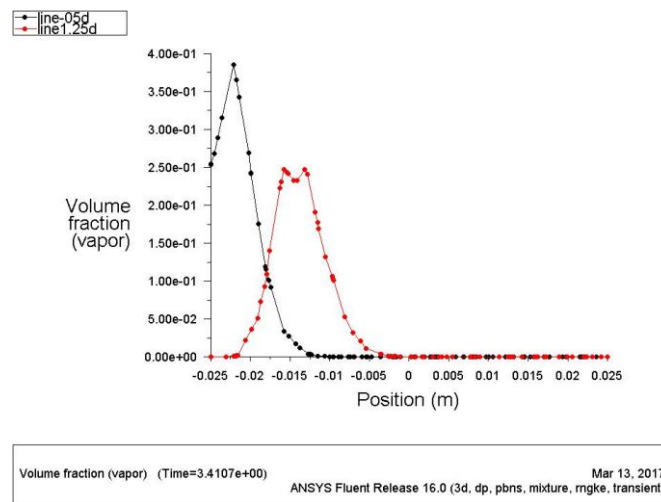


Σχήμα 4.4.57: Κατανομή ταχύτητας $X = r = 2$



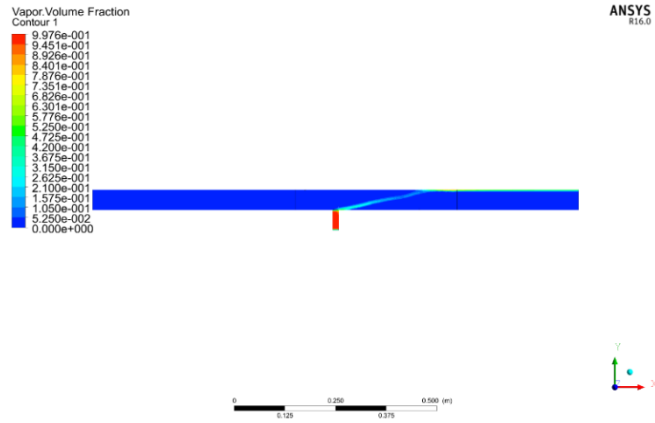
Σχήμα 4.4.58: XY Κατανομή ταχύτητας $X - r = 2$

Παρατηρείται υψηλή τιμή κλάσματος όγκου ατμού στο κάτω μέρος του τοιχώματος του αγωγού κοντά στο σημείο μίξης (γραμμή 0.5d). Λίγο υψηλότερα στο εσωτερικό του αγωγού στη γραμμή 1.25d παρατηρείται επίσης μεγαλύτερη συγκέντρωση. Τέλος, από το μέσο του αγωγού και προς τα άνω οι τιμές είναι μηδενικές.

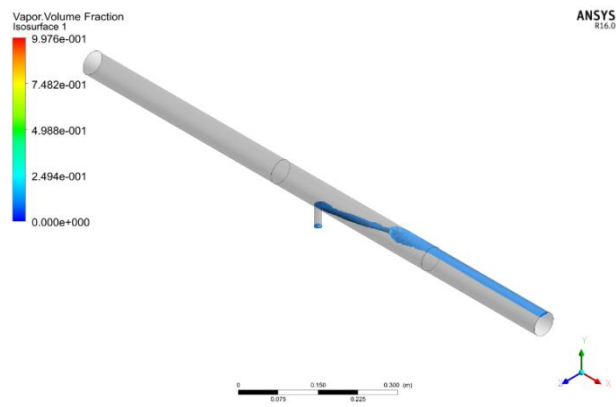


Σχήμα 4.4.59: Κατανομή κλάσματος όγκου ατμού $X - r = 2$

Μόλις η ταχύτητα της δευτερεύουσας φάσης είναι αρκετά υψηλή ($r = 2$) τότε παρατηρείται ένα ενιαίο jetφυσάλιδων που εισέρχεται διαγωνίως στον αγωγό και προσκολλάται στο πάνω τοίχωμα όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 4.4.51 και 52.



Σχήμα 4.4.51: XY κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 2$



Σχήμα 4.4.52: 3D κατανομή κλάσματος όγκου ατμού – $r = 2$

4.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα ταξινομούνται με βάση το είδος των ρευστών. Αρχικά παρατίθενται τα συμπεράσματα της μονοφασικής ροής όπου το ρευστό είναι μόνο νερό.

Μονοφασική ροή (νερό)

Διάμετρος εισόδου ζεστού νερού $b = 25 \text{ mm}$.

- $r = 0.5$: Το φιλμ της θερμοκρασίας κυμαίνεται κοντά στο χαμηλό τοίχωμα από το σημείο μίξης και μετά.
- $r = 1$ Παρατηρείται αύξηση του φιλμ θερμοκρασίας. Δεν κυμαίνεται μόνο κοντά στο κάτω τοίχωμα αλλά σχεδόν μέχρι το μέσο του αγωγού.
- $r = 2$: Παρατηρείται μικρή αύξηση του φιλμ σε σχέση με το προηγούμενο λόγο $r = 1$.
Παρατηρείται αύξηση της πτώσης στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου-εξόδου.
- $r = 4$: Το jet θερμού αέρα εισέρχεται στο εσωτερικό του αγωγού και κατευθύνεται κατευθείαν προς το άνω τοίχωμα.
Παρατηρείται αύξηση της πτώσης στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου-εξόδου.

Διάμετρος εισόδου ζεστού νερού $b = 15 \text{ mm}$.

- $r = 0.5$: Το φιλμ της θερμοκρασίας κυμαίνεται κοντά στο χαμηλό τοίχωμα από το σημείο μίξης και μετά.
- $r = 1$ Παρατηρείται αύξηση του φιλμ θερμοκρασίας. Δεν κυμαίνεται μόνο κοντά στο κάτω τοίχωμα αλλά σχεδόν μέχρι το μέσο του αγωγού.
- $r = 2$: Παρατηρείται μικρή αύξηση του φιλμ σε σχέση με το προηγούμενο λόγο $r = 1$.
Παρατηρείται μικρότερη διαφορά στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου – εξόδου συγκριτικά με την περίπτωση ($b = 25\text{mm} / r = 2$).
- $r = 4$: Το jet θερμού αέρα εισέρχεται στο εσωτερικό του αγωγού και κατευθύνεται κατευθείαν προς το άνω τοίχωμα.
Παρατηρείται αύξηση της πτώσης στατικής πίεσης μεταξύ εισόδου-εξόδου.

Διφασική ροή (νερό-ατμός)

- $r = 0.5$: Παρατηρείται μικρή θερμοκρασιακή διαφορά.
Παρατηρείται σχηματισμός φιλμ ατμού στο άνω τοίχωμα.
- $r = 1$: Παρατηρείται μεγαλύτερη πτώση πίεσης σε σχέση με την περίπτωση $r = 0.5$.
Παρατηρείται μικρή θερμοκρασιακή διαφορά.

Παρατηρείται σχηματισμός μεγαλύτερου φιλμ ατμού στο άνω τοίχωμα σε σχέση με την περίπτωση $r = 0.5$.

$r = 2$: Παρατηρείται μεγαλύτερη πτώση πίεσης σε σχέση με την περίπτωση $r = 1$.

Παρατηρείται μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά ειδικά στο σημείο εισόδου του ζεστού νερού-ατμού.

Παρατηρείται σχηματισμός τυρβώδους και ογκώδους φιλμ ατμού στο άνω τοίχωμα σε σχέση με την περίπτωση $r = 0.5$ και 1 .

$r = 4$: Παρατηρείται μεγαλύτερη πτώση πίεσης σε σχέση με την περίπτωση $r = 2$.

Παρατηρείται μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά ειδικά στο σημείο εισόδου του ζεστού νερού-ατμού σε σχέση με την περίπτωση $r = 2$.

Παρατηρείται σχηματισμός τυρβώδους και ογκώδους φιλμ ατμού στο άνω τοίχωμα σε σχέση με την περίπτωση $r = 0.5, 1$ και 2 .

- ❖ Τα συμπεράσματα είναι ίδια και για την περίπτωση διφασικής ροής με $b = 15\text{mm}$ με την διαφορά ότι η ποσότητα του κλάσματος όγκου στο εσωτερικό του αγωγού είναι μικρότερη λόγω μικρότερης διαμέτρου εισόδου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ακολουθούν βήματα (tutorial) για την εισαγωγή μιας γεωμετρίας δύο διαστάσεων που έχει διακριτοποιηθεί σε πλέγμα στο λογισμικό AnsysFluent.

Εισαγωγή στο λογισμικό

Το υπολογιστικό πακέτο Fluent, είναι ένα λογισμικό, στο οποίο ο μελετητής χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση φαινομένων μετάδοσης θερμότητας, ροής και στερεοποίησης και τήξης.

Το υπολογιστικό πακέτο Fluent, μπορεί να επιλύσει φαινόμενα τα οποία εξελίσσονται σε 2 ή 3 διαστάσεις. Στη προκειμένη περίπτωση το παράδειγμά μας έχει στηθεί στις 2 διαστάσεις, γλιτώνοντας έτσι σημαντικό υπολογιστικό χρόνο και ισχύ.

Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνεται μια εποπτική άποψη για τη χρήση του προγράμματος και περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν για την τελική επίλυση του φαινομένου της διφασικής ροής αέρα-νερού σε αγωγό

Εισαγωγή παραμέτρων επίλυσης

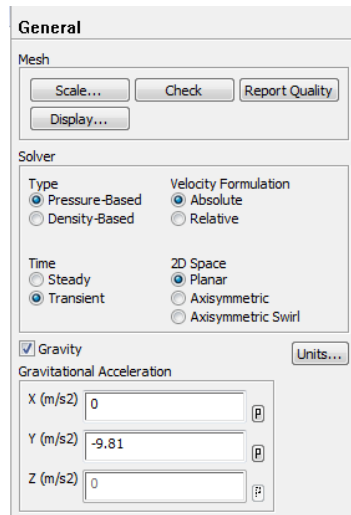
Στο ήδη υπάρχουσα πλατφόρμα της Ansys (projectschematic), ανοίγουμε την καρτέλα setup, επιλέγουμε 2DDimension, DoublePrecision για 64bitλειτουργικά συστήματα, καθώς επίσης και τους επιθυμητούς πυρήνες επεξεργασίας (numberofprocesses). Τέλος πατάμε OK.



Άνοιγμα της καρτέλας setup

Επιλογή του λύτη (solver)

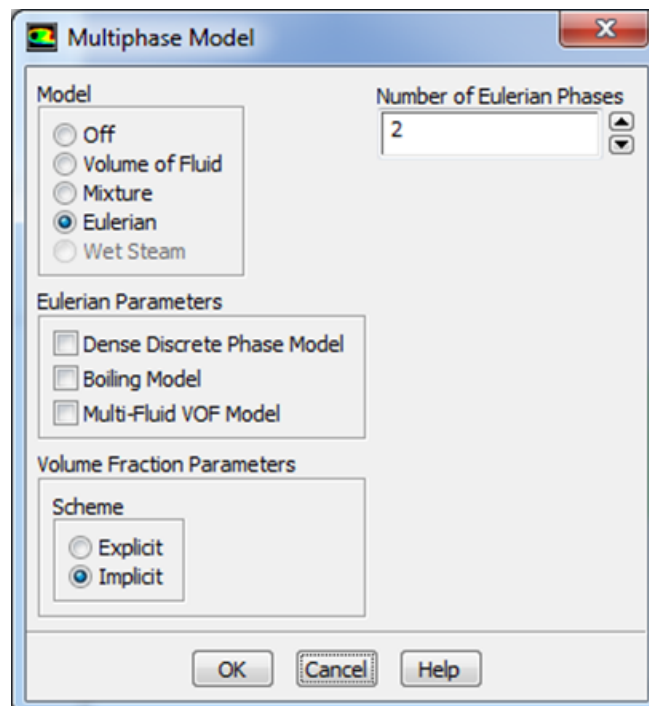
Κατόπιν, στο παράθυρο που ανοίγει αμέσως μετά, προσδιορίζουμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις για το λύτη.



Επιλογές του λύτη

Επιλογή μοντέλου πολυφασικής ροής (multiphase)

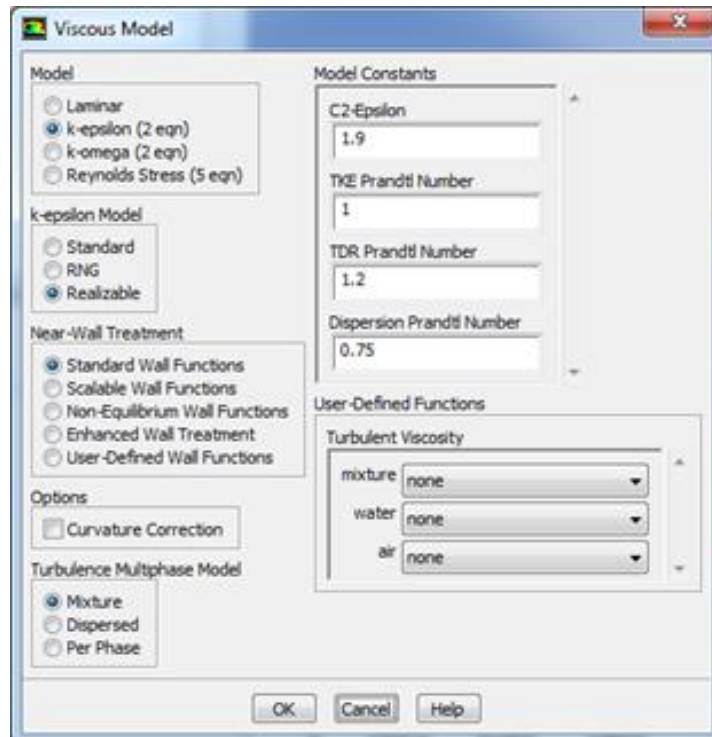
Από την αριστερή μπάρα επιλογών, πατάμε την καρτέλα Models. Οι παράμετροι που επιλέγονται παρουσιάζονται στο σχήμα 4.6. Έχουμε επιλέξει το μοντέλο του Euler (Eulerian), καθώς επίσης και τον αριθμό των φάσεων (NumberOfEulerianPhases) να είναι 2. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό προϋποθέσεις, οι οποίες στην περίπτωση μας τηρούνται.



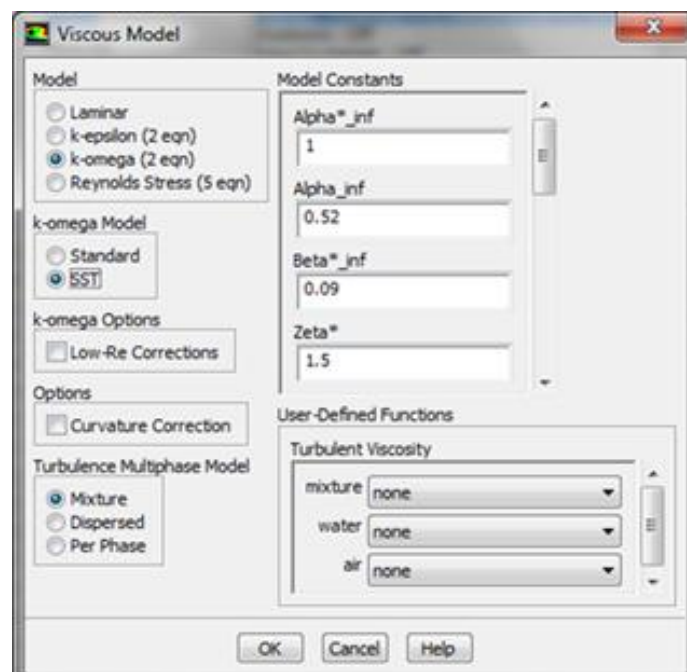
Επιλογή μοντέλου πολυφασικής ροής

Επιλογή μοντέλου τύρβης (viscous)

Τα μοντέλα τύρβης που χρησιμοποιήσαμε για τη διαφασική ροή είναι το k-ε και το k-ω. Το FLUENT δίνει την δυνατότητα επιλογής τριών μοντέλων για το k-ε. Αυτά είναι το Standard k-ε, RNG k-ε και Realizable k-ε. Όσον αφορά το k-ω, υπάρχουν τα μοντέλα Standard k-ω και k-ω SST.



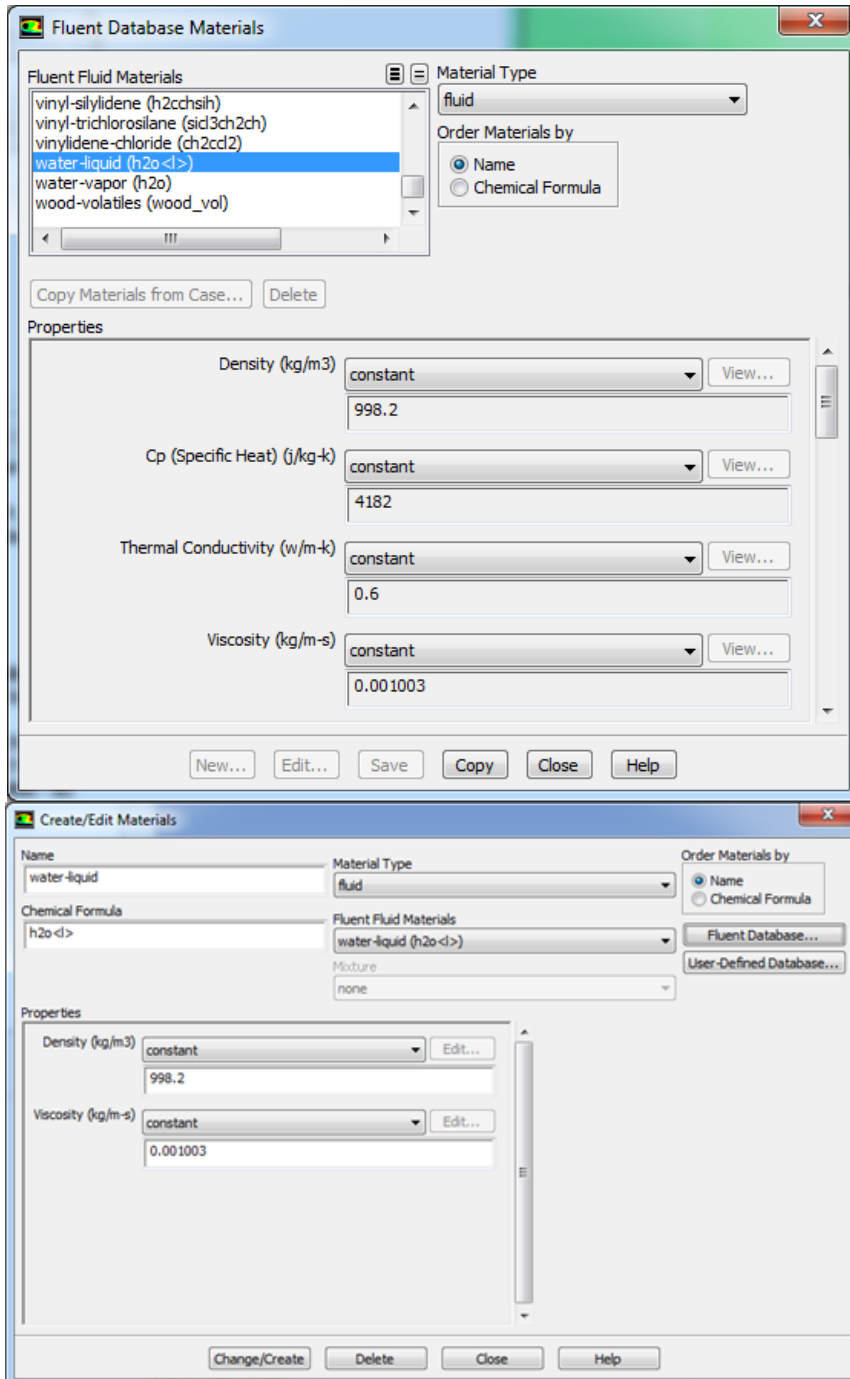
Ρυθμίσεις μοντέλου τύρβης k-ε



Ρυθμίσεις μοντέλου τύρβης k-ω

Επιλογή των ρευστών λειτουργίας (materials)

Από την καρτέλα materials πατάμε την επιλογή Create/Edit. Στο νέο παράθυρο που ανοίγει (Create/EditMaterials) επιλέγουμε το υλικό water-liquid από τη λίστα του FluentDatabase και στη συνέχεια πατάμε το κουμπί Copy και κλείνουμε το παράθυρο. Τέλος στο παράθυρο Create/EditMaterials πατάμε το κουμπί Change/Create και έπειτα Close.



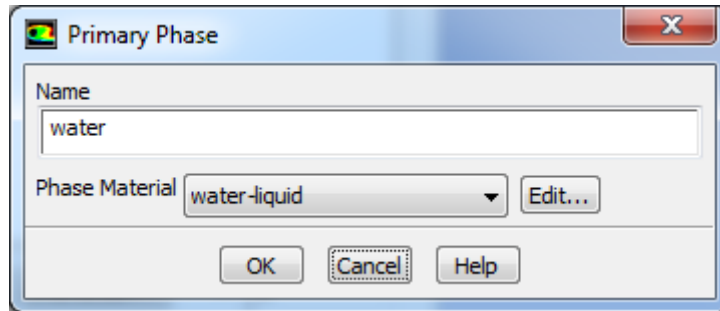
Επιλογή των ρευστών λειτουργίας

Καθορισμός πρωταρχικής και δευτερεύουσας φάσης για τη διφασική ροή (phases).

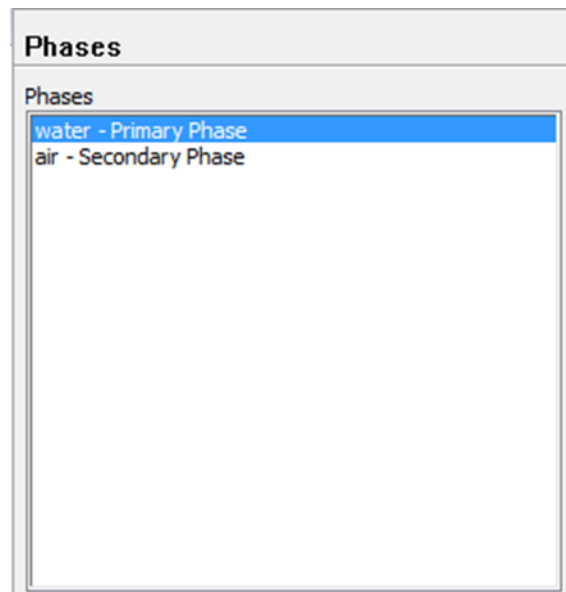
Ως πρωταρχική φάση (primaryphase) θεωρούμε το νερό και ως δευτερεύουσα φάση (secondaryphase) τον αέρα.

Ο καθορισμός των φάσεων γίνεται ως εξής:

Στο παράθυρο «Phases» στην λίστα «Phase», επιλέγουμε την κάθε μία φάση και πατάμε το κουμπί «Edit». Εκεί ορίζεται το υλικό της κάθε φάσης με ένα όνομα που δίνεται σε κάθε φάση αφού την επιλέξουμε από το μενού «PhaseMaterial».



Καθορισμός ονόματος και υλικού κάθε φάσης



Τελικό παράθυρο καθορισμού των φάσεων

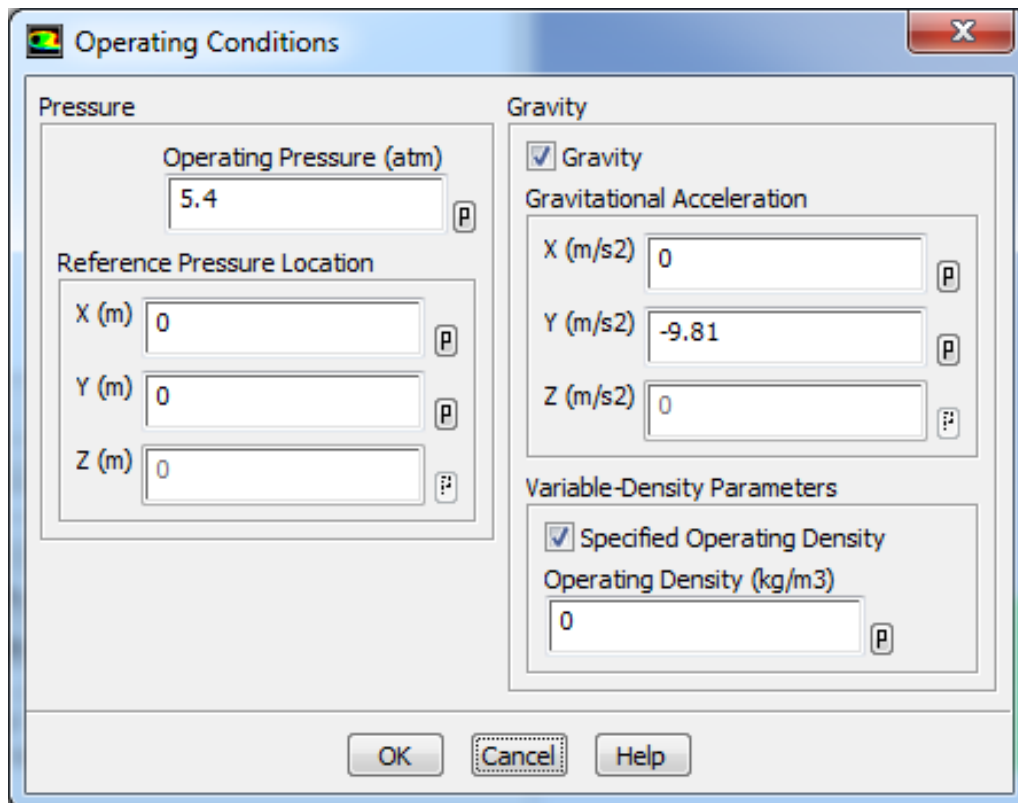
Καθορισμός των συνθηκών λειτουργίας των κελιών (CellZoneConditions)

Ο καθορισμός των συνθηκών λειτουργίας αφορά την πίεση αναφοράς, την πυκνότητα λειτουργίας και το βαρυτικό πεδίο. Η διαδικασία αυτή γίνεται ως εξής. Πίεση αναφοράς ορίζεται σαν πίεση μακρινού πεδίου και εφόσον δεν έχει οριστεί οριακή συνθήκη πίεσης..

Για τον καθορισμό της πυκνότητας λειτουργίας στο «Variabledensityparameters» επιλέγουμε το «Specifiedoperatingdensity» και

εισάγουμε την τιμή 0 σύμφωνα με τις οδηγίες του εγχειριδίου για διφασικό μίγμα νερού-αέρα.

Η βαρύτητα με βάση το καρτεσιανό σύστημα αναφοράς έχει κάθε φορά αρνητικό πρόσημο και τιμή ίση με -9.81 m/s^2 .



OperatingConditions

Καθορισμός οριακών συνθηκών (BoundaryConditions) και τρόπος υπολογισμού τους.

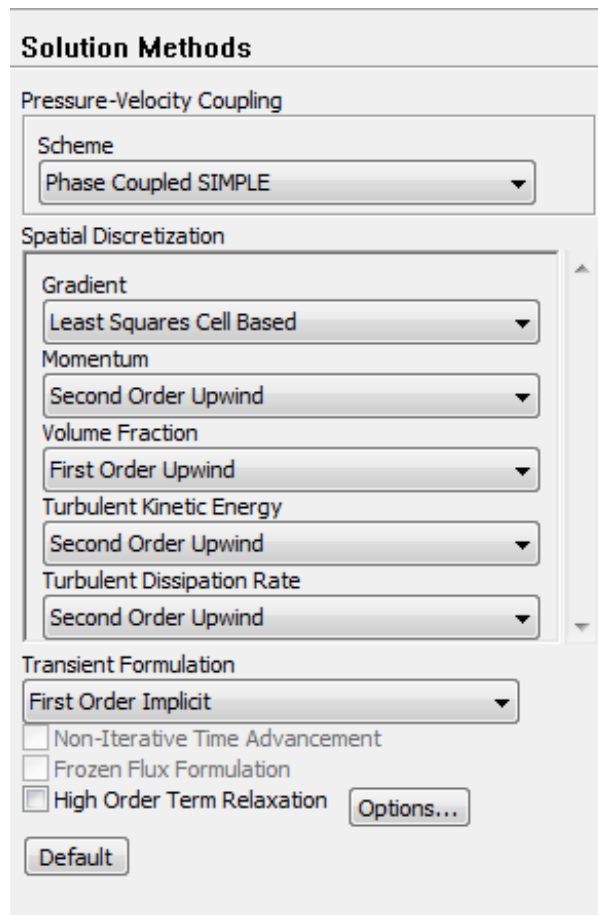
Για την επίλυση του μοντέλου από το FLUENT χρειάζεται να καθοριστούν οι οριακές συνθήκες του κάθε μοντέλου. Οι οριακές συνθήκες στην περίπτωση μας αφορούν τις συνθήκες εισόδου και εξόδου των 2 φάσεων ξεχωριστά και του διφασικού μίγματος από τη γεωμετρία.

Συγκεκριμένα πρέπει να καθοριστούν οι ταχύτητες εισόδου του αέρα και του νερού, παροχή μάζας του νερού και του αέρα, καθώς επίσης και ο καθορισμός της υδραυλικής διαμέτρου στην είσοδο της διάταξης και την έξοδο της κοιλότητας. Ακολουθούν όλα τα βήματα που έγιναν στην καρτέλα «Boundaryconditions».

Από την αριστερή μπάρα επιλογών, πατάμε την καρτέλα BoundaryConditions.

Καθορισμός των μεθόδων επίλυσης (SolutionMethods)

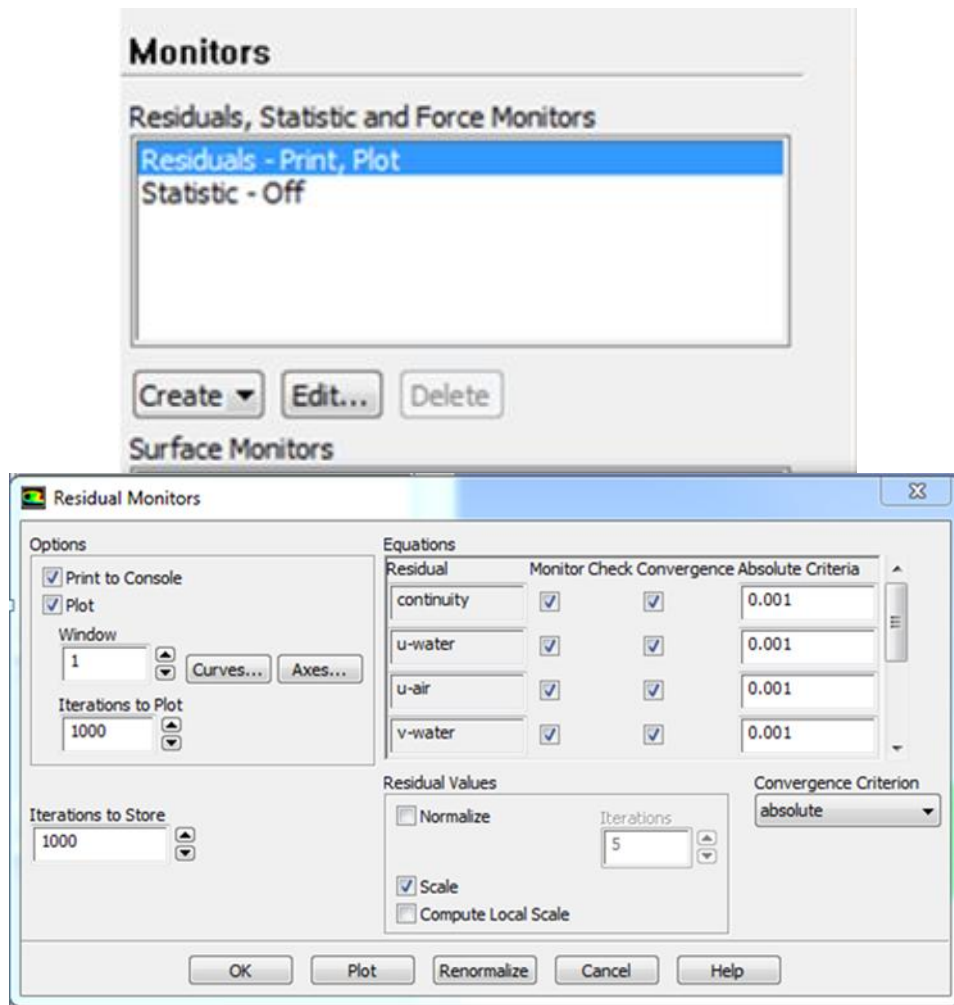
Στο σημείο αυτό καθορίζονται τα πιο βασικά στοιχεία της επίλυσης, ώστε αυτή να έχει γρήγορη και καλή σύγκλιση και φυσικά να δίνει όσο γίνεται πιο ακριβή αποτελέσματα.



Ρυθμίσεις των μεθόδων διακριτοποίησης

Καθορισμός κριτηρίου σύγκλισης (ResidualMonitors)

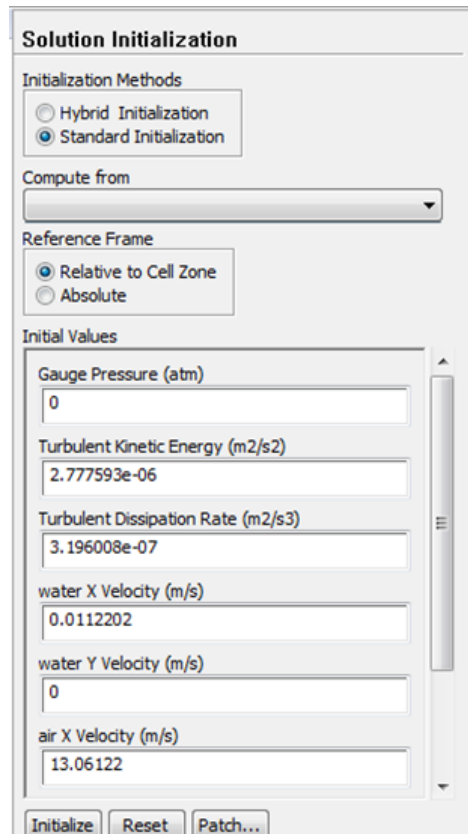
Το κριτήριο σύγκλισης για όλες τις υπολογιστικές αναλύσεις είναι το υπόλοιπο της αρχικής από την τελική τιμή ενός μεγέθους μετά από μία επανάληψη του αλγορίθμου επίλυσης να είναι ίσο ή μικρότερο από μία προκαθορισμένη τιμή. Η τιμή αυτή είναι ίση με $R=0.001$. Φυσικά η πραγματική τιμή του υπόλοιπου στα διάφορα επιλυόμενα μεγέθη δεν είναι $R=0.001$ αλλά μικρότερη. Αυτό συμβαίνει διότι η συγκεκριμένη τιμή ισχύει για το πρώτο βήμα της ανάλυσης της διφασικής ροής. Επομένως στο δεύτερο βήμα οι επιπλέον επαναλήψεις με τους αρκετά μικρούς συντελεστές υποχαλάρωσης, ελαττώνουν ακόμα το υπόλοιπο των διαφόρων μεγεθών. Το κριτήριο σύγκλισης δεν αλλάζει αλλά παραμένει πάντα $R=0.001$. Στην περίπτωση μας η τάξη μεγέθους του R που είναι ορισμένη αρχικά, μας ικανοποιεί. Από την καρτέλα Monitors επιλέγουμε τα Residuals και πατάμε την επιλογή Edit. Στο παράθυρο που εμφανίζεται καθορίζουμε την τιμή του AbsoluteCriteria σε 0.001, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.14.



Καθορισμός κριτηρίου σύγκλισης

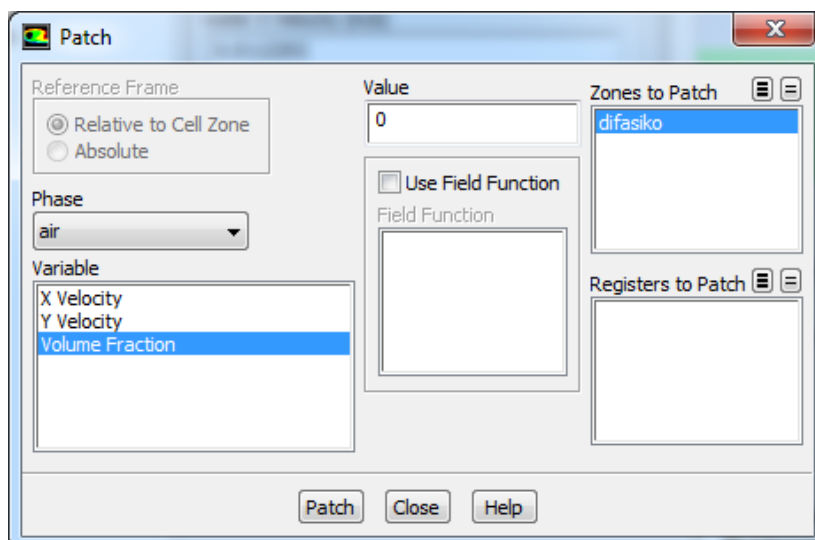
Καθορισμός αρχικής συνθήκης πριν την έναρξη της υπολογιστικής ανάλυσης (SolutionInitialization)

Πρίν την έναρξη της υπολογιστικής ανάλυσης απαιτείται ο καθορισμός μιας αρχικής συνθήκης. Στην περίπτωσή μας, θεωρήσαμε ότι ο υπολογισμός θα γίνει στο σημείο εισόδου του αέρα στη γεωμετρία μας (inlet). Αφού επιλέξουμε την καρτέλα SolutionInitialization, στην επιλογή Compute from διαλέγουμε το inlet και στη συνέχεια πατάμε Initialize, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15.



Καθορισμός αρχικών συνθηκών υπολογισμού

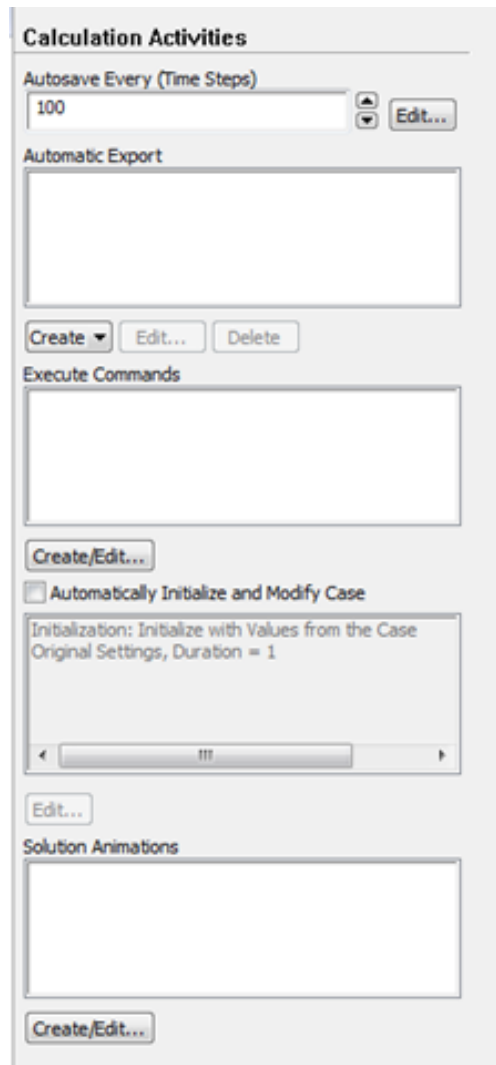
Κατόπιν, πατάμε το κουμπί Patch και στο νέο παράθυρο το οποίο ανοίγει επιλέγουμε ως Phase τον αέρα (air), ως μεταβλητή θέτουμε το VolumeFraction, επιλέγουμε τιμή 0 καθώς αρχικά η εγκατάστασή μας είναι γεμάτη με νερό και κλικάρουμε την επιλογή difasiko στο πλαίσιο ZonestoPatch, όπως φαίνεται στο Σχήμα



Ρυθμίσεις για Patch

Αποθήκευση των υπολογιστικών δεδομένων και αποτελεσμάτων (CalculationActivities).

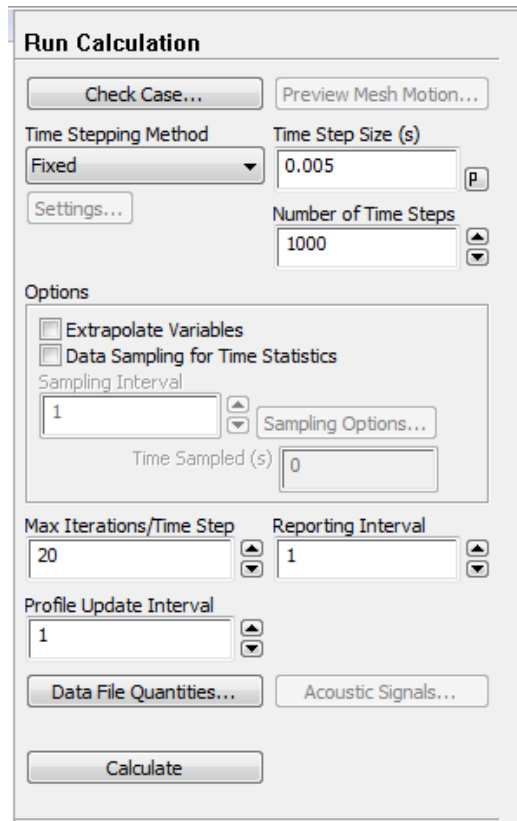
Στην καρτέλα CalculationActivities καθορίζουμε την αυτόματη αποθήκευση των δεδομένων να γίνεται κάθε 100 **βήματα**, έτσι ώστε να έχουμε μια πιο ακριβή και πιο λεπτομερή εικόνα των αποτελεσμάτων του κάθε υπολογιστικού πειράματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.17.



Καθορισμός της συχνότητας αποθήκευσης των αποτελεσμάτων

Εκτέλεση υπολογισμού (RunCalculation)

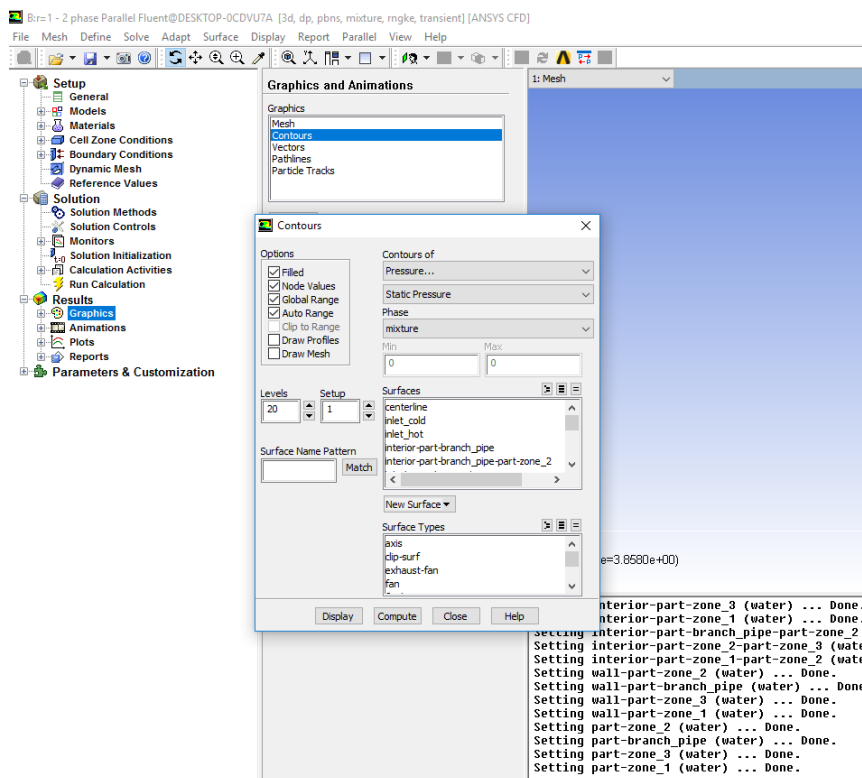
Τέλος, από την καρτέλα RunCalculation, επιλέγουμε βήμα 0,005 sec και αριθμός βημάτων 1000. Το μέγιστο των επαναλήψεων που έγιναν σε κάθε βήμα ήταν 20. Για να αρχίσει ο υπολογισμός, πατάμε το κουμπί Calculate.

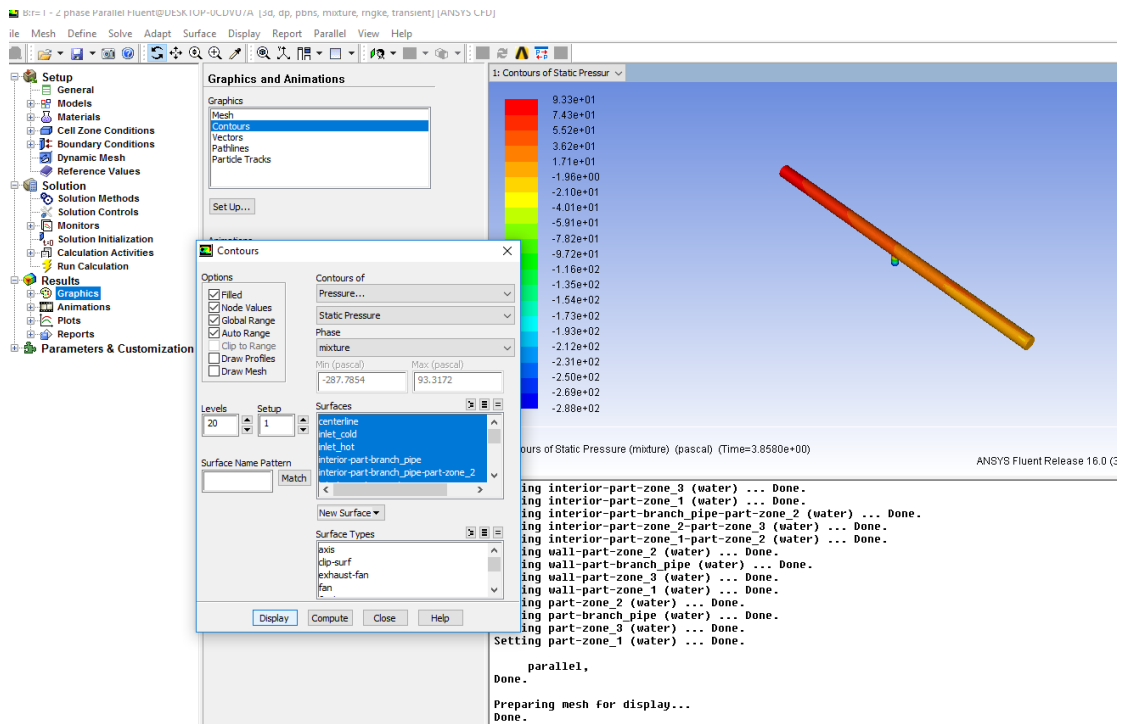


Καθορισμός των παραμέτρων υπολογισμού

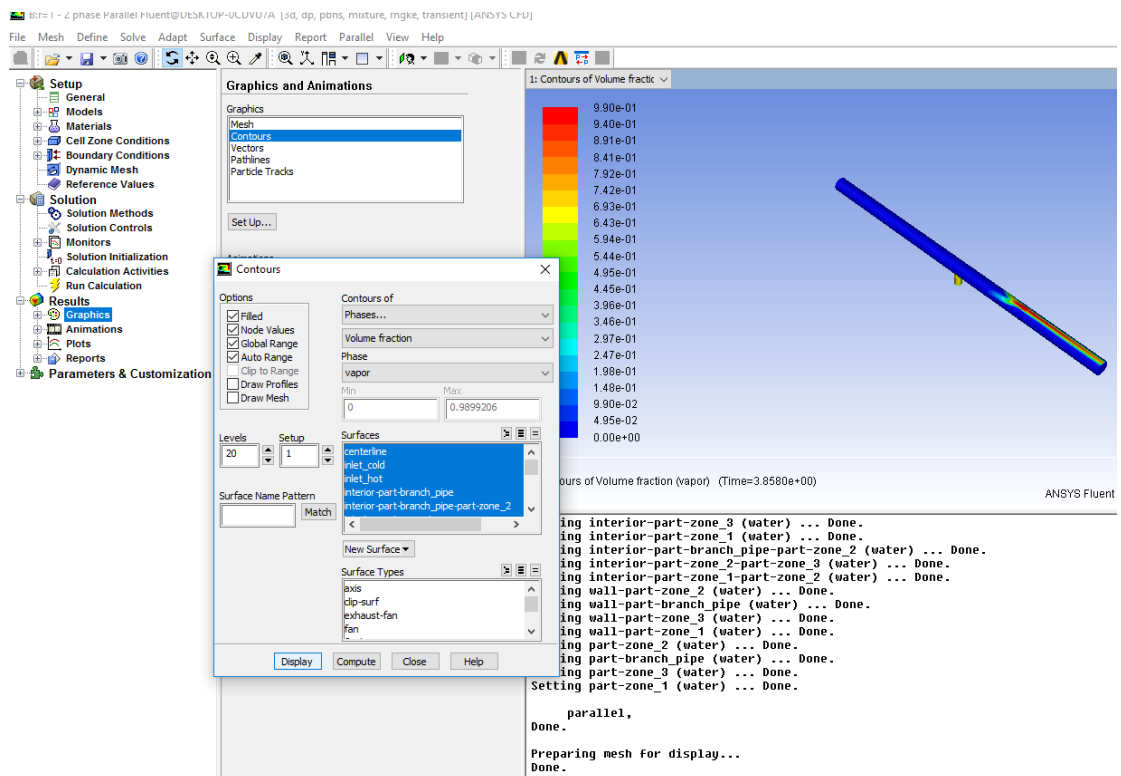
Διαδικασία εξαγωγή εικόνων – Διαγραμμάτων μέσω screenshots από το πρόγραμμα Fluent

- Απεικόνιση 3D κατανομής στατικής πίεσης

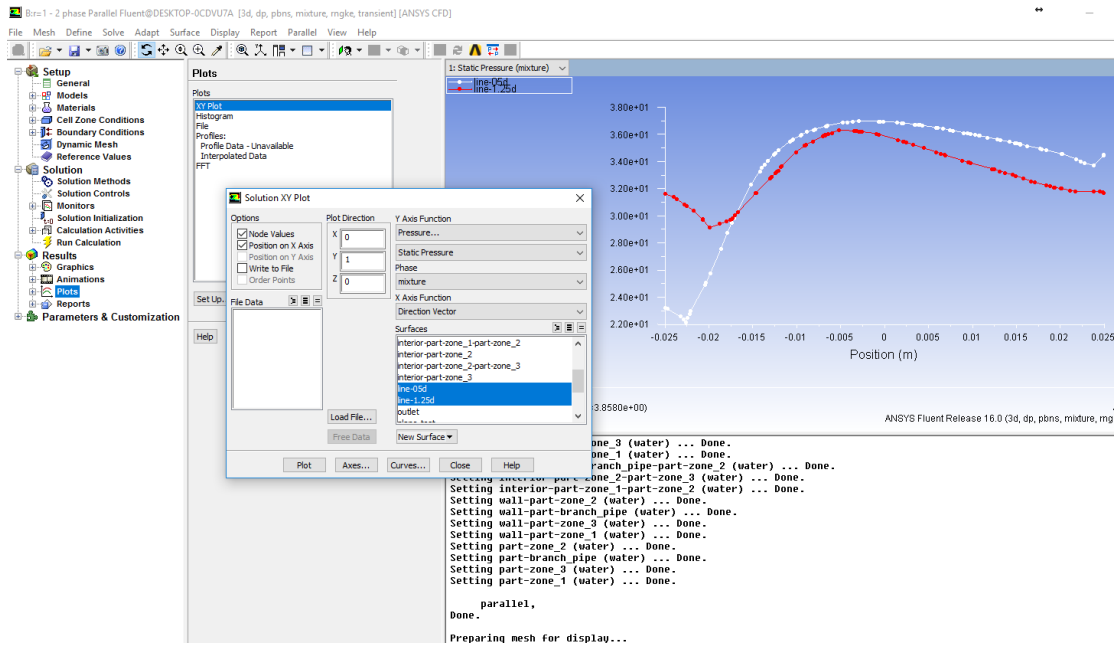




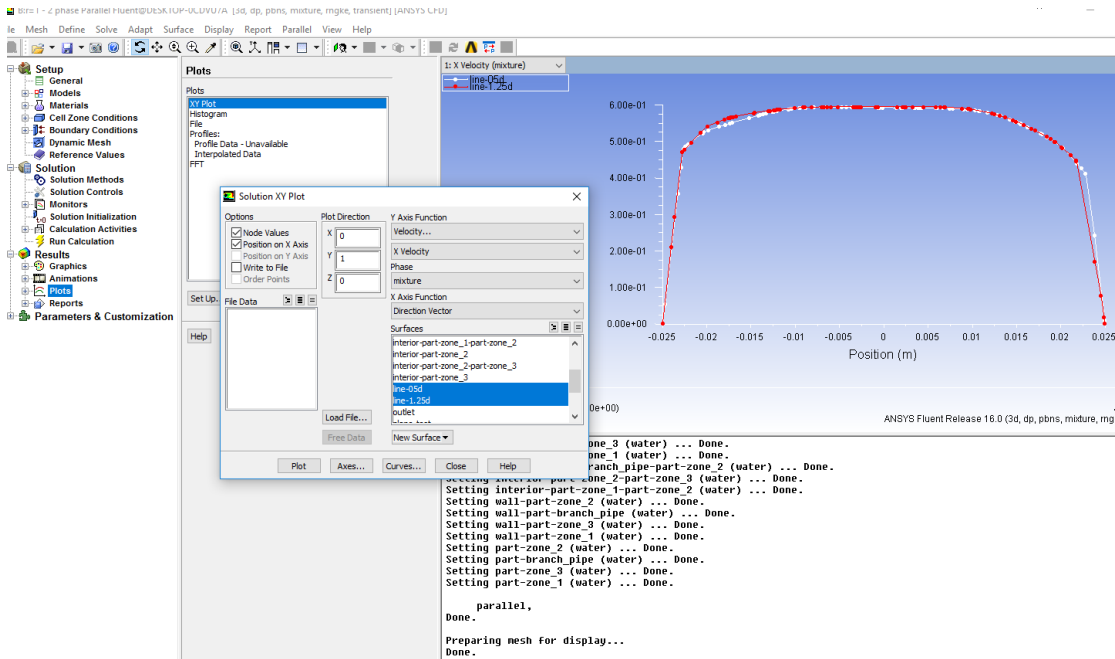
• Απεικόνιση κλάσματος ατμού



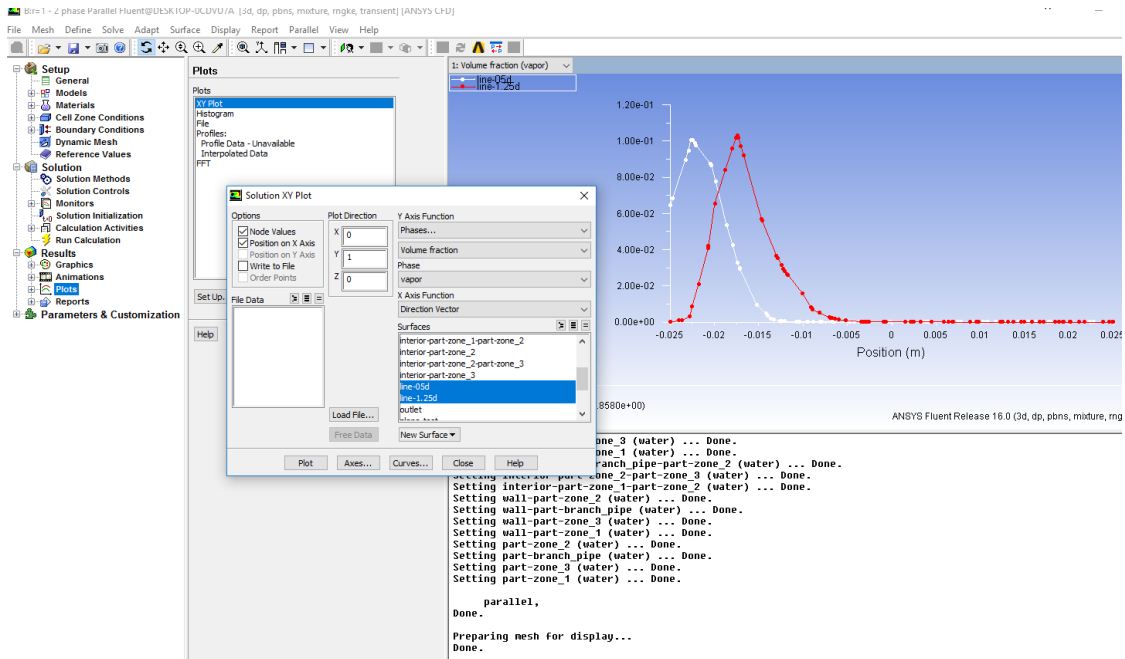
• Διάγραμμα στατικής πίεσης στις γραμμές ελέγχου



• Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας x.



- Διάγραμμα κλάσματος όγκου ατμού.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

1. V.S. Naik-Nimbalkar, A.W.Patwardhan, I.Banerjee, G.Padmakumar, G.Vaidyanathan, 2010. Thermal mixing in T-junctions, *Chemical Engineering Science* 65(2010)5901–5911.
2. McFarland, B.L., Landy, D.G., 1980. Turbulent mixing of two streams in a 90° tee. *AIChE Symposium* 76, 351–358.
3. Maruyama, T., Suzuki, S., Mizushima, T., 1981. Pipeline mixing between two fluid streams meeting at a T-junction. *International Chemical Engineering* 21 (2), 205–212.
4. Maruyama, T., Mizushima, T., Hayashiguchi, S., 1982. Turbulent mixing of two fluid streams at an oblique branch. *International Chemical Engineering* 22 (2), 287–294.
5. Andreopolus, J., 1983. Heat transfer measurements in a heated jet-pipe flow issuing in to a cold cross stream. *Physics of fluids* 26, 3201–3210.
6. Sherif, S.A., Pletcher, R.H., 1989. Measurements of the thermal characteristics of heated turbulent jets in crossflow. *Journal of Heat Transfer* 111, 897–903.
7. Zughbi, H.D., Khokhar, Z.H., 2003. Mixing in pipelines with side and opposed tees. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 42, 5333–5344.
8. Igarashi, M., Tanaka, M., 2003. Study on fluid mixing phenomena for evaluation of thermal striping in a mixing tee. In: *Proceedings of the 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10)*, Korea.
9. Noguchi, H., Tanimoto, K., 2003. Study on high cycle fatigue evaluation for thermal striping in mixing tees with hot and cold water (3). In: *Proceedings of the 11th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-11)*, Japan.
10. Hu, L., Kazimi, M., 2006. LES benchmark study of high cycle temperature fluctuations caused by thermal striping in a mixing tee. *International Journal of Heat and Fluid flow* 27, 54–64.
11. Walker, C., Simiano, M., Zborayb, R., Prassera, H.M., 2009. Investigations on mixing phenomena in single-phase flow in a T-junction geometry. *Nuclear Engineering and Design* 239, 116–126.

Ιστοσελίδες

1. ANSYS User's Guide

- (<http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>)
2. <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+-+Bifurcating+Artery>
 3. Flow in pipes
(https://www.uio.no/studier/emner/matnat/math/MEK4450/h11/undervisningsmateriale/modul-5/Pipeflow_intro.pdf)
 4. Section 1: Fluid Flow in Pipes
(http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/CIVE2400/pipeflow2_2008a.pdf)
 5. Introduction to modelling multiphase flows
(<http://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/chp18.pdf>)
 6. Slug Flow CFD tutorial using Multiphase VOF model | Fluent tutorial
(<https://www.youtube.com/watch?v=1uX5EpyyRUM>)
 7. Using the Mixture and Eulerian MultiphaseModels
([https://acadinfo.central.ntua.gr/sem/semreq.nsf/9086be3e36235a74c2256f23002cc907/e168be02c0bf54f9c2257505003b3e66/\\$FILE/MULTIPHASE\(I-19\).pdf](https://acadinfo.central.ntua.gr/sem/semreq.nsf/9086be3e36235a74c2256f23002cc907/e168be02c0bf54f9c2257505003b3e66/$FILE/MULTIPHASE(I-19).pdf))