

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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ
ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΣΚΟΥΡΑΣ ΕΥΓΕΝΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην υπολογιστική ρευστομηχανική ανάλυση ροής φυσικού αερίου σε αγωγούς υψηλής πίεσης.

Χωρίς να χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση είναι γνωστό ότι οι κυβερνήσεις και οι μεγάλες βιομηχανίες αναζητούν τρόπους για ένα καθαρότερο περιβάλλον και μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Το φυσικό αέριο έχει αναγνωρισθεί παγκοσμίως ως το πιο καθαρό αέριο καύσιμο. Στατιστικά στοιχεία υποδεικνύουν ότι η χρήση φυσικού αερίου στις μεγαλουπόλεις είναι καθοριστική αφού αντικαθιστά μορφές ενέργειας που είναι βασισμένες στον άνθρακα και είναι ιδιαίτερος ρυπογόνος. Η μεταφορά του φυσικού αερίου παίζει καθοριστικό ρόλο. Για παράδειγμα στις ΗΠΑ υπάρχει ένα τεράστιο και πυκνό δίκτυο σωληνώσεων μήκους 400.000 χιλιομέτρων που συνδέει τις περιοχές όπου εξάγεται το αέριο (πχ. Αλάσκα, Τέξας κτλ.) με τις βιομηχανικές βορειοανατολικές περιοχές. Επίσης, να αναφερθεί ότι η μεταφορά του φυσικού αερίου γίνεται και με ειδικά πλοία όμως πρέπει πρώτα να υγροποιηθεί. Συνεπώς, οι αυξανόμενες τάσεις της τιμής του πετρελαίου δημιουργεί νέες ενεργειακές συνθήκες και είναι αναγκαία μια καινούργια ενεργειακή πολιτική που θα περιλαμβάνει το φυσικό αέριο. Συνεπώς, είναι αναγκαία η ανάπτυξη υποδομών και δικτύου που θα μεταφέρει το φυσικό αέριο σε όσο το δυνατόν περισσότερες περιοχές.

Η μελέτη και η έρευνα για την εκτίμηση, γνώση και βελτίωση των δικτύων μεταφοράς είναι ένας σημαντικός κλάδος της βιομηχανικής και πανεπιστημιακής έρευνας. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ένα από τα καλύτερα πακέτα υπολογιστικής ρευστομηχανικής που κυκλοφορούν και είναι το ANSYS Fluent 16.0 και προσομοιώνει διάφορα φαινόμενα ρευστομηχανικής. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ιστορική αναδρομή καθώς και σημαντικά στοιχεία για το φυσικό αέριο και την ροή του σε αγωγούς. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σημαντικά στοιχεία πολυφασικών ροών καθώς το φυσικό αέριο είναι στην ουσία ένα ρευστό που αποτελείται από πολλές διαφορετικές φάσεις. Επίσης, γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στον κλάδο της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Από το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα υπολογιστικά μοντέλα (μονοφασική και διφασική ροή) με τροποποιημένες γεωμετρίες (αγωγός χωρίς πλάκα πτώσης πίεσης – αγωγό με πλάκα πτώσης πίεσης). Έπειτα ακολουθούν τα αποτελέσματα και ο σχολιασμός αυτών.

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

Σεπτέμβριος 2017

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

Παναγιωτόπουλος Βασίλης

Σταυρόπουλος Γιάννης

.....

.....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η εκμάθηση ενός γνωστού προγράμματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής (ANSYS Fluent) και η εκτέλεση προσομοιώσεων για τη ροή φυσικού αερίου εντός αγωγού διαφορετικής εσωτερικής διαμόρφωσης υπό συνθήκες υψηλής πίεσης. Η προσέγγιση του φυσικού αερίου γίνεται αρχικά με τον τρόπο που προτείνεται σε βιβλιογραφικές πηγές, δηλαδή το φυσικό αέριο θεωρείται μόνο μεθάνιο. Στη συνέχεια έγινε προσέγγιση του φυσικού αερίου ως διφασικό μίγμα, με δευτερεύουσα φάση το άζωτο.

Κάθε περίπτωση εξετάστηκε σε δύο διαφορετικά διαμορφωμένους αγωγούς. Στην πρώτη διαμόρφωση ο αγωγός δεν έχει εσωτερικά πλάκα στομίου όπου μειώνεται η διατομή και αυξάνεται εσωτερικά η πίεση. Η δεύτερη διαμόρφωση έχει πλάκα στόμιο και παρατηρούνται ενδιαφέροντα φαινόμενα στο σημείο αυτό. Αρχικά παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού και διακριτοποίησης σε τετράπλευρα κελιά των δύο διαφορετικών γεωμετριών και στη συνέχεια όλες οι συνθήκες που ορίζονται στο Fluent πριν την έναρξη των υπολογισμών.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ιστορική αναδρομή για την εξέλιξη του φυσικού αερίου, αναφέρονται οι κατηγορίες αερίων και γίνεται μια εκτενέστερη περιγραφή στο τρόπο σχηματισμού και τις μορφές του φυσικού αερίου. Στη συνέχεια περιγράφεται η ροή ρευστών σε αγωγούς καθώς και οι διαφορές στην περίπτωση ροής φυσικού αερίου. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στον κλάδο των πολυφασικών ροών, στις εφαρμογές του φυσικού αερίου στην βιομηχανία και μια βασική εισαγωγή στον κλάδο της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Τέλος, περιγράφονται τα μοντέλα τύρβης που χρησιμοποιήθηκαν στην πτυχιακή.

Τα τελευταία κεφάλαια παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τρεις διαφορετικές παροχές ροής, 40, 80 και 120 kg/s για δισδιάστατο αγωγό. Ωστόσο, για καλύτερες συγκρίσεις και εξαγωγή συμπερασμάτων οι καλύτερες διφασικές περιπτώσεις προσομοιώνονται και σε τρισδιάστατη γεωμετρία. Οι προσομοιώσεις γίνονται με το πιο ρεαλιστικό διφασικό μοντέλο Volume Of Fluid (VOF) και χρησιμοποιούνται τα τρία k-ε μοντέλα τύρβης.

Τέλος, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν την πτώση πίεσης, την κατανομή της ταχύτητας και το κλάσμα όγκου του αζώτου εντός του αγωγού και συγκεκριμένα στην κεντρική ροϊκή γραμμή που συνδέει το κέντρο της εισόδου με την έξοδο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	vi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	2
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ.....	2
1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΕΡΙΩΝ.....	3
1.3 ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ.....	4
1.3.1 Σχηματισμός Φυσικού Αερίου.....	5
1.3.2 Μορφές Φυσικού αερίου.....	6
1.4 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ.....	6
1.4.1 Υποθέσεις κίνησης ιδανικών ρευστών.....	6
1.4.2 Εξίσωση διατήρησης της μάζας.....	7
1.4.3 Εξίσωση Bernoulli.....	8
1.5 ΡΟΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	11
2.1 ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΕΣ ΡΟΕΣ.....	11
2.1.1 Είδη πολυφασικών ροών σε αγωγούς.....	12
2.1.2 Ροϊκά μεγέθη σε διφασικές ροές.....	15
2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ.....	21
2.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (CFD).....	22
2.4 ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΡΟΕΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΥΡΒΗΣ.....	22
2.4.1 Το μοντέλο standard k-ε.....	23
2.4.2 Το μοντέλο RNG k-ε.....	23
2.4.3 Το μοντέλο Realizable k-ε.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	25
3.1 ΜΟΝΤΕΛΟ 1: ΑΓΩΓΟΣ ΜΕ ΠΛΑΚΑ.....	25
3.2 ΜΟΝΤΕΛΟ 2: ΑΓΩΓΟΣ ΧΩΡΙΣ ΠΛΑΚΑ.....	25
3.3 Pre – Process – ΠΡΟ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	26

3.4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ	27
3.5	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ANSYS FLUENT	28
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	34
4.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 1: ΑΓΩΓΟΣ ΜΕ ΠΛΑΚΑ (ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ)	34
4.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 1: ΑΓΩΓΟΣ ΜΕ ΠΛΑΚΑ (ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ)	42
4.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 2: ΑΓΩΓΟΣ ΧΩΡΙΣ ΠΛΑΚΑ (ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ)	53
4.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 2: ΑΓΩΓΟΣ ΧΩΡΙΣ ΠΛΑΚΑ (ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ)	63
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	69
5.1	ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΧΩΡΙΣ ΠΛΑΚΑ – ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ	69
5.2	ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ ΠΛΑΚΑ – ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ	78
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	90
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παγκόσμια αύξηση των απαιτήσεων για θερμότητα και ενέργεια έχει τεράστια επίδραση στη μείωση των ορυκτών πόρων και στην τάση αύξησης των τιμών τους. Είναι απαραίτητο να τα αντιμετωπίσουμε υπεύθυνα. Μία από αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιεί φυσικό αέριο ως πηγή ενέργειας και θερμότητας. Σήμερα έχουν εξ ορυχθεί δισεκατομμύρια κανονικοποιημένα κυβικά μέτρα φυσικού αερίου που μεταφέρονται και χρησιμοποιούνται κάθε μέρα σε όλο τον κόσμο. Ο πιο συνηθισμένος τύπος μέτρησης ροής, που χρησιμοποιείται σε αγωγούς υψηλής πίεσης, μετράει χρησιμοποιώντας τη διαφορά πίεσης, η οποία χρησιμοποιεί κυρίως πλάκες στομίων που εισάγονται στους αγωγούς. Η βιβλιογραφία προσπαθεί να επικεντρωθεί στη συμπεριφορά του φυσικού αερίου που ρέει μέσω ενός αγωγού υψηλής πίεσης με μια εγκατεστημένη πλάκα στομίου που χρησιμοποιείται ως μετρητής ροής. Αυτός ο τύπος μέτρησης εξακολουθεί να είναι κοινός για μετρήσεις ροής στις γραμμές μεταφοράς φυσικού αερίου της Σλοβακίας και άλλων ευρωπαϊκών χωρών.

Το Φυσικό Αέριο θεωρείται σε παγκόσμια κλίμακα από τα πιο καθαρά καύσιμα, το οποίο συμβάλλει στην καταπολέμηση της μόλυνσης του περιβάλλοντος και συνεπώς στην καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Στις μεγάλες πόλεις, όπου οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι υψηλές, έχει καθοριστική συμβολή αφού αντικαθιστά άλλες πιο ακριβές και ρυπογόνες μορφές ενέργειας. Γι' αυτό το λόγο οι πιο πολλές κυβερνήσεις προσπαθούν να κλείσουν συμφωνίες με ευνοϊκούς όρους για την εισαγωγή και χρήση του Φυσικού Αερίου στις χώρες τους.

Η παρούσα πτυχιακή στοχεύει στην υπολογιστική μελέτη ροής φυσικού αερίου σε πραγματική γεωμετρία χωρίς πλάκα-μετρητή και στη συνέχεια με πλάκα-μετρητή. Επίσης, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1, το φυσικό αέριο είναι μίγμα συστατικών. Στην πρώτη περίπτωση θα εξεταστεί ως μονοφασικό ρευστό (μόνο μεθάνιο που αποτελεί το 98.39% του Φ.Α.) και στο επόμενο σετ προσομοιώσεων ως μίγμα τυποποιημένη ογκομετρική αναλογία.

Πίνακας 1: Σύσταση φυσικού αερίου

Αέριο	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂
Vol(%)	98.39	0.44	0.16	0.07	0.03	0.84	0.07

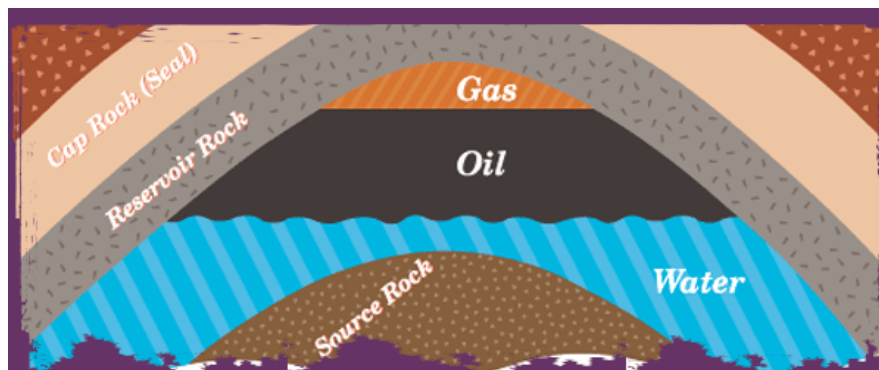
Στην πρώτη περίπτωση θα γίνει η υπόθεση ότι το φυσικό αέριο που χρησιμοποιείται στην ανάλυση θα έχει φυσικές και χημικές ιδιότητες όπως το καθαρό μεθάνιο, λόγω των σχεδόν ίδιων χημικών συνθέσεων. Ως κύριες μεταβλητές αποτελεσμάτων θα παρουσιαστούν εικόνες από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις διαφορές πίεσης, τα πεδία πίεσης και τις ροές ταχύτητας ανάμεσα όταν υπάρχει και όταν δεν υπάρχει πλάκα. Για αυτές τις αναλύσεις ετοιμάστηκαν 2 μοντέλα. Το μη παραμορφωμένο μοντέλο δεν φορτώνεται με τη δράση οποιωνδήποτε τάσεων. Η γεωμετρία του παραμορφωμένου μοντέλου επηρεάζεται από τη δράση της διαφοράς πίεσης, η οποία προκαλεί μετατόπιση και παραμόρφωση στην πλάκα του στομίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Το φυσικό αέριο συναντάται σε κοιτάσματα πετρελαίου και συγκεκριμένα σε κοιλότητες πάνω από αυτό, καθώς οι γεωλογικές συνθήκες (πιέσεις κτλ.) ευνοούν την δημιουργία του. Η άσφαλτος και τα βιτουμένα είναι από τα πιο παλιά γνωστά προϊόντα του πετρελαίου. Ενδείξεις για διαρροή Φυσικού Αερίου βρέθηκαν μεταξύ 6000 – 2000 π.Χ. στις χώρες Ιράν – Ιράκ. Στην Κίνα το φυσικό αέριο αναφέρεται περίπου στο 900 π.Χ., όπου ανοίχθηκαν περίπου 1000 φρέατα και μετέφεραν ποσότητες αερίου μέσα σε αγωγούς από ξύλο μπαμπού. Αντιθέτως στην Ευρώπη, και συγκεκριμένα στην Αγγλία, η πρώτη αναφορά για χρήση φυσικού αερίου αναφέρονται πολλά χρόνια μετά και, συγκεκριμένα, περίπου το 1660 μ.Χ.

Υπήρξε ένα μεταβατικό στάδιο με σχετική στασιμότητα στη χρήση του φυσικού αερίου και περίπου το 1670 μ.Χ., ύστερα από απόσταση ανθράκων (ανθρακαέριο – φωταέριο), το οποίο χρησιμοποιήθηκε μετά από αρκετά χρόνια (1790), ανακαλύφθηκε το αέριο που μπορεί να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί για να χρησιμοποιηθεί σε μηχανές εσωτερικής καύσης ή για φωτισμό. Το 1821 η πόλη Φριντόνια στην περιφέρεια της Νέας Υόρκης φωτιζόταν με Φυσικό Αέριο, αλλά η χρήση του εξακολουθούσε να είναι περιορισμένη, γιατί δεν είχε επινοηθεί τρόπος για τη μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις και έτσι, επί έναν αιώνα, το Φυσικό Αέριο παρέμενε στο περιθώριο της βιομηχανικής εξέλιξης, που βασίστηκε στον άνθρακα και το πετρέλαιο. Η μέθοδος μεταφοράς του Φυσικού Αερίου με αγωγούς εξελίχθηκε ιδιαίτερα στη δεκαετία του 1920 και αποτέλεσε ένα σημαντικό στάδιο στη χρήση του φυσικού αερίου.



Εικόνα 1.1: Κοίτασμα φυσικού αερίου

(Πηγή: http://www.pgesafetyeducation.com/school/ngas_safety-smart/66721_natural_gas_science/dinosaurs.html)

Οι πρώτες αναφορές για διαδεδομένη χρήση του φυσικού αερίου στην Γαλλία παρουσιάζονται μέχρι το 1930 και όλες οι μεγάλες και μικρομεσαίες πόλεις αποκτούν δίκτυο διανομής αερίου το οποίο τροφοδοτούσε ένα τοπικό εργοστάσιο. Όμως, η εμφάνιση στην

αγορά μεγάλων ποσοτήτων υγρών ή αέριων παραγώγων πετρελαίου συντέλεσε ως ένα σημείο στην ανάσχεση της επεκτάσεως διανομής του αερίου πόλεως με δίκτυο σωληνώσεων. Ιδιαίτερα επιχειρήσεις πετρελαίου που διέθεταν αυξημένες ποσότητες προπανίου και βουτανίου, ανέπτυξαν τη διοχέτευση στην κατανάλωση υγροποιημένου αερίου (Υγραερίου) σε φιάλες, κυρίως στις αγροτικές περιοχές.

Μετά το Β' παγκόσμιο πόλεμο και την ανακάλυψη σημαντικών κοιτασμάτων φυσικών αερίων στην Αφρική, Ασία, Ρωσία και, Ευρώπη, άλλαξε εντελώς η φυσιογνωμία της βιομηχανίας του φωταερίου. Ο λιθάνθρακας, που ήταν η βασικότερη πηγή παραγωγής φωταερίου, αντικαταστάθηκε εξ' ολοκλήρου από τα υγρά ή αέρια παράγωγα του πετρελαίου. Έτσι, λοιπόν, το φυσικό αέριο και το υγραέριο ανακτά το χαμένο έδαφος τόσων χρόνων και καταλαμβάνουν την πρώτη θέση στις πωλήσεις. Σαν συνέπεια όλων αυτών, ενώ το 1960 η παγκόσμια παραγωγή αερίων (Φυσικού Αερίου και υγραερίου) ήταν 470 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα, το 1979 ήταν 1.459 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Τέλος, φτάνοντας στη σημερινή πραγματικότητα, παρατηρούμε τη χρήση του φυσικού αερίου, αλλά και του υγραερίου, να επεκτείνεται τόσο σε οικιακές όσο και σε βιομηχανικές και εμπορικές χρήσεις.

1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΕΡΙΩΝ

Πριν παρουσιαστούν τα σημαντικά χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου είναι σημαντικό να γίνει μια σύντομη αναφορά στην κατηγοριοποίηση – διάκριση των αερίων καυσίμων. Όλα τα αέρια, θα μπορούσε να δεχθεί κανείς, είναι μίγματα καυσίμων και αδρανών (μη καυσίμων) αερίων. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των αερίων με βάση την ανώτερη θερμογόνο δύναμη καυσίμου κατά DIN 1340 (9.75) (Deutsches Institut für Normung, (Ελ. Γερμανικός Οργανισμός Τυποποίησης)).

Πίνακας 2: Κατηγορίες αερίων κατά DIN 1340

Ομάδα	Ανώτ. Θερμ. Δύναμη (H _o) MJ/N _m ³ Kcal/N _m ³	Κύρια Συστατικά	Παραδείγματα	
1	≤ 10	>2400	N ₂ , CO, H ₂	Αέριο υψικαμίνων
2	10-30	2400-7150	N ₂ , CO, H ₂ , CH ₄	Υδαταέριο, αέριο πόλεως
3	30-60	7150-14300	CH ₄ , C _n H _m	Φυσικό αέριο
4	>60	>14300	C _n H _m	Προπάνιο, βουτάνιο

Επιπλέον υπάρχει και η ακόλουθη κατηγοριοποίηση:

- Πτωχά ή Ασθενή αέρια (H_o ≤ 9 MJ/Nm³ = 2150 kcal/Nm³)
- Μέσα αέρια (H_o = 9 έως 15 MJ/Nm³ = 2150 έως 3600 kcal/Nm³)
- Ισχυρά αέρια (H_o = 15 έως 23 MJ/Nm³ = 3600 έως 5500 kcal/Nm³)
- Πλούσια αέρια (H_o = 23 MJ/Nm³ = 5500 kcal/Nm³)

Να σημειωθεί η διαφορά στις μονάδες μέτρησης:

- Nm³: normal cubic meter (κανονικοποιημένα κυβικά μέτρα) = όγκος σε κανονικές συνθήκες (1 atm & 15 degC)
- m³ = actual cubic meter (πραγματικά κυβικά μέτρα) = όγκος σε τρέχουσα κατάσταση (πιο δύσκολο να προβλεφθεί)

Τα αέρια καύσιμα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες που συνδέουν την προέλευσή τους με τον τρόπο χρήσης τους. Σύμφωνα με το φύλλο εργασίας G260 του DVGW (Deutsche Vereinigung des Gas und Wasserfaches, (Ελ. Γερμανική Τεχνικοεπιστημονική

Ένωση για το Αέριο και Νερό), τα αέρια διακρίνονται σε τρεις οικογένειες και κατά περίπτωση σε δύο ομάδες, όπως φαίνεται στο Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Οικογένειες αερίων
[Πηγή: Λέφας, 2004]

Οικογένεια	Σύμβολο	Είδος αερίου	Ομάδα
1	S	Αέριο πόλης, τηλαέριο	A:αέριο πόλης B: αέριο κοκερίας, τηλαέριο
2	N	Φυσικό Αέριο	L: Πτωχό φυσικό αέριο H: Πλούσιο φυσικό αέριο και τα εναλλάξιμα προς αυτά
3	F	Υγραέριο	-Προπάνιο, βουτάνιο -Μίγματα αυτών

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν οριστεί όροι και συμβολισμοί, όπως οι ακόλουθοι:

- Cryogenetics: αέρια, που υγροποιούνται σε θερμοκρασίες μικρότερες των -150°C
- LNG: Liquefied Natural Gas = υγροποιημένο δια ψύξεως φυσικό αέριο
- LPG: Liquefied Petroleum Gas = υγροποιημένο πετρελαϊκό αέριο ήτοι υγραέριο, όπως βουτάνιο ή προπάνιο
- SNG: Substitute (or synthetic) Natural Gas = υποκατάστατο (ή συνθετικό) φυσικό αέριο

Επίσης, στον Πίνακα 4 περιλαμβάνονται στοιχεία για την οικογένεια 3. Συνήθως τα μίγματα αποτελούνται από 70-90% προπάνιο και 10-30% βουτάνιο. Αναφέρεται ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες η εξάτμιση γίνεται δυσκολότερη από το βουτάνιο γι' αυτό και πρέπει να γίνεται πρόσμιξη σε μικρές αναλογίες.

Πίνακας 4: Στοιχεία για την οικογένεια 3 κατά DVGW – G260 (1.73)
[Πηγή: Λέφας, 2004]

Είδος αερίου	Σύμβολο	Κύρια συστατικά κατά DIN 51622 (11.73)
Προπάνιο	C_3H_8	95% κατά μάζα($\text{C}_3\text{H}_8 + \text{C}_4\text{H}_6$) περισσότερο C_3H_8
Βουτάνιο	C_4H_{10}	95% κατά μάζα($\text{C}_4\text{H}_{10} + \text{C}_4\text{H}_8$) περισσότερο C_4H_{10}
Μίγμα αυτών	$\text{C}_3\text{H}_8 + \text{C}_4\text{H}_{10}$	60% κατά μάζα (max) υδρογονάνθρακες C_4
Πίεση προ των συσκευών $P_e = 50 \text{ mbar}$		

1.3 ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ

Το φυσικό αέριο είναι ένα καύσιμο (αέριο) μίγμα υδρογονανθράκων που αποτελείται από μεθάνιο, κατά κύριο λόγο, και σε μικρότερες αναλογίες από προπάνιο, αιθάνιο, βουτάνιο και πεντάνιο. Συναντάται σε υπόγειες κοιλότητες-κοιτάσματα πετρελαίου σε πορώδη πετρώματα. Σημαντικό ρόλο στη σύστασή του διαδραματίζει η προέλευσή του και, συγκεκριμένα, αν προέρχεται από κοιτάσμα φυσικού αερίου ή αν προκύπτει από κοιτάσμα πετρελαίου. Μπορεί να βρεθεί μόνο του ή με αργό πετρέλαιο και συμπυκνώματα υδρογονανθράκων - αερίων που υγροποιούνται σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση και μοιάζουν αρκετά με κηροζίνη. Με αργό ρυθμό, με την πάροδο 200 έως 400 εκατομμυρίων ετών, η πίεση και η θερμότητα από την γη μετέτρεψαν τα υπολείμματα φυτών και μικρών θαλάσσιων ζώων, που θάφτηκαν κάτω από ιζήματα, σε πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Η εμπορική αξιοποίησή του ξεκίνησε περίπου το 1810 ως καύσιμο σε λάμπες φωτισμού, ενώ

μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου κατασκευάστηκαν τα πρώτα δίκτυα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου. Αν και το φυσικό αέριο έχει μακρά ιστορία χρήσης ως πηγή ενέργειας, σήμερα το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής του έρχεται από τις ΗΠΑ και την Ρωσία. Σημειώνεται ότι η αντιστοίχιση των m^3 με το Mm^3 είναι: $1000m^3 = 1 Mm^3$.

Producers Mm: World

Χώρα	Mm3	% παραγωγής
Ρωσία	656.290	22,0
ΗΠΑ	524.368	17,6
Καναδάς	189.179	6,4
Ιράν	98.123	3,3
Νορβηγία	91.834	3,1
Αλγερία	88.785	3,0
Μ.Βρετανία	83.821	2,8
Ολλανδία	77.295	2,6
Ινδονησία	72.096	2,4
Τουρκμενιστάν	67.052	2,3

Εικόνα 1.2: Σημαντικότερες χώρες παραγωγής φυσικού αερίου (2006)
[Πηγή: <http://www.allaboutenergy.gr/NaturalGas.html>]

Η σύσταση του φυσικού αερίου που εισάγεται στην Ελλάδα σύμφωνα με τα στοιχεία της ΔΕΠΑ (Δημόσια Επιχείρηση Αερίου ΑΕ) παρουσιάζεται στην ακόλουθη Εικόνα 1.3.

Συστατικά	% κατά όγκο σύσταση
Μεθάνιο (CH_4)	70-90
Αιθάνιο (C_2H_6)	5-15
Προπάνιο (C_3H_8) και Βουτάνιο (C_4H_{10})	< 5
CO_2 , N_2 , H_2S , κτλ.	μικρότερες ποσότητες

Εικόνα 1.3: Σύσταση εισαγόμενου στην Ελλάδα φυσικού αερίου.

1.3.1 Σχηματισμός Φυσικού Αερίου

Όπως προαναφέρθηκε το φυσικό αέριο είναι ένα ορυκτό καύσιμο και στην ουσία αποτελεί προϊόν της επεξεργασίας κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες διάφορων υπολειμμάτων ζώων, φυτών και οργανισμών πριν από χιλιάδες χρόνια. Παρουσιάζονται οι παράγοντες που συμβάλλουν στον σχηματισμό του φυσικού αερίου και είναι οι ακόλουθοι:

- Τα βακτήρια
- Το φυτοπλαγκτόν,
- Το ζωοπλαγκτόν και
- Τα χερσογενή ανώτερα φυτά.

1.3.2 Μορφές Φυσικού αερίου

✓ Ξηρό φυσικό αέριο

Πρόκειται για το φυσικό αέριο του οποίου τα συστατικά δεν μπορούν να συμπυκνωθούν σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Σαν αποτέλεσμα το αέριο δεν περιέχει πολλούς υδρογονάνθρακες οι οποίοι είναι βαρύτεροι από το αιθάνιο, όπως το προπάνιο και το βουτάνιο.

✓ Υγρό φυσικό αέριο

Πρόκειται για το φυσικό αέριο που συναντάται στα κοιτάσματα (σε αέρια ή υγρή μορφή) γιατί περιέχει υδρογονάνθρακες που περιέχουν ενώσεις που συμπυκνώνονται εύκολα (ενώσεις άνθρακα και υδρογόνου που είναι πιο βαριές από το αιθάνιο όπως το αιθάνιο και το προπάνιο).

Τα αέρια αυτά χαρακτηρίζονται συνήθως από τον όγκο ή το βάρος των συμπυκνωμένων αερίων που περιέχονται σ' ένα δοθέντα όγκο αερίου. Ο αριθμός αυτός, που υπολογίζεται για όγκους σε θερμοκρασία 15 °C και πίεση 750 mmHg, εκφράζεται συνήθως σε γαλόνια ανά χίλια κυβικά πόδια ή ως gr/m^3 . Ένα αέριο χαρακτηρίζεται σαν υγρό, αν περιέχει περισσότερα από 39,9L συμπυκνωμένων αερίων σε 1000 m^3 . Τα συμπυκνώσιμα προϊόντα ανακτώνται και εμφιαλώνονται υπό μικρή πίεση (προπάνιο και βουτάνιο).

1.4 ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ

Η κίνηση ενός ρευστού σε μια συγκεκριμένη περιοχή του χώρου, η οποία ονομάζεται πεδίο ροής, αναφέρεται ως ροή. Ως σημείο αναφοράς για τη μελέτη της ροής ρευστού λαμβάνεται ένας στοιχειώδης όγκος-σωματίδιο του ρευστού και εξετάζεται η τροχιά που εκτελεί κατά την κίνησή του στο πεδίο ροής. Η τροχιά αυτή ονομάζεται γραμμή ροής. Μερικά χαρακτηριστικά της κίνησης ενός στοιχειώδους όγκου σε ένα πεδίο ροής είναι τα εξής:

- Κατά την κίνησή τους η ταχύτητά τους μπορεί να μεταβάλλεται σε μέτρο και κατεύθυνση.
- Η ταχύτητα σε κάθε σημείο είναι εφαπτόμενη στην γραμμή ροής.
- Οι γραμμές ροής δεν γίνεται να τέμνονται σε κάποιο σημείο καθώς το σωματίδιο που θα έφτανε στο σημείο τομής θα είχε την ίδια στιγμή δύο ταχύτητες, πράγμα αδύνατο.

1.4.1 Υποθέσεις κίνησης ιδανικών ρευστών

Όταν ο στοιχειώδης όγκος-σωματίδιο του ρευστού περνά από ένα τυχαίο σημείο του πεδίου ροής, διαγράφει πάντα την ίδια τροχιά ροής και, παράλληλα, η ταχύτητά του στο συγκεκριμένο σημείο είναι ανεξάρτητη του χρόνου, τότε η ροή ονομάζεται μόνιμη (steady).

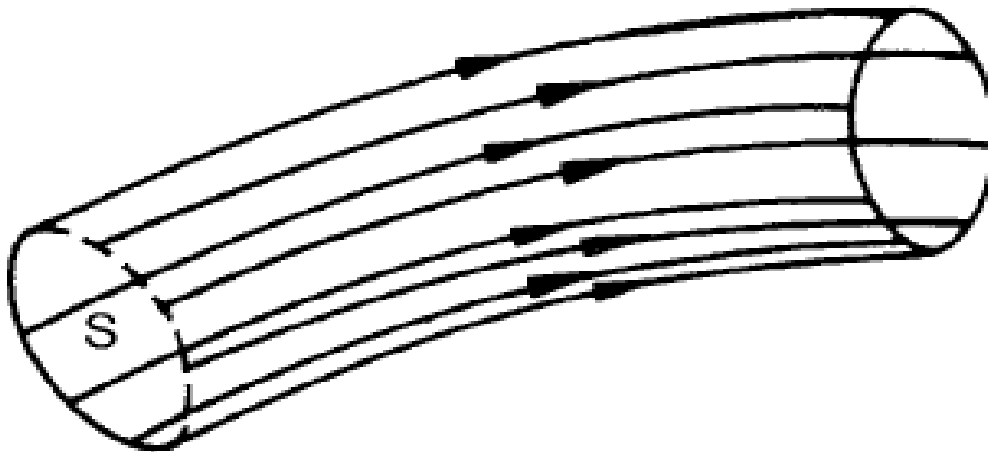
Η ειδική κατηγορία-περίπτωση όπου η μόνιμη ροή γίνεται σε παράλληλα στρώματα, όπου το κάθε ένα έχει συγκεκριμένη ταχύτητα, τότε η ροή ονομάζεται στρωτή (laminar).

Όταν η ροή εξαρτάται από το χρόνο, φαινόμενο που συναντάται στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, τότε ο στοιχειώδης όγκος του ρευστού που διασχίζει το συγκεκριμένο σημείο του πεδίου ροής μπορεί είτε να ακολουθεί διαφορετικές τροχιές ροής σε τυχαίες χρονικές στιγμές, είτε να σχηματίζει στροβίλους. Σε αυτή την περίπτωση η ροή ονομάζεται τυρβώδης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση εσωτερικής τριβής και παραγωγή θερμότητας.

Μια συνηθισμένη παραδοχή που ακολουθείται σε ροή ρευστών είναι η παραδοχή των ασυμπίεστων ρευστών. Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά η πυκνότητα παραμένει σταθερή σε όλο το ρευστό. Να σημειωθεί ότι και ένα αέριο μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασυμπίεστο, όταν η διαφορά πίεσης μεταξύ των περιοχών του δεν είναι μεγάλη.

Οι παραδοχές συνεχίζονται με την υπόθεση ότι η ροή δεν συναντά εσωτερική αντίσταση (non-viscous flow). Το ιξώδες είναι το μέτρο της εσωτερικής αντίστασης κατά τη ροή ενός ρευστού. Το ιξώδες είναι ανάλογο της τριβής μεταξύ της κίνησης δύο στέρεων σωμάτων. Η εσωτερική τριβή σε ένα ρευστό προκαλεί διαμητικές τάσεις όταν ένα στρώμα ρευστού κινείται ως προς ένα άλλο ρευστό ή αντικείμενο (πχ. Ροή μέσα σε αγωγό). Τις περισσότερες φορές, για λόγους ευκολίας οι τάσεις αυτές αγνοούνται, καθώς θεωρούνται αμελητέες συγκριτικά με αυτές που προέρχονται από διαφορά πίεσης ή την βαρύτητα.

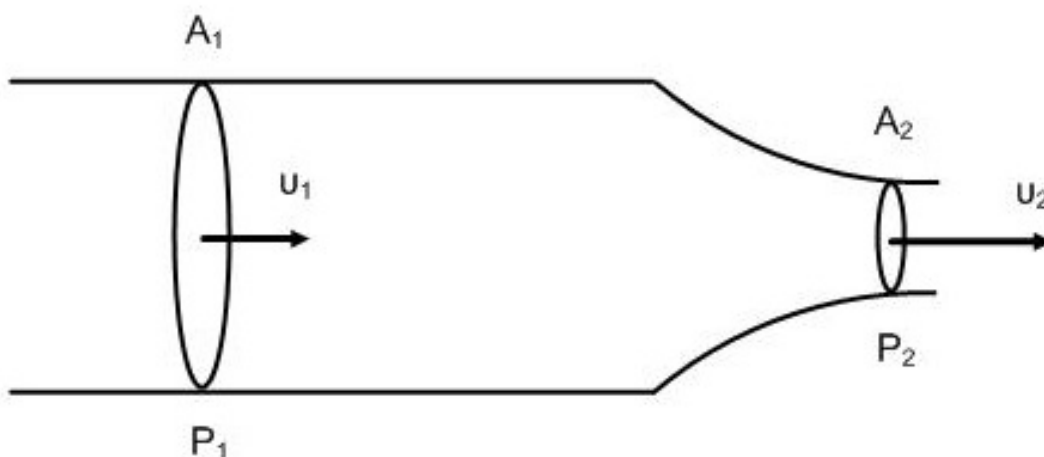
Για την μελέτη της κίνησης ρευστού σε έναν αγωγό χρησιμοποιείται η απομόνωση της κίνησης ενός σωματιδίου σε έναν νοητό σωλήνα-φλέβα που, στην ουσία, αποτελείται από τις γραμμές ροής. Το σωματίδιο ρευστού που ακολουθεί την φλέβα ροής δεν μπορεί να δραπέτεύσει από τα τοιχώματα, καθώς αν συνέβαινε αυτό θα υπήρχε τομή ρευματικών γραμμών.



Εικόνα 1.4: Σωλήνας – φλέβα ροής

1.4.2 Εξίσωση διατήρησης της μάζας

Η βασικότερη εξίσωση που χαρακτηρίζει την ροή ρευστού σε έναν αγωγό, είτε με σταθερή είτε με μεταβλητή διατομή, είναι η εξίσωση συνέχειας.



Εικόνα 1.5: Αγωγός μεταβλητής διατομής

P_1 : Το ρευστό κινείται με ταχύτητα u_1 .

Σε ένα χρονικό διάστημα dt το σωματίδιο του ρευστού που μελετάται θα διανύσει απόσταση $u_1 dt$ και όγκος $dV = A_1 u_1 dt$ θα περάσει από την διατομή A_1 . Εφόσον το ρευστό είναι

ασυμπίεστο, ο ίδιος όγκος θα περάσει από τη διατομή A_2 . Σε αυτό το σημείο η ταχύτητα είναι u_2 και ίση με:

$$dV = A_1 u_1 dt = A_2 u_2 dt \quad (1)$$

ή

$$Q = \frac{dV}{dt} = Au = \text{σταθερή} \quad (2)$$

- Παροχή Q ονομάζεται ο όγκος dV ρευστού που διέρχεται από μία διατομή της σε χρόνο dt , διά του χρόνου αυτού:

$Q = dV/dt$ Μονάδα μετρήσεως της παροχής είναι το $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ή $1 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Παρατηρήσεις

- ∅ Η ροή αποκτά μεγαλύτερη ταχύτητα σε στενά τμήματα ενός αγωγού, στα σημεία όπου οι ρευματικές γραμμές είναι και πιο πολλές.
- ∅ Η παραπάνω Εξίσωση 1 αποτελεί μια έκφραση διατήρησης της μάζας.
- ∅ Στη μόνιμη ροή, η ολική μάζα μέσα στο θεωρούμενο τμήμα του σωλήνα ροής είναι σταθερή, οπότε:

$$\rho A_1 u_1 dt = \rho A_2 u_2 dt \quad \text{ή} \quad A u = \text{σταθ.} \quad (3)$$

- ∅ Ο ρυθμός ροής μάζας ανά μονάδα χρόνου διαμέσου μιας εγκάρσιας διατομής (Παροχή μάζας), ισούται με την πυκνότητα επί την παροχή όγκου (παροχή φλέβας).

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

Μπορούμε να γενικεύσουμε για την περίπτωση που το ρευστό δεν είναι ασυμπίεστο. Αν ρ_1 και ρ_2 είναι οι πυκνότητες στις διατομές B και C, τότε:

$$\rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2 \quad (5)$$

1.4.3 Εξίσωση Bernoulli

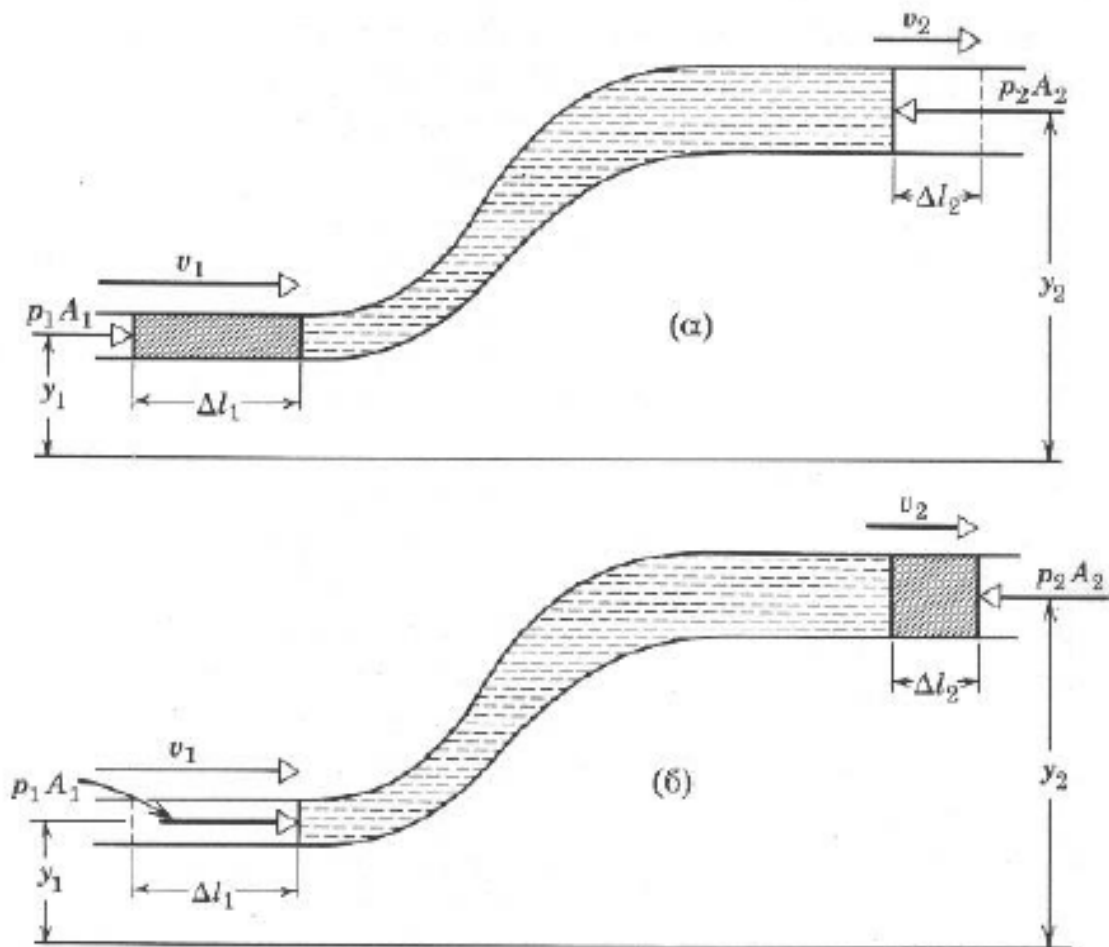
Ο νόμος Bernoulli για τη Ρευστομηχανική προϋποθέτει την απώλεια μηχανικής ενέργειας κατά τη διεύθυνση της ροής, δηλαδή την απουσία εσωτερικής τριβής. Αν θεωρηθεί το σχήμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.6 τότε για μια ροή ασυμπίεστη και στρωτή, χωρίς τριβές εσωτερικά μέσα από έναν αγωγό προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$\ThetaΜΚΕ: W = \Delta K \quad (6)$$

(Το έργο που παράγεται από τη συνισταμένη δύναμη η οποία δρα πάνω σε ένα σύστημα ισούται με τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας του συστήματος)

$$\Delta K = \frac{1}{2} dm u_2^2 - \frac{1}{2} dm u_1^2 = \frac{1}{2} \rho dV (u_2^2 - u_1^2) \quad (7)$$

$\rho = \text{σταθ.} - \text{Ασυμπίεστο ρευστό}$



Εικόνα 1.6: Ροή σε αγωγό για εξίσωση Bernoulli

$$dV = \text{σταθ.} - \text{ασυμπίεστο ρευστό} \quad (8)$$

$$W_p = -p_2 dV + p_1 dV = -(p_2 - p_1) dV \quad (9)$$

$$W = W_g + W_p = \Delta K \quad (10)$$

$$-\rho g dV (y_2 - y_1) - (p_2 - p_1) dV = \frac{1}{2} \rho dV (u_2^2 - u_1^2) \quad (11)$$

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 + \rho g y_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho u_2^2 + \rho g y_2 \quad (12)$$

$$\rho + \frac{1}{2} \rho u^2 + \rho g y = \text{σταθ.} \quad (13)$$

- Ø Η πίεση p ονομάζεται στατική, είναι εκείνη που θα μετρηθεί με μανόμετρο τοποθετημένο στη φλέβα, και συνδέεται με τις δυνάμεις που προκαλούν τη ροή του ρευστού. Μπορεί να λεχθεί ότι η στατική πίεση είναι, στην περίπτωση αυτή, το έργο που παράγεται από τις δυνάμεις αυτές σε κάθε μονάδα όγκου του ρευστού.
- Ø Η πίεση $\frac{1}{2} \rho u^2$ ονομάζεται δυναμική και συνδέεται με την κινητική ενέργεια του ρευστού, είναι δηλαδή η κινητική ενέργεια ανά μονάδα όγκου.
- Ø Ο όρος $\rho g h$ είναι η υδροστατική πίεση που συνδέεται με τη δυναμική ενέργεια, δηλαδή απεικονίζει την επίδραση του πεδίου βαρύτητας στην κίνηση του ρευστού.
- Ø Επομένως ο νόμος του Bernoulli εκφράζει ότι κατά τη ροή ιδανικού ρευστού το άθροισμα της στατικής πίεσης p , της υδροστατικής $\rho g h$ και της δυναμικής $\frac{1}{2} \rho u^2$, κατά μήκος μιας φλέβας παραμένει σταθερό.

- ∅ Όταν λοιπόν η διατομή του σωλήνα δεν είναι σταθερή, στα σημεία στα οποία η ταχύτητα είναι μικρότερη, είναι μεγαλύτερη η πίεση και αντίστροφα. Εάν η ταχύτητα ενός σωματιδίου ρευστού αυξάνεται καθώς ταξιδεύει σε μια ρευματική γραμμή, η πίεση του ρευστού ελαττώνεται και αντίστροφα.
- ∅ Εκεί που οι ρευματικές γραμμές είναι σχετικά πυκνές (επομένως η ταχύτητα είναι σχετικά μεγάλη) η πίεση είναι σχετικά μικρή και αντίστροφα.

1.5 ΡΟΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Η ροή φυσικού αερίου σε πορώδες μέσο χαρακτηρίζεται από πολύπλοκους νόμους ρευστομηχανικής, καθώς και από μη γραμμικούς όρους. Σε περίπτωση ροής φυσικού αερίου σε κυκλικό κοίτασμα ακτίνας R όπου ανοίγεται πηγάδι με ακτίνα ίση με a και η ταχύτητα της ροής είναι Q_m (μέσα στο φρέαρ) ισούται:

$$P(R)^2 - P(a)^2 = A Q_m + B Q_m^2 \quad (14)$$

Όπου:

$P(R)$ = η μέση πίεση του στρώματος

$P(a)$ = πίεση στο φρέαρ

A, B = συντελεστές που εξαρτώνται από χαρακτηριστικά του αερίου.

Η παραπάνω σχέση (11) εκφράζει την εξάρτηση μεταξύ πίεσης της στατικής κατάστασης και της ροής. Οι περισσότερες καμπύλες αρχικής πίεσης ωστόσο περιγράφονται από την εξής εμπειρική σχέση:

$$Q_m = ax[P^2(R) - P^2(a)]^n \quad (15)$$

Όπου:

n, a = εμπειρικοί συντελεστές.

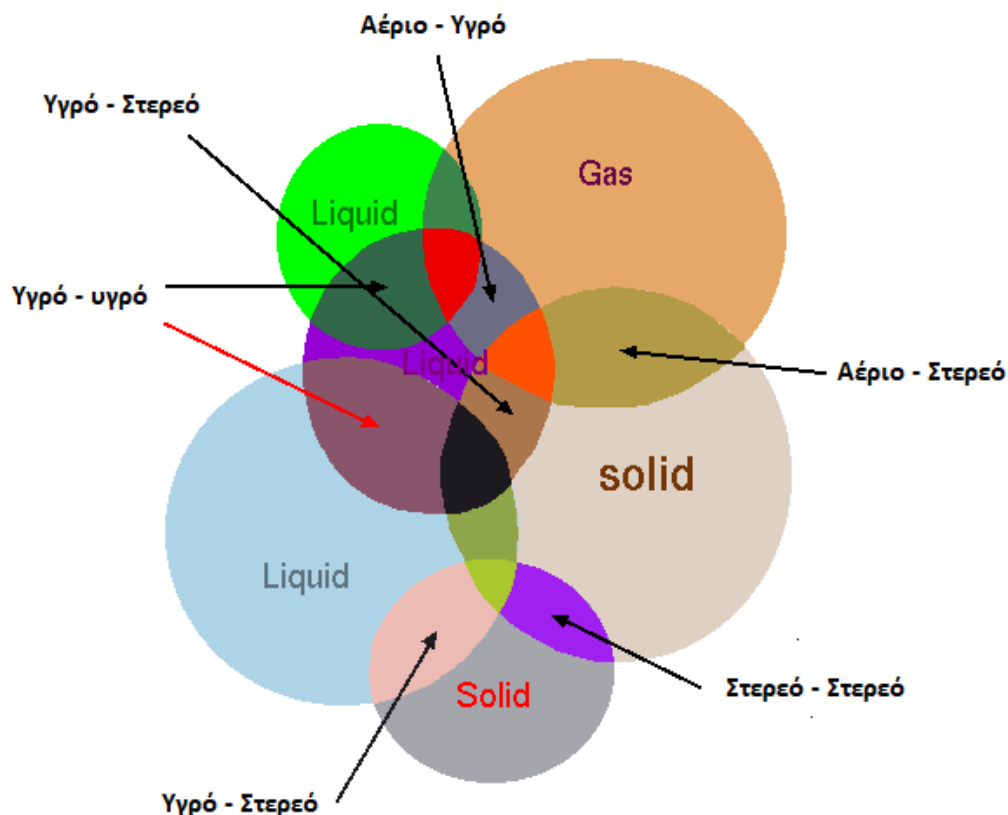
Σημειώνεται ότι όταν οι ταχύτητες ροής είναι μικρές μπορούν να γίνουν απλουστεύσεις και να χρησιμοποιηθούν απλοί νόμοι ροής ρευστών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 ΠΟΛΥΦΑΣΙΚΕΣ ΡΟΕΣ

Ο όρος πολυφασική ροή χρησιμοποιείται για την αναφορά σε κάθε ροή ρευστού που αποτελείται από περισσότερες από μία φάσεις ή συστατικά. Με τον όρο φάση δεν εννοούμε αναγκαστικά κατάσταση της ύλης, αλλά μπορεί να έχουμε πολυφασική ροή ακόμη και αν έχουμε ταυτόχρονη ροή δύο ή περισσότερων υγρών ή στερεού με διάφορα μεγέθη σωματιδίων μαζί με ρευστό. Η διφασική ροή είναι η πιο απλή περίπτωση πολυφασικής ροής.

Υπάρχουν δύο θεωρίες για την προσέγγιση της διφασικής ροής. Πρώτον, η θεωρία της ομογενούς διφασικής ροής, όπου αέρας και σωματίδια θεωρούνται σαν ιδεατό ρευστό, οι ιδιότητες του οποίου είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος των ιδιοτήτων των δύο φάσεων. Στην περίπτωση αυτή η ταχύτητα αέρα και σωματιδίων θεωρείται ίδια και η συγκέντρωση μάζας είναι σταθερή σε όλη τη διατομή σε ένα σημείο του αγωγού (διασκορπισμένο συστατικό ομοιόμορφα κατανεμημένο στο φορέα). Δεύτερον, η θεωρία της χωριστής διφασικής ροής, όπου οι δύο φάσεις θεωρούνται ότι ρέουν χωριστά στον αγωγό και υπάρχει πλήρης αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Οι κατανομές ταχυτήτων αέρα και σωματιδίων θεωρούνται διαφορετικές.



Εικόνα 2.1: Πιθανοί συνδυασμοί πολυφασικών ροών
[Πηγή: <http://www.potto.org/fluidMech/phase.php>]

2.1.1 Είδη πολυφασικών ροών σε αγωγούς

Οι πολυφασικές ροές μπορούν να παρατηρηθούν σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές και, συγκεκριμένα, στους αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου. Στις πραγματικές εφαρμογές, όπως είναι κατανοητό, το μίγμα που συναντάται μέσα στον αγωγό μεταφοράς μπορεί να περιέχει συνδυασμό φάσεων όπως, για παράδειγμα, υγρή φάση (πετρέλαιο), αέρια φάση (φυσικό αέριο), καθώς και στερεή φάση (λάσπη, πέτρες κτλ.).

Η απλούστερη μορφή της πολυφασικής ροής είναι η διφασική και συγκεκριμένα ο συνδυασμός αέρα – νερό. Για αυτόν τον συνδυασμό, που είναι εύκολα μετρήσιμος και διαχειρίσιμος εντός εργαστηριακού περιβάλλοντος, υπάρχει η κατηγοριοποίηση σε διφασική ροή σε οριζόντιο αγωγό και σε κατακόρυφο αγωγό.

Συνοπτικά, παρουσιάζονται τα είδη των κατακόρυφων πολυφασικών ροών και είναι τα ακόλουθα:

- **Ροή με φυσαλίδες (Bubble flow)**

Στη ροή με φυσαλίδες η αέρια φάση βρίσκεται υπό μορφή φυσαλίδων εντός της υγρής φάσης και εξαιτίας της άνωσης και της επίδρασης του προφίλ της ταχύτητας, η μέση ταχύτητα της αέριας φάσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτήν της υγρής φάσης. Είναι αβέβαιο αν αυτό το είδος ροής μπορεί να εμφανιστεί στη μόνιμη κατάσταση, λόγω του ότι οι φυσαλίδες τείνουν να συσσωματώνονται. Σε οποιαδήποτε περίπτωση πάντως, οι φυσαλίδες πιθανότατα βρίσκονται σε περιοχές χαμηλής ποιότητας του εξατμιζόμενου μίγματος.

- **Ροή με τμήματα αέρα βληματοειδούς σχήματος (Slug flow)**

Σε αυτό το είδος της ροής σχηματίζονται φυσαλίδες αέρα σε σχήμα βλήματος, διαφόρων διαστάσεων, ανάμεσα στις οποίες βρίσκεται η υγρή φάση. Συγχρόνως, εντός της υγρής φάσης εμφανίζονται διασκορπισμένες φυσαλίδες μικρότερων διαστάσεων. Η μέση ταχύτητα της αέριας φάσης συνήθως είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν της υγρής φάσης και αυτό συμβαίνει κύρια στην περίπτωση που το μήκος της υγρής φάσης, που χωρίζει τα τμήματα του αέρα, είναι αρκετά μικρό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μεγάλο μέρος της υγρής φάσης στη συνέχεια θα ρεύσει, με τη μορφή ενός αργά κινούμενου φιλμ, μεταξύ των φυσαλίδων αέρα και του τοιχώματος του αγωγού. Για χαμηλές ταχύτητες, μέρος της υγρής φάσης που κείται κοντά στο τοίχωμα, δύναται να κινηθεί προς τα κάτω λόγω των δυνάμεων βαρύτητας, ακόμα κι αν το υπερκείμενο στρώμα ρευστού ρέει προς τα πάνω. Λόγω της ύπαρξης ανομοιομορφίας στο μίγμα με μεγάλη κλίμακα, η ροή τείνει να πάρει παλμοειδή μορφή, φαινόμενο που δυσχεραίνει τη μέτρηση της πίεσης.

- **Ροή με αναταράξεις (Churn flow)**

Αυτό το είδος της ροής μπορεί να χαρακτηριστεί σα μια μη μόνιμη ροή slug, η οποία διασπάται λόγω του συνδυασμού μικρών διατμητικών παραμορφώσεων και μεγάλης διαμέτρου αγωγού ή μεγάλης επιτάχυνσης της ροής λόγω εξάτμισης. Οι φάσεις κινούνται και περιστρέφονται μαζί με έναν εντελώς τυχαίο και ακανόνιστο τρόπο, παρ' όλο που η υγρή φάση είναι στο μεγαλύτερο μέρος της συνεχής και κινείται κύρια προς το τοίχωμα του αγωγού. Όπως και στη slug μορφή ροής, έτσι και εδώ η μέτρηση της πίεσης είναι δύσκολη.

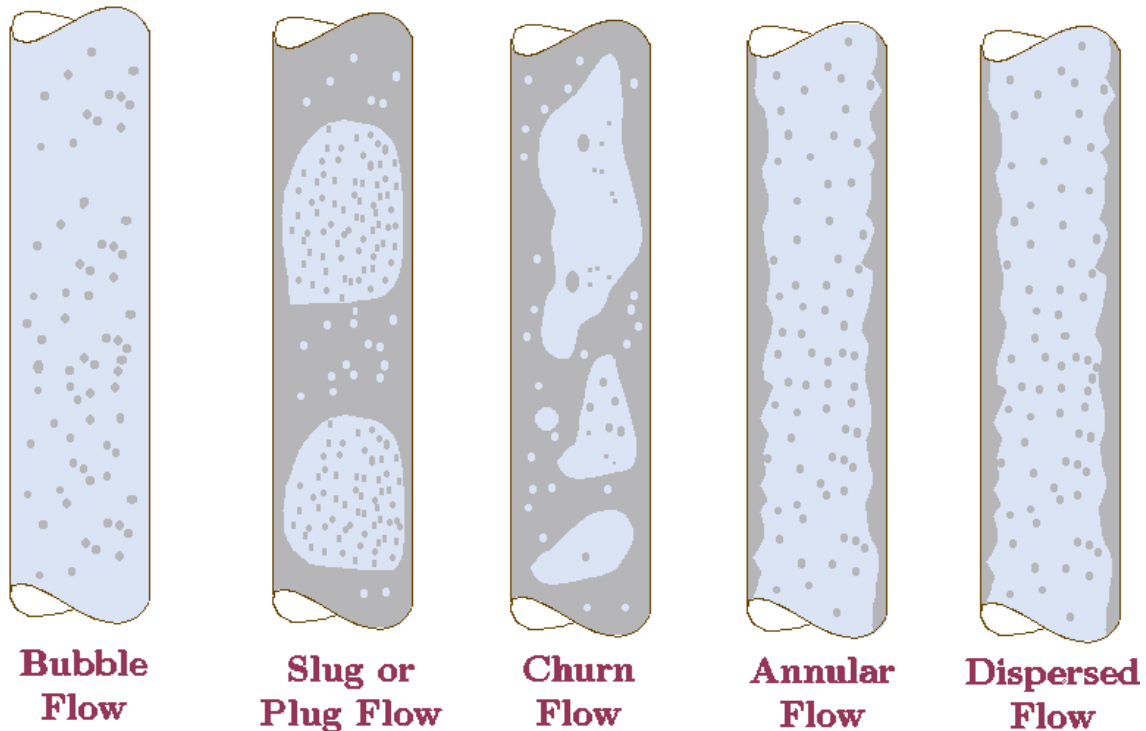
- **Δακτυλιοειδής ροή (Annular flow)**

Αυτό το είδος της ροής απαντάται στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές διφασικής ροής. Μια ποσότητα υγρού κατακρατείται από την αέρια φάση υπό μορφή υγρασίας, ενώ το υπόλοιπο υγρό ρέει με σχετικά μικρή ταχύτητα εντός ενός λεπτού στρώματος (φιλμ), περιβρέχοντας την εσωτερική περίμετρο του αγωγού. Ο τύπος αυτός της ροής του μίγματος σε κατακόρυφη προς τα πάνω ροή, πρακτικά συμβαίνει όταν η ποιότητα ατμού του μίγματος είναι μεγαλύτερη του 0.2. Σημειώνεται ότι, ως ποιότητα ατμών της ροής (x) ορίζεται το ποσοστό μάζας του μίγματος, το οποίο αποτελείται από ατμό ή αέρια φάση. Επίσης, αυτό το είδος ροής είναι δυνατό να συμβεί και για μικρότερες τιμές της ποιότητας ατμού, αν και τότε

δεν υπάρχει σαφής διαφορά από τη slug μορφή ροής, στην περίπτωση που αναπτύσσονται στο μίγμα υψηλές ταχύτητες.

- **Ομιχλώδης ροή ή ροή με υγρασία (Wispy-annular flow)**

Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα της υγρής φάσης, η συγκέντρωση σταγονιδίων στο χώρο της αέριας φάσης μεγαλώνει. Σαν συνέπεια έχουμε τη συνένωση σταγονιδίων με τη μορφή δεσμών ή ραβδώσεων. Η ροϊκή αυτή κατάσταση είναι χαρακτηριστική για ροές με μεγάλη ροή μάζας.



Εικόνα 2.2: Είδη διφασικών ροών υγρού-αερίου σε κατακόρυφη ροή
 [Πηγή: <http://www.potto.org/fluidMech/phase.php>]

Συνοψίζοντας τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι για την περίπτωση ενός εξαμιζόμενου μίγματος που ρέει κατακόρυφα προς τα πάνω, τα είδη της ροής που εμφανίζονται καθώς αυξάνεται η ποιότητα ατμών του μίγματος είναι αυτά που αναφέρονται στον πιο κάτω Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Ποιότητα ατμών και είδος ροής

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΤΜΩΝ	ΕΙΔΟΣ ΡΟΗΣ
X πολύ κοντά στο μηδέν	Ροή με φυσαλίδες (Bubble flow)
$0 < X < 0.1$	Ροή με τμήματα αέρα βληματοειδούς σχήματος (Slug flow)
$X = 0.1$	Ροή με αναταράξεις (Churn flow)
$0.1 < X < 1.0$	Δακτυλιοειδής ροή (Annular flow)
$0.9 < X < 1.0$	Ομιχλώδης ροή ή ροή με υγρασία (Wispy-annular flow)

Τα ροϊκά μοτίβα – σκίτσα για την πολυφασική ροή νερού-αέρα σε οριζόντιο αγωγό είναι τα ακόλουθα:

- **Ροή με φυσαλίδες (Bubble flow)**

Αυτό το ροϊκό μοντέλο είναι παρόμοιο με αυτό στην κατακόρυφη ροή εκτός από το ότι οι φυσαλίδες αερίου τείνουν να ταξιδέψουν στο ανώτερο μισό του σωλήνα. Για μέτριες ταχύτητες αερίου και υγρής φάσης, ολόκληρη η διατομή σωλήνων περιέχει τις φυσαλίδες, ενώ στις ακόμα υψηλότερες ταχύτητες εισάγεται ένα ροϊκό μοντέλο ισοδύναμο με το μικρή-δακτυλιοειδής ροή. Αυτή η ροή αναφέρεται μερικές φορές ως ροή αφρού.

- **Plug flow**

Αυτό είναι παρόμοιο με τη βληματοειδή ροή στην κατακόρυφη ροή. Πάλι οι φυσαλίδες αερίου τείνουν να ταξιδέψουν στο ανώτερο μισό του σωλήνα.

- **Στρωματοποιημένη ροή (Stratified flow)**

Αυτό το πρότυπο εμφανίζεται μόνο στις πολύ χαμηλές ταχύτητες υγρού και αερίου. Οι δύο φάσεις ρέουν χωριστά με μια σχετικά ομαλή διεπιφάνεια.

- **Κυματιστή ροή (Wavy flow)**

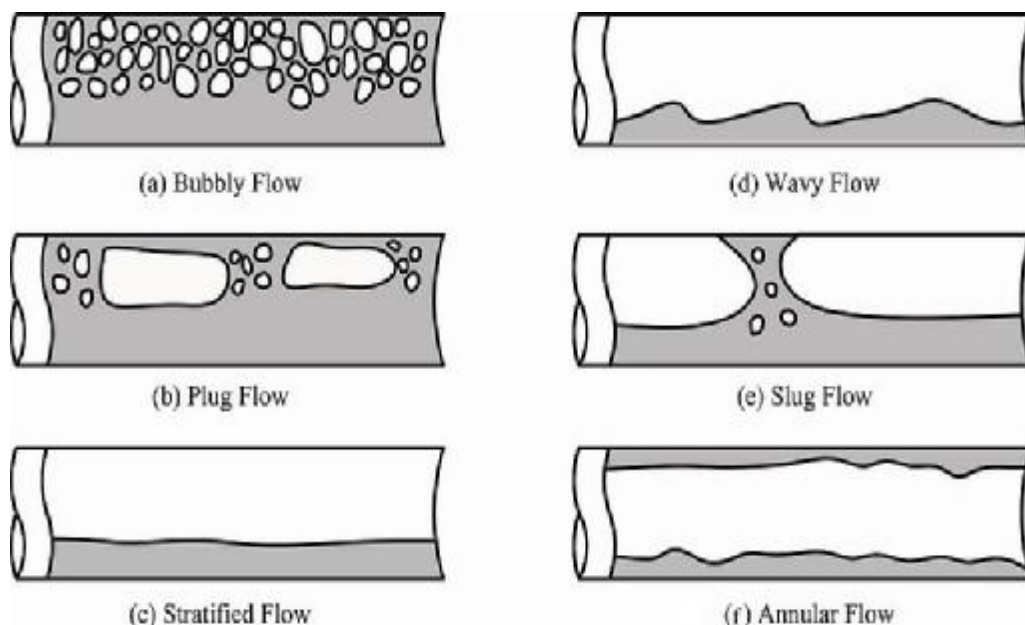
Δεδομένου ότι η ταχύτητα αερίου αυξάνεται, η διεπιφάνεια επηρεάζεται από τα κύματα που ταξιδεύουν στην κατεύθυνση της ροής.

- **Βληματοειδής ροή (Slug flow)**

Μια περαιτέρω αύξηση στην ταχύτητα αερίου προκαλεί τα κύματα στη διεπιφάνεια για να διαμορφώσει ένα αφρώδες βλήμα που διαδίδεται κατά μήκος του καναλιού με μια υψηλή ταχύτητα.

- **Δακτυλιοειδής ροή (Annular flow):**

Μια ακόμα υψηλότερη ταχύτητα αερίου θα οδηγήσει στο σχηματισμό ενός πυρήνα αερίου με ένα υγρό φιλμ γύρω από την περιφέρεια του σωλήνα. Το φιλμ μπορεί να μην είναι συνεχές γύρω από όλη την περιφέρεια αλλά φυσικά, θα είναι πιο παχύ στην βάση του σωλήνα. Περιγράφεται ως μια περιοχή ροής σπρέι ή σταγόνας, όπου το κύριο μέρος της ροής μπαίνει στον πυρήνα του αερίου και χωρίζεται σε σταγονίδια.



Εικόνα 2.3: Είδη διφασικών ροών υγρού-αερίου σε οριζόντια ροή

[Πηγή: [https://www.thermalfuidscentral.org/encyclopedia/index.php/File:Chapter11j_\(3\).jpg](https://www.thermalfuidscentral.org/encyclopedia/index.php/File:Chapter11j_(3).jpg)]

2.1.2 Ροϊκά μεγέθη σε διφασικές ροές

Το μεγαλύτερο μέρος της ονοματολογίας που χρησιμοποιείται για τα ροϊκά μεγέθη προέρχεται από την απλή μονοφασική ροή και, για το λόγο αυτό, τα κύρια ροϊκά μεγέθη της διφασικής ροής αντιστοιχούν σε αυτή της μονοφασικής. Η διαφορά στην περίπτωση της διφασικής ροής είναι ότι έχουμε διπλάσιο αριθμό μεγεθών, για παράδειγμα, έχουμε δύο πυκνότητες, δύο ιξώδη και δύο παροχές. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες για την διφασική ροή είναι η διατμητική τάση και η κλίση του αγωγού, δηλαδή η γωνιά που σχηματίζει ο αγωγός με το οριζόντιο επίπεδο. Στη διφασική ροή στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές η πλέον ενδιαφέρουσα εξαρτημένη μεταβλητή είναι βαθμίδα πίεσης η οποία αποτελείται από τρεις όρους:

- 1) Λόγω τριβής
- 2) Λόγω βαρύτητας
- 3) Λόγω μεταβολής της ορμής (επιτάχυνση)

Οι κυριότερες παράμετροι για μια διφασική ροή εντός ενός ευθύγραμμου αγωγού κυκλικής διατομής είναι οι παρακάτω:

- **Εσωτερική διάμετρος αγωγού (D)**

Είναι σημαντικός όρος για τον υπολογισμό της τριβής στη βαθμίδα πίεσης. Το μέγεθος της διαμέτρου του αγωγού έχει άμεση επίδραση στο είδος της ροής που θα συμβεί και συνεπώς και στις κατανομές μάζας, ταχύτητας και αδράνειας των δύο φάσεων.

- **Ροή μάζας ανά μονάδα επιφανείας (G)**

Αποτελεί τον κύριο παράγοντα για τον υπολογισμό των όρων πίεσης λόγω τριβής και αδράνειας. Επιπροσθέτως, επειδή επηρεάζει και το είδος της ροής, έχει συχνά και επιπλέον επιδράσεις στους τρεις όρους της βαθμίδας πίεσης, και μάλιστα αρκετά σημαντικές.

- **Ποιότητα ατμών ροής (x)**

Υποδεικνύει το ποσοστό μάζας του μίγματος που αποτελείται από ατμό ή αέρια φάση. Έχει άμεση επίδραση σε όλους τους όρους της βαθμίδας πίεσης.

- **Διεπιφανειακή τάση (γ)**

Σε συνδυασμό και με άλλες παραμέτρους, η διεπιφανειακή τάση είναι δυνατό να έχει μια κρίσιμη επίδραση στη διαμόρφωση του είδους ροής που θα συμβεί. Επίσης μπορεί να έχει επίδραση και στους τρεις όρους της βαθμίδας πίεσης, αν και ο βαθμός της επίδρασής της και η μεταβολή που επιφέρει σε καθένα από τους όρους πίεσης είναι δύσκολο να εξακριβωθούν με βάση πειραματικά αποτελέσματα.

- **Ύψος τραχύτητας (ε)**

Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται στη διφασική ροή στην περίπτωση ενός εξατμιζόμενου μίγματος ή ενός μίγματος υγρού-αερίου προβλέπουν κατά ένα συνεχή τρόπο τη βαθμίδα της πίεσης. Παρόλα αυτά όμως, τα αποτελέσματά τους θα έπρεπε να συμπίπτουν με αυτά των σχέσεων που ισχύουν για τη μονοφασική ροή, στις οριακές περιπτώσεις που όλο το υγρό έχει εξατμιστεί ή όλος ο ατμός έχει γίνει υγρό, οπότε η ροή θα έχει γίνει μονοφασική. Όμως έχει παρατηρηθεί ότι η επίδραση του ύψους τραχύτητας στον όρο πίεσης λόγω τριβής είναι μικρότερη στην περίπτωση της διφασικής ροής από ότι στη μονοφασική ροή.

- **Κλίση του αγωγού μεταφοράς (θ)**

Αποτελεί κύρια παράμετρο για τον υπολογισμό του όρου πίεσης λόγω βαρύτητας, επειδή ισχύει ότι:

$$\frac{dp_G}{dz} = -\rho_{av} \cdot g \cdot \sin\theta \quad (16)$$

Όπου, ρ_{av} η μέση πυκνότητα του μίγματος. Ειδικά, όταν η σπουδαιότητα του όρου πίεσης λόγω τριβής είναι μικρή, η κλίση του αγωγού μπορεί να επιδράσει σημαντικά στο είδος της ροής που θα συμβεί και έτσι θα έχει μια επιπλέον επίδραση στον όρο της βαθμίδας πίεσης λόγω βαρύτητας, εξαιτίας της μεταβολής της μέσης πυκνότητας του μίγματος.

- **Δυναμικό ιξώδες της αέριας φάσης (μ_g)**

Η παράμετρος αυτή εμφανίζεται να μην έχει σημαντική επίδραση σε κανέναν από τους τρεις όρους της βαθμίδας πίεσης, ίσως λόγω του γεγονότος ότι σημαντικές μεταβολές δεν υφίστανται. Απλώς χρησιμοποιείται σε κάποιες σχέσεις για τον υπολογισμό της βαθμίδας πίεσης.

- **Δυναμικό ιξώδες της υγρής φάσης (μ_L)**

Εξαιτίας του γεγονότος ότι παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος μεταβολών, έχει σημαντική επίδραση στον προσδιορισμό των βαθμίδων πίεσης σε κατάσταση αναφοράς απ' ότι το δυναμικό ιξώδες της αέριας φάσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε κάποιες σχέσεις της διασπαστικής ροής. Το δυναμικό ιξώδες της αέριας φάσης μπορεί να επηρεάσει το είδος της ροής που θα συμβεί και σε πιο ακριβείς σχέσεις υπολογισμού χρησιμοποιείται σαν μια επιπλέον ανεξάρτητη μεταβλητή.

- **Πυκνότητα της αέριας φάσης (ρ_g)**

Αποτελεί μεγάλης σπουδαιότητας παράμετρο για τον υπολογισμό όλων των όρων της βαθμίδας πίεσης.

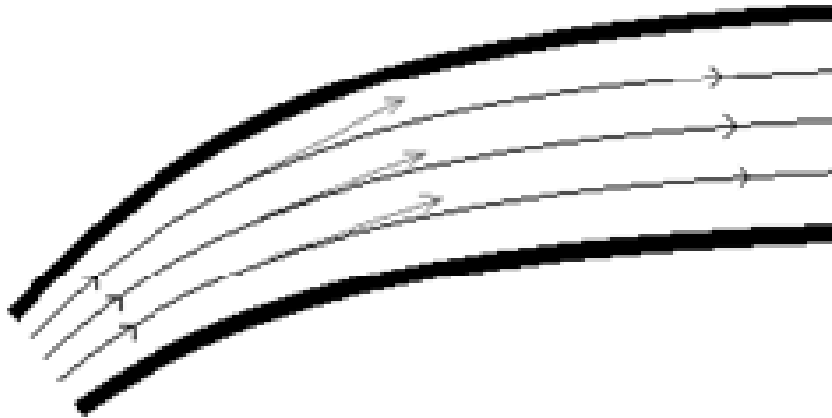
- **Πυκνότητα της υγρής φάσης (ρ_L)**

Επίσης αποτελεί σημαντικότερο παράγοντα για τον υπολογισμό όλων των όρων της βαθμίδας της πίεσης.

- **Μεγέθη ροής σε αγωγούς (Προφίλ ταχύτητας, αριθμός Reynolds)**

Για να περιγράψουμε τη ροή ενός ρευστού σημειώνουμε συνήθως την ταχύτητά του σε διάφορα σημεία του χώρου. Το μέγεθος, που λαμβάνουμε υπ' όψη στη μελέτη της κίνησης των ρευστών είναι επομένως η ταχύτητα $u(r)$ σε κάθε σημείο r του χώρου. Εισάγουμε έτσι ένα διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων, που είναι το πεδίο ροής του ρευστού. Το πεδίο ροής απεικονίζεται με τις ρευματικές γραμμές. Οι ρευματικές γραμμές είναι συνεχείς καμπύλες, οι οποίες σε κάθε σημείο του πεδίου ροής είναι εφαπτόμενες στο διάνυσμα της ταχύτητας, όπως στο Σχήμα 2.4. Παρατηρούμε ότι στα στενότερα σημεία του αγωγού οι ρευματικές γραμμές είναι πυκνότερες. Όπως γνωρίσαμε όμως ήδη από το νόμο της συνεχείας, η ταχύτητα ροής είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του αγωγού.

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 ασυμπιεστή 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.



Σχήμα 2.4: Ρευματικές ή ροϊκές γραμμές

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

$$\dot{m} = \rho V_{avg} A_c = \int_{A_c} \rho u(r) dA_c \quad (17)$$

Όπου:

\dot{m} = 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,

$$V_{avg} = \frac{\int_{A_c} \rho u(r) dA_c}{\rho A_c} = \frac{\int_0^R \rho u(r) 2\pi r dr}{\rho \pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r) r dr \quad (18)$$

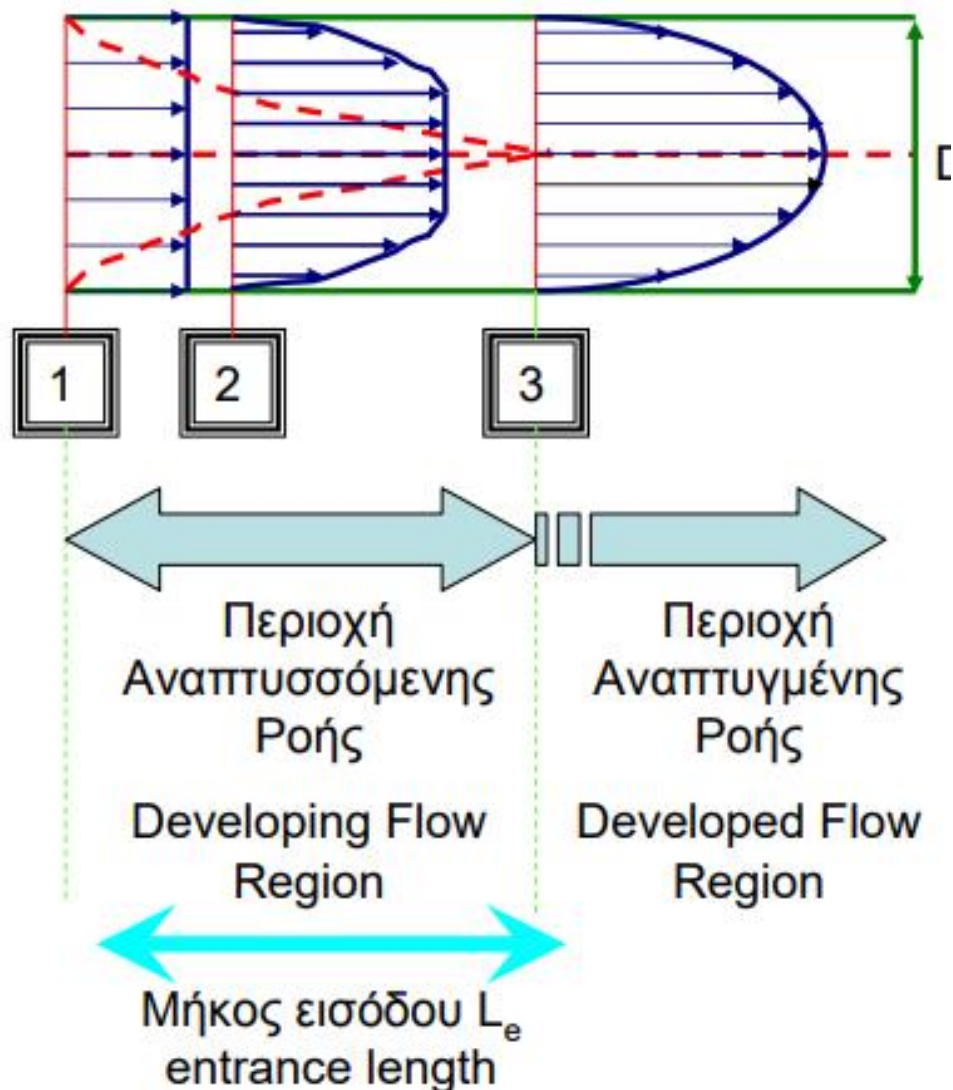
Με τον τρόπο αυτό, αν είναι γνωστή η παροχή ή το προφίλ της ταχύτητας είναι εύκολο να υπολογιστεί η μέση ταχύτητα.

Θεωρώντας ένα ρευστό να εισέρχεται σε έναν κυκλικό σωλήνα με ομοιόμορφη ταχύτητα, λόγω της κατάστασης μη 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 σε 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 2.5. 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 έχει αναπτυχθεί πλήρως όταν το κανονικοποιημένο προφίλ θερμοκρασίας παραμένει αμετάβλητο. 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.



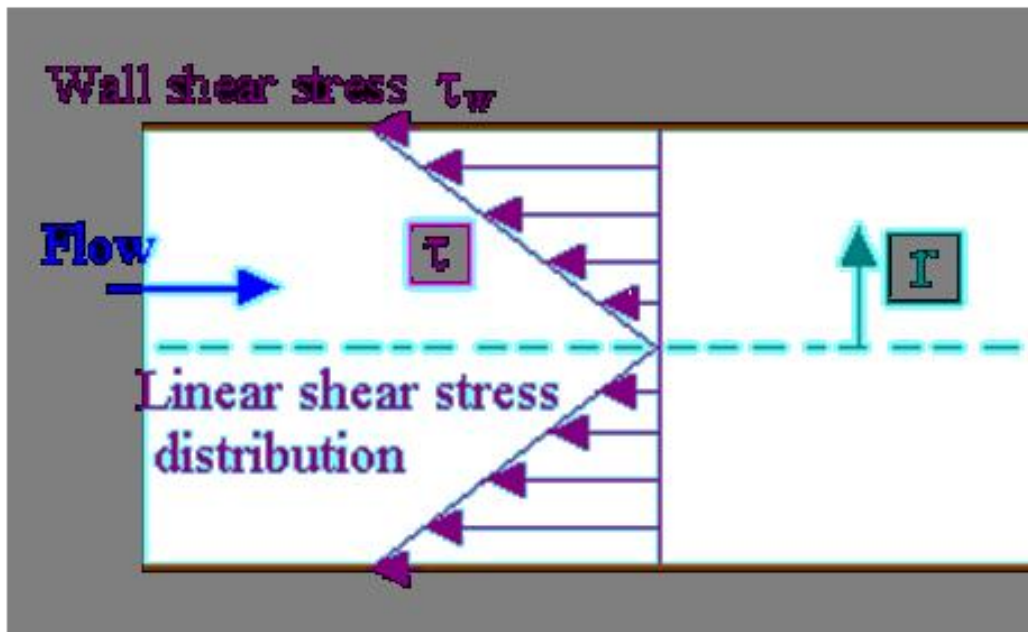
Σχήμα 2.5: Προφίλ ταχύτητας 1) Προφίλ ταχύτητας στην είσοδο του αγωγού, 2) Προφίλ ταχύτητας στην αναπτυσσόμενη περιοχή ροής και 3) Προφίλ ταχύτητας στην ανεπτυγμένη ταχύτητα ροής

(Πηγή: http://cyrus.tcdn.teicrete.gr/Portals/23/Shmeioseis/udrodunamiki/9_%CE%A3%CF%89%CE%BB%CE%B7%CE%BD%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82.pdf)

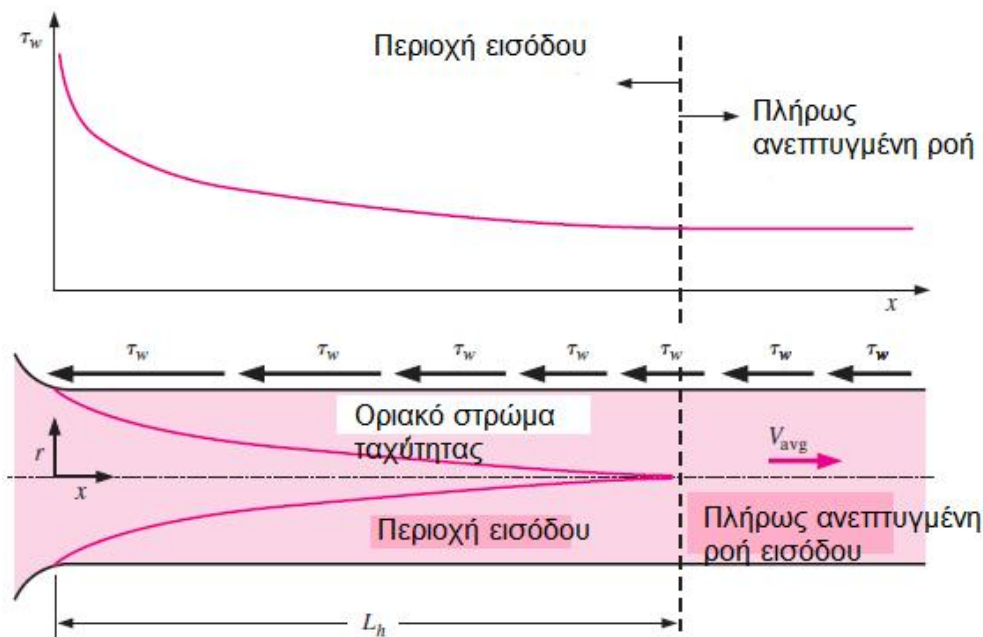
Το προφίλ ταχύτητας στην πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή είναι παραβολικό σε ελασματοειδή ροή και κάπως πιο επίπεδη (ή πληρέστερη) σε τυρβώδη ροή λόγω κυκλοφοριακής κίνησης και πιο έντονης ανάμιξης στην ακτινική κατεύθυνση. Το προφίλ της ταχύτητας με μέση ταχύτητα παραμένει αμετάβλητο όταν αναπτύσσεται πλήρως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

$$\frac{\partial u(r,x)}{\partial x} = 0 \rightarrow u = u(r) \quad (19)$$

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. 2.6). 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. 2.7. 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.



Σχήμα 2.6: Σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή αγωγού η διατμητική τάση παραμένει σταθερή. [Πηγή: http://www.oocities.org/venkatej/mech/fluid_mechanics/fluid_mechanics.html]



Σχήμα2.7: Η διακύμανση της διατμητικής τάσης στη διεύθυνση της ροής στην περιοχή εισόδου και σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή

Διακρίνουμε δύο είδη ροής. Στο πρώτο η ταχύτητα σε κάθε σημείο του πεδίου ροής είναι χρονικά αμετάβλητη, επομένως και οι ρευματικές γραμμές έχουν σταθερό σχήμα και διατρέχουν το πεδίο ροής ομαλά η μία δίπλα στην άλλη. Αυτή είναι η στρωτή ροή. Κατά κανόνα, η στρωτή ροή χαρακτηρίζεται από χαμηλές ταχύτητες.

Όταν αυξηθεί η ταχύτητα του ρευστού, τότε η ροή παύει να είναι μόνιμη. Η ταχύτητα μεταβάλλεται χρονικά γύρω από μια μέση τιμή σε ένα σημείο του πεδίου, και όταν υπερβεί ένα όριο, τότε μεταπίπτει σε τυρβώδη. Στην τυρβώδη ροή δημιουργούνται στρόβιλοι, δηλαδή το ρευστό κυκλοφορεί σε κλειστές τροχιές. Χαρακτηριστικό της τυρβώδους ροής είναι οι δίνες.

Η ποιοτική διαφορά μεταξύ της στρωτής και της τυρβώδους ροής συνίσταται στους διαφορετικούς νόμους, που ακολουθούν οι αντιστάσεις στη ροή, όταν μεταβαίνουμε από το ένα είδος ροής στο άλλο και σημειώνουμε ότι:

- Στη στρωτή ροή οι απώλειες είναι ανάλογες της ταχύτητας, ενώ στην τυρβώδη ανάλογες του τετραγώνου της ταχύτητας.
Διάφοροι ερευνητές έχουν υπολογίσει ότι το στρωτό μήκος εισόδου σε έναν αγωγό δίνεται περίπου ως:

$$L_{h,laminar} \approx 0.05ReD \quad (20)$$

Διακρίνονται διάφορες περιπτώσεις ανάλογα με τον αριθμό Reynolds και τον τρόπο υπολογισμού του υδροδυναμικού μήκους εισόδου:

- $Re = 20$ (Το υδροδυναμικό μήκος εισόδου θεωρείται περίπου ίδιο με την διάμετρο του αγωγού αλλά αυξάνει γραμμικά με την ταχύτητα).
- $Re = 2300$ (Το υδροδυναμικό μήκος εισόδου μπορεί να θεωρηθεί περίπου ίσο με $11D$).
- Σε στρωτή ροή το υδροδυναμικό μήκος εισόδου για τυρβώδη ροή μπορεί να προσεγγιστεί ως

$$L_{h,turbulent} \approx 1,359DRe_D^{1/4} \quad (21)$$

Η εξάρτηση του μήκους εισόδου σε περίπτωση τυρβώδους ροής είναι μικρότερη. Αυτό συνεπάγεται ότι δεν έχει πλέον ισχυρή συσχέτιση με τον αριθμό Reynolds. Σε πρακτικές εφαρμογές με τυρβώδεις ροές έχει υπολογιστεί ότι τα αποτελέσματα δεν έχουν τόσο μεγάλη σημασία πέρα από μήκος σωλήνα μήκους 10 διαμέτρων και ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$L_{h,turbulent} \approx 10D \quad (22)$$

2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Όταν το φυσικό αέριο μεταφερθεί είτε μέσω αγωγών είτε σε υγρή μορφή σε δεξαμενές στη συνέχεια αρχίζει η διανομή του για διάφορες χρήσεις. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά μερικές από τις βασικές εφαρμογές του φυσικού αερίου.

- **Βιομηχανία**

Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται στη βιομηχανία σαν πρώτη ύλη για την παραγωγή Αμμωνίας, Μεθανόλης και Πολυολεφινών (6% της παγκόσμιας κατανάλωσης Φυσικού Αερίου), όπως και στην πηγή θερμότητας.

- **Έμμεσες θερμικές χρήσεις**

Στις έμμεσες θερμικές χρήσεις η θερμότητα που παράγεται κατά την καύση του φυσικού αερίου μεταφέρεται σε διάφορα άλλα σημεία όπου μπορεί να φανεί χρήσιμη και καταναλώνεται εκεί. Αυτή η διαδικασία συναντάται μετά από την καύση φυσικού αερίου σε λέβητες. Ρευστά που άγουν την θερμότητα που εκλύεται και την μεταφέρουν σε άλλα σημεία είναι ο ατμός, διάφορα λάδια ή και το νερό.

- **Άμεσες θερμικές χρήσεις**

Σε αυτές τις εφαρμογές η καύση πραγματοποιείται στο τελικό σημείο κατανάλωσης της ενέργειας. Τέτοιες εφαρμογές είναι οι βιομηχανίες τσιμέντου, μετάλλων (φούρνοι τήξεως, ανόπτησης, βαφής κτλ.) μονάδες παραγωγής γυαλιού (φούρνοι) και βιομηχανίες οικοδομικών υλικών.

- **Ατμοπαραγωγή Θερμικών Χρήσεων**

Η ατμοπαραγωγή θερμικών χρήσεων είναι διαδεδομένη στην βιομηχανία καθώς παρέχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιούνται πολλά καύσιμα, με οικονομικό και εύκολο τρόπο εγκατάστασης συστημάτων θέρμανσης.

- **Άμεσες θερμικές χρήσεις**

Σε εφαρμογές που απαιτείται άμεση απόκριση καύσης και εξαιτίας των καθαρών απαερίων του, το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται για να συμβάλει στην βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων αλλά και στην μείωση του κόστους λειτουργίας με ταυτόχρονη αύξηση της παραγωγικότητας. Τέτοιες βιομηχανίες είναι οι βιομηχανίες παραγωγής χαρτιού, πορσελάνη και μετάλλων.

2.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (CFD)

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD) είναι ένας τομέας της ρευστομηχανικής και βασίζεται στη χρήση αριθμητικών μεθόδων και αλγορίθμων για την επίλυση προβλημάτων που περιλαμβάνουν ροές ρευστών. Γίνεται χρήση υπολογιστών για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των ρευστών αξιοποιώντας τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής (εξισώσεις Navier-Stokes) σε συνδυασμό με τις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας, σε γεωμετρία και οριακές συνθήκες που ορίζονται από το χρήστη. Αποτελεί αποτελεσματικό και εύχρηστο εργαλείο του μηχανικού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων (γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ιδιότητες του ρευστού, των οριακών συνθηκών κλπ.) στα χαρακτηριστικά της ροής (κατανομή ταχύτητας, πτώση πίεσης, μεταφορά θερμότητας, μεταφορά μάζας κλπ.). Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική δεν βρίσκει ακριβή αναλυτική λύση στα ροϊκά προβλήματα, αλλά υπολογίζει διακριτές τιμές της λύσης που απέχουν συνήθως από τις πραγματικές, λόγω απώλειας πληροφορίας από τις τιμές της λύσης που δεν υπολογίζονται. Έτσι η λύση προκύπτει ως σύνολο αριθμών και όχι μαθηματικής έκφρασης.

Για να επιλυθεί ένα φυσικό πρόβλημα με χρήση CFD, τα βασικά βήματα είναι:

- Να σχεδιαστούν τα φυσικά όρια του προβλήματος (δηλαδή, η γεωμετρία) και να οριστούν οι οριακές συνθήκες,
- Να διαχωριστεί ο φυσικός χώρος της ροής σε δίκτυο κελιών (grid) όπου διακριτοποιούνται οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο. Με τον τρόπο αυτό οι μη-γραμμικές διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε εξισώσεις διαφορών, δηλαδή αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες στη συνέχεια επιλύονται διαδοχικά μέσα στα κελιά του πλέγματος.
- Τα αποτελέσματα τέλος, μπορούν να παρουσιαστούν με τη μορφή γραφημάτων των χαρακτηριστικών της ροής (πχ ταχύτητας, πίεσης, διατμητικής τάσης) με διάφορες μορφές (π.χ. contours, isosurfaces, streamlines κλπ), είτε με τη μορφή animation.

2.4 ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΡΟΕΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΥΡΒΗΣ

Συνήθως οι τυρβώδεις ροές συναντώνται σε μεγάλες ταχύτητες ροής, όπου ισχύουν ακανόνιστες κινήσεις των ροϊκών στοιχείων προς όλες τις διευθύνσεις. Οι πιο πολλές εφαρμογές τόσο στην φύση όσο και στην βιομηχανία είναι τυρβώδεις. Συνεπώς, είναι αναγκαία η εύρεση μιας μεθοδολογίας που διερευνά την φύση της τυρβώδους ροής και μπορεί να αναπυχθεί σε ένα σύστημα εξισώσεων (συνέχειας - ορμής και ενέργειας) που θα δίνει μια λεπτομερή περιγραφή της τύρβης.

Μια ροή λέγεται τυρβώδης όταν επικρατούν φαινόμενα έντονα, ακανόνιστα ή ακόμη και χαοτικές διακυμάνσεις (μεταβολές) των ροϊκών μεγεθών, όπου δεν παρουσιάζουν καμία δομή. Η τύρβη προκαλείται από αστάθεια της ροής εντός του ροϊκού πεδίου. Σε κάθε σημείο του πεδίου επικρατεί ισορροπία μεταξύ των δυνάμεων που ασκούνται στο ρευστό. Όταν αυξάνεται η ταχύτητα οι δυνάμεις τριβής αυξάνονται, όχι τόσο σημαντικά όσο οι δυνάμεις αδράνειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορούν να «ηρεμήσουν» τις διαταραχές που αυξάνονται σταδιακά και δημιουργούν αστάθειες.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η τύρβη δεν μπορεί να διατηρηθεί από μόνη της αλλά εξαρτάται από το πόση ενέργεια θα πάρει το περιβάλλον στο ροϊκό πεδίο. Μια συνηθισμένη πηγή ενέργειας για τις διακυμάνσεις της τύρβης είναι η διάτμηση στη μέση ροή. Γενικά οι περισσότερες τυρβώδεις ροές χαρακτηρίζονται ως διατμητικές. Όταν στο ροϊκό πεδίο δεν υπάρχει στοιχείο να προκαλεί διατήρηση της τύρβης τότε μετά από λίγο η τύρβη φθίνει.

Τέλος, αναφέρεται ότι βασικό συστατικό της τύρβης είναι ότι οι διακυμάνσεις είναι μηχανικές, δηλαδή οι κινήσεις των ροϊκών στοιχείων είναι κατά πολλές τάξεις μεγέθους

μεγαλύτερες από τις κινήσεις των μορίων του ρευστού. Οι μηχανικές διακυμάνσεις προκαλούν μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας.

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα για την προσομοίωση της τύρβης στο υπολογιστικό πακέτο Fluent και είναι τα ακόλουθα:

- Μοντέλο Spallart- Allmaras
- Κανονικό μοντέλο k-ε
- RNG k-ε μοντέλο (Renormalization Group – RNG)
- Ρεαλιστικό μοντέλο k-ε
- Μοντέλο τάσεων Reynolds (Reynolds Stress Model – RSM)
- Μοντελοποίηση μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation – LES)

Τα τρία πρώτα μοντέλα βασίζονται στην υπόθεση του Boussinesq ενώ τα υπόλοιπα σε διαφορετικές προσεγγίσεις.

2.4.1 Το μοντέλο standard k-ε

Τα πιο απλά 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 Lauder. 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 και το «ρεαλιστικό» k-ε μοντέλο

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια k και ο ρυθμός εκφυλισμού ε εξάγονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (24)$$

2.4.2 Το μοντέλο RNG k-ε

Το μοντέλο RNG k-ε εξήχθη χρησιμοποιώντας μία αυστηρή στατιστική θεωρία (renormalization group theory). Είναι παρόμοιο με το Standard k-ε, όμως περιλαμβάνει και τις ακόλουθες βελτιώσεις:

- Το μοντέλο RNG έχει έναν επιπρόσθετο όρο στην εξίσωσή του για το ε, ο οποίος βελτιώνει την ακρίβεια για ροές που «εντείνονται» απότομα.
- Η επίδραση της στροβιλικότητας στην τύρβη συμπεριλαμβάνεται στο RNG μοντέλο, βελτιώνοντας την ακρίβειά του στις στροβιλώδεις ροές.
- Η θεωρία RNG δίνει μία αναλυτική σχέση για τυρβώδεις αριθμούς Prandtl, ενώ το Standard k-ε χρησιμοποιεί για αυτό το σκοπό σταθερές που καθορίζονται από το χρήστη.

- Ενώ το Standard k-ε μοντέλο είναι ένα μοντέλο υψηλού αριθμού Reynolds, η θεωρία RNG δίνει μία αναλυτικά εξελιγμένη διαφορική εξίσωση για το δραστικό ιξώδες η οποία αποδίδει τις επιδράσεις του χαμηλού αριθμού Reynolds. Ωστόσο, η αποτελεσματική εφαρμογή αυτής της δυνατότητας εξαρτάται από την κατάλληλη αντιμετώπιση της περιοχής κοντά στα τοιχώματα.

Οι ανωτέρω βελτιώσεις κάνουν το μοντέλο RNG πιο ακριβές και αξιόπιστο για μια πιο ευρεία γκάμα ροών σε σχέση με το μοντέλο Standard k-ε. Το μοντέλο RNG k-ε αποτελεί μια εξελιγμένη παραπλήσια μορφή του Standard k-ε και οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί για την εξαγωγή των μεγεθών k και ε είναι:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (25)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (26)$$

Στις εξισώσεις αυτές ο όρος G_k αναπαριστά την παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω μέσων ταχυτήτων και το G_b είναι παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω άνωσης. Το Y_M αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά της ταλαντευόμενης συμπιεστής τύρβης στο ρυθμό εκφυλισμού. Τέλος, οι όροι α_k και α_ε είναι οι αντίστροφοι αριθμοί Prandtl για τα μεγέθη k και ε.

2.4.3 Το μοντέλο Realizable k-ε

Το τρίτο μοντέλο της κατηγορίας k-ε. Οι εξισώσεις μοντελοποίησης για τα k και ε για το Ρεαλιστικό k-ε μοντέλο είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (27)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (28)$$

όπου,

$$C_1 = \max \left[0,43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (29)$$

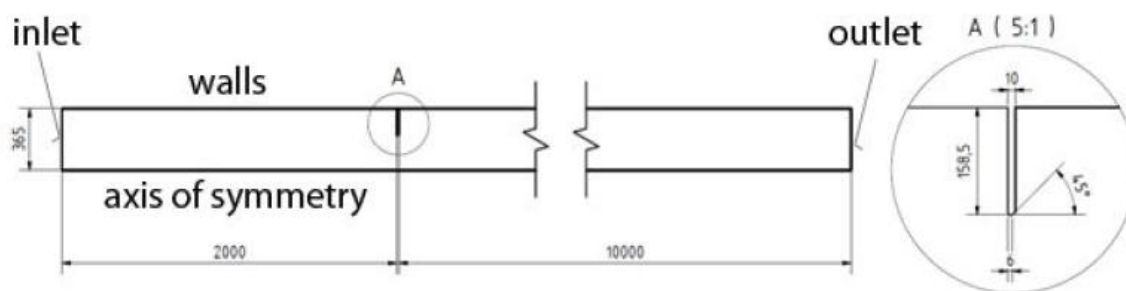
$$\eta = S k / \varepsilon \quad (30)$$

Σε αυτές τις εξισώσεις, το G_k αντιπροσωπεύει την παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω της μέσης βαθμωτής μεταβολής της ταχύτητας. Το G_b είναι παραγωγή κινητικής ενέργειας λόγω άνωσης. Το Y_M αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά της ταλαντευόμενης διεύρυνσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στο συνολικό ρυθμό κατάπτωσης. Τα C_2 και $C_{1\varepsilon}$ είναι σταθερές και τα σ_k και σ_ε είναι οι τυρβώδεις αριθμοί Prandtl για τα k και ε αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 ΜΟΝΤΕΛΟ 1: ΑΓΩΓΟΣ ΜΕ ΠΛΑΚΑ

Η ανάλυση του μοντέλου 1, της γεωμετρίας του αγωγού με πλάκα, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το ANSYS Workbench. Το μοντέλο 1 αποτελείται από τρία μέρη, δύο ευθύγραμμους σωλήνες και την πλάκα στομίου μεταξύ τους. Στην ανάλυση χρησιμοποιείται μόνο ο ανεστραμμένος στερεός όγκος, που είναι το ρευστό που ρέει μέσα από τους σωλήνες και την πλάκα του στομίου. Στην περίπτωση αυτή το φυσικό αέριο είναι το ρευστό μέσο. Το μοντέλο είναι άξονας συμμετρίας για να μειώσει τον αριθμό των κυψελών και να απλοποιήσει τον υπολογισμό. Λόγω της αξονικής συμμετρίας η γεωμετρία αποτελείται μόνο από το ήμισυ του τμήματος. Το ύψος του σωλήνα είναι 365 χιλιοστά, το μήκος εισόδου είναι 2.000 χιλιοστά και το μήκος εξόδου είναι 10.000 χιλιοστά (Σχήμα 1). Το πάχος της πλάκας στομίου είναι 10 χιλιοστά.

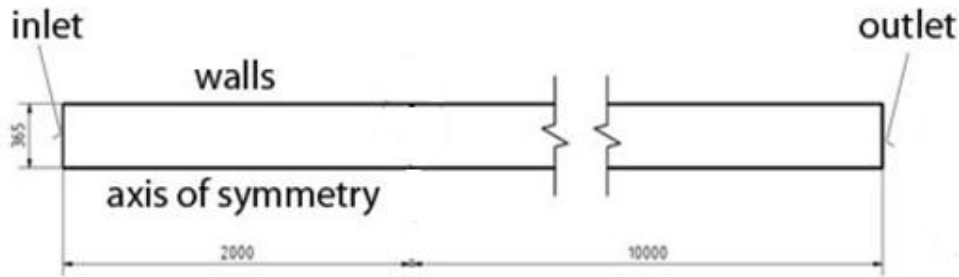


Εικόνα 3.1.1: Γεωμετρία μοντέλου 1 – Αγωγός με πλάκα

Οι ονομασίες inlet (είσοδος), walls (τοιχώματα), axis of symmetry (άξονας συμμετρίας) και outlet (έξοδος) αποτελούν τις οριακές συνθήκες του προβλήματος ώστε να πραγματοποιηθεί η υπολογιστική επίλυση και θα περιγράψουν αναλυτικά στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο.

3.2 ΜΟΝΤΕΛΟ 2: ΑΓΩΓΟΣ ΧΩΡΙΣ ΠΛΑΚΑ

Το δεύτερο πακέτο προσομοιώσεων που αφορούν το μοντέλο της ροής φυσικού αερίου σε αγωγό χωρίς πλάκα περιλαμβάνει τη γεωμετρία που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2.1.



Εικόνα 3.2.1: Γεωμετρία μοντέλου 2 – Αγωγός χωρίς πλάκα

3.3 Pre – Process – ΠΡΟ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η επίλυση των προβλημάτων με την μέθοδο της υπολογιστικής ρευστομηχανικής χωρίζονται σε τρία βασικά βήματα:

1. Την προ-επεξεργασία του προβλήματος (pre – process).
 - a. Στο βήμα αυτό δημιουργείται η γεωμετρία του προβλήματος σε σχεδιαστικό πακέτο και στη συνέχεια η γεωμετρία διαιρείται σε μικρούς όγκους – κελιά. Το σύνολο της γεωμετρίας διαιρεμένο σε κελιά ονομάζεται υπολογιστικό πλέγμα (grid/mesh). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Geometry καθώς και το πρόγραμμα Mesh της πλατφόρμας Ansys Workbench.
2. Ο λύτης (Solver), δηλαδή το λογισμικό που επιλύει τις διακριτοποιημένες μερικές διαφορικές εξισώσεις Navier-Stokes και δίνει προσεγγιστικές λύσεις στο πρόβλημα.
 - a. Στην παρούσα πτυχιακή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Ansys Fluent 16.0.
3. Η μετα-επεξεργασία (post-process), το λογισμικό που επιτρέπει την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων (αριθμητικά ή εικόνες με κατανομές μεταβλητών).
 - a. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CFD-Post Results της πλατφόρμας Ansys Workbench.

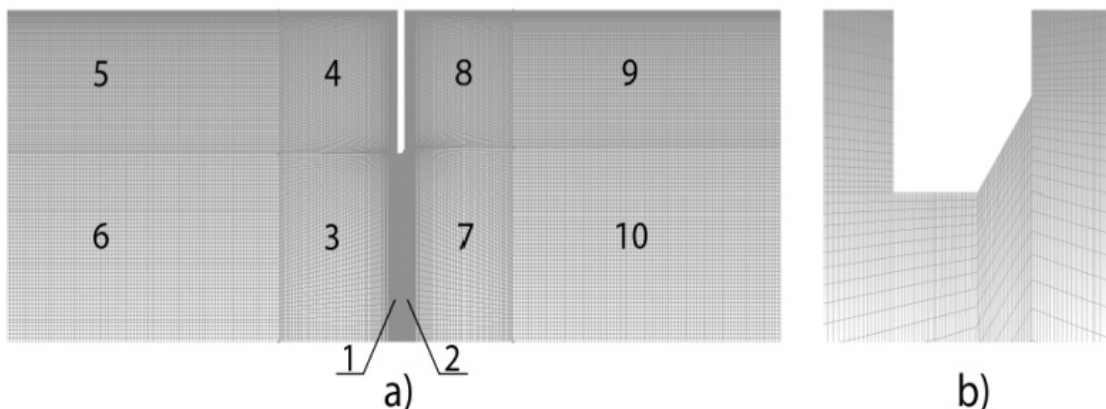
Η υπολογιστική γεωμετρία του μοντέλου 2, του αγωγού χωρίς την πλάκα, που παρουσιάζεται στις παραπάνω Εικόνες σχεδιάστηκε όπως αναφέρθηκε στο σχεδιαστικό εργαλείο Geometry (Ansys Workbench) και παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα 3.3.1.



Εικόνα 3.3.1: Μοντέλο 2 – Αγωγός χωρίς πλάκα

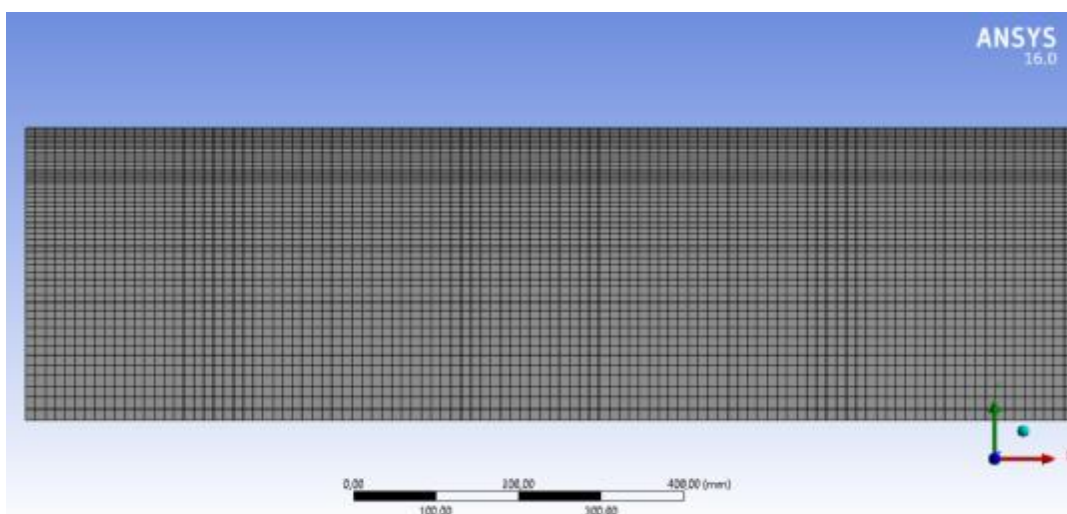
3.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ

Το πλέγμα και των δύο μοντέλων έχει 530.078 κόμβους. Η επιφάνεια του μοντέλου χωρίζεται σε δέκα τετράγωνα. Δύο τετράγωνα είναι για το τμήμα του ανοίγματος και τέσσερα τεμάχια είναι για κάθε σωλήνα (η διαίρεση της Εικόνας σχ. 3.4.1 είναι απαραίτητη για να γίνει το πλέγμα παχύτερο στις περιοχές γύρω από την πλάκα του στομίου (περιοχές: 1, 2, 3, 4, 7, 8) και τα τοιχώματα του αγωγού (περιοχές αριθ.: 4, 5, 8, 9). Στις περιοχές 6 και 10 δεν είναι σημαντικό να έχουμε τόσες πολλές κυψέλες και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το πλέγμα είναι λεπτότερο εκεί. Η χαμηλότερη απόσταση κοντά στα τοιχώματα και γύρω από την πλάκα του ανοίγματος είναι σημαντική για να γίνει πιο ρεαλιστική η συμπεριφορά της ροής του φυσικού αερίου, α) Πλέγμα με τη γεωμετρία να διαχωρίζεται γύρω από την άκρη της πλάκας διαφράγματος. (β) το πλέγμα γύρω από την πλάκα του στομίου με λεπτομέρεια.



Εικόνα 3.4.1: α) Πλέγμα με διαιρεμένη γεωμετρία, β) Λεπτομέρεια πλέγματος κοντά στην πλάκα

Στην παρακάτω Εικόνα 3.4.2 παρουσιάζεται λεπτομέρεια του πλέγματος για το μοντέλο 2, της γεωμετρίας χωρίς την πλάκα. Είναι εμφανής η πύκνωση προς το άνω τοίχωμα του αγωγού.



Εικόνα 3.4.2: Πλέγμα για λεπτομέρεια οριακού στρώματος κοντά στο άνω τοίχωμα.

Μόλις ολοκληρωθεί το πλέγμα τότε ορίζονται ονομαστικά οι ακμές που θα αποτελέσουν τις οριακές συνθήκες της προσομοίωσης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι οριακές συνθήκες που παρουσιάζονται είναι: A) Είσοδος (inlet), B) Τοίχωμα (Wall), C) Συμμετρία (ώστε να δημιουργεί αντίγραφο ως προς τη γραμμή συμμετρίας) και D) Έξοδος (Outlet).



Εικόνα 3.4.3: Οριακές συνθήκες γεωμετρίας

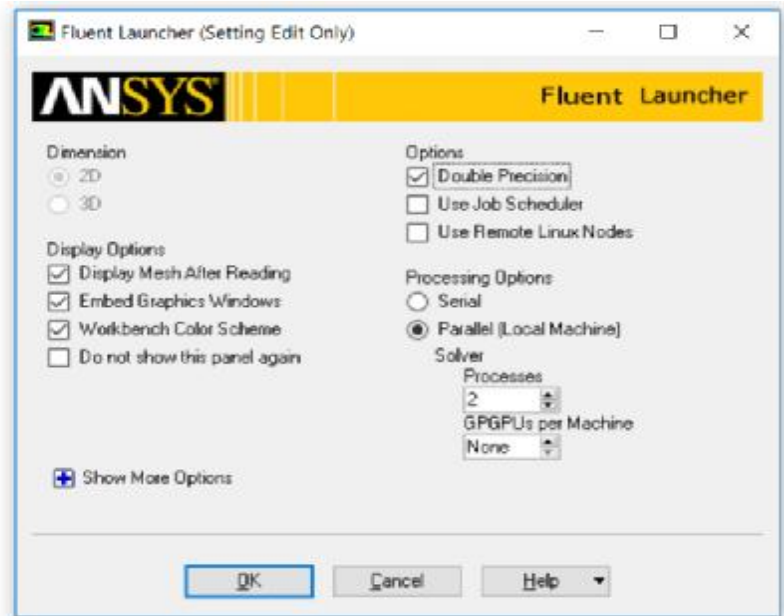
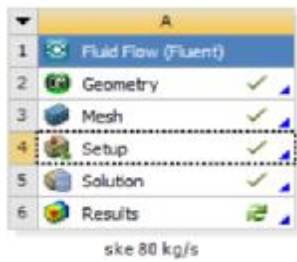
Από το εγχειρίδιο χρήσης της Ansys ως κριτήριο άριστου πλέγματος ορίζεται η τιμή skewness, η στρέβλωση του κελιού ως προς την αρχική του γεωμετρία. Όσο πιο κοντά στην τιμή μηδέν τόσο καλύτερη η ποιότητα του πλέγματος. Το πλέγμα στην παρούσα εργασία έχει μέση τιμή skewness ίση με $1,3068e-010$, που σημαίνει ότι το παραπάνω πλέγμα είναι στην κατηγορία του άριστου.

Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1,3057e-010
<input type="checkbox"/> Max	1,318e-010
<input type="checkbox"/> Average	1,3068e-010
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,

Εικόνα 3.4.4: Κριτήριο ποιότητας πλέγματος.

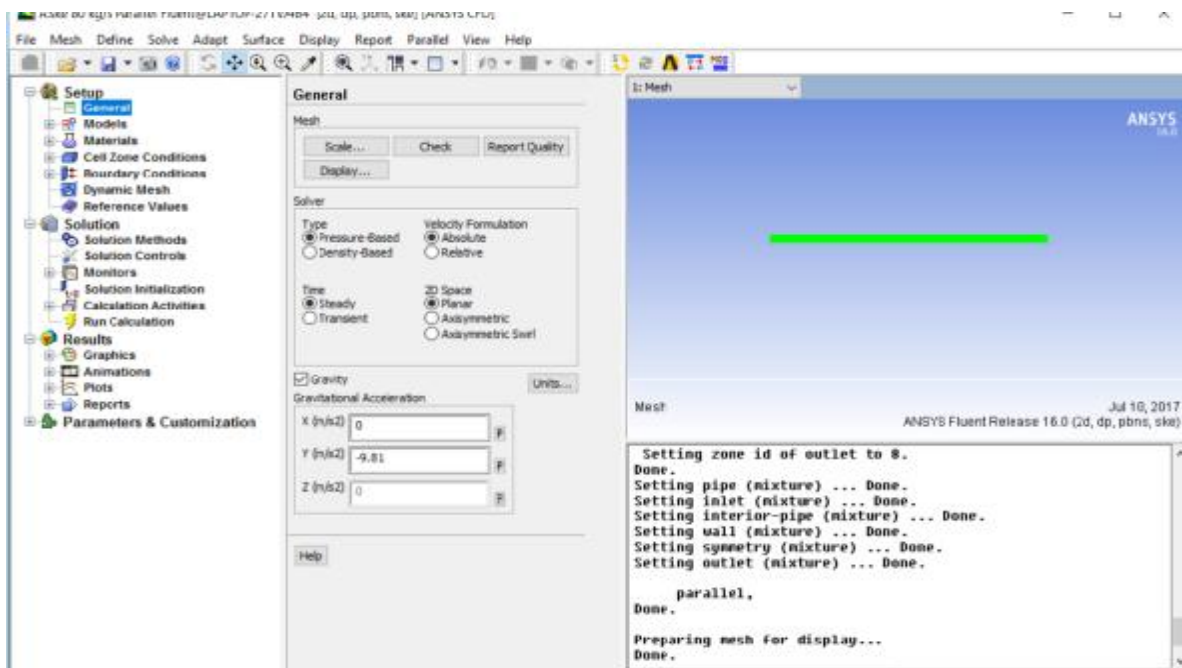
3.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ANSYS FLUENT

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματοποιείται συνοπτική παρουσίαση των βημάτων που απαιτούνται για την έναρξη της προσομοίωσης στο εμπορικό υπολογιστικό πακέτο Ansys Fluent. Στην Εικόνα 3.5.1 παρουσιάζεται το παράθυρο που εμφανίζεται όταν εισαχθεί σωστά το αρχείο Mesh στο πρόγραμμα Fluent. Δίνεται η δυνατότητα για παράλληλη επεξεργασία ανάλογα με τον αριθμό των πυρήνων που διαθέτει ο χρήστης.



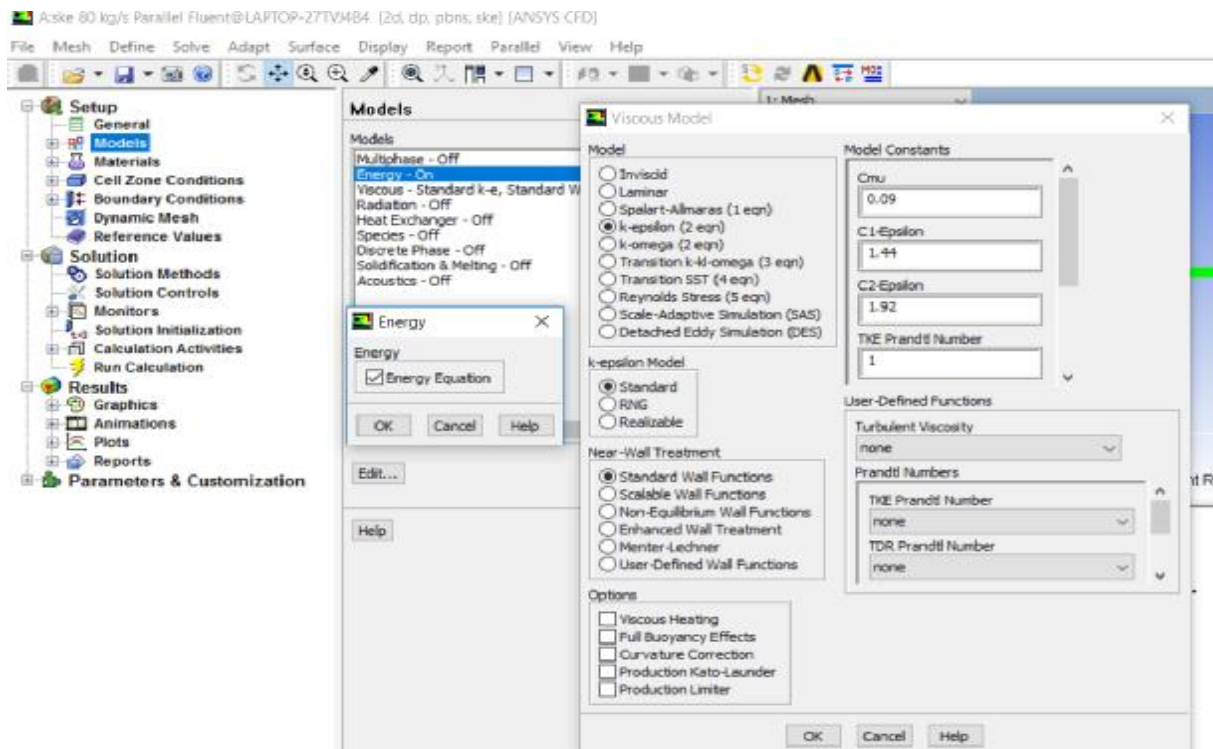
Εικόνα 3.5.1: Ορισμός πυρήνων υπολογιστικής ισχύος

Στην συνέχεια το παράθυρο το προγράμματος Fluent ανοίγει και μόλις φορτωθούν όλες οι σωστές ρυθμίσεις των βημάτων προ-επεξεργασίας (σωστή γεωμετρία, σωστό πλέγμα και σωστή ονομασία οριακών συνθηκών) τότε εμφανίζεται το μήνυμα Done. Στην αριστερή πλευρά της οθόνης εμφανίζονται τα βήματα – επιλογές που πρέπει να οριστούν πριν τον τελικό υπολογισμό. Στο συγκεκριμένο παράθυρο μπορεί να γίνει έλεγχος της ποιότητας του πλέγματος, να γίνει προβολή ή απόκρυψη κάποιων τμημάτων της γεωμετρίας, να οριστεί αν το πρόβλημα είναι αξονοσυμμετρικό, να οριστεί αν το πρόβλημα είναι χρονικά εξαρτημένο ή γίνεται η παραδοχή της συνεχούς ροής και τέλος να οριστεί η τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Οι παραπάνω παρατηρήσεις παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.5.2.



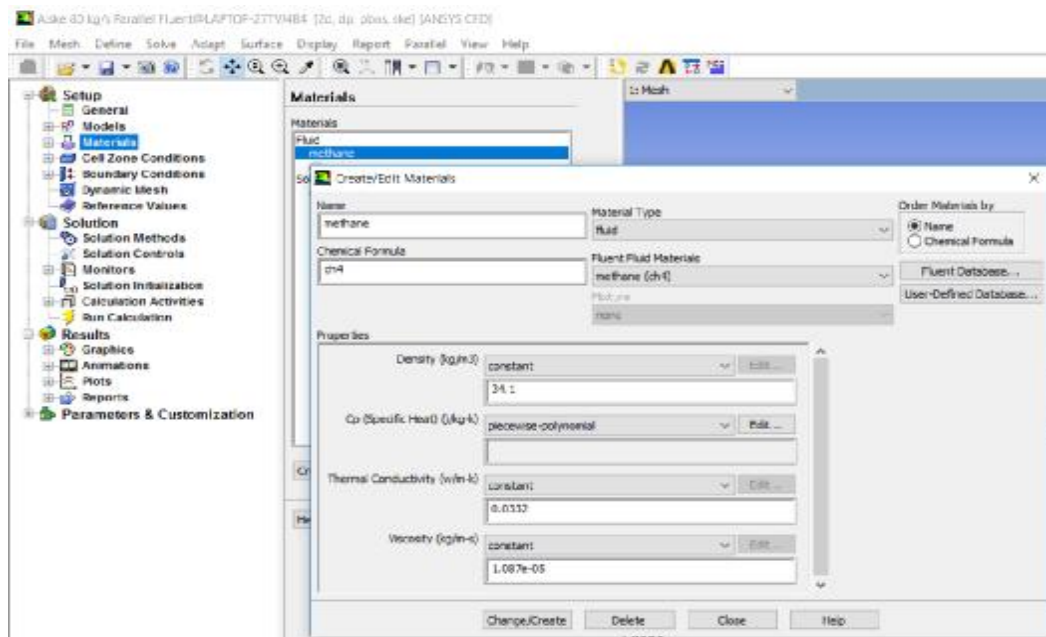
Εικόνα 3.5.2: Αρχική επιφάνεια εργασίας προγράμματος Fluent

Στη συνέχεια στην καρτέλα Models μπορεί να οριστεί αν το πρόβλημα αφορά ροή πολλών ρευστών (πολυφασική ροή), να ενεργοποιηθεί η επιλογή Energy αν υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές, να επιλεγεί μοντέλο προσομοίωσης της τύρβης. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.5.3 το μοντέλο Standard k-ε.



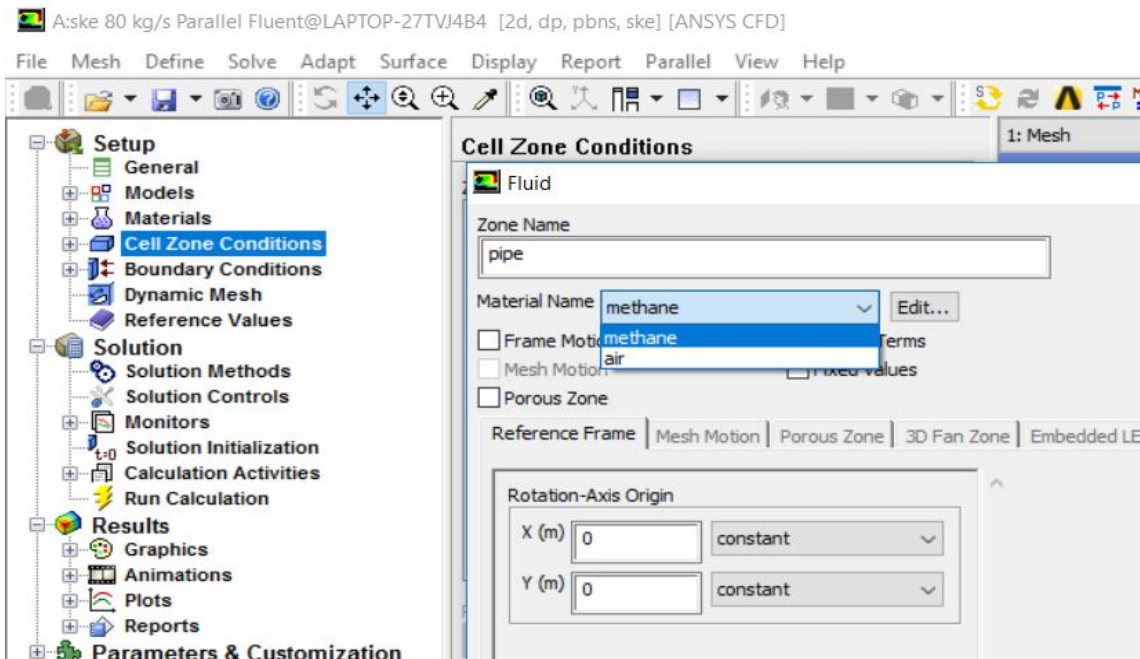
Εικόνα 3.5.3: Καθορισμός μοντέλου τύρβης

Στην επόμενη Εικόνα 3.5.4 απεικονίζεται η εισαγωγή του ρευστού λειτουργίας και συγκεκριμένα του μεθανίου από την βιβλιοθήκη του Fluent.



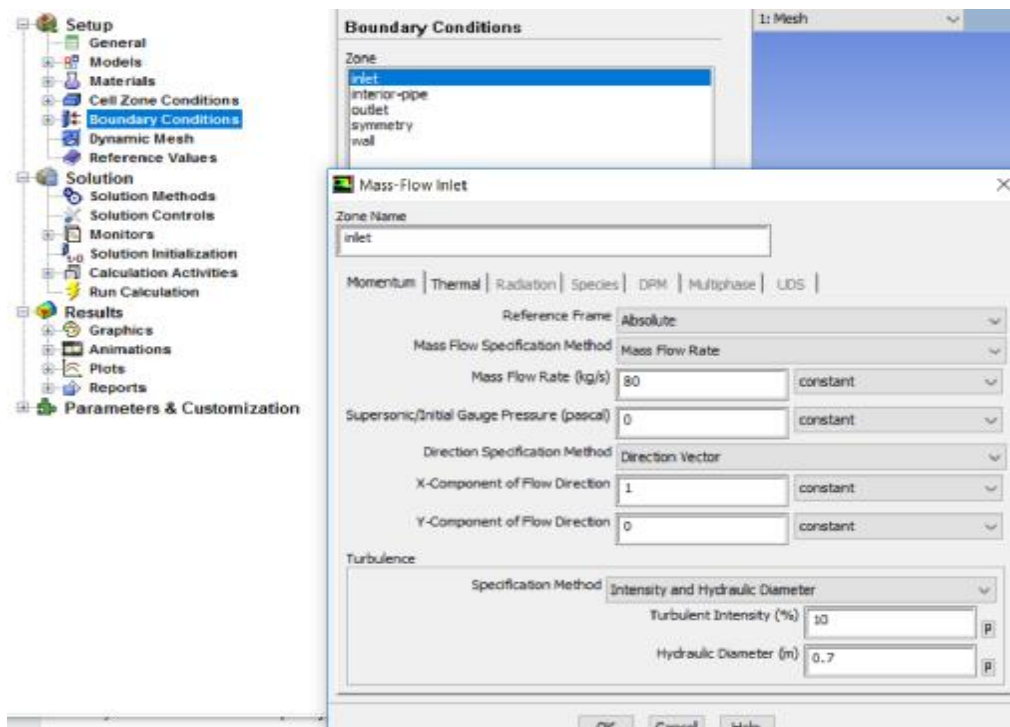
Εικόνα 3.5.4: Καθορισμός μοντέλου τύρβης

Το προκαθορισμένο ρευστό λειτουργίας που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα είναι ο αέρας. Στην Εικόνα 3.5.5 παρουσιάζεται στην καρτέλα Cell-Zone Conditions η επιλογή του μεθανίου ως ρευστό λειτουργίας για τις προσομοιώσεις.



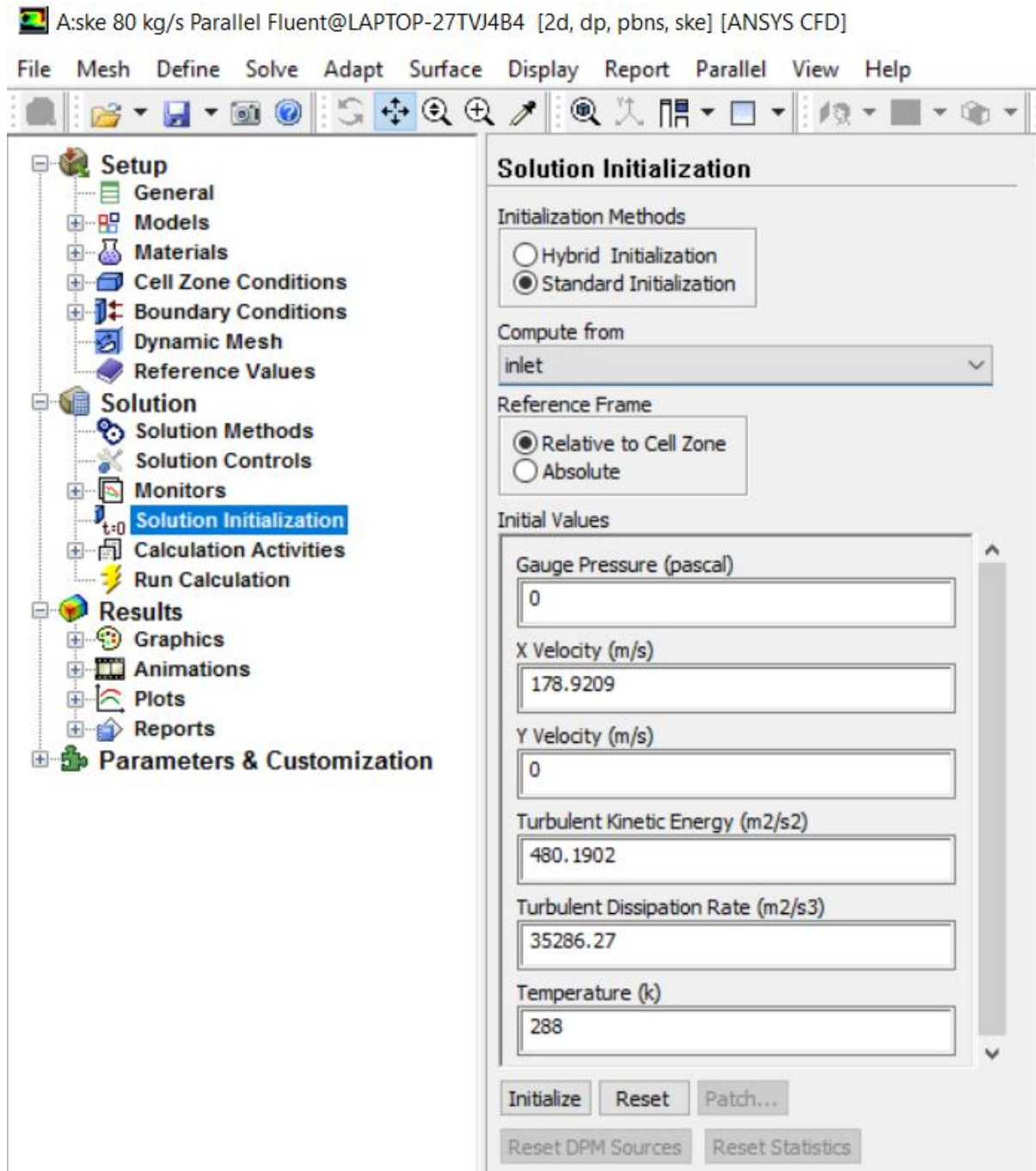
Εικόνα 3.5.5: Ορισμός μεθανίου ως ρευστό λειτουργίας

Το επόμενο βήμα αφορά την εισαγωγή των ταχυτήτων-παροχών μάζας, των λειτουργικών πιέσεων κτλ. Στην Εικόνα 3.5.6 παρουσιάζεται η καρτέλα για την εισαγωγή της παροχής εισόδου από την είσοδο της γεωμετρίας (inlet). Επίσης, ορίζονται παράμετροι όπως η διεύθυνση της ροής, η ένταση των φαινομένων τύρβης και η υδραυλική διάμετρος.



Εικόνα 3.5.6: Ορισμός παροχής μάζας

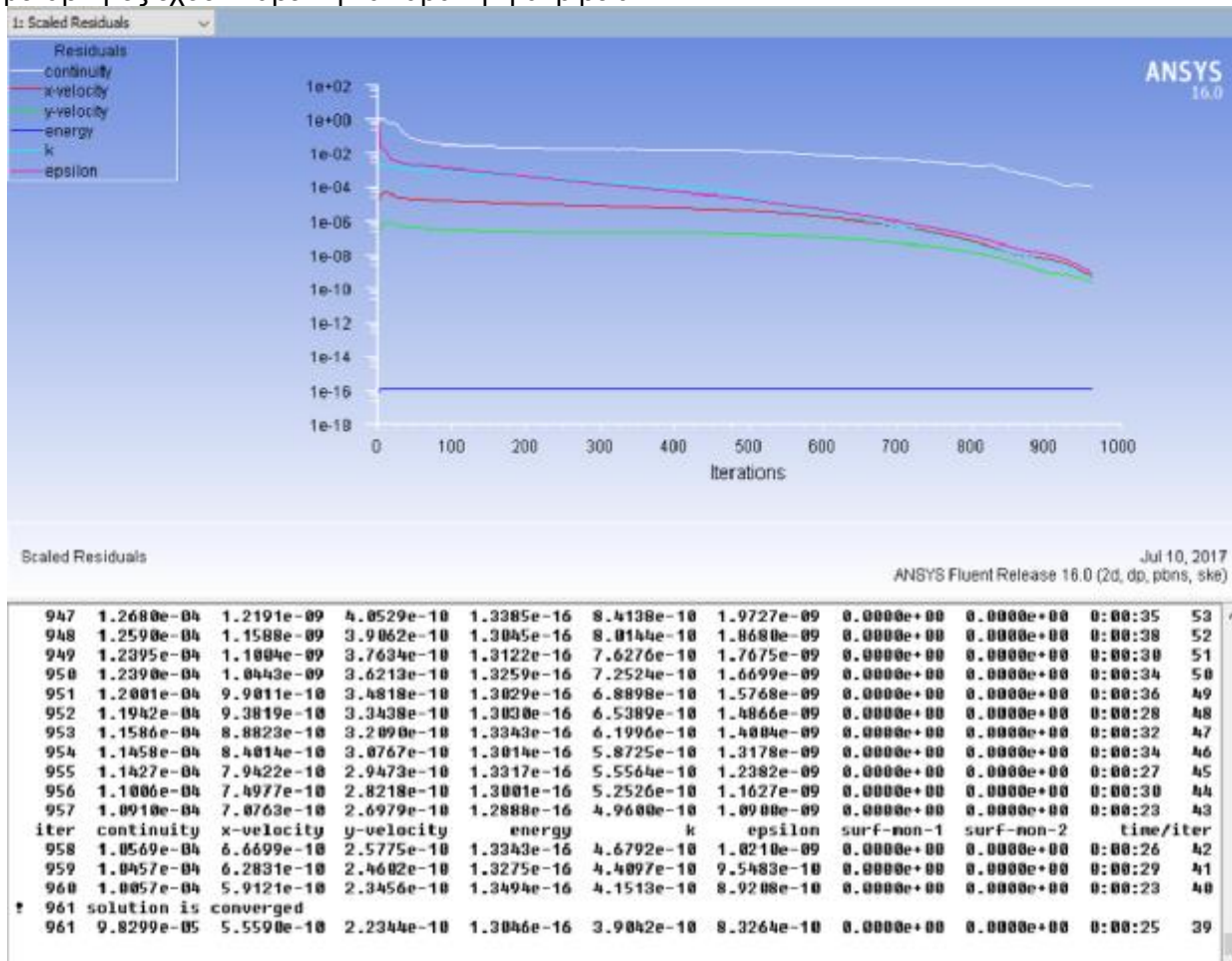
Παραλείπονται κάποια βήματα σχετικά με τις μεθοδολογίες για την σύζευξη των μεγεθών πίεσης και ταχύτητας, όπου παρέμεινε η προκαθορισμένη επιλογή από το πρόγραμμα – ο αλγόριθμος SIMPLE. Επίσης, τα υπόλοιπα (η ακρίβεια των υπολογισμών) ορίστηκε να είναι της τάξεως 10^{-5} . Στην Εικόνα 3.5.7 παρουσιάζεται η καρτέλα όπου επιλέγεται η είσοδος της ροής ως σημείο έναρξης των υπολογισμών καθώς και υπολογισμού της τυχαίας αρχικής τιμής για την έναρξη των υπολογισμών των μερικών διαφορικών εξισώσεων.



Εικόνα 3.5.7: Ορισμός εισόδου ως αναφορά έναρξης υπολογισμών

Στην τελευταία Εικόνα 3.5.8 παρουσιάζεται η εικόνα που λαμβάνει ο χρήστης καθώς πραγματοποιείται η επίλυση του προβλήματος. Με την απεικόνιση του μηνύματος "solution is

converged – Η λύση έχει συγκλίνει” η λύση σταματά και θεωρείται ολοκληρωμένη καθώς οι μεταβλητές έχουν λάβει την απαραίτητη ακρίβεια.



Εικόνα 3.5.8: Απεικόνιση υπολοίπων (Residuals) και σύγκλιση λύσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 1: ΑΓΩΓΟΣ ΜΕ ΠΛΑΚΑ (ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ)

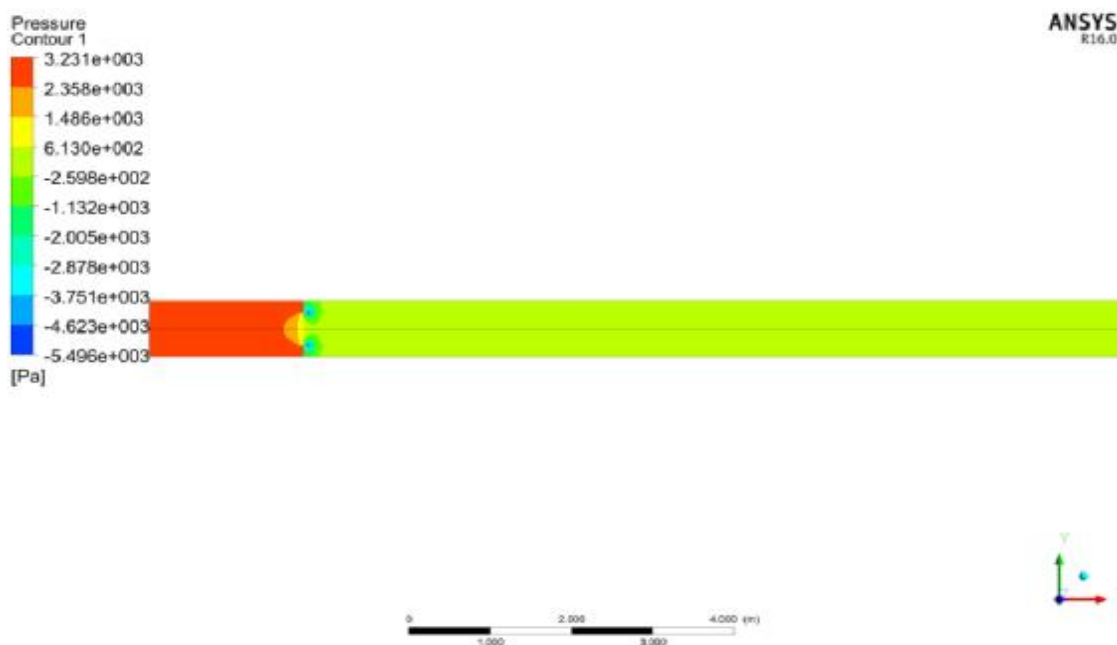
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την περίπτωση της μονοφασικής ροής. Στην βιβλιογραφία (R. Kiš, M. Malcho, M. Janoncová, 2014) αναφέρεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις το φυσικό αέριο προσεγγίζεται ως ένα ρευστό καθώς η περιεκτικότητα του μεθανίου είναι πάρα πολύ υψηλή (98.39%).

Τα αποτελέσματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Εικόνες ορατοποίησης της κατανομής της πίεσης και της ταχύτητας.
- Διαγράμματα κατανομής της πίεσης και της ταχύτητας πάνω στην αξονική γραμμή της γεωμετρίας.

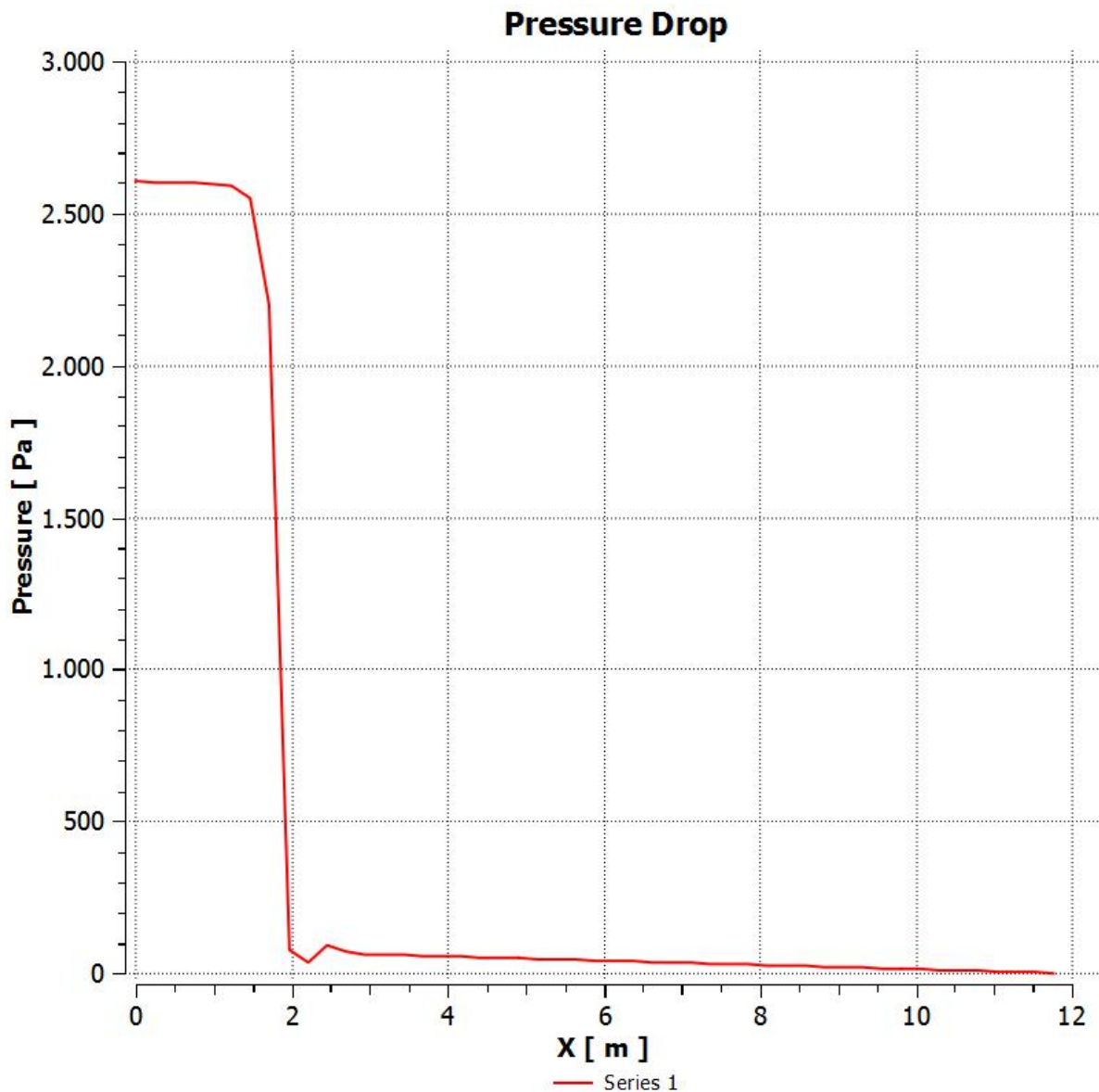
Ø 40 kg/s

Στο Σχήμα 4.1.1 παρουσιάζεται η κατανομή της μονοφασικής κατανομής της πίεσης μέσα στον αγωγό με την πλάκα. Παρατηρείται ότι μέχρι το σημείο της πλάκας επικρατεί υψηλή πίεση εντός του αγωγού. Στην στένωση της διατομής λόγω της πλάκας δημιουργείται περιοχή μείωσης της πίεσης και αμέσως μετά της πλάκας υπάρχουν δύο περιοχές με αρνητικές τιμές πιέσεων. Στην συνέχεια η τιμή της πίεσης εντός του αγωγού σταθεροποιείται.



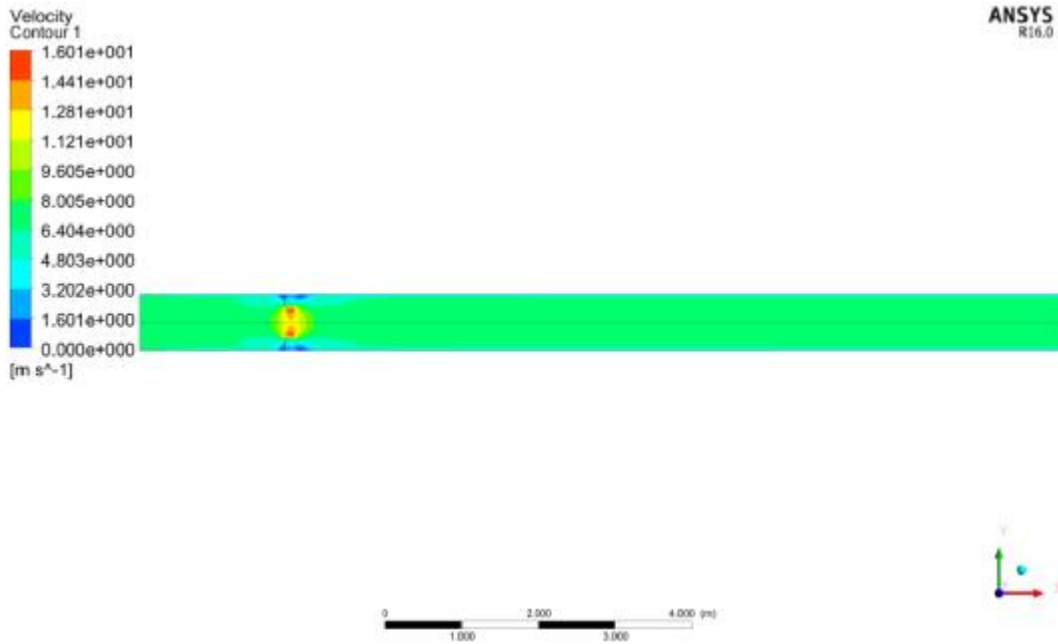
Σχήμα 4.1.1: Κατανομή πίεσης για μονοφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

Στο Σχήμα 4.1.2 παρουσιάζεται η κατανομή της πτώσης πίεσης εντός του αγωγού με μετρητική πλάκα για την περίπτωση της μονοφασικής ροής. Το διάγραμμα επιβεβαιώνει την ορατοποίηση της πτώσης πίεσης του Σχ. 4.1.3 καθώς στα 2 πρώτα μέτρα της γεωμετρίας επικρατεί υψηλή τιμή πίεσης και στο σημείο που η μονοφασική ροής προσκρούει στην πλάκα επέρχεται πτώση πίεσης σε σχεδόν μηδενικές τιμές. Να σημειωθεί ότι η κατανομή αυτή είναι για την αξονική γραμμή της γεωμετρίας.

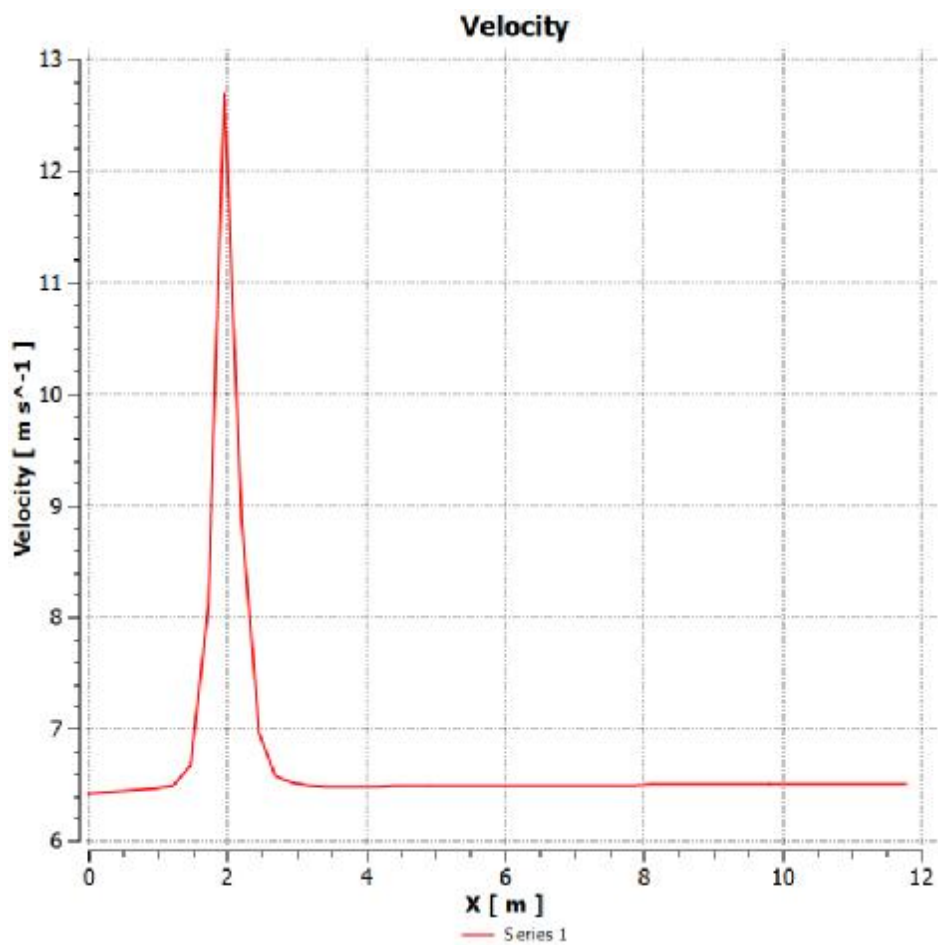


Σχήμα 4.1.2: Κατανομή πτώσης πίεσης στην αξονική γραμμή για μονοφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

Στο Σχήμα 4.1.3 παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας εντός του αγωγού με μονοφασική ροή με πλάκα. Η κατανομή της ταχύτητας παρουσιάζει αλλαγή στο σημείο της στένωσης. Παρατηρείται ότι αυξάνει η ταχύτητα στο σημείο αλλαγής της διατομής και πίσω από τις πλάκες υπάρχει περιοχή στροβίλων. Στο διάγραμμα του Σχ. 4.1.4 παρατηρείται η αύξηση της ταχύτητας στο σημείο της στένωσης πάνω στην αξονική γραμμή.



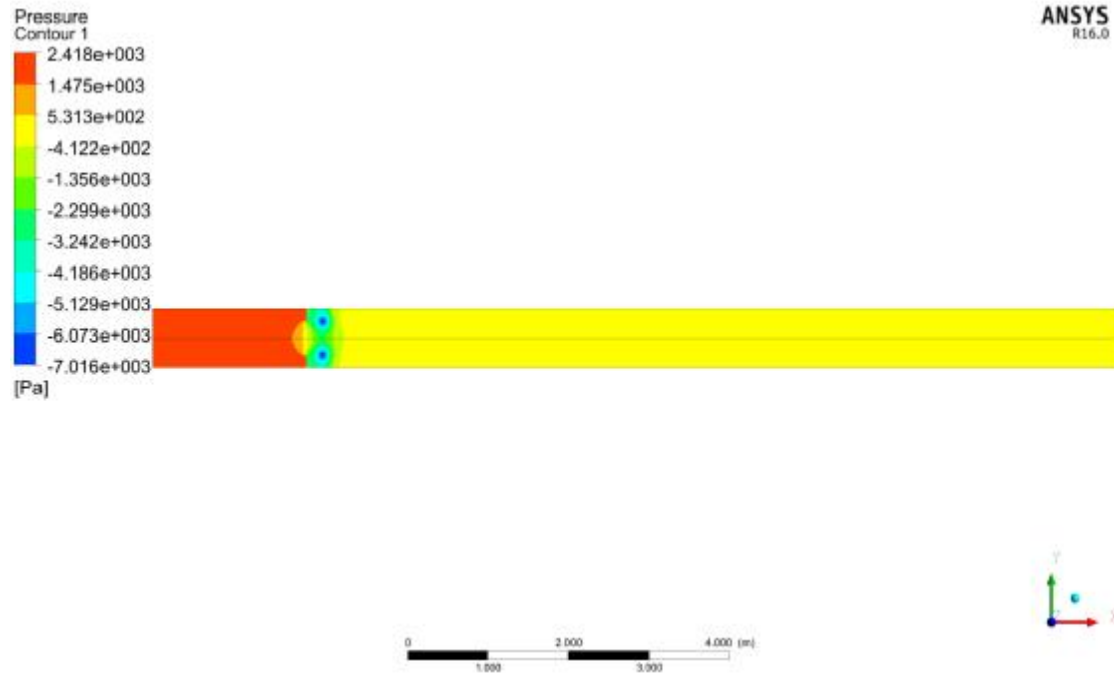
Σχήμα 4.1.3: Κατανομή ταχύτητας για μονοφασική ροή σε αγωγό με πλάκα



Σχήμα 4.1.4: Κατανομή ταχύτητας στην αξονική γραμμή για μονοφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

Ø 80 kg/s

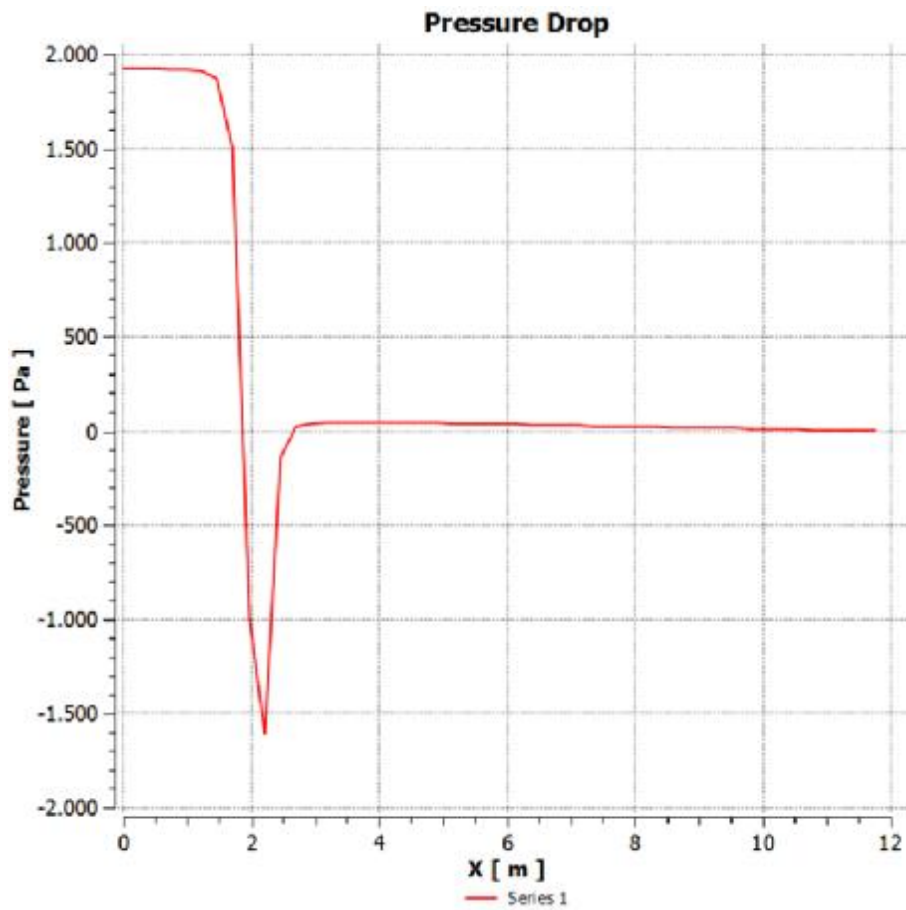
Στο Σχήμα 4.1.5 παρουσιάζεται η κατανομή της πτώσης πίεσης για μονοφασική ροή μεθανίου σε αγωγό με πλάκα. Παρατηρείται ότι στο αρχικό μήκος των 2000 mm η πίεση είναι υψηλή και στο σημείο της στένωσης υπάρχει περιοχή πτώσης πίεσης. Υψηλότερη πτώση παρατηρείται και στα σημεία πίσω από τις πλάκες όπου δημιουργούνται στρόβιλοι ανακυκλοφορίας.



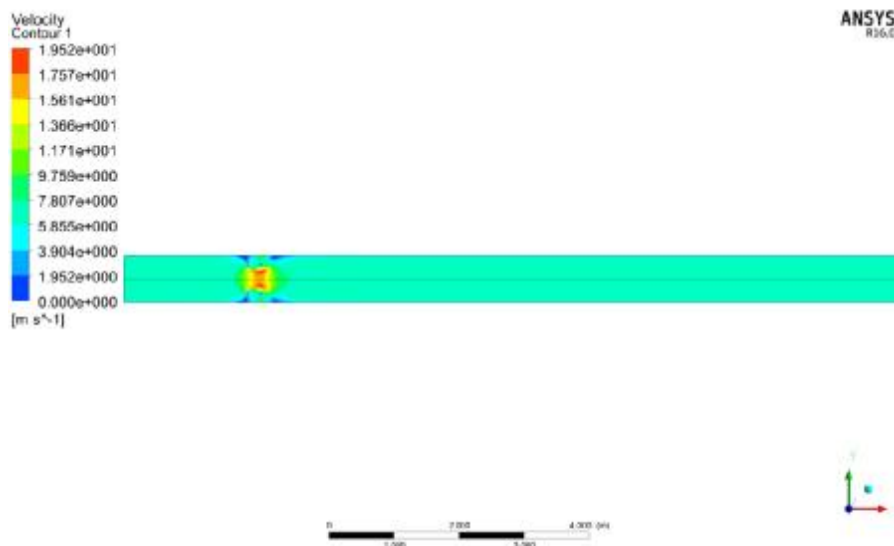
Σχήμα 4.1.5: Κατανομή πίεσης για μονοφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

Στο Σχήμα 4.1.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα της πτώσης πίεσης στην αξονική γραμμή του αγωγού. Παρατηρείται ότι στο αρχικό μήκος των 2000 mm η πίεση είναι υψηλή, της τάξεως των 1800 Pa και στη συνέχεια στο σημείο της στένωσης πέφτει στα -1500 Pa έως όπου σταθεροποιηθεί σε μια σταθερή σχεδόν τιμή περίπου στα 50 Pa.

Στο Σχήμα 4.1.7 παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας για μονοφασική ροή μεθανίου σε αγωγό με πλάκα για την παροχή των 80 kg/s. Οι σημαντικότερες διαφορές είναι ότι παρατηρούνται περιοχές με αρνητική πίεση και στο εμπρός μέρος των πλακών. Αντίστοιχα η περιοχή αυξημένης ταχύτητας είναι μεγαλύτερη από ότι στην προηγούμενη περίπτωση.

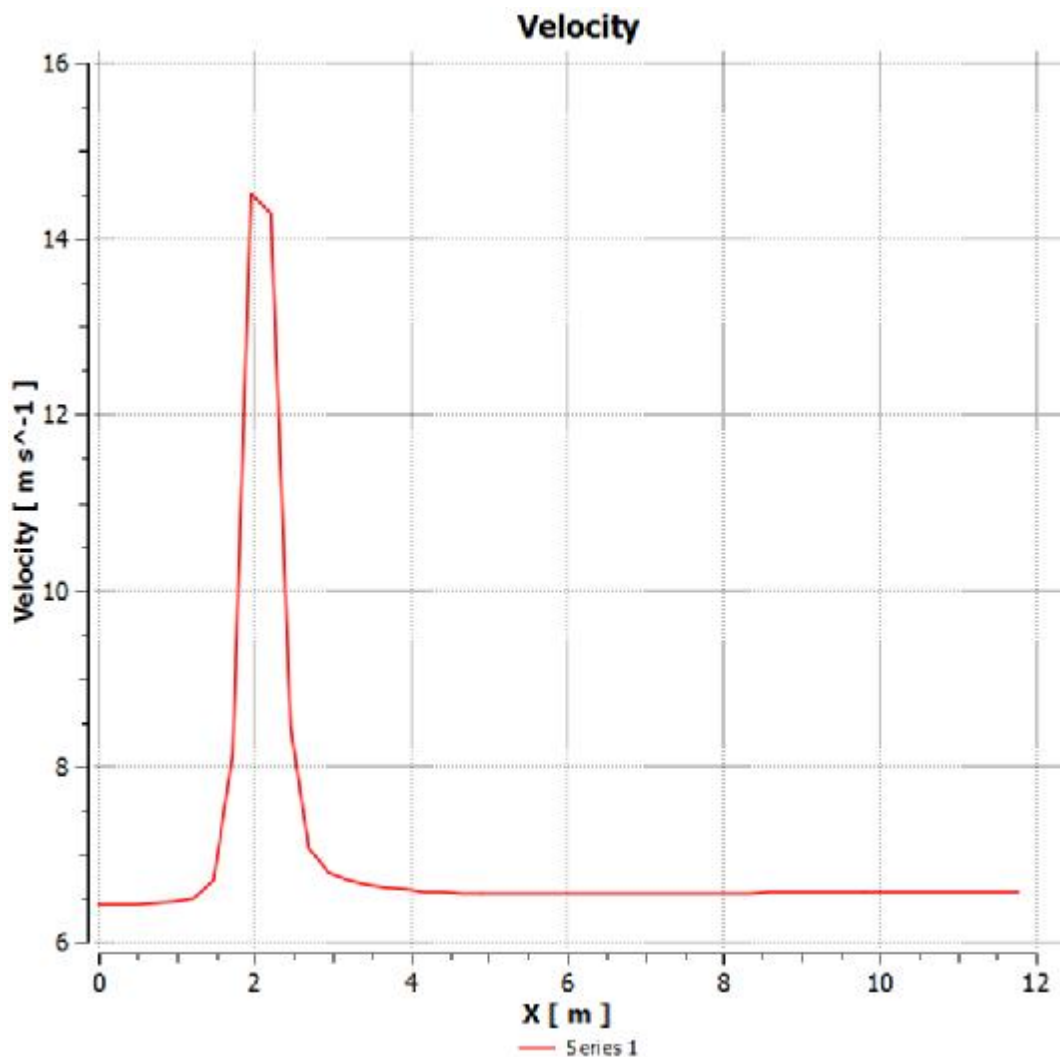


Σχήμα 4.1.6: Κατανομή πτώσης πίεσης στην αξονική γραμμή για μονοφασική ροή σε αγωγό με πλάκα



Σχήμα 4.1.7: Κατανομή ταχύτητας για μονοφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

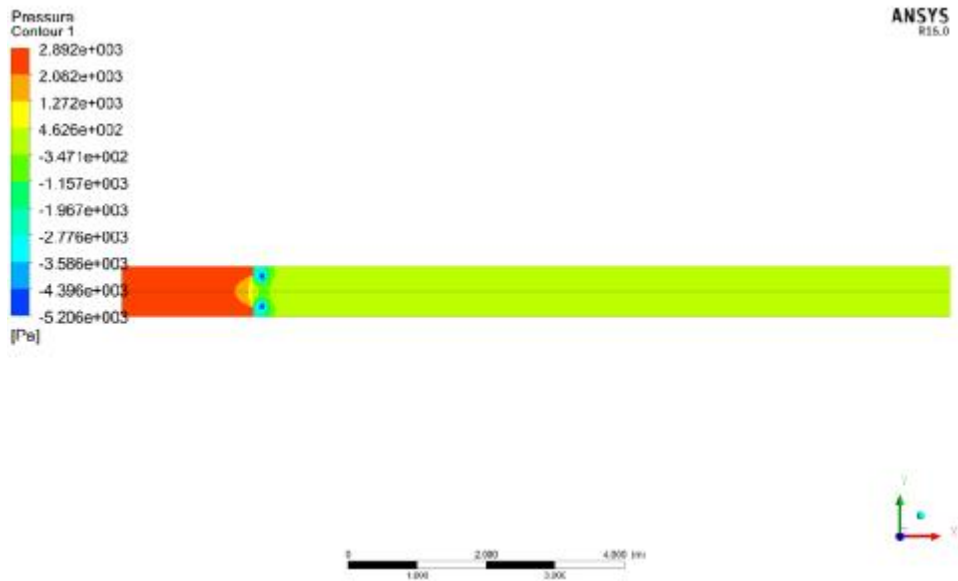
Τέλος, η κατανομή της ταχύτητας πάνω στην αξονική γραμμή της γεωμετρίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.8 όπου στο σημείο της στένωσης λαμβάνει μέγιστη τιμή της τάξεως των 14.5 m/s. Στη συνέχεια, η ταχύτητα μειώνεται σε μια σχεδόν σταθερή τιμή 6.5 – 7 m/s.



Σχήμα 4.1.8: Κατανομή ταχύτητας στην αξονική γραμμή για μονοφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

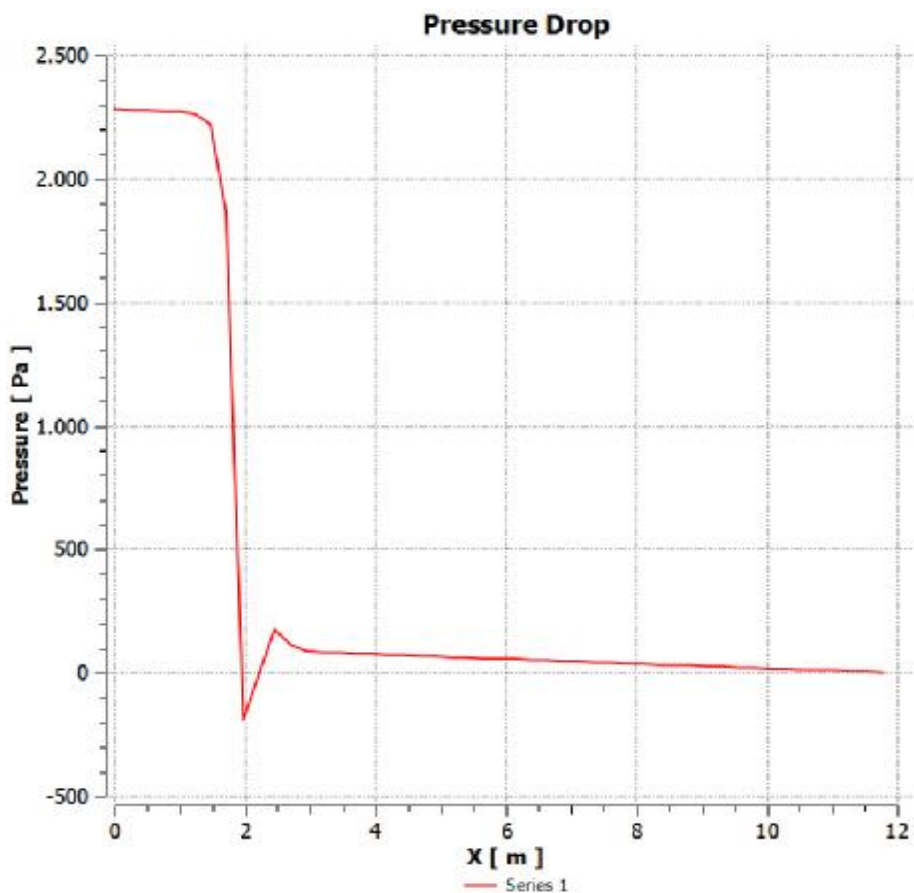
Ø 120 kg/s

Τα αποτελέσματα για την τρίτη και τελευταία παροχή που εξετάστηκε στην μονοφασική ροή αγωγού με πλάκα παρουσιάζονται σε αυτό το υποκεφάλαιο. Στο Σχήμα 4.1.9 παρουσιάζεται η πτώση πίεσης εντός του αγωγού για ροή μεθανίου. Παρατηρείται ίδια συμπεριφορά με την παροχή των 80 kg/s με υψηλή πίεση μέχρι την πρόσκρουση στις πλάκες. Στη συνέχεια υπάρχει περιοχή αρνητικών πιέσεων και τέλος η πίεση σταθεροποιείται. Στο Σχήμα



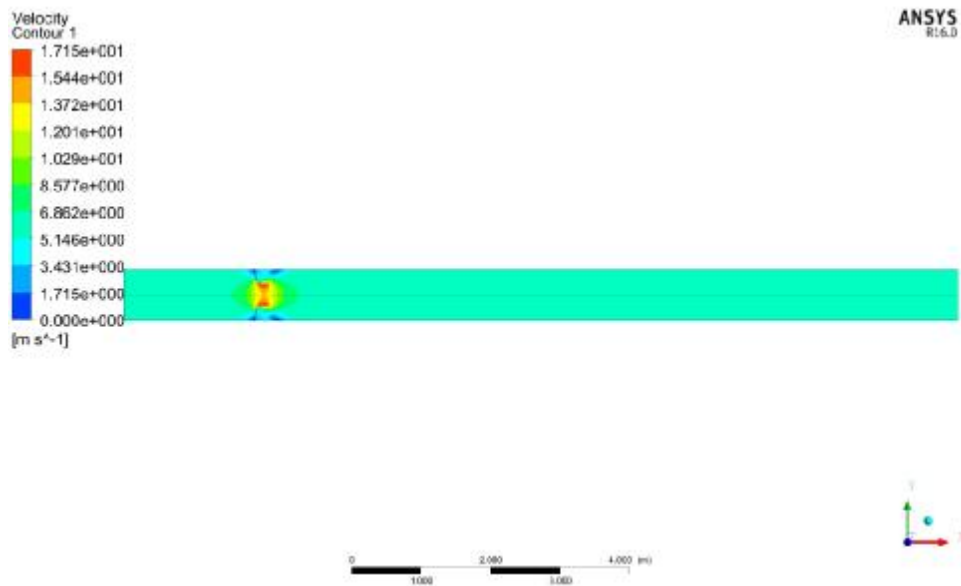
Σχήμα 4.1.9: Κατανομή πίεσης για μονοφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

Το διάγραμμα της πτώσης πίεσης για τα 120 kg/s απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1.10 όπου στα πρώτα 2000 mm επικρατεί υψηλή πίεση 2500 Pa και στην στένωση λαμβάνει ελάχιστη τιμή της τάξεως των – 250 Pa.

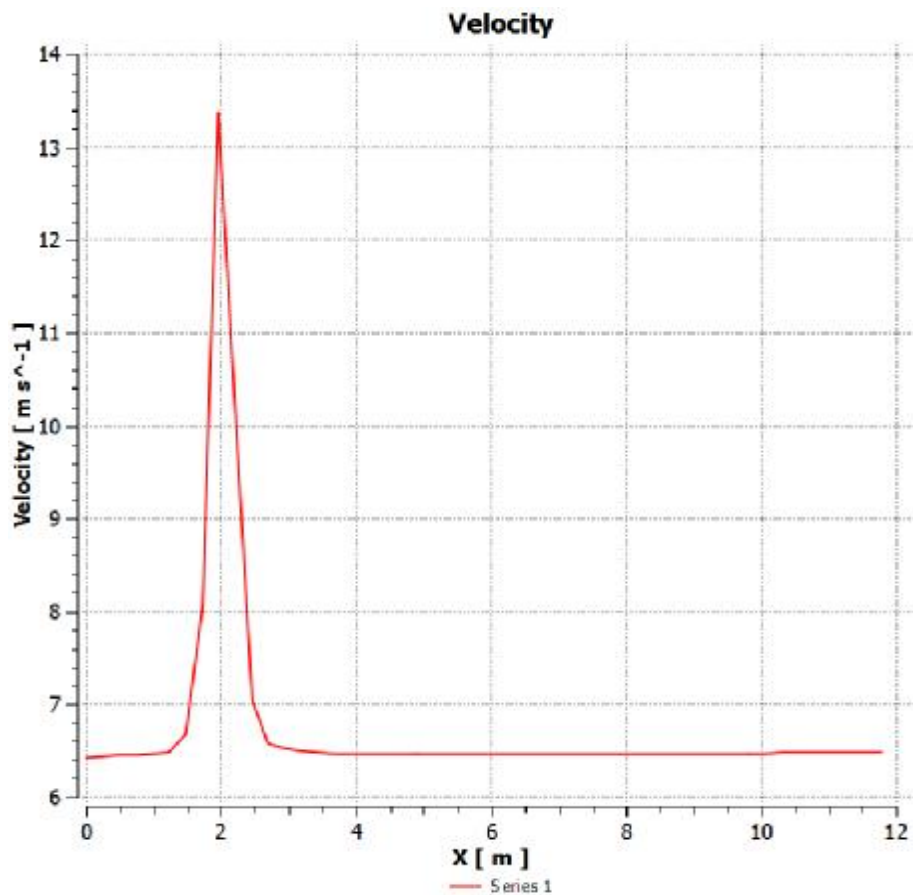


Σχήμα 4.1.10:Κατανομή πτώσης πίεσης στην αξονική γραμμή για μονοφασική ροή σε αγωγό με πλάκα.

Η κατανομή της ταχύτητας μέσα στον αγωγό για την παροχή των 120 kg/s παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.11. Παρατηρούνται ξανά περιοχές αρνητικής πίεσης και ανάντι και κατόντι της πλάκας. Το διάγραμμα με την αξονική ταχύτητα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.12 με μέγιστη τιμή 13.4 m/s.



Σχήμα 4.1.11: Κατανομή ταχύτητας για μονοφασική ροή σε αγωγό με πλάκα



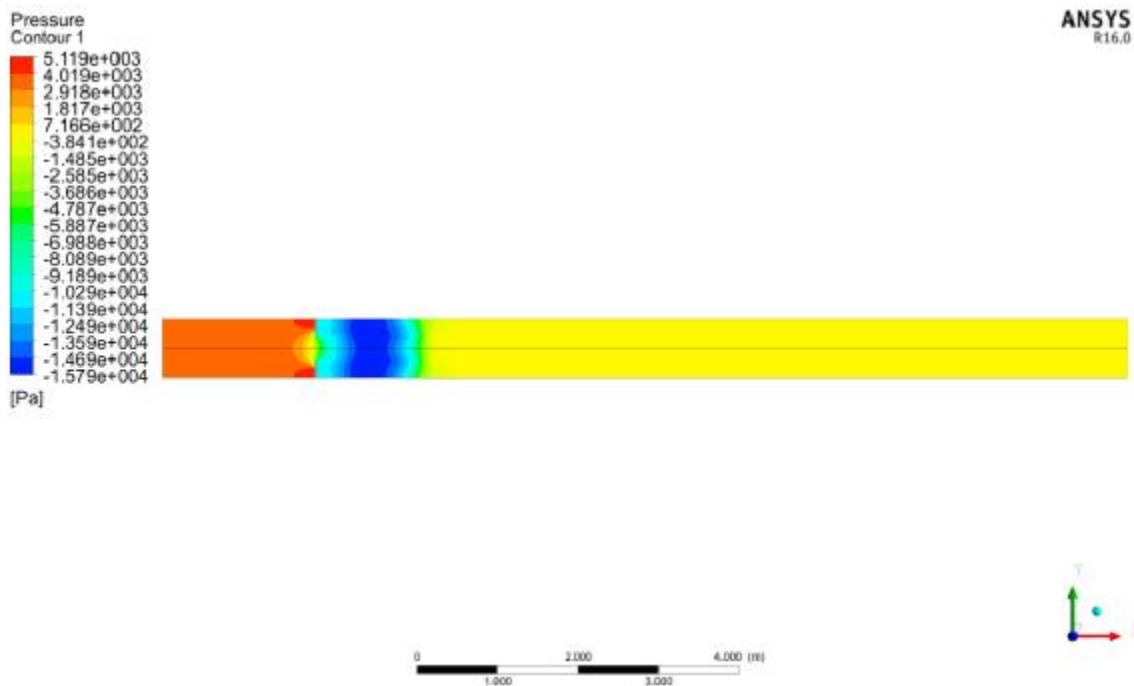
Σχήμα 4.1.12: Κατανομή ταχύτητας στην αξονική γραμμή για μονοφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 1: ΑΓΩΓΟΣ ΜΕ ΠΛΑΚΑ (ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ)

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τον αγωγό με πλάκα για περίπτωση που το φυσικό αέριο προσεγγίζεται ως μίγμα.

Ø 40 kg/s

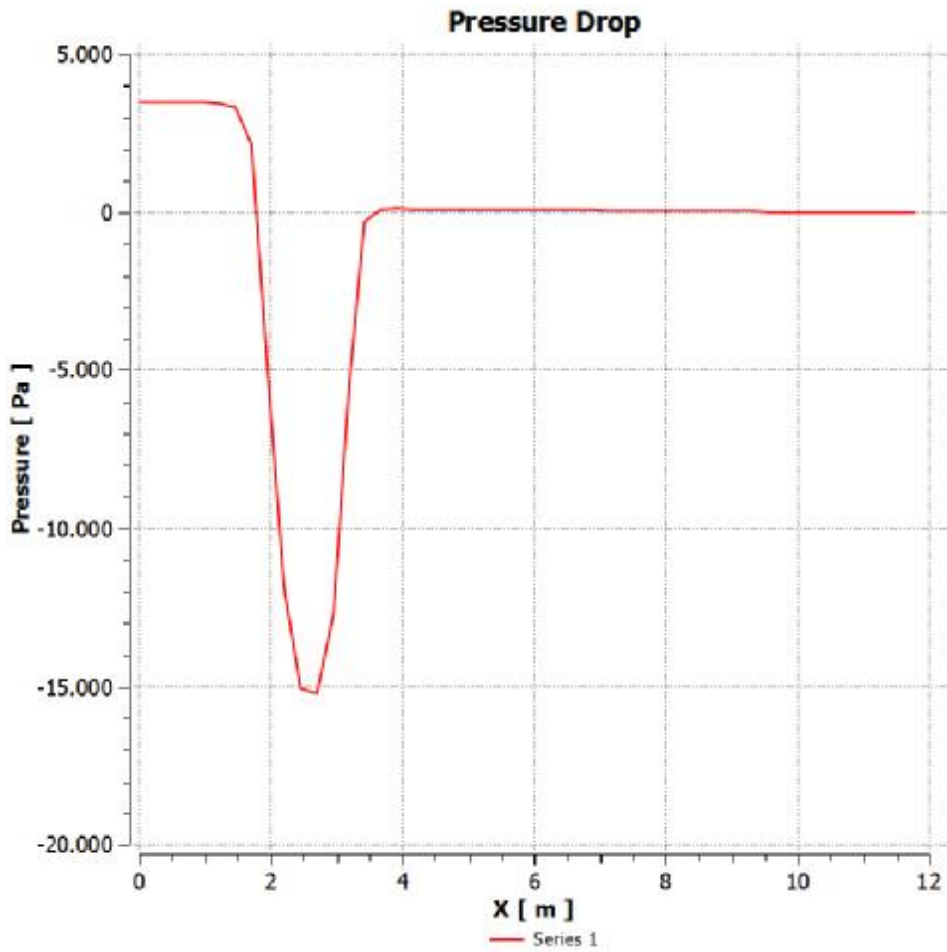
Η κατανομή της πτώσης πίεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.1 και παρουσιάζει σημαντικές διαφορές με την περίπτωση της μονοφασικής ροής του Κεφαλαίου 4.1. Παρατηρείται ότι στα πρώτα 2000 mm η πίεση λαμβάνει υψηλές τιμές, στη συνέχεια η ροή προσκρούει στις πλάκες και στη συνέχεια δημιουργείται μεγάλη περιοχή υποπίεσης. Τέλος, η πίεση σταδιακά αυξάνεται και αποκτά σταθερή τιμή.



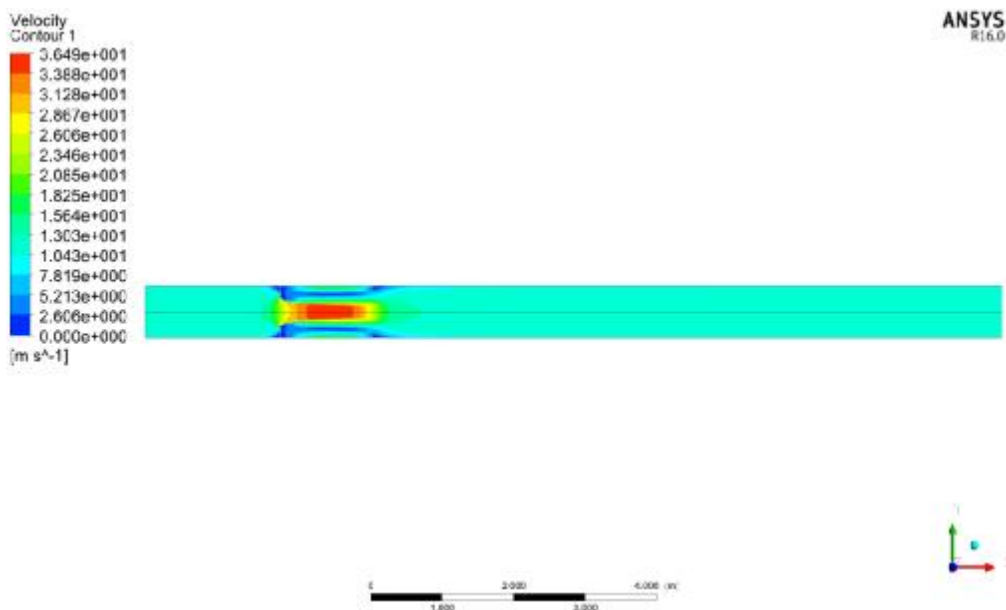
Σχήμα 4.2.1: Κατανομή πίεσης για διφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

Στο Σχήμα 4.2.2 παρουσιάζεται η κατανομή της αξονική πτώσης πίεσης μέσα στον αγωγό. Η πίεση αρχικά λαμβάνει υψηλές τιμές (περίπου 3500 Pa), έπειτα στα -15.000 Pa και έπειτα σταθεροποιείται σε χαμηλές θετικές τιμές.

Στο Σχήμα 4.2.3 παρατηρείται μεγαλύτερη περιοχή αυξανόμενης ταχύτητας από τη διατομή μεταξύ των πλακών. Παράλληλα, πίσω από τις πλάκες δημιουργούνται περιοχές πτώσης πίεσης με μεγαλύτερο μήκος από ότι στην μονοφασική ροή.

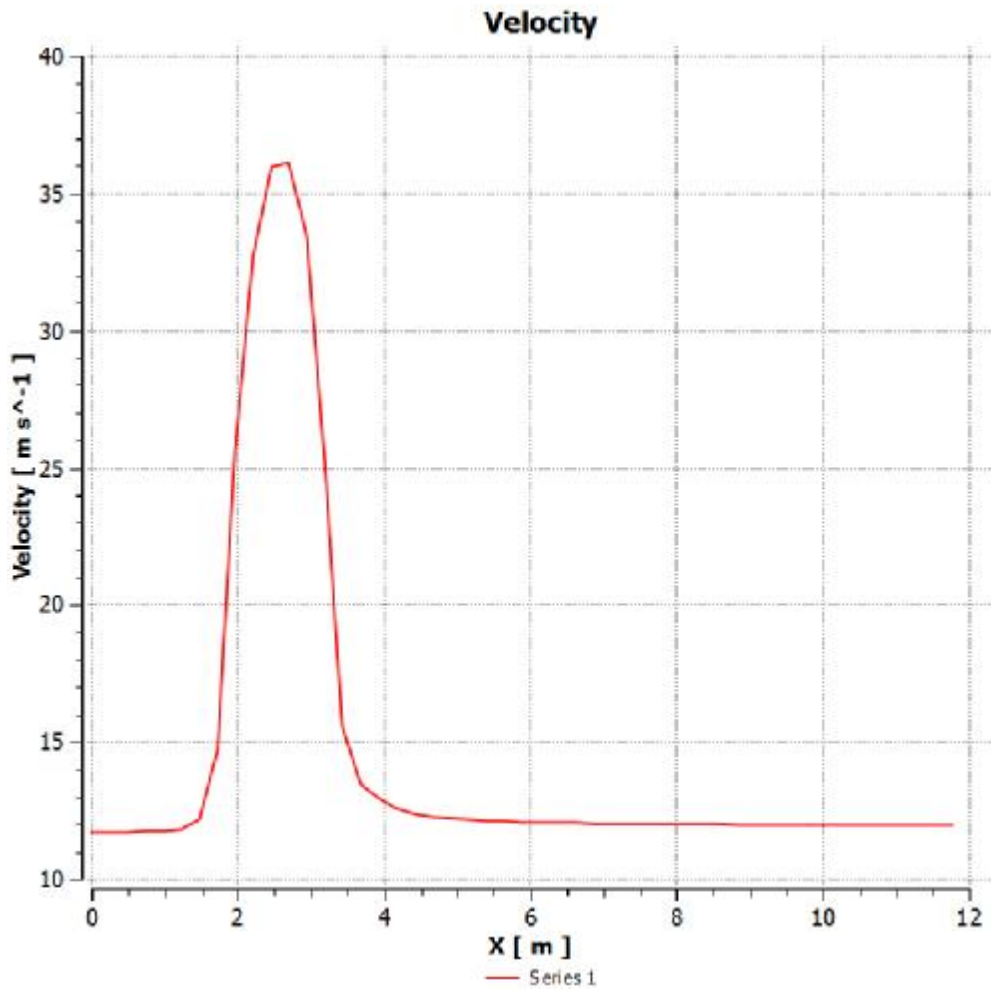


Σχήμα 4.2.2: Κατανομή πτώσης πίεσης στην αξονική γραμμή για διφασική ροή σε αγωγό με πλάκα



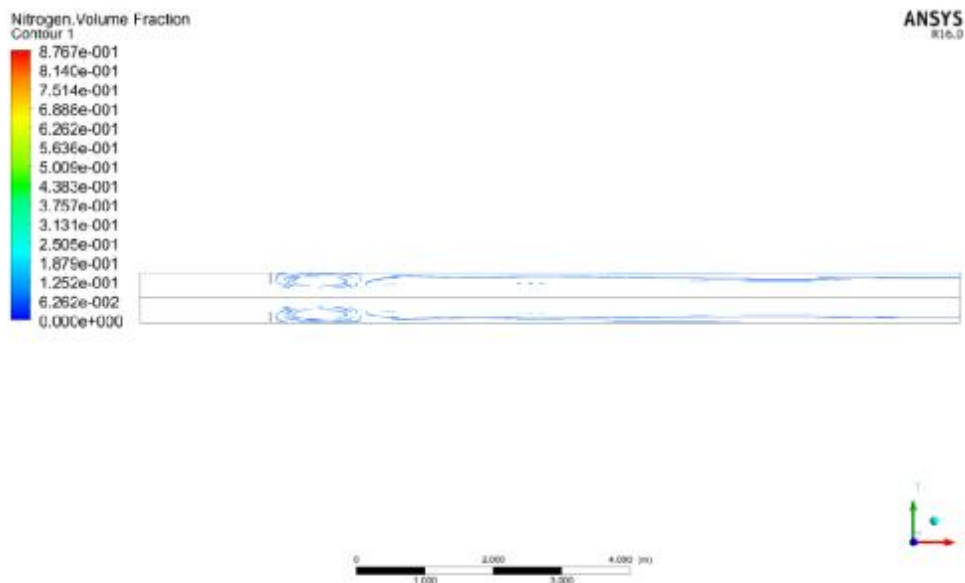
Σχήμα 4.2.3: Κατανομή ταχύτητας για διφασική ροή σε αγωγό με πλάκα.

Το διάγραμμα της αξονικής κατανομής της ταχύτητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.4 και λαμβάνει μέγιστη τιμή τα 36 m/s στην περιοχή της στενής διατομής ανάμεσα στις πλάκες ενώ στο πίσω μέρος η ταχύτητα σταδιακά μειώνεται και επανέρχεται στα 12.5 m/s.



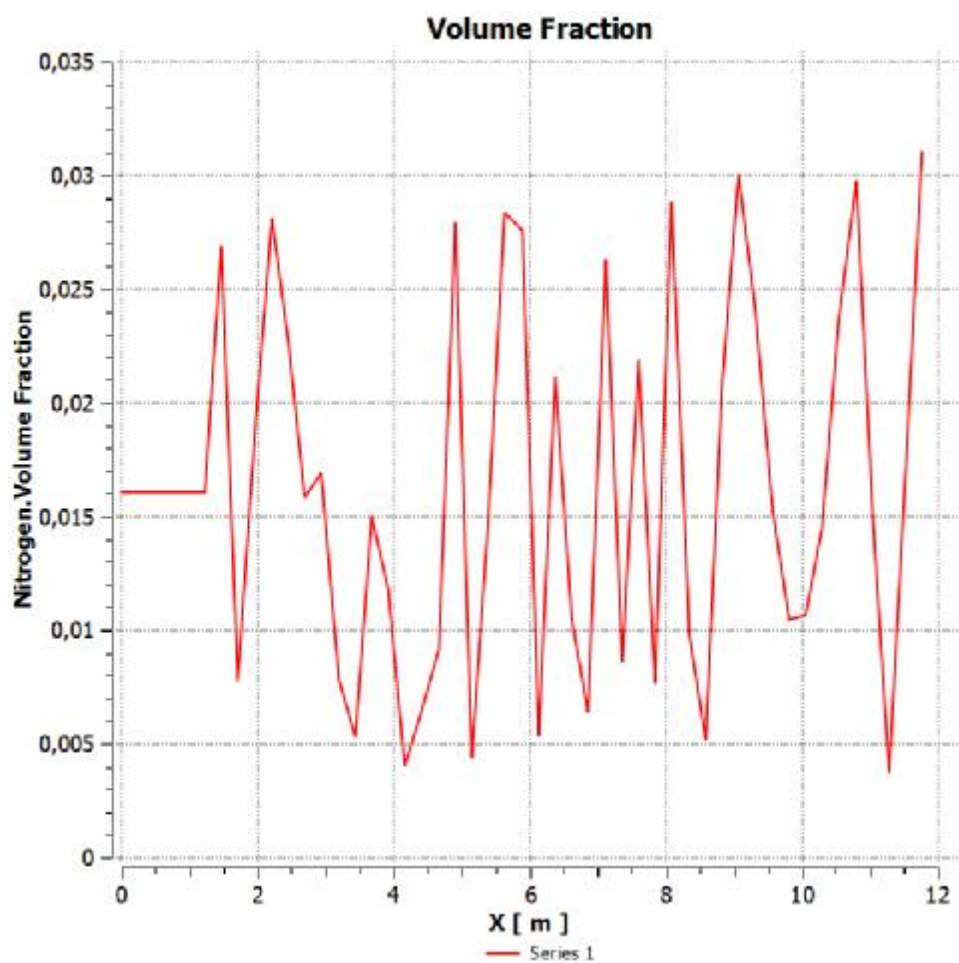
Σχήμα 4.2.4:Κατανομή ταχύτητας στην αξονική γραμμή για διφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

Τέλος στο Σχήμα 4.2.5 παρουσιάζεται και η μεταβλητή του κλάσματος όγκου της δευτερεύουσας φάσης του αζώτου και παρατηρείται ότι δημιουργούνται στρόβιλοι ανακυκλοφορίας πίσω από τις πλάκες. Στη συνέχεια η δευτερεύουσα φάση τείνει να προσκολληθεί στα τοιχώματα του αγωγού.



Σχήμα 4.2.5:Κλάσμα όγκου αζώτου

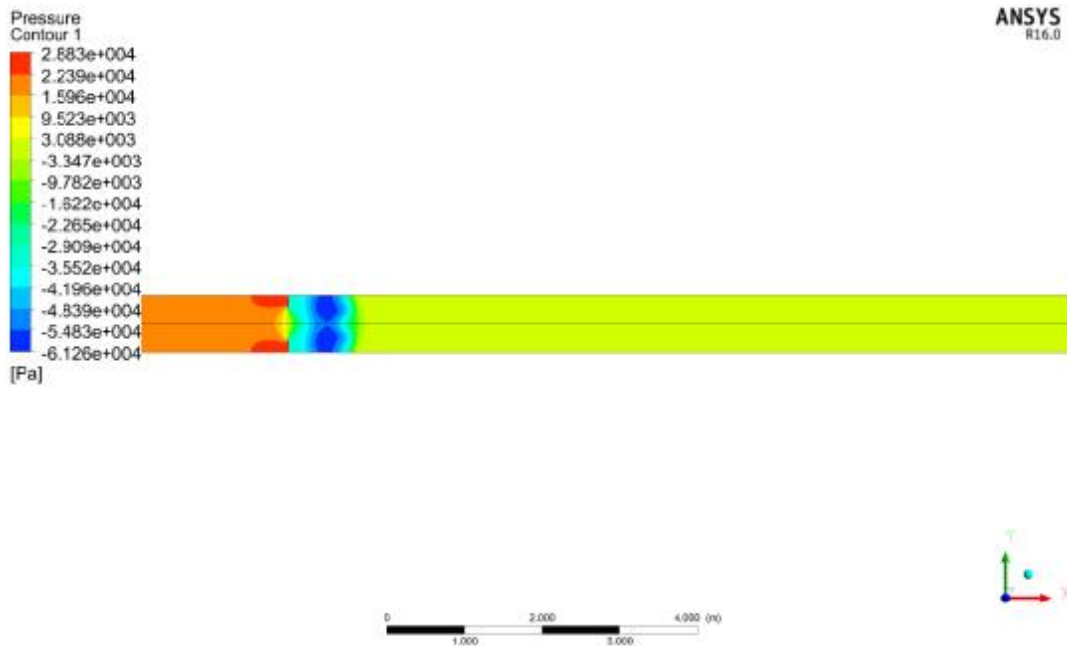
Στο Σχήμα 4.2.6 παρουσιάζεται η κατανομή του κλάσματος όγκου της δευτερεύουσας φάσης του αζώτου στην αξονική γραμμή της γεωμετρίας.



Σχήμα 4.2.6: Κατανομή κλάσματος όγκου αζώτου

Ø 80 kg/s

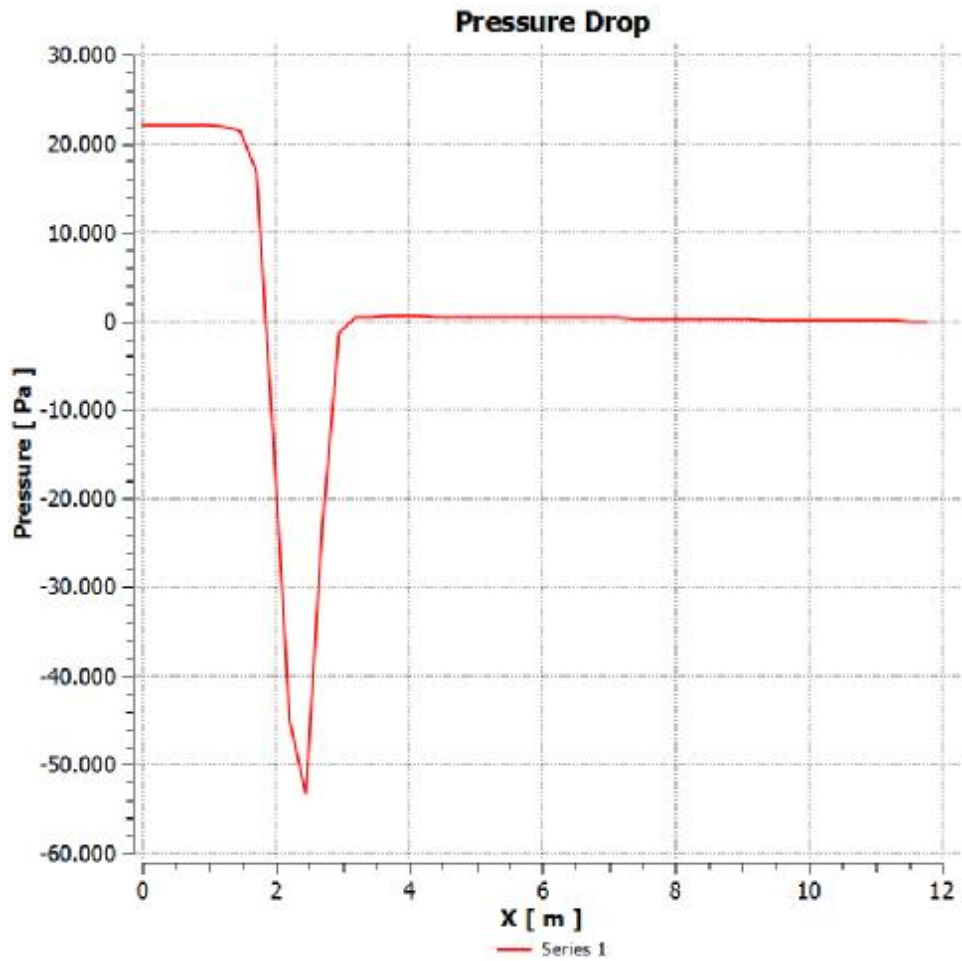
Η ορατοποίηση της πτώσης πίεσης για τη δεύτερη παροχή των 80 kg/s για το μίγμα μέσα σε αγωγό με πλάκα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.7. Παρατηρείται ότι στο εμπρός μέρος των 2000 mm πριν από τις πλάκες επικρατεί υψηλή πίεση. Στη συνέχεια, μόλις η ροή προσκρούει στις πλάκες όπως είναι αναμενόμενο υπάρχει πτώση πίεσης στο πίσω μέρος των πλακών και αύξηση στο εμπρός. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πίεση σε αυτή την περίπτωση δεν λαμβάνει τη χαμηλότερη τιμή της αμέσως μετά την πρόσκρουση στις πλάκες αλλά λίγο πιο μετά (σκούρο μπλε χρώμα στο Σχήμα 4.2.7). Στη συνέχεια αυξάνεται και σταθεροποιείται σε θετική τιμή κοντά όμως στα 0 Pa.



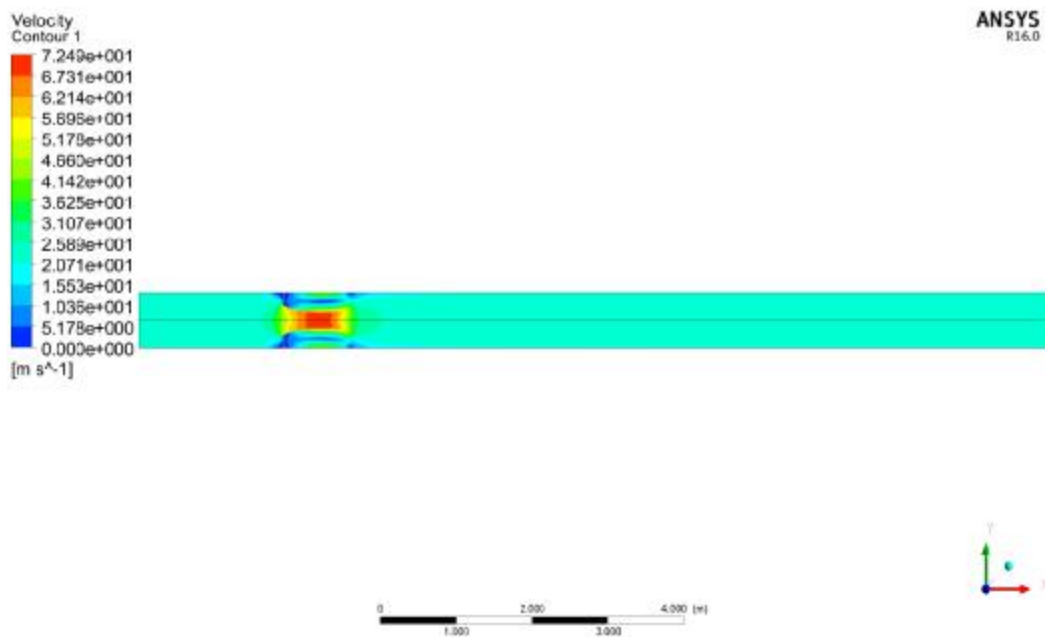
Σχήμα 4.2.7: Κατανομή πίεσης για διφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

Το διάγραμμα απεικόνισης της πτώσης πίεσης στον άξονα συμμετρίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.8. Όπως προαναφέρθηκε η πίεση στα πρώτα 2000 mm είναι υψηλή (περίπου 20.000 Pa), με την πρόσκρουση υπάρχει μια συνεχώς μειούμενη τάση όπου η ελάχιστη τιμή είναι περίπου -55.000 Pa και στη συνέχεια η τιμή σταθεροποιείται σε οριακά θετικές τιμές μέχρι και την έξοδο του αγωγού.

Η ορατοποίηση της κατανομής της ταχύτητας μέσα στον αγωγό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.9. Παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με το προηγούμενο διφασικό πείραμα των 40 kg/s. Παρατηρείται περιοχή με στάσιμο ρευστό (ανακυκλοφορία – δίνες – στροβιλισμοί στα σημεία με έντονο μπλε χρώμα) Επιπλέον, όπως είναι αναμενόμενο η ταχύτητα στην στένωση είναι μεγάλη και στην συνέχεια ελαττώνεται.

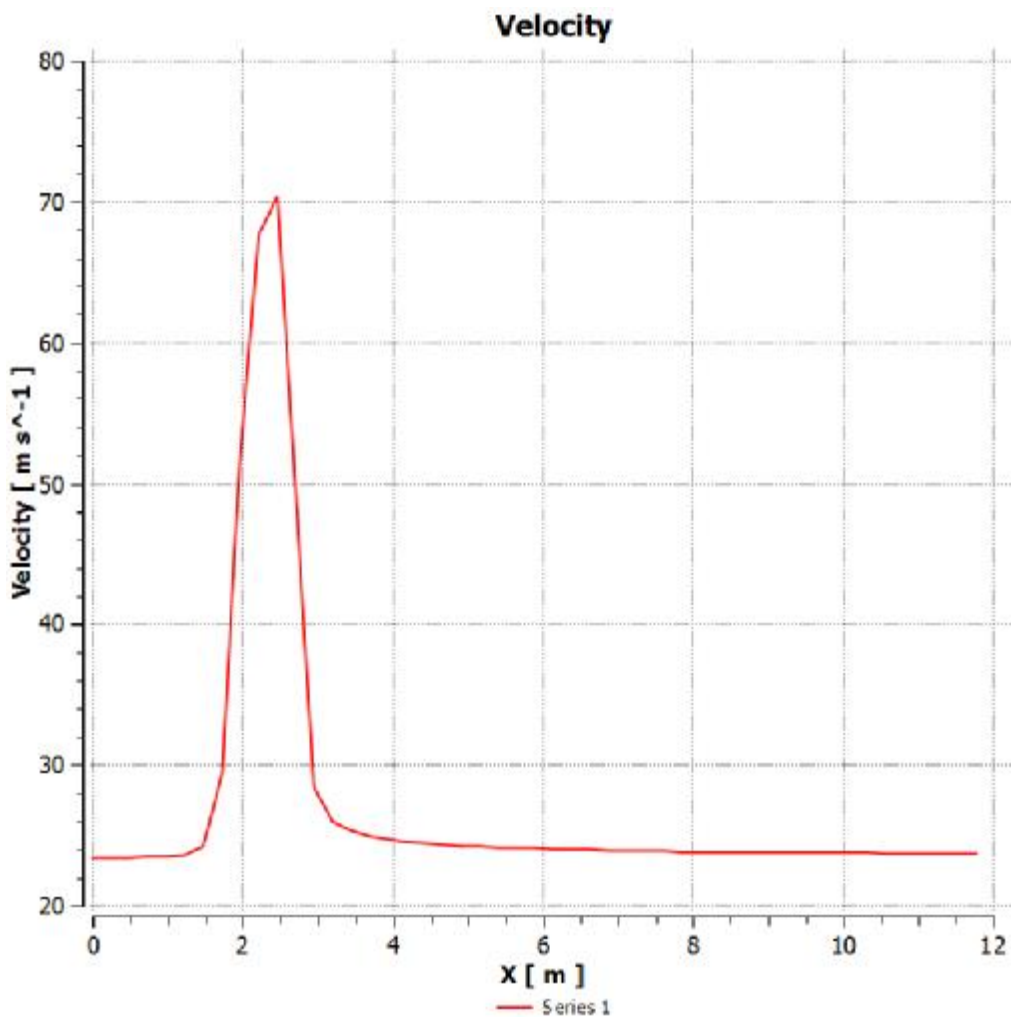


Σχήμα 4.2.8: Κατανομή πτώσης πίεσης στην αξονική γραμμή για διφασική ροή σε αγωγό με πλάκα.



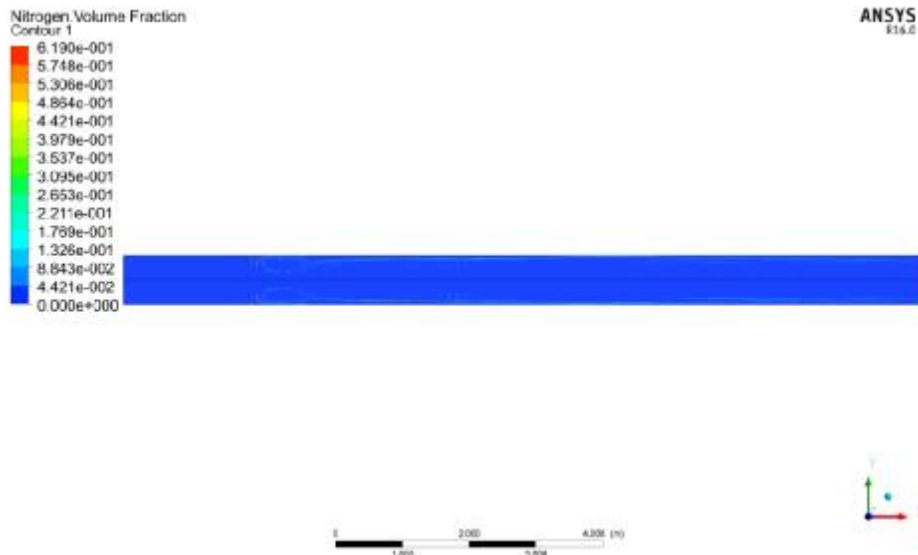
Σχήμα 4.2.9: Κατανομή ταχύτητας για διφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

Το παρακάτω διάγραμμα του Σχήματος 4.2.10 περιγράφει αριθμητικά την κατανομή της ταχύτητας. Παρατηρείται ότι στην περιοχή της εισόδου η ταχύτητα έχει τιμή περίπου 23 m/s, αυξάνεται ραγδαία στην στένωση και φθάνει τα 70 m/s και στη συνέχεια ξαναπέφτει στα επίπεδα των 25 m/s.



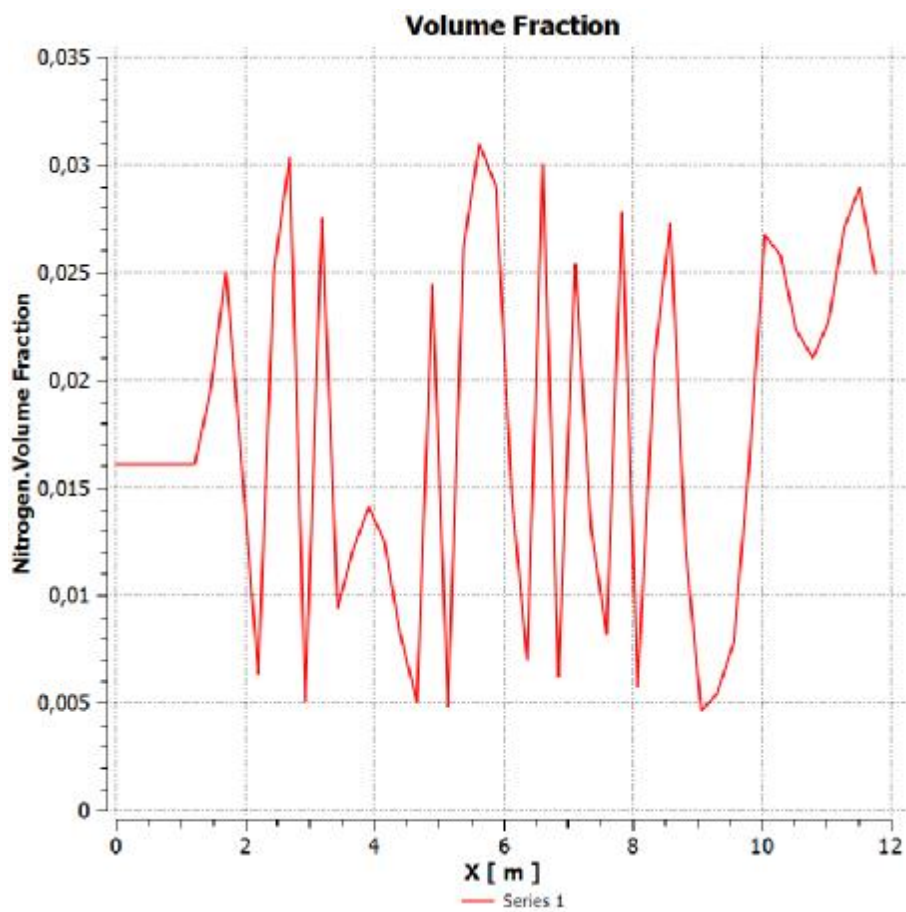
Σχήμα 4.2.10:Κατανομή ταχύτητας στην αξονική γραμμή για διφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

Τελειώνοντας τα αποτελέσματα για την περίπτωση των 80 kg/s στη διφασική ροή, παρατηρείται ότι το κλάσμα όγκου της φάσης που βρίσκεται σε χαμηλότερη περιεκτικότητα στον αγωγό συγκεντρώνεται και περιστρέφεται πίσω από τις πλάκες και στη συνέχεια τείνει να προσκολληθεί στα τοιχώματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.11.



Σχήμα 4.2.11: Κλάσμα όγκου αζώτου

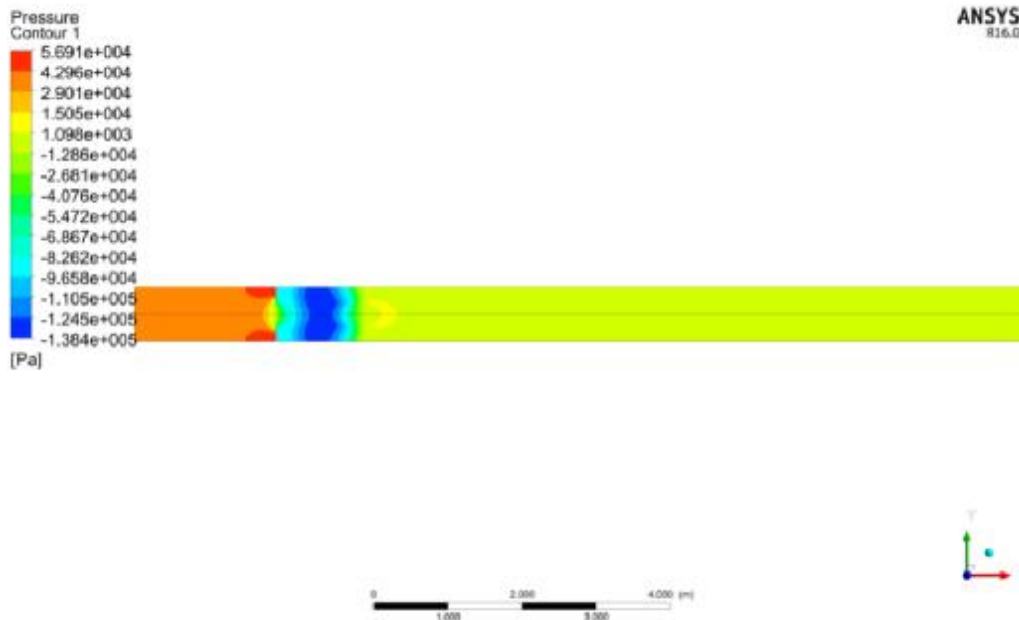
Οι φυσαλίδες του αζώτου δεν παρουσιάζουν κάποια καθορισμένη συγκέντρωση στο μέσον του αγωγού. Παρατηρείται ότι η ύπαρξη αζώτου στην αξονική γραμμή αρχίζει σχεδόν μετά το πρώτο μέτρο και έχει εύρος συγκέντρωσης από -0.005 έως 0.035 (Σχήμα 4.2.12).



Σχήμα 4.2.12: Κατανομή κλάσματος όγκου αζώτου

Ø 120 kg/s

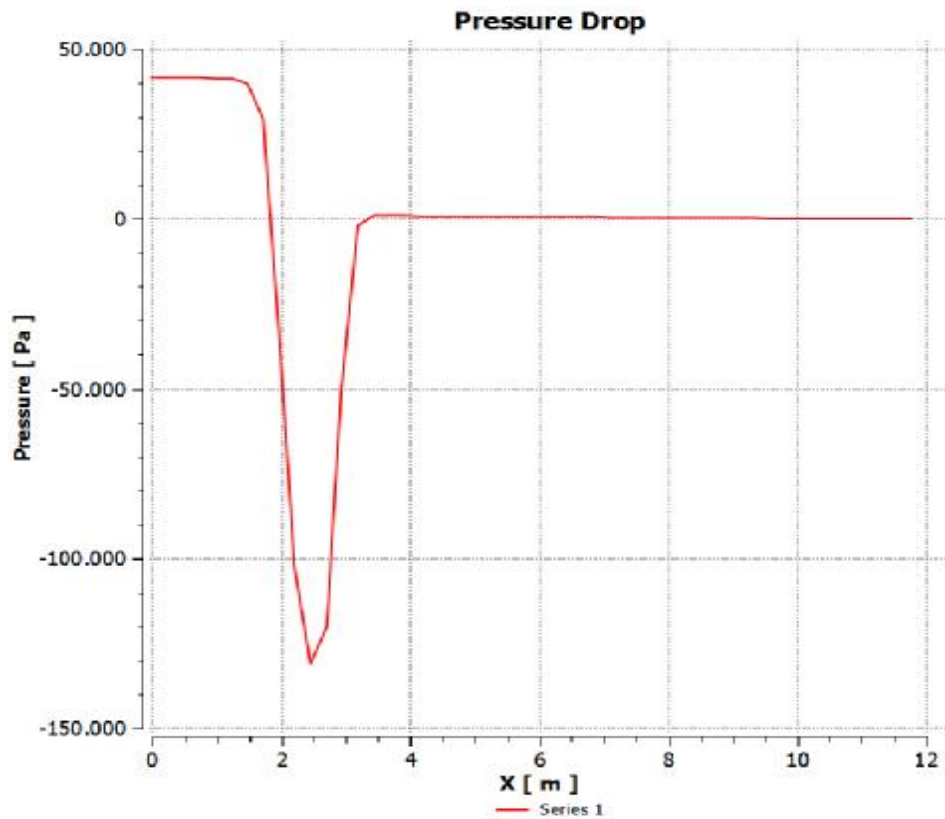
Η τελευταία περίπτωση των 120 kg/s για διφασική ροή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.13 όπου παρατηρούνται τέσσερις διαφορετικές περιοχές πίεσης. Αρχικά η περιοχή εισόδου με την υψηλή πίεση, η περιοχή όπου η πίεση μειώνεται απότομα πίσω από τις πλάκες, η περιοχή όπου η πίεση μειώνεται ακόμα περισσότερο (σκούρο μπλε χρώμα) λαμβάνοντας αρνητικές τιμές και τέλος η περιοχή όπου η πίεση αυξάνεται και σταθεροποιείται σε οριακά θετικές τιμές.



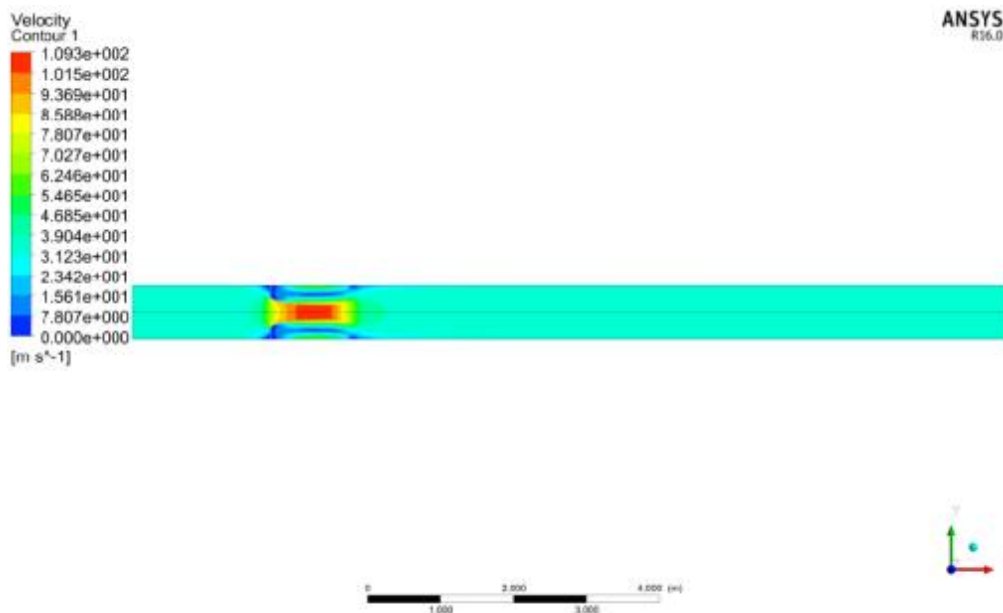
Σχήμα 4.2.13: Κατανομή πίεσης για διφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

Το διάγραμμα που παρουσιάζει την αξονική πτώση πίεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.14 και επιβεβαιώνει την παραπάνω χρωματική ορατοποίηση της κατανομής της πίεσης. Στο αρχικό μήκος εισόδου παρατηρείται υψηλή τιμή της πίεσης περίπου στα 40.000 Pa, στη συνέχεια υπάρχει μεγάλη πτώση πίεσης στα -130.000 Pa και τέλος η πίεση ομαλοποιείται σε οριακά θετικές τιμές μέχρι την έξοδο (Σχήμα 4.2.14).

Η κατανομή της ταχύτητας του μίγματος στον αγωγό με πλάκα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.15 και παρατηρείται ότι λόγω μεγαλύτερης παροχής, οι περιοχές αρνητικής ταχύτητας, δηλαδή τα σημεία όπου δημιουργούνται στρόβιλοι αποκτούν μεγαλύτερο μήκος μετά τις πλάκες. Επίσης, η δέσμη της ταχύτητας του μίγματος είναι μεγαλύτερη.

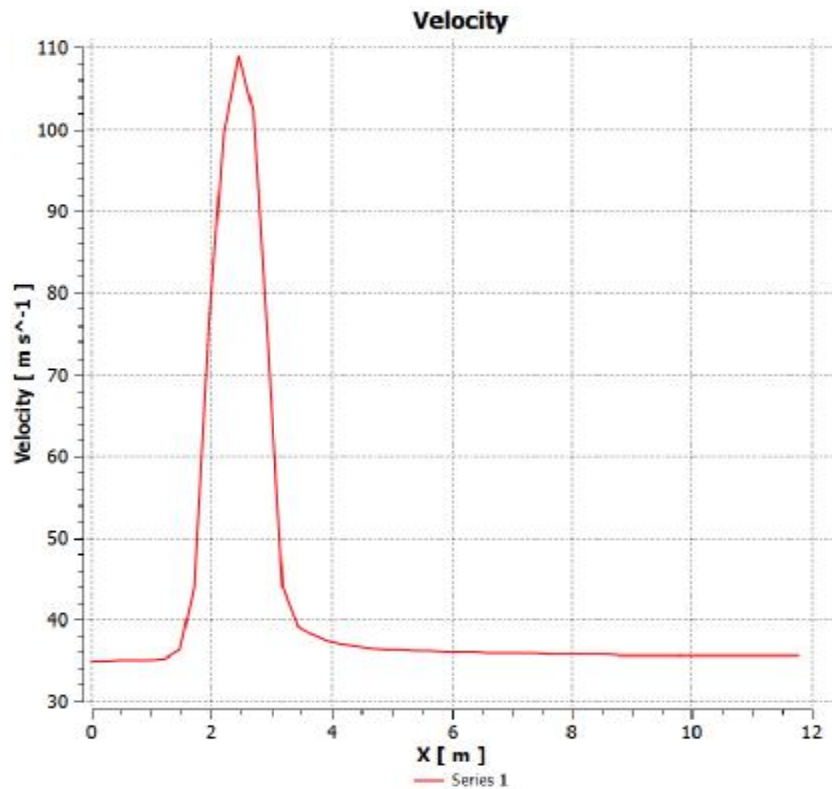


Σχήμα 4.2.14: Κατανομή πτώσης πίεσης στην αξονική γραμμή για διφασική ροή σε αγωγό με πλάκα



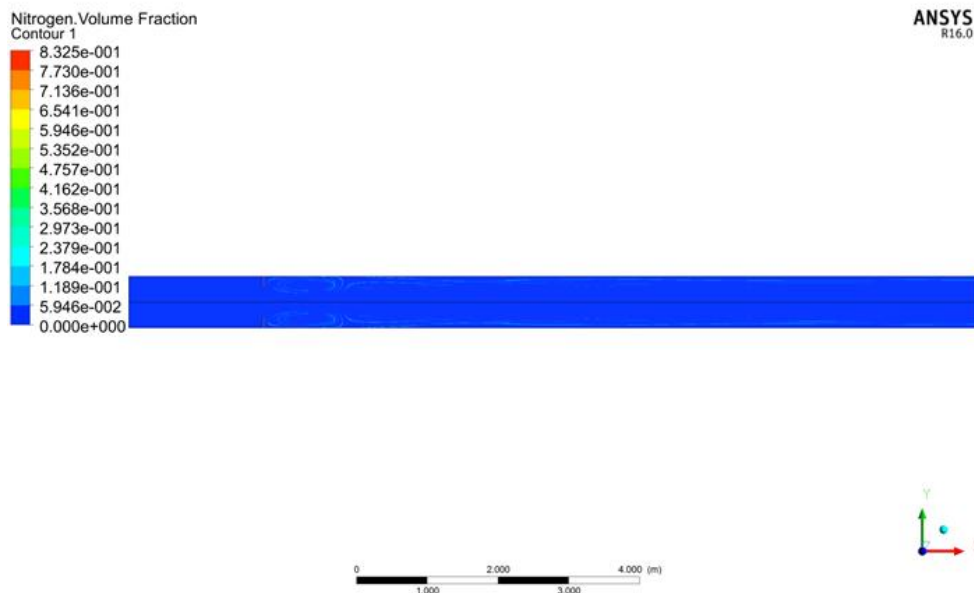
Σχήμα 4.2.15: Κατανομή ταχύτητας για διφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

Η παραπάνω ορατοποίηση της κατανομής της ταχύτητας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.16 όπου η αρχική ταχύτητα των 35 m/s αυξάνεται απότομα στην στένωση στα 109 m/s και μετά μειώνεται στα 37 m/s.



Σχήμα 4.2.16: Κατανομή πτώσης πίεσης στην αξονική γραμμή για διφασική ροή σε αγωγό με πλάκα

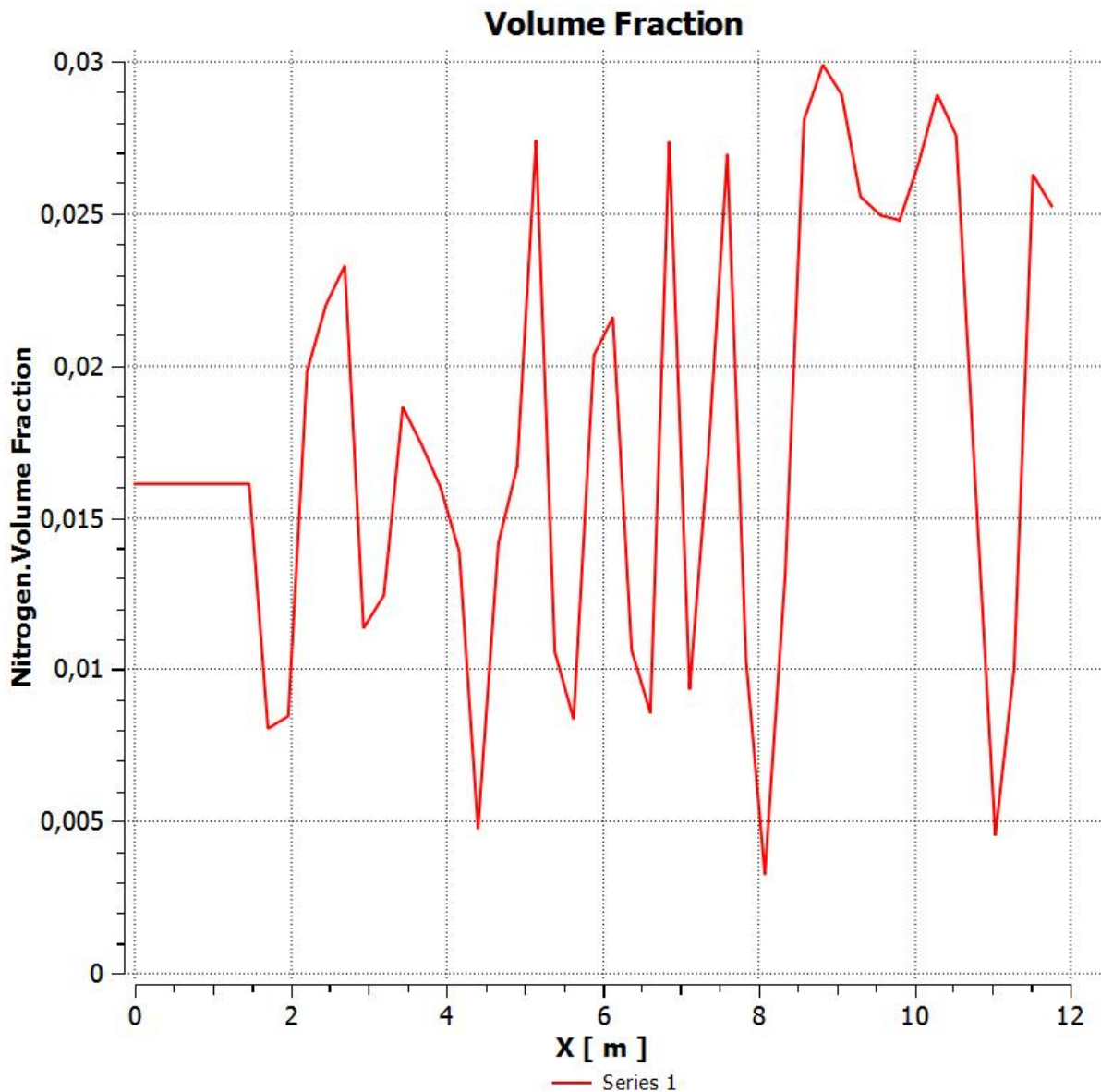
Η κατανομή του κλάσματος όγκου μέσα στον αγωγό με τους στροβιλισμούς παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.17.



Σχήμα 4.2.17: Κλάσμα όγκου αζώτου

Η κατανομή του κλάσματος όγκου στην αξονική γραμμή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.18 και αξίζει να σημειωθεί ότι παρουσιάζει υψηλότερη συγκέντρωση στο πίσω μέρος του

αγωγού. Το εύρος της συγκέντρωσης της φάσης του αζώτου στην αξονική γραμμή είναι από 0.0035 έως 0.03.



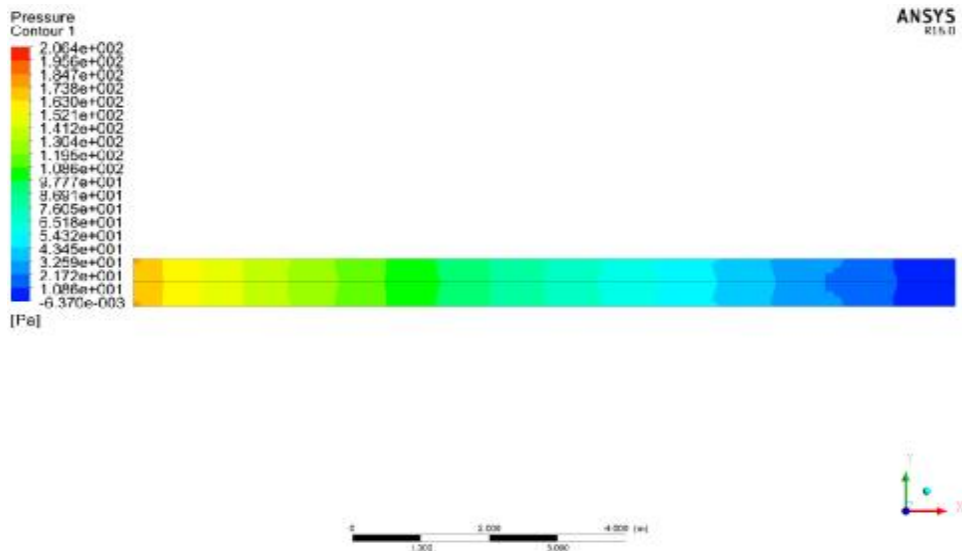
Σχήμα 4.2.18: Κατανομή κλάσματος όγκου αζώτου

4.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 2: ΑΓΩΓΟΣ ΧΩΡΙΣ ΠΛΑΚΑ (ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ)

Το δεύτερο μοντέλο προς διερεύνηση αφορά την υπολογιστική προσομοίωση αρχικά του διφασικού μίγματος σε αγωγό χωρίς πλάκα και στη συνέχεια την απλούστερη περίπτωση της μονοφασικής ροής σε αγωγό χωρίς πλάκα.

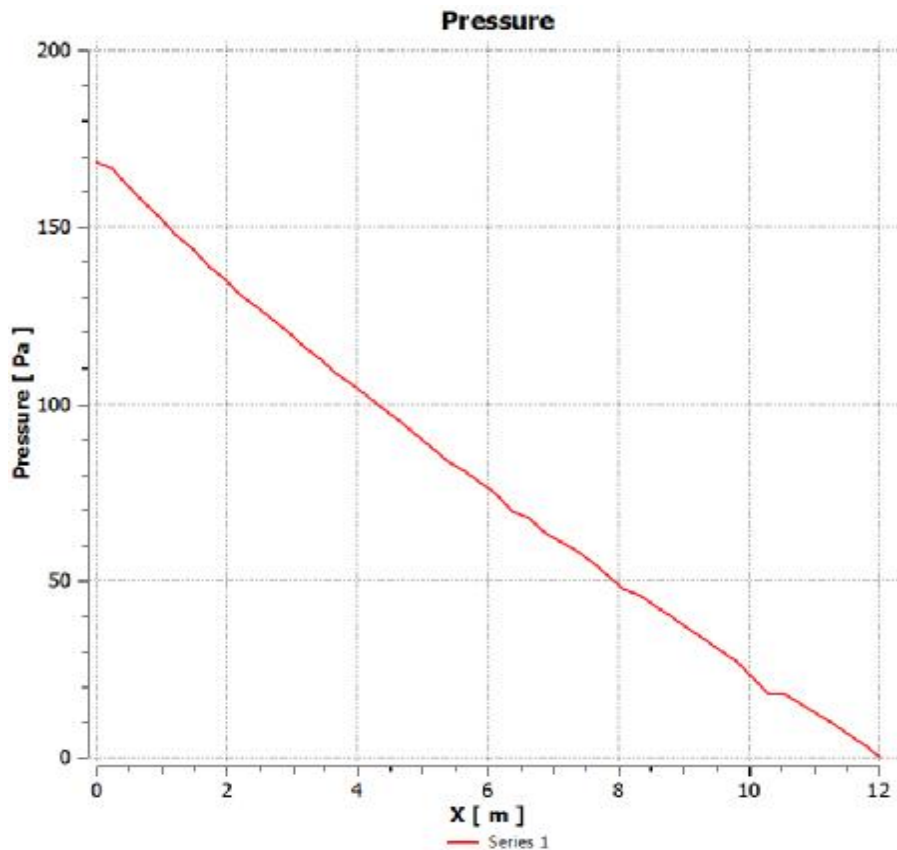
Ø 40 kg/s

Η ορατοποίηση της κατανομής της πίεσης μέσα στον αγωγό χωρίς την πλάκα μετρητή απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.1. Παρατηρείται υψηλή τιμή πίεσης στην είσοδο και σταδιακά η πίεση μειώνεται σε αρνητικές τιμές.



Σχήμα 4.3.1: Κατανομή πίεσης σε αγωγό χωρίς πλάκα – διφασική ροή

Για την επιβεβαίωση και την κατανόηση των αποτελεσμάτων εξάγονται και διαγράμματα στην αξονική γραμμή της γεωμετρίας. Το διάγραμμα του Σχήματος 4.3.2 παρουσιάζει την καμπύλη πτώσης πίεσης στον αγωγό όπου φαίνεται ότι στην είσοδο η ροή έχει μεγάλη πίεση (170 Pa) και λαμβάνει αρνητικές τιμές κοντά στο μηδέν στην έξοδο.

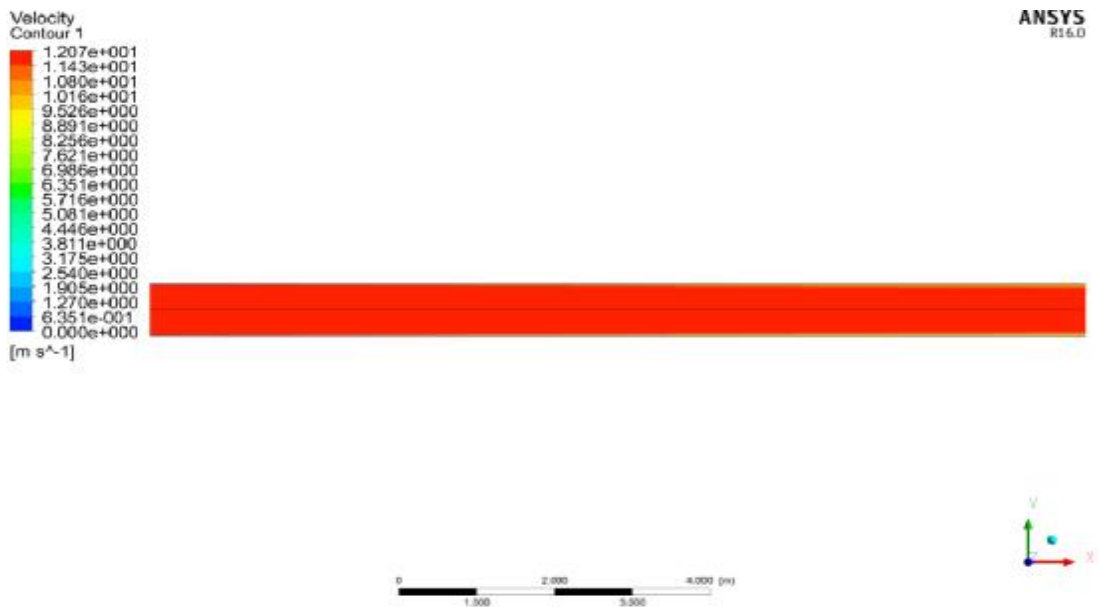


Σχήμα 4.3.2: Καμπύλη πτώσης πίεσης για αγωγό χωρίς πλάκα – διφασική ροή

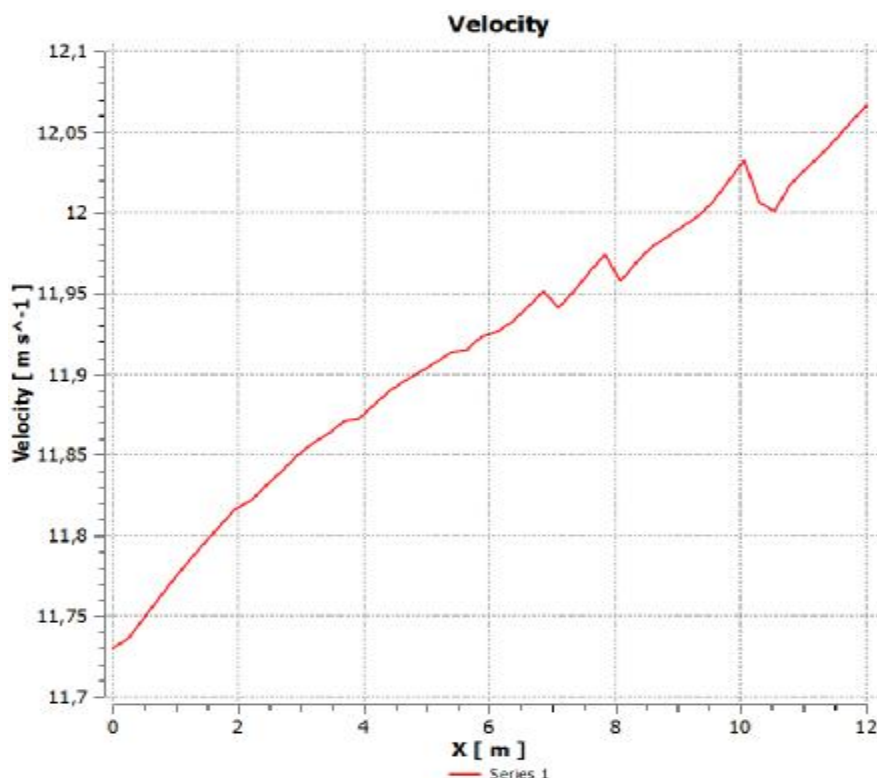
Η ταχύτητα μέσα στον αγωγό δεν μεταβάλλεται αισθητά και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει κάποιο εμπόδιο που θα διαταράξει το ροϊκό πεδίο όπως

προηγούμενως. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κατανομή της ταχύτητας να μην παρουσιάζει σχεδόν καθόλου αλλαγές όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.3. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα διατηρείται σχεδόν σταθερή εντός του αγωγού.

Η καμπύλη που απεικονίζει την αριθμητική κατανομή της ταχύτητας στην αξονική γραμμή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.4 και δείχνει ότι η ταχύτητα στην είσοδο στο κέντρο του αγωγού ισούται με 11.725 m/s και στο μέσο της εξόδου ισούται με 12.06 m/s. Η απόκλιση μεταξύ της ταχύτητας εισόδου και εξόδου είναι αμελητέα και είναι της τάξεως των 0.33 m/s.

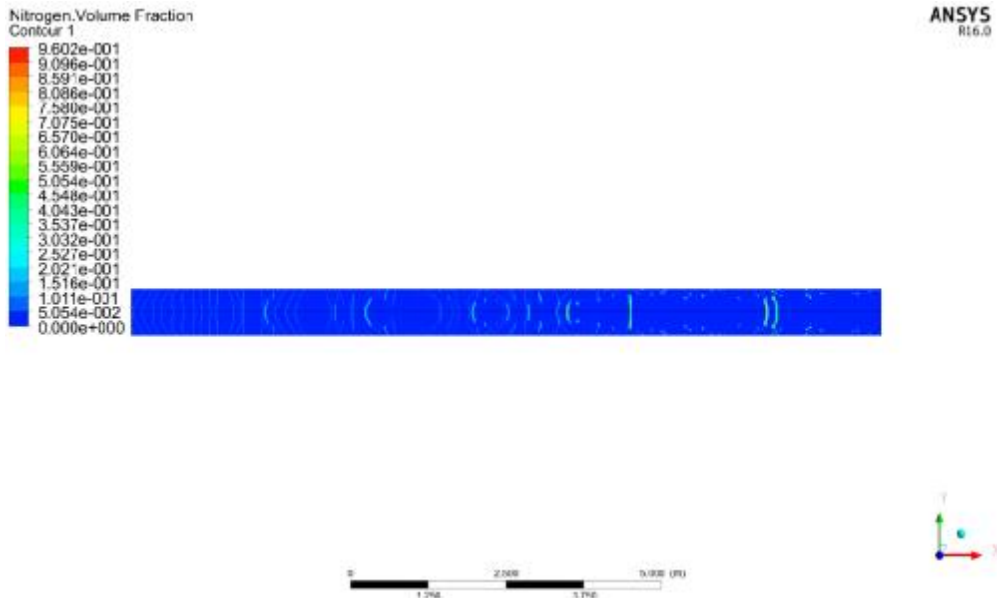


Σχήμα 4.3.3:Κατανομή ταχύτητας σε αγωγό χωρίς πλάκα – διφασική ροή

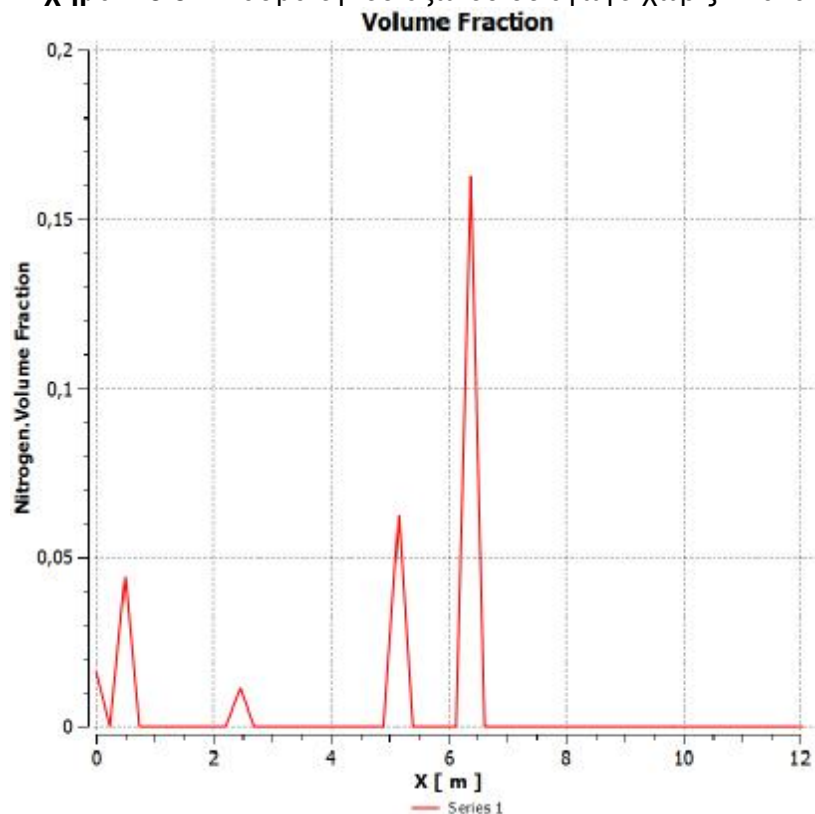


Σχήμα 4.3.4: Καμπύλη κατανομής ταχύτητας για αγωγό χωρίς πλάκα – διφασική ροή

Τέλος για τη διφασική ροή (μεθάνιο – άζωτο) στον αγωγό παρουσιάζεται και η κατανομή του κλάσματος όγκου (Σχήμα 4.3.5). Σε αντίθεση με την περίπτωση της διφασικής ροής με πλάκα δεν υπάρχουν σημεία με στροβιλισμούς του αζώτου και κατά μήκος του αγωγό παρατηρούνται δομές με φυσαλίδες αζώτου. Η κατανομή του αζώτου στην αξονική γραμμή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.6 με εύρος 0 – 0.16.



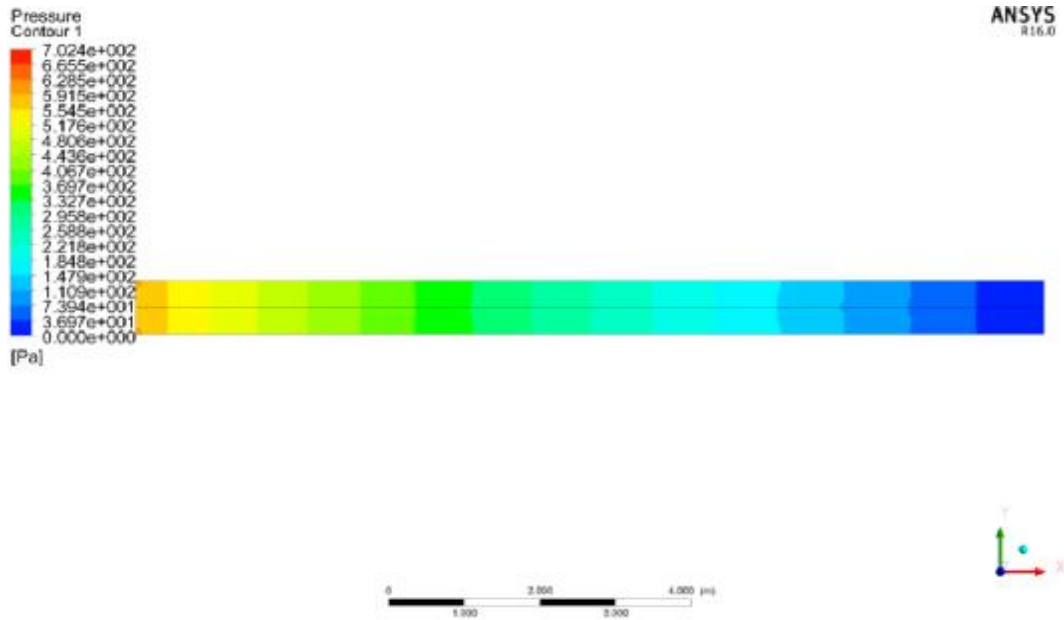
Σχήμα 4.3.5: Κλάσμα όγκου αζώτου σε αγωγό χωρίς πλάκα



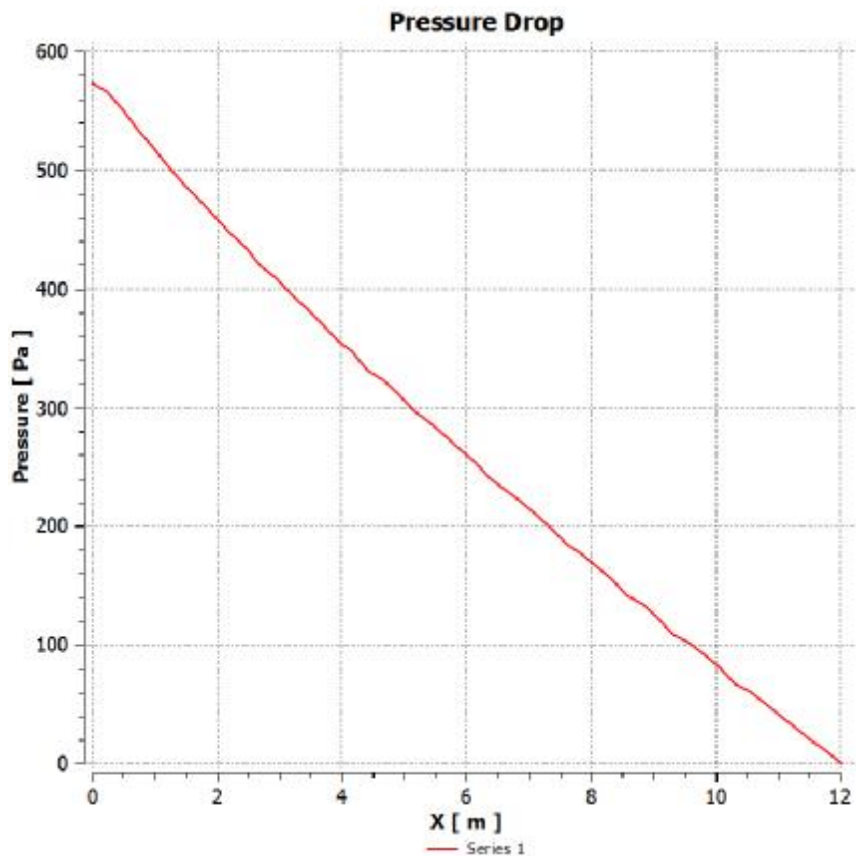
Σχήμα 4.3.6:Καμπύλη κλάσματος όγκου στην αξονική γραμμή

Ø 80 kg/s

Η κατανομή της πίεσης για την περίπτωση που η παροχή του μίγματος διπλασιάζεται παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.7. Παρατηρείται πάλι πτώση πίεσης από την είσοδο (580 Pa) προς την έξοδο (≈ 0 Pa) όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.3.8.

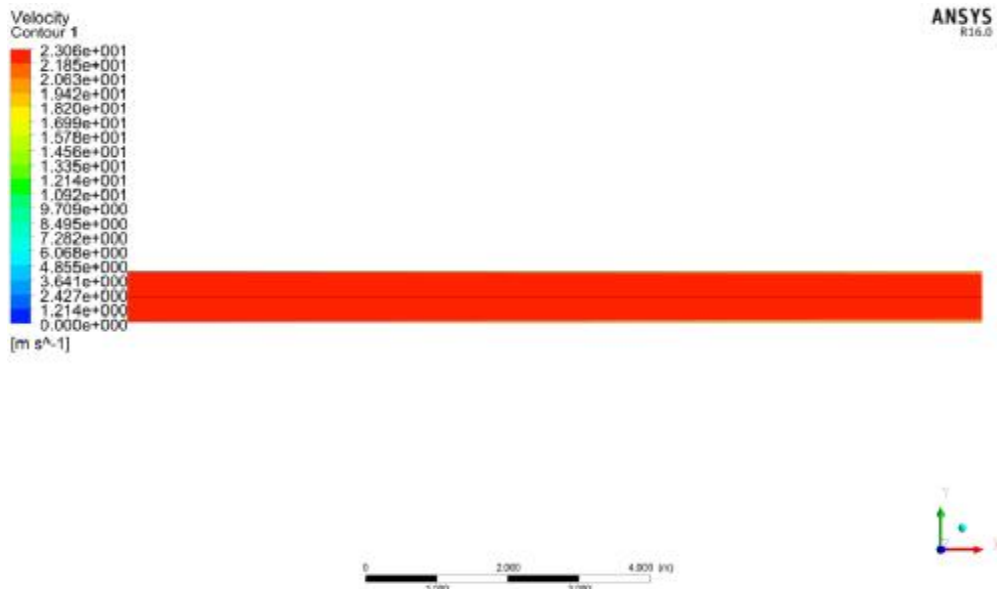


Σχήμα 4.3.7: Κατανομή πίεσης σε αγωγό χωρίς πλάκα – διφασική ροή

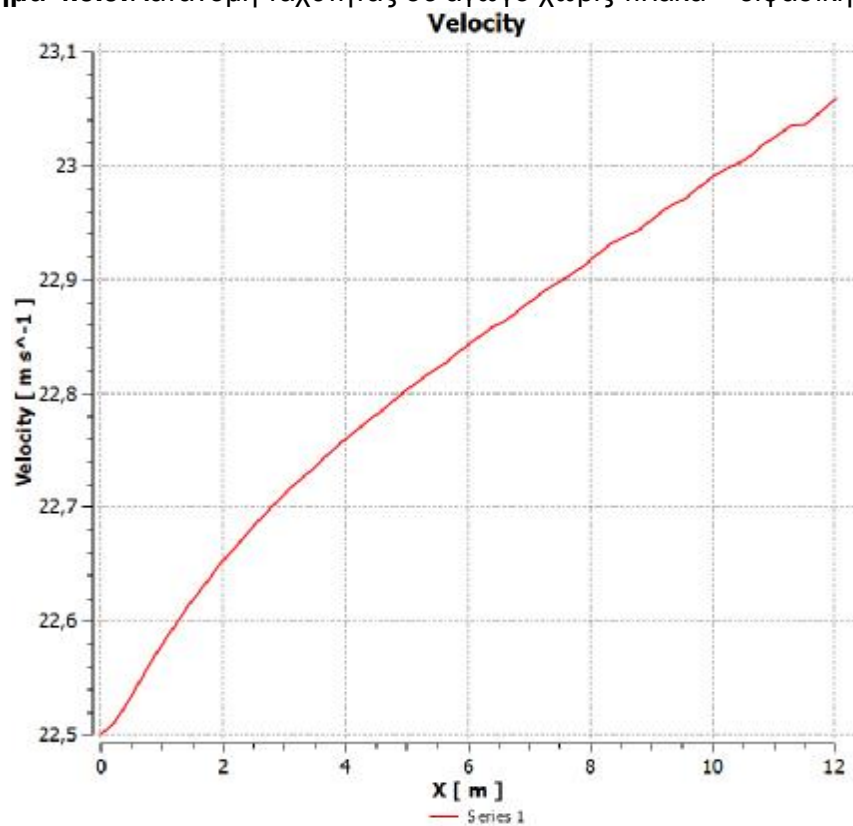


Σχήμα 4.3.8: Καμπύλη πτώσης πίεσης για αγωγό χωρίς πλάκα – διφασική ροή

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση δεν παρατηρείται κάποια αξιόλογη μεταβολή στην ταχύτητα στον αγωγό (Σχήμα 4.3.9). Επίσης, παρατηρείται μια μικρή αύξηση της ταχύτητας από την είσοδο (22.5 m/s) στα 23.05 m/s στην έξοδο (Σχήμα 4.3.10).

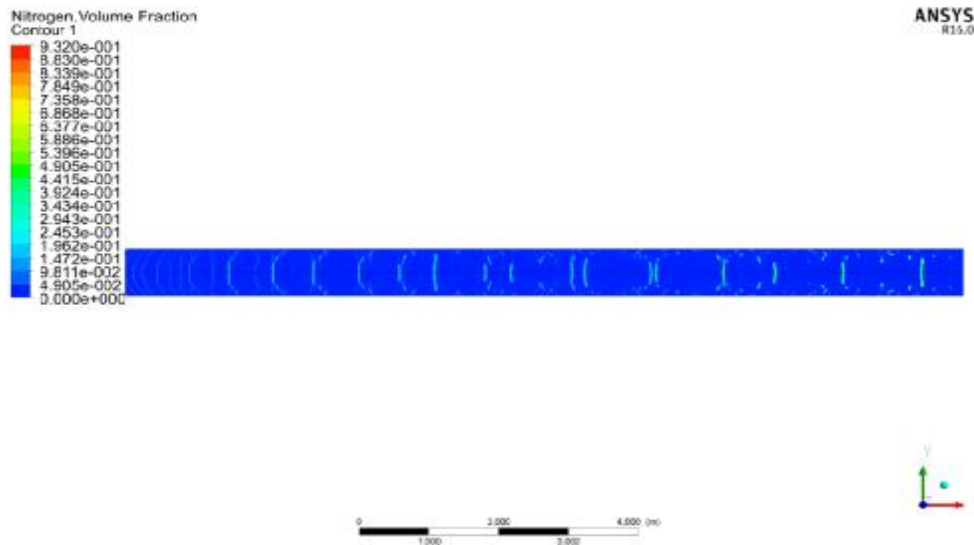


Σχήμα 4.3.9: Κατανομή ταχύτητας σε αγωγό χωρίς πλάκα – διφασική ροή

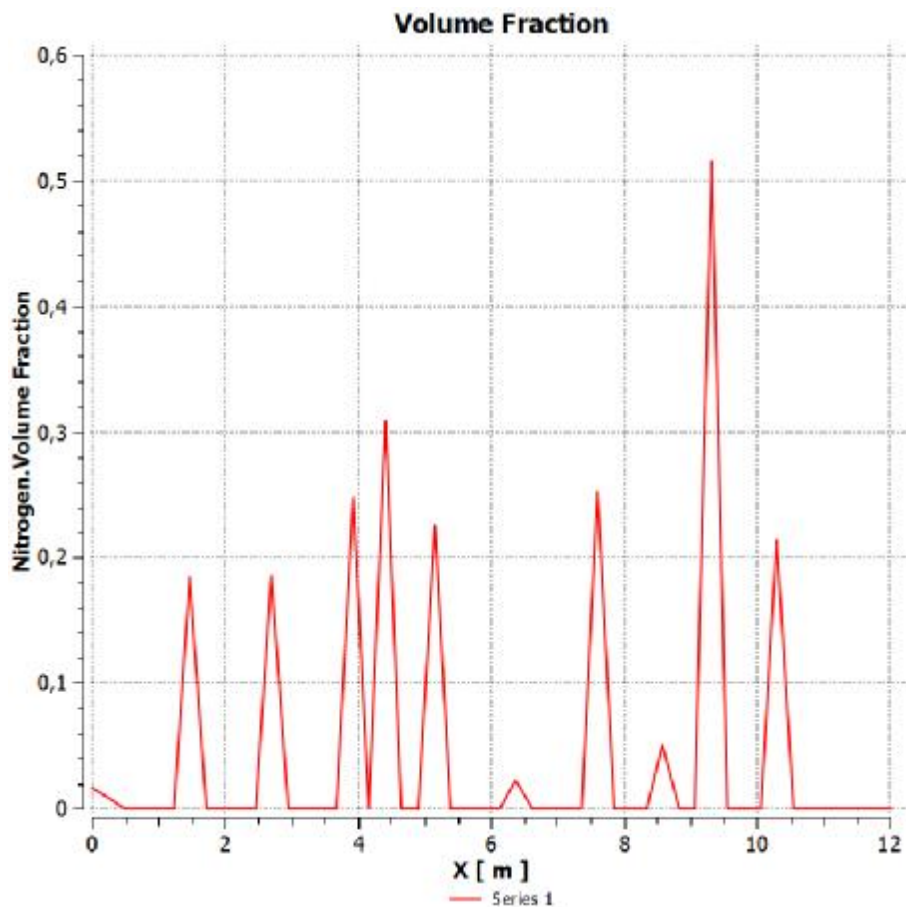


Σχήμα 4.3.10: Καμπύλη κατανομής ταχύτητας για αγωγό χωρίς πλάκα – διφασική ροή.

Η κατανομή της δευτερεύουσας φάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.11 και παρατηρούνται δομές φυσαλίδων με μεγαλύτερη συγκέντρωση στο μέσο του αγωγού. Όσο αυτές οι δομές πλησιάζουν την έξοδο οι δομές διασπώνται ειδικά στις περιοχές κοντά στα τοιχώματα του αγωγού. Το κλάσμα όγκου στην αξονική γραμμή κυμαίνεται από 0 έως 0.51.



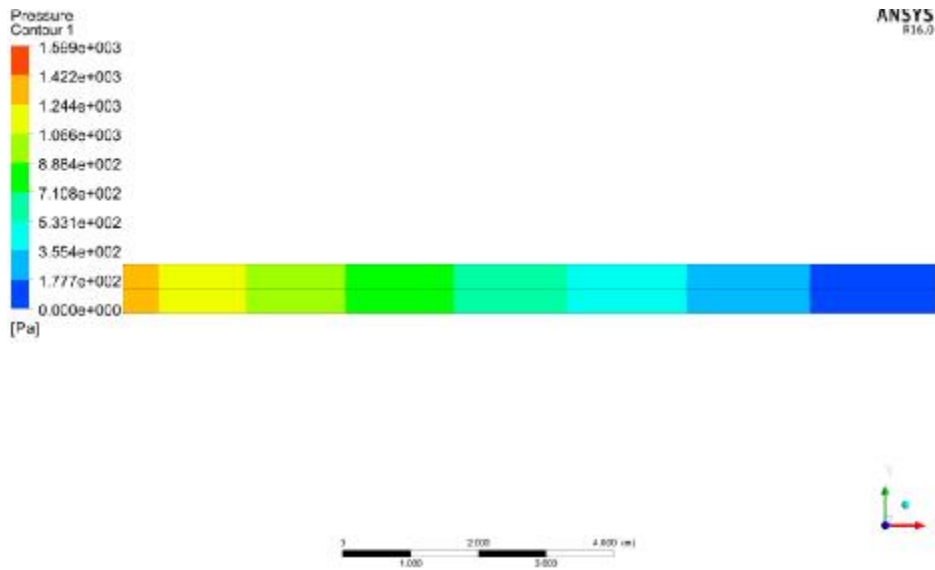
Σχήμα 4.3.11: Κλάσμα όγκου αζώτου σε αγωγό χωρίς πλάκα



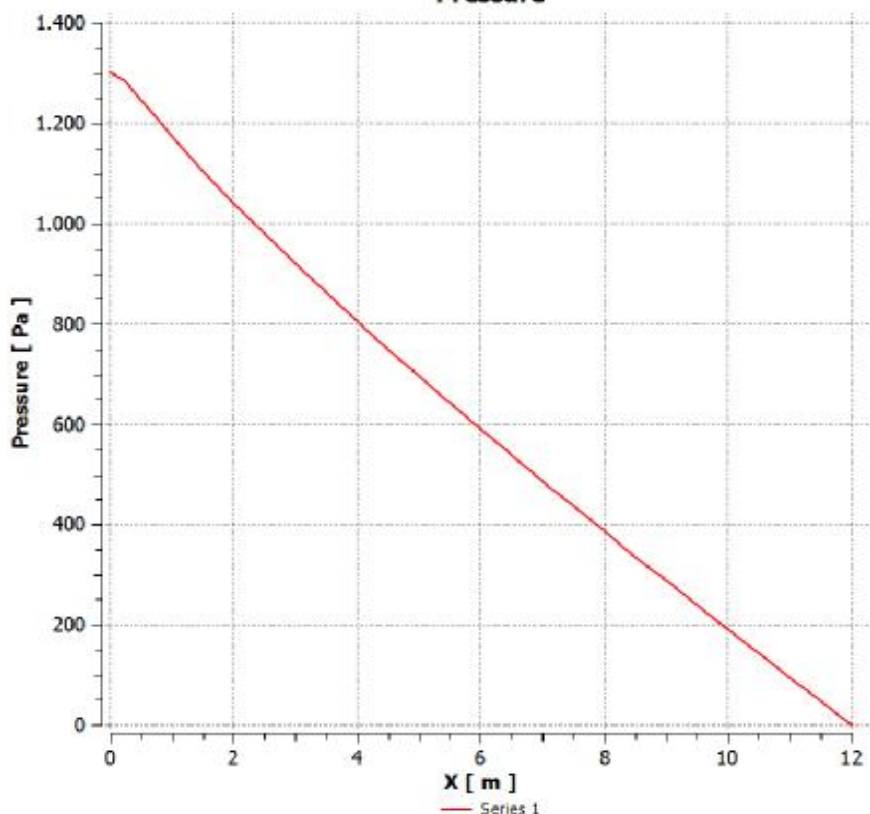
Σχήμα 4.3.12: Καμπύλη κλάσματος όγκου στην αξονική γραμμή.

Ø 120 kg/s

Η κατανομή της πίεσης για την περίπτωση που η παροχή του μίγματος διπλασιάζεται παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.13. Παρατηρείται πάλι πτώση πίεσης από την είσοδο (1300Pa) προς την έξοδο (≈ 0 Pa) όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.3.14.

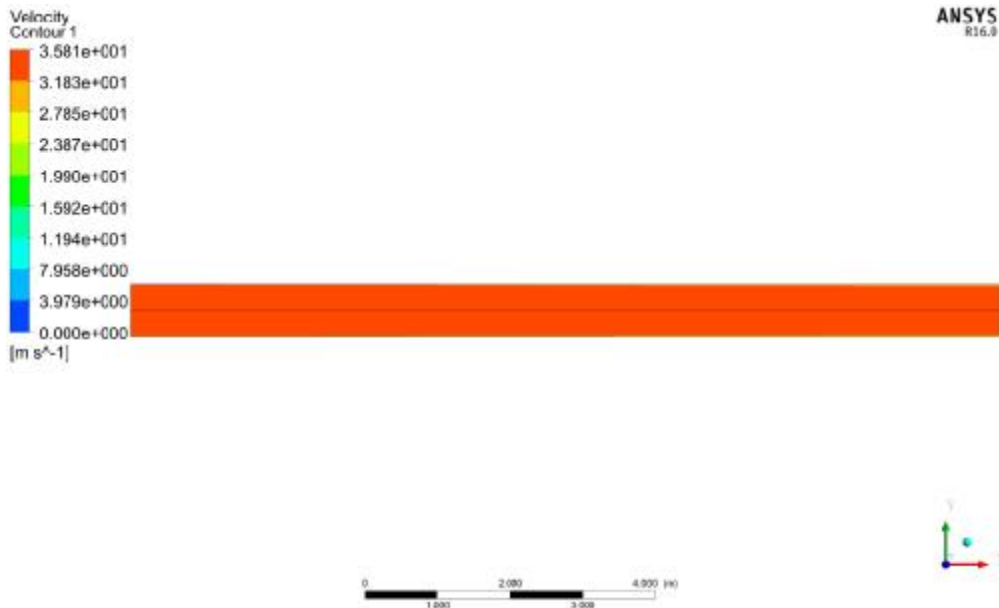


Σχήμα 4.3.13:Κατανομή πίεσης σε αγωγό χωρίς πλάκα – διφασική ροή

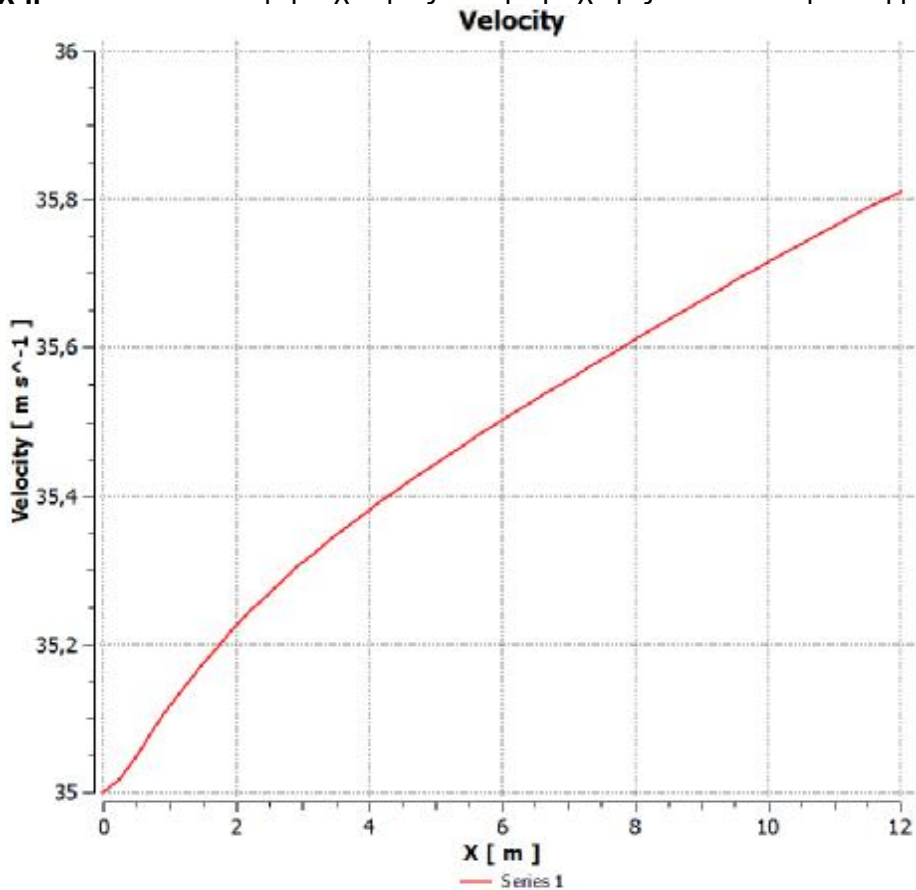


Σχήμα 4.3.14: Καμπύλη πτώσης πίεσης για αγωγό χωρίς πλάκα – διφασική ροή

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση δεν παρατηρείται κάποια αξιόλογη μεταβολή στην ταχύτητα στον αγωγό (Σχήμα 4.3.15). Επίσης, παρατηρείται μια μικρή αύξηση της ταχύτητας από την είσοδο (35m/s) στα 35.8 m/s στην έξοδο (Σχήμα 4.3.16).

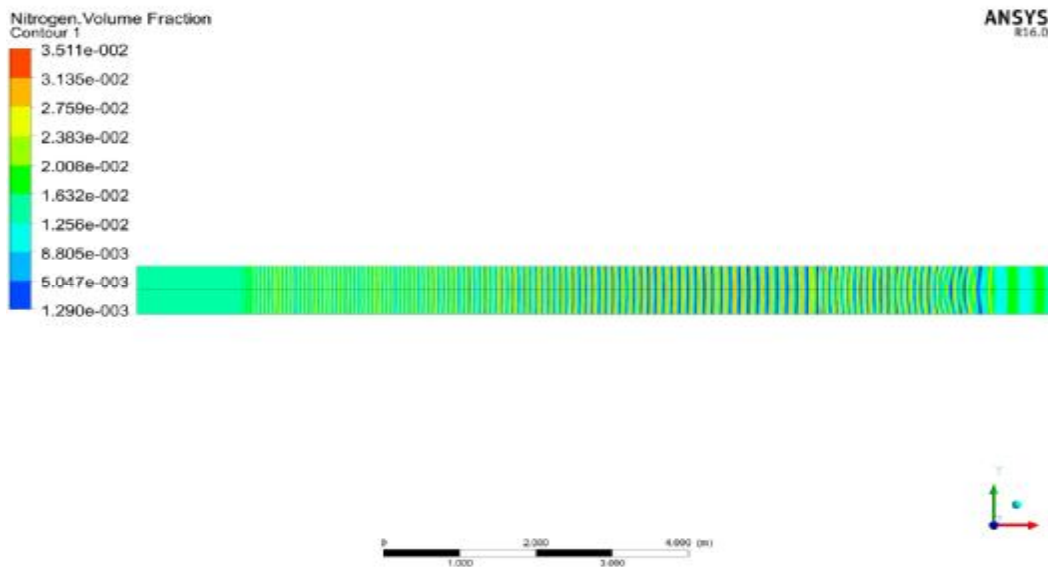


Σχήμα 4.3.15:Κατανομή ταχύτητας σε αγωγό χωρίς πλάκα – διφασική ροή

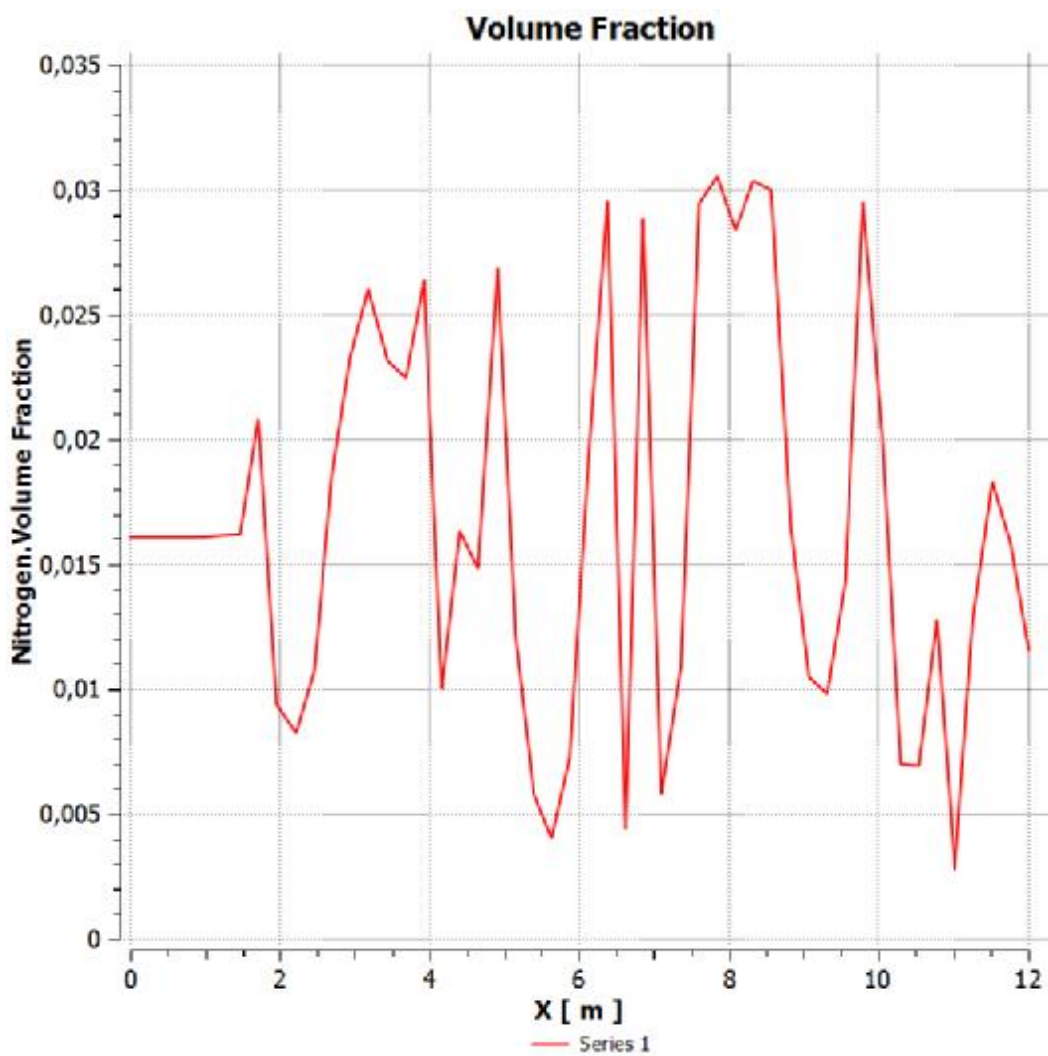


Σχήμα 4.3.16: Καμπύλη κατανομής ταχύτητας για αγωγό χωρίς πλάκα – διφασική ροή

Η κατανομή της δευτερεύουσας φάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.17 και παρατηρούνται δομές φυσαλίδων με μεγαλύτερη συγκέντρωση από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Το κλάσμα όγκου στην αξονική γραμμή κυμαίνεται από 0.0035 έως 0.031.



Σχήμα 4.3.17: Κλάσμα όγκου αζώτου σε αγωγό χωρίς πλάκα

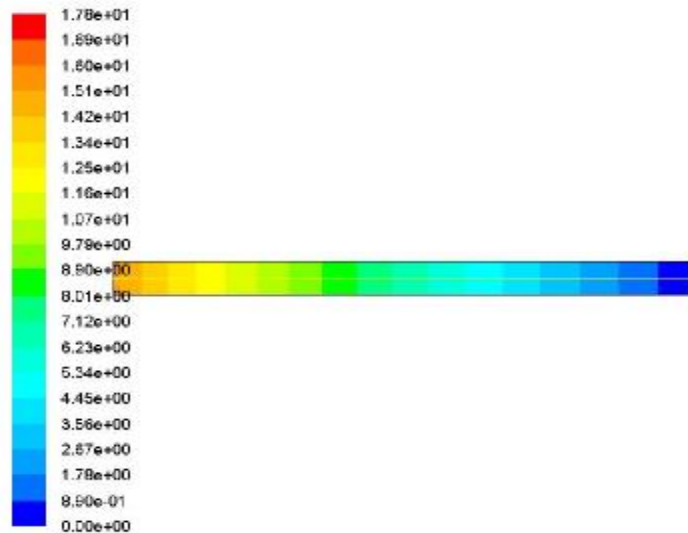


Σχήμα 4.3.18: Καμπύλη κλάσματος όγκου στην αξονική γραμμή

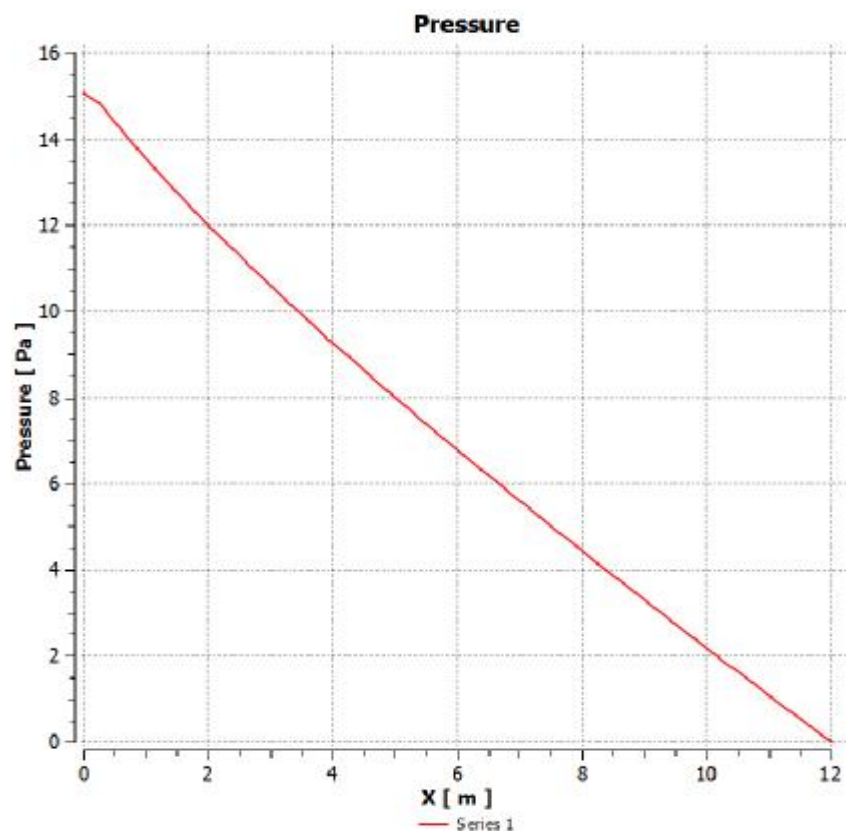
4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 2: ΑΓΩΓΟΣ ΧΩΡΙΣ ΠΛΑΚΑ (ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ)

Ø 40 kg/s

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ροής φυσικού αερίου που προσεγγίζεται ως ένα ρευστό και συγκεκριμένα το μεθάνιο. Η κατανομή της πίεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.1 και παρατηρείται όπως και στην διφασική περίπτωση πτώση πίεσης από την είσοδο (15 Pa) στην έξοδο (0 Pa).



Σχήμα 4.4.1:Κατανομή πίεσης σε αγωγό χωρίς πλάκα – Μονοφασική ροή

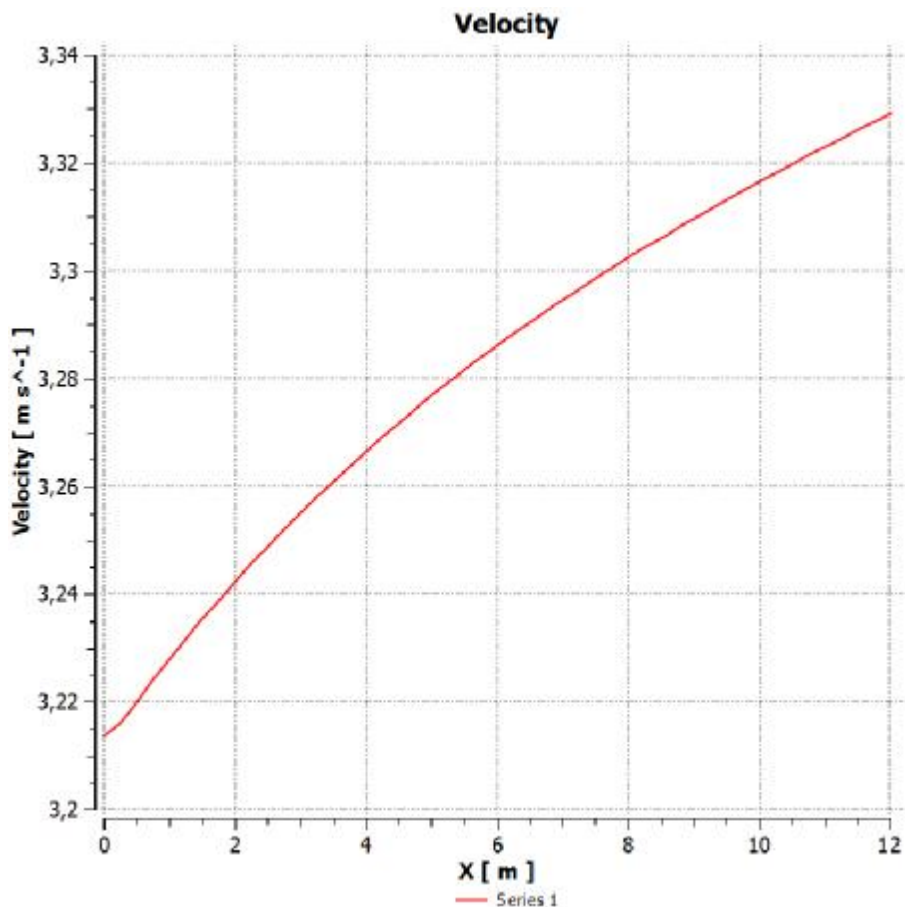


Σχήμα 4.4.2:Καμπύληπτώσης πίεσης για αγωγό χωρίς πλάκα – Μονοφασική ροή

Όπως και στις διφασικές περιπτώσεις δεν παρατηρείται κάποια αξιόλογη μεταβολή στην ταχύτητα στον αγωγό (Σχήμα 4.4.2). Επίσης, παρατηρείται μια μικρή αύξηση της ταχύτητας από την είσοδο (3.21 m/s) στα 3.32 m/s στην έξοδο (Σχήμα 4.4.3).



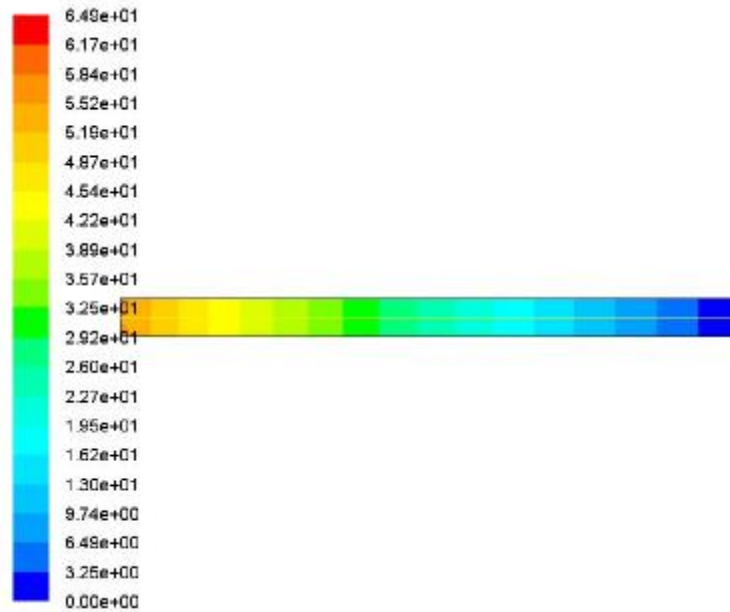
Σχήμα 4.4.3: Κατανομή ταχύτητας σε αγωγό χωρίς πλάκα – Μονοφασική ροή



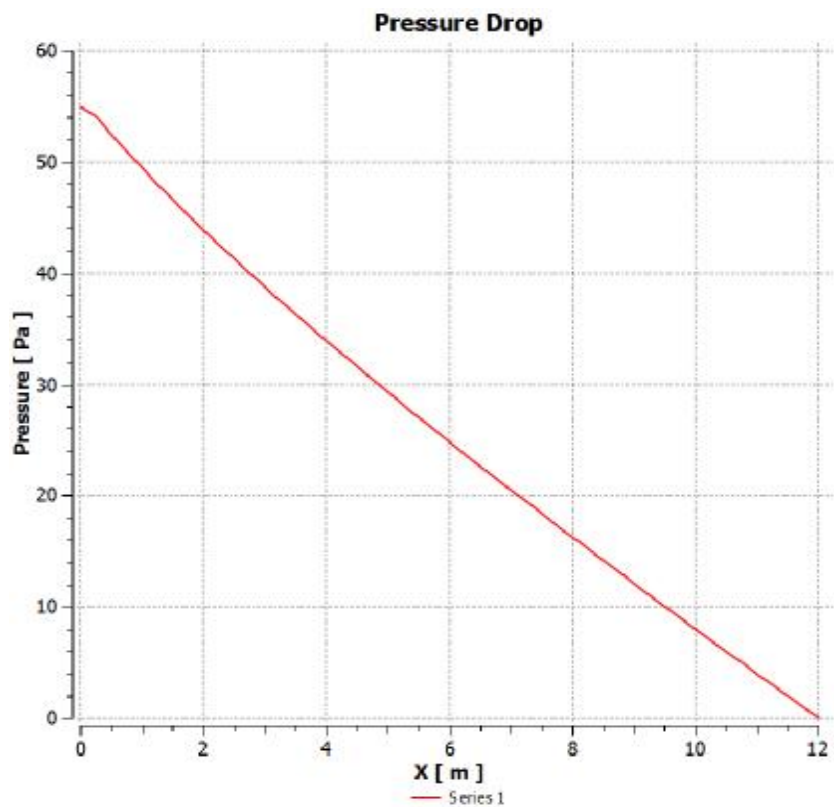
Σχήμα 4.4.4: Καμπύλη κατανομής ταχύτητας για αγωγό χωρίς πλάκα – Μονοφασική ροή

Ø 80 kg/s

Η κατανομή της πίεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.5 και παρατηρείται όπως και στην διφασική περίπτωση πτώση πίεσης από την είσοδο (56Pa) στην έξοδο (≈ 0 Pa) όπως φαίνεται και στο διάγραμμα πτώσης πίεσης (Σχήμα 4.4.5).



Σχήμα 4.4.5: Κατανομή πίεσης σε αγωγό χωρίς πλάκα – Μονοφασική ροή

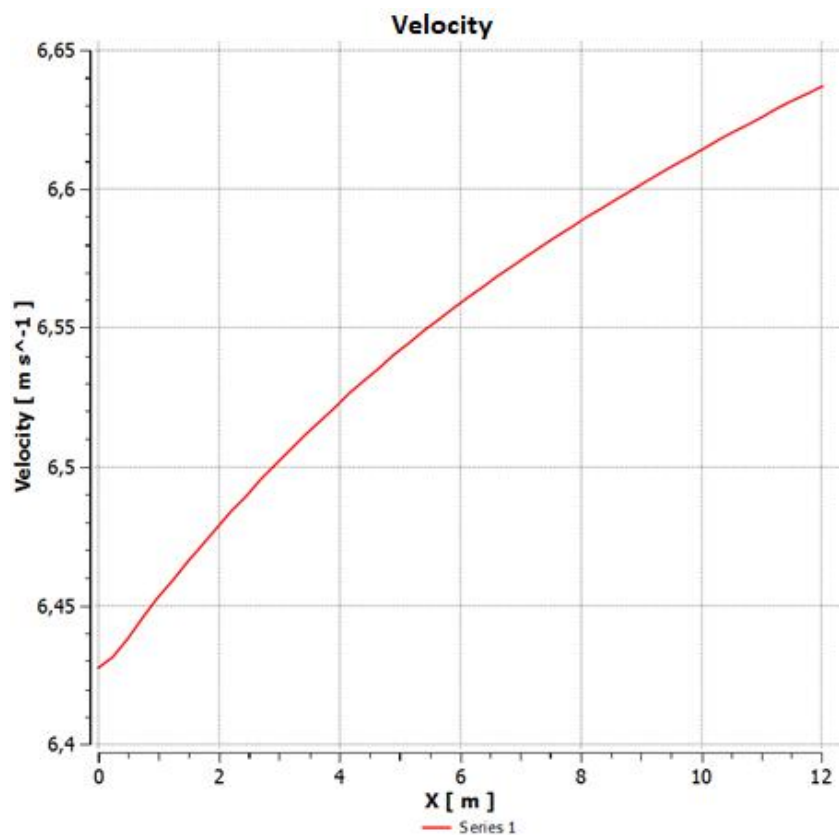


Σχήμα 4.4.6: Καμπύλη πτώσης πίεσης για αγωγό χωρίς πλάκα – Μονοφασική ροή

Όπως και στις διφασικές περιπτώσεις δεν παρατηρείται κάποια αξιόλογη μεταβολή στην ταχύτητα στον αγωγό (Σχήμα 4.4.7). Επίσης, παρατηρείται μια μικρή αύξηση της ταχύτητας από την είσοδο (3.21 m/s) στα 3.32 m/s στην έξοδο (Σχήμα 4.4.8).



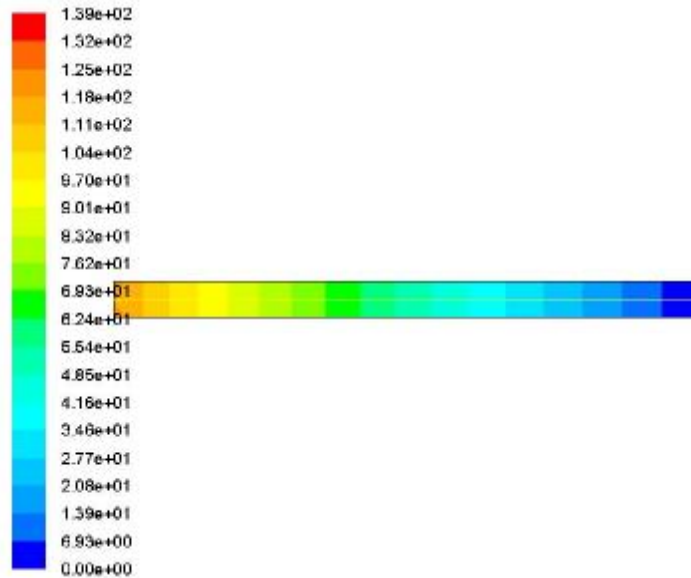
Σχήμα 4.4.7: Κατανομή ταχύτητας σε αγωγό χωρίς πλάκα – Μονοφασική ροή



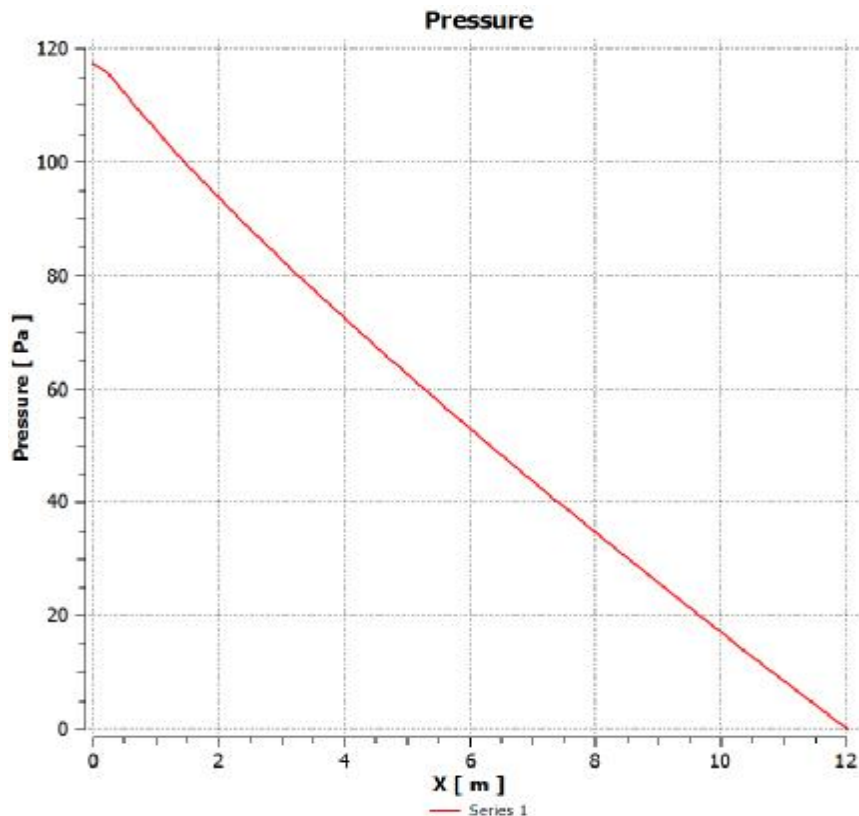
Σχήμα 4.4.8: Καμπύλη κατανομής ταχύτητας για αγωγό χωρίς πλάκα – Μονοφασική ροή

Ø 120 kg/s

Τα αποτελέσματα για την τελευταία και μέγιστη παροχή των 120 kg/s παρουσιάζονται ακολούθως. Στο Σχήμα 4.4.9 παρουσιάζεται η κατανομή της πτώσης πίεσης όπου στην είσοδο επικρατεί υψηλή πίεση (118 Pa) και στην είσοδο οριακά θετικές τιμές (Σχήμα 4.4.10).



Σχήμα 4.4.9: Κατανομή πίεσης σε αγωγό χωρίς πλάκα – Μονοφασική ροή

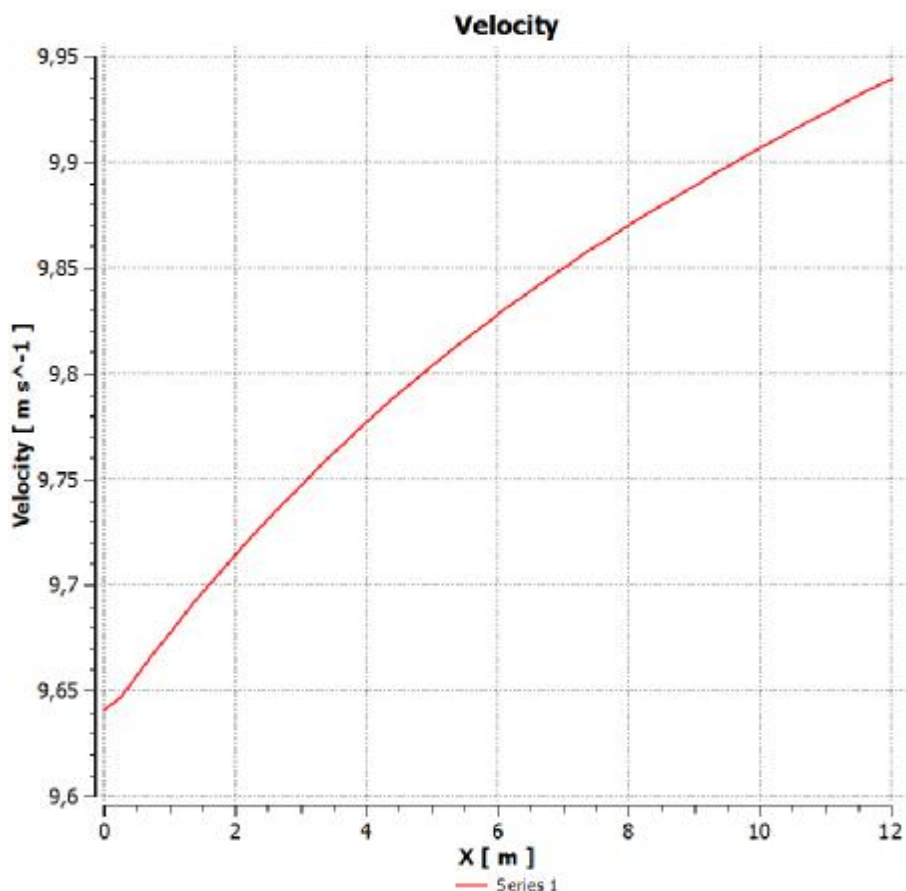


Σχήμα 4.4.10: Καμπύλη πτώσης πίεσης για αγωγό χωρίς πλάκα – Μονοφασική ροή

Η κατανομή της ταχύτητας και σε αυτή την μονοφασική περίπτωση στον αγωγό χωρίς πλάκα δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες μεταβολές. Όπως αποδεικνύει και το διάγραμμα του Σχήματος 4.4.11 η αξονική ταχύτητα στην είσοδο είναι ίση με 9.64 m/s και στην έξοδο είναι 9.94 m/s.



Σχήμα 4.4.10: Κατανομή ταχύτητας σε αγωγό χωρίς πλάκα – Μονοφασική ροή

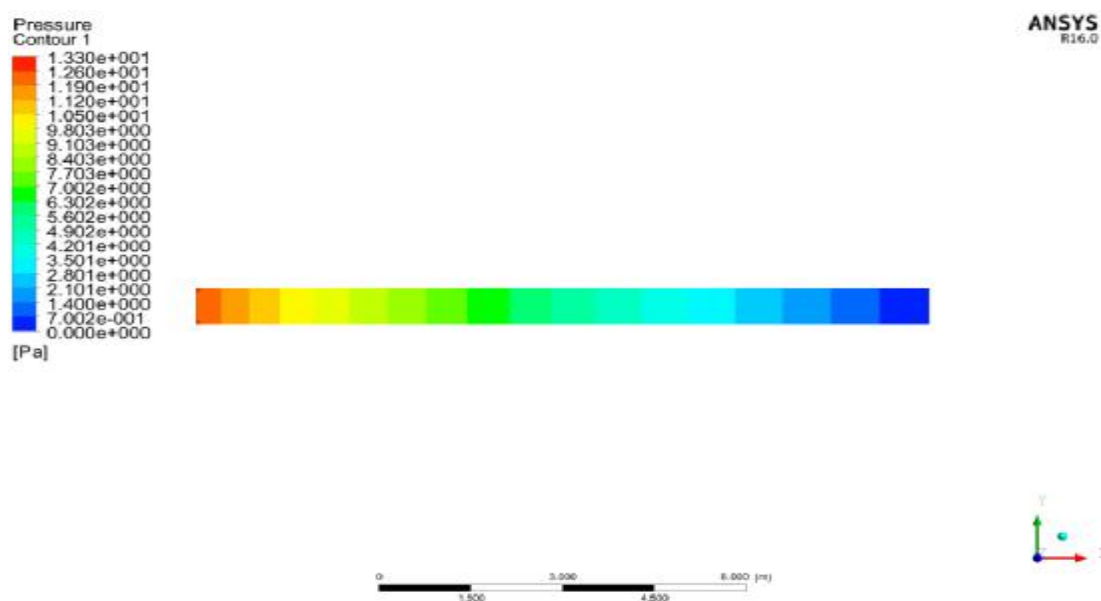


Σχήμα 4.4.11: Καμπύλη κατανομής ταχύτητας για αγωγό χωρίς πλάκα – Μονοφασική ροή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

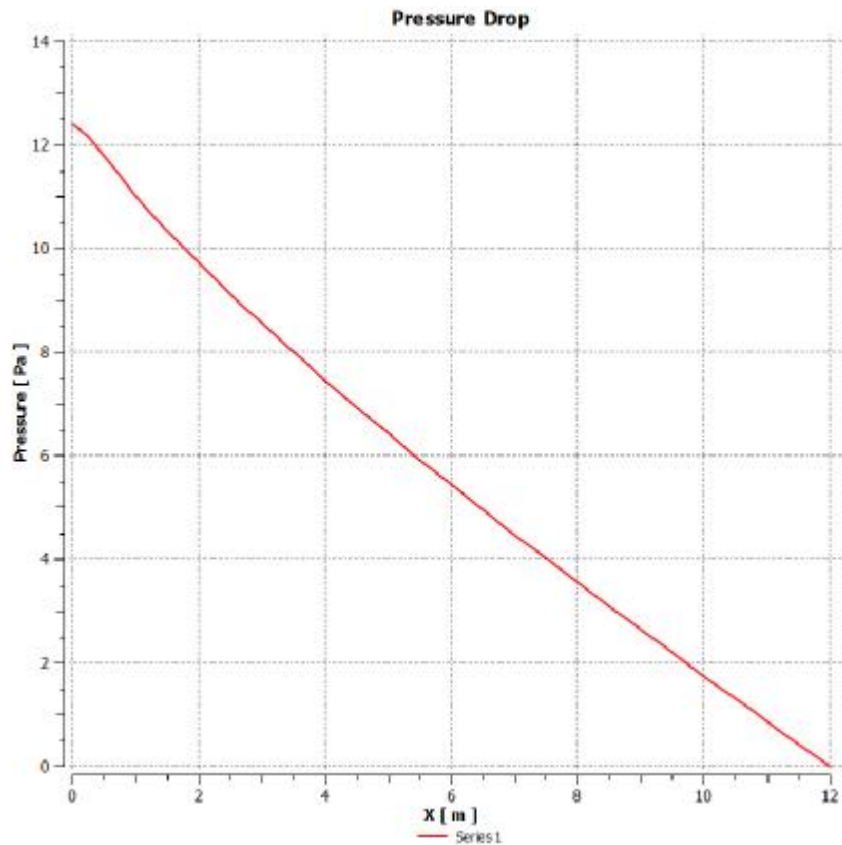
5.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΧΩΡΙΣ ΠΛΑΚΑ – ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ

· 40 kg/s



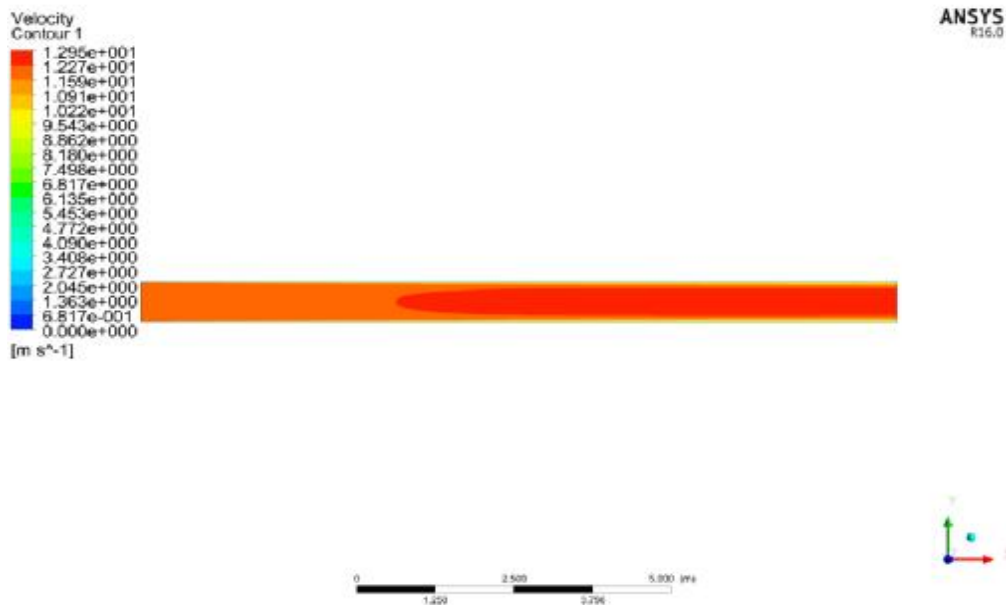
Σχήμα 5.1.1: Κατανομή στατικής πίεσης στο επίπεδο XY

Η πτώση πίεσης του Σχήματος 5.1.1 στο επίπεδο XY της τρισδιάστατης γεωμετρίας επιβεβαιώνεται και με την καμπύλη πτώσης πίεσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.2. Από την μέγιστη τιμή εισόδου στην έξοδο η πίεση λαμβάνει μηδενικές τιμές (ατμοσφαιρική πίεση δηλαδή).

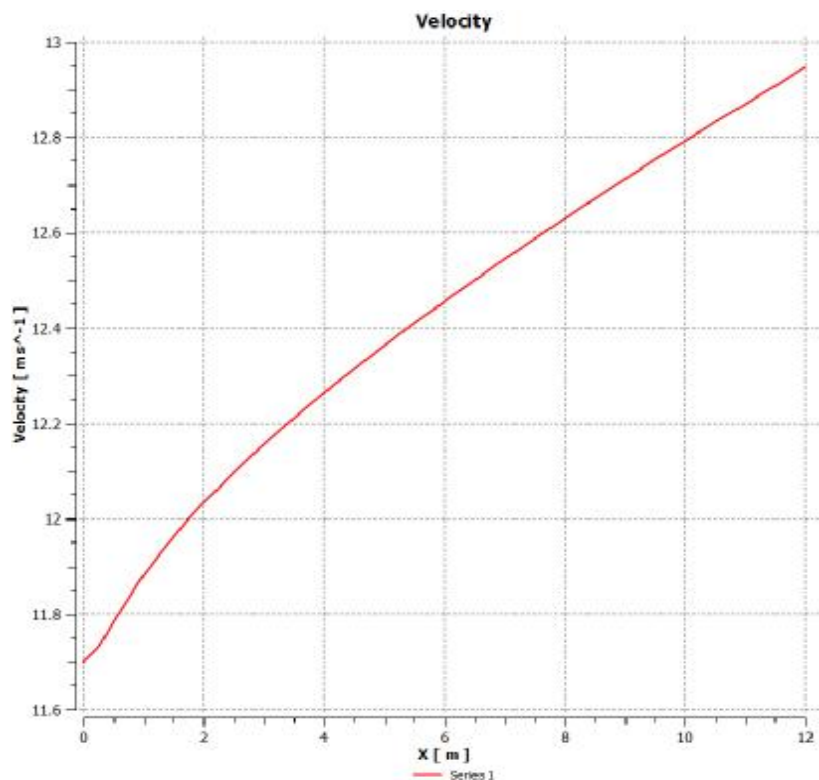


Σχήμα 5.1.2: Καμπύλη στατικής πίεσης στην κεντρική γραμμή ροής

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας στο XY επίπεδο. Από τη στιγμή που από το μέσον του αγωγού και προς την έξοδο παρατηρείται πτώση στην πίεση, είναι αναμενόμενη η αύξηση στην ταχύτητα.

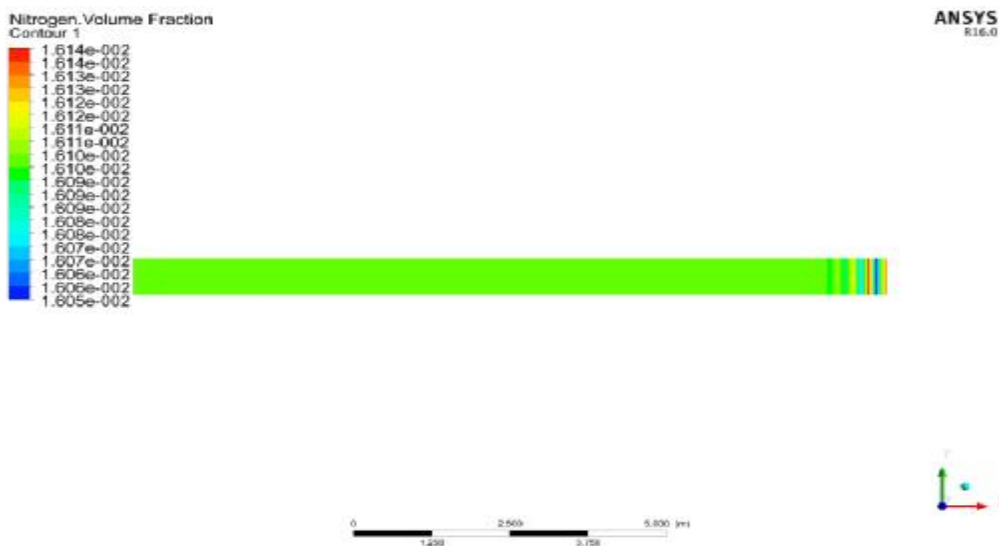


Σχήμα 5.1.3: Κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο XY



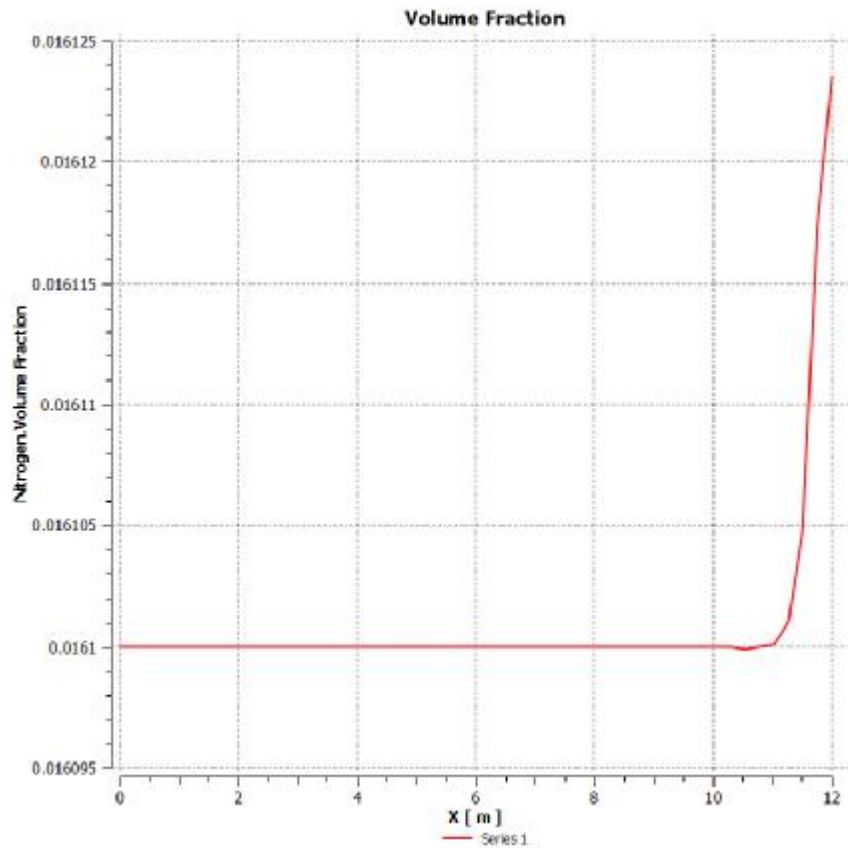
Σχήμα 5.1.4: Καμπύλη ταχύτητας στην κεντρική γραμμή ροής

Το κλάσμα όγκου της δευτερεύουσας φάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.5 και ενώ η συγκέντρωση είναι σταθερή σε όλο το μήκος του αγωγού στην έξοδο παρατηρείται μια απότομη αύξηση της περιεκτικότητας της 2^η φάσης.



Σχήμα 5.1.5: Κατανομή κλάσματος όγκου αζώτου – XY επίπεδο

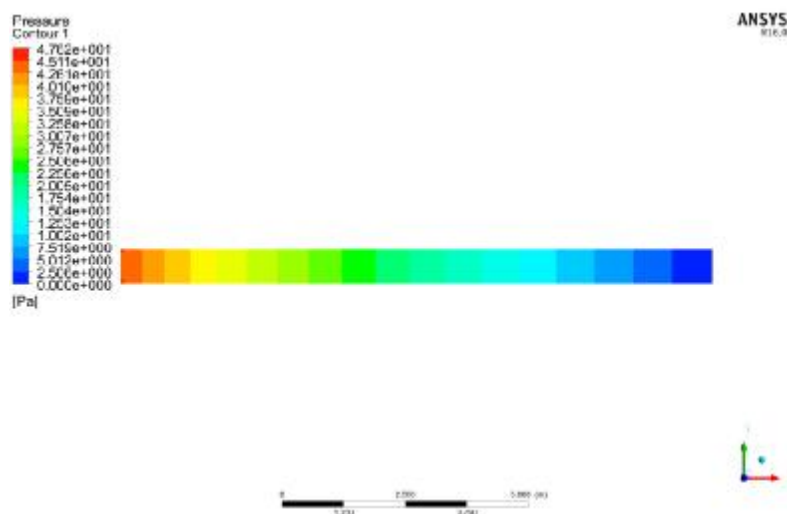
Η καμπύλη που παρουσιάζει την συγκέντρωση του κλάσματος όγκου του αζώτου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1.6.



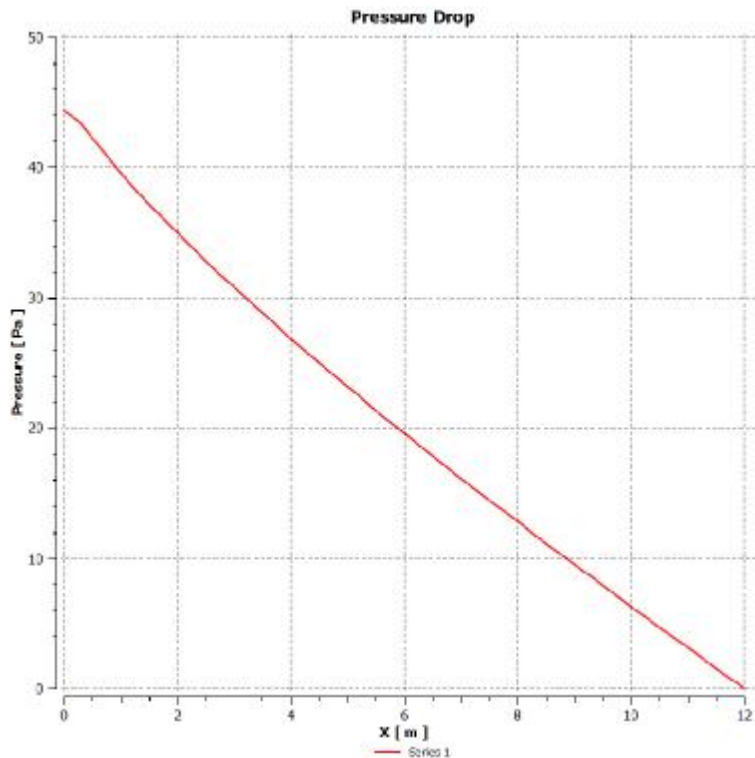
Σχήμα 5.1.6: Καμπύλη κλάσματος όγκου αζώτου στην κεντρική γραμμή ροής

• **80 kg/s**

Η πτώση πίεσης του Σχήματος 5.1.7 στο επίπεδο XY της τρισδιάστατης γεωμετρίας επιβεβαιώνεται και με την καμπύλη πτώσης πίεσης που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.8. Από την μέγιστη τιμή εισόδου στην έξοδο η πίεση λαμβάνει μηδενικές τιμές (ατμοσφαιρική πίεση δηλαδή).

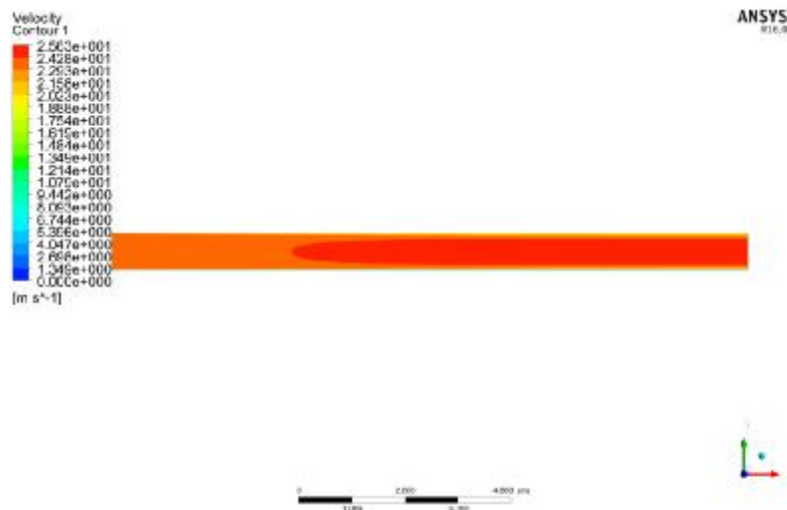


Σχήμα 5.1.7: Κατανομή στατικής πίεσης στο επίπεδο XY



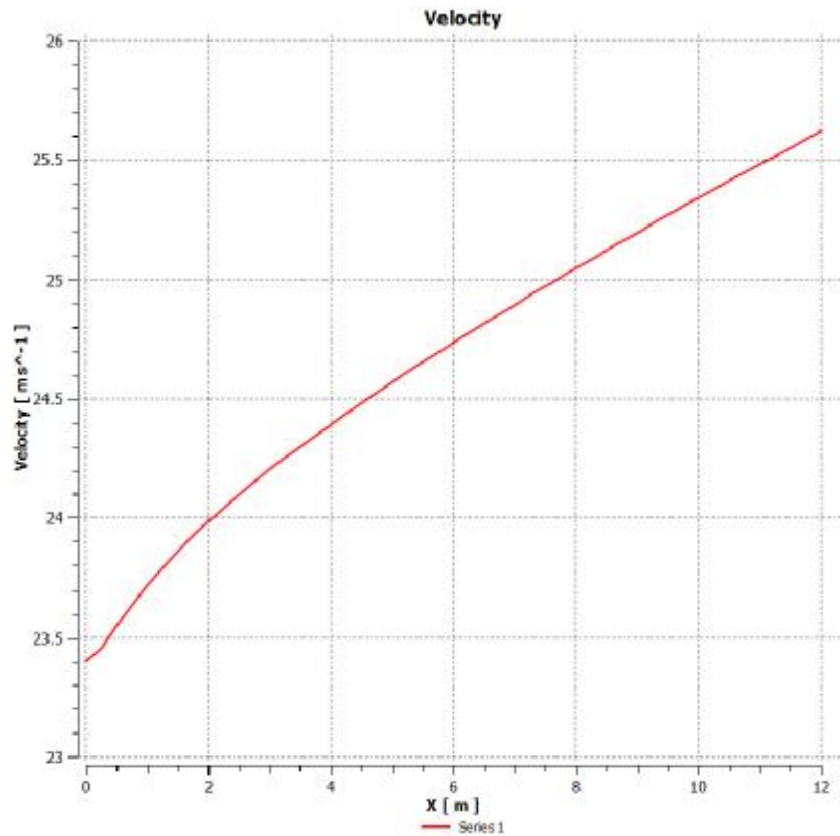
Σχήμα 5.1.8: Καμπύλη στατικής πίεσης στην κεντρική γραμμή ροής

Στην μεγαλύτερη παροχή των 80 kg/s παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας εντός του αγωγού πραγματοποιείται περίπου στο 1/3 του μήκους του αγωγού (πιο έντονο κόκκινο χρώμα).



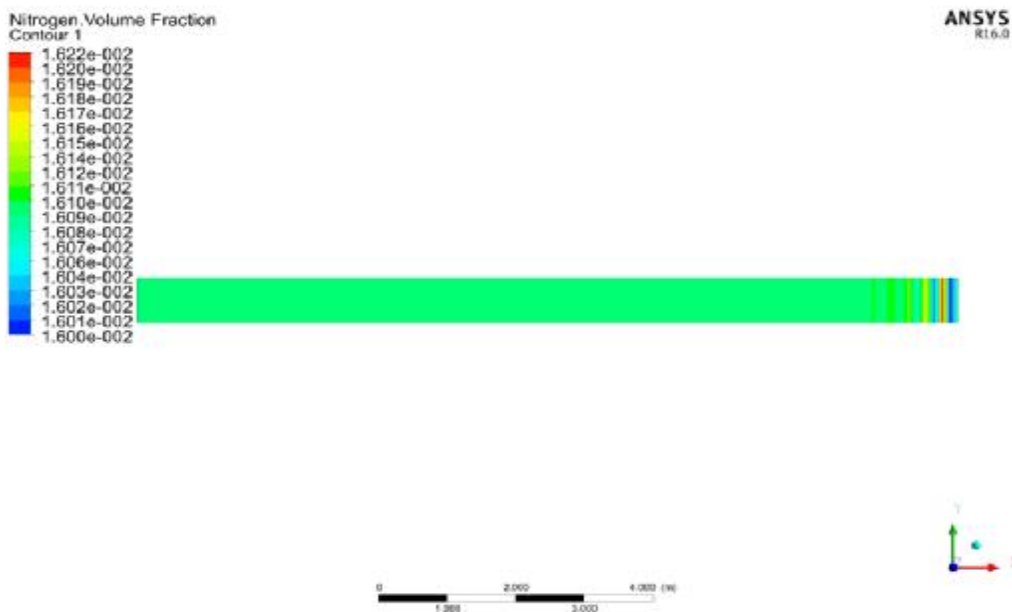
Σχήμα 5.1.9: Κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο XY

Η αύξηση της ταχύτητας πραγματοποιείται στο εύρος 23.5 m/s ως 25.6 m/s (Σχήμα 5.1.10).

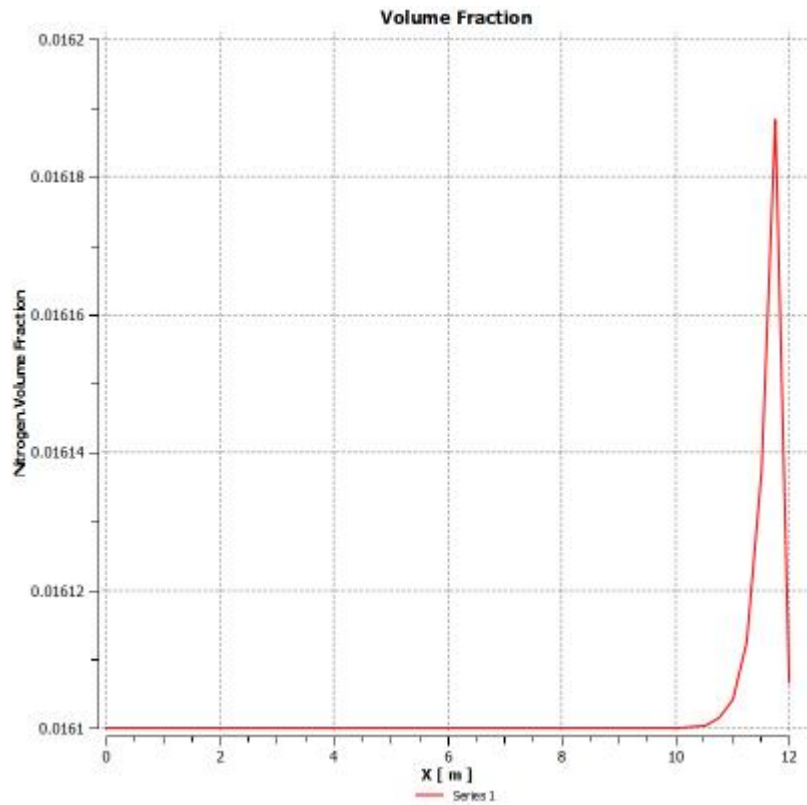


Σχήμα 5.1.10: Καμπύλη ταχύτητας στην κεντρική γραμμή ροής

Αντίστοιχη συμπεριφορά με την περίπτωση των 40 kg/s παρατηρείται και στο κλάσμα όγκου. Σταθερή κατανομή και αύξηση στην έξοδο.



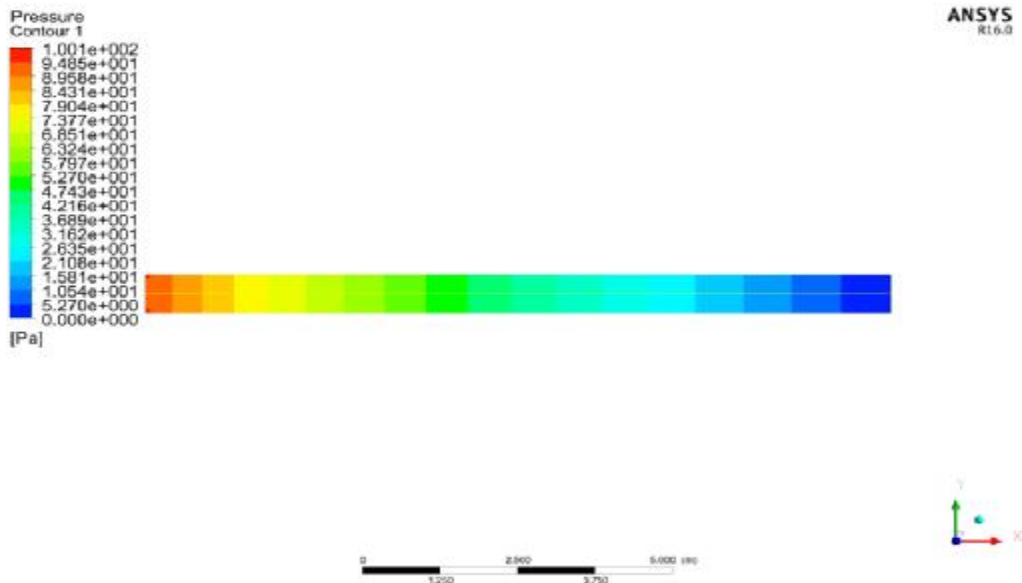
Σχήμα 5.1.11: Κατανομή κλάσματος όγκου αζώτου – XY επίπεδο



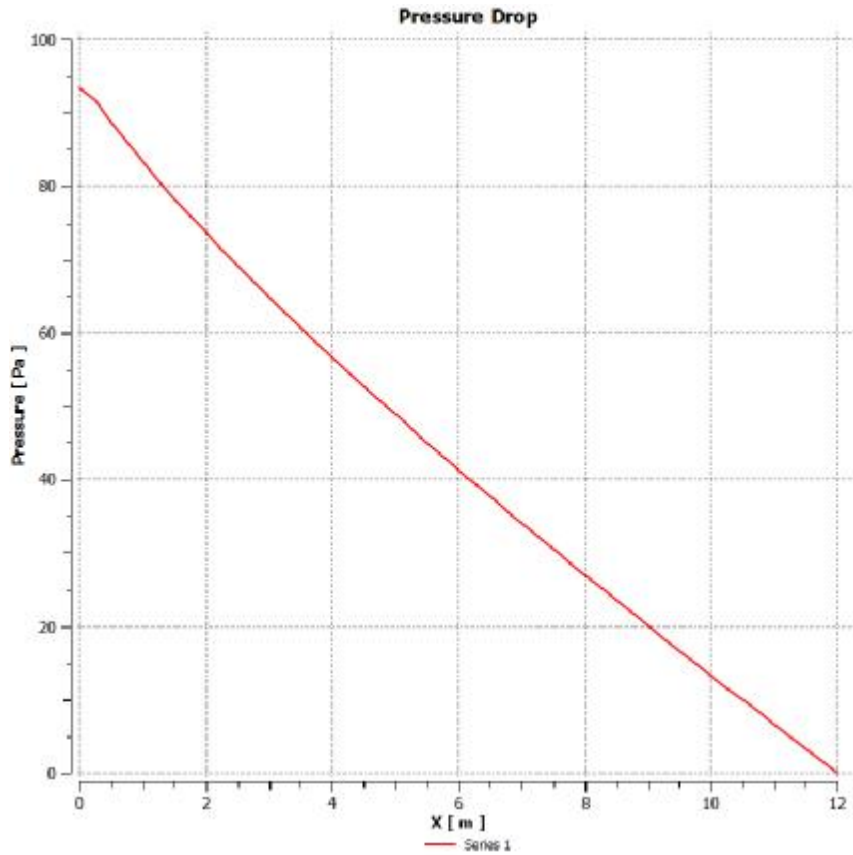
Σχήμα 5.1.12: Καμπύλη κλάσματος όγκου αζώτου στην κεντρική γραμμή ροής

- 120 kg/s

Τέλος στην παροχή των 120 kg/s παρατηρείται μεγαλύτερη πτώση πίεσης. Στην είσοδο η στατική είναι σχεδόν 95 Pa και στην έξοδο μηδενίζεται, δηλαδή γίνεται ίση με την ατμοσφαιρική.

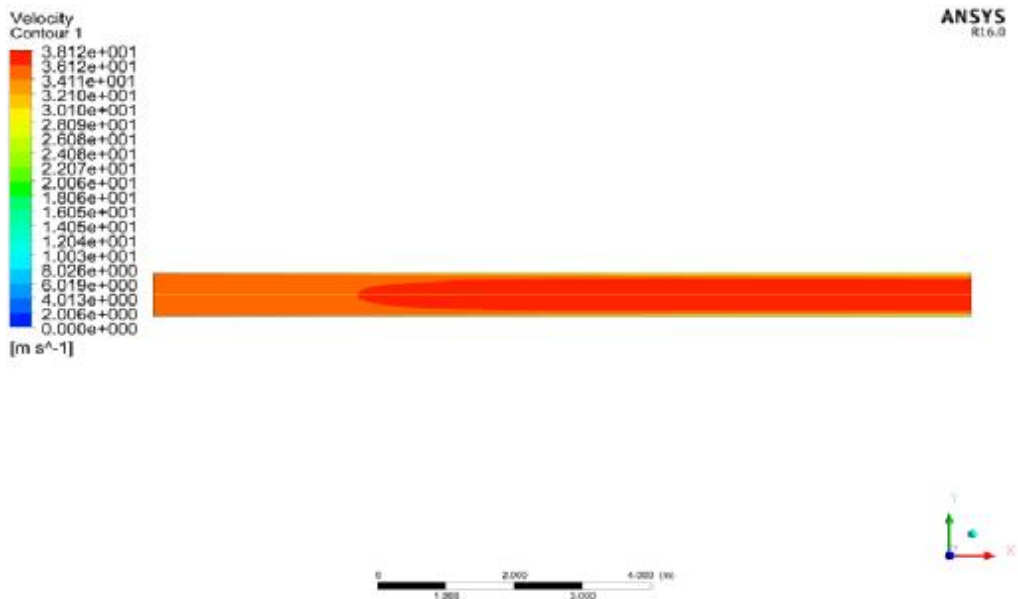


Σχήμα 5.1.13: Κατανομή στατικής πίεσης στο επίπεδο XY

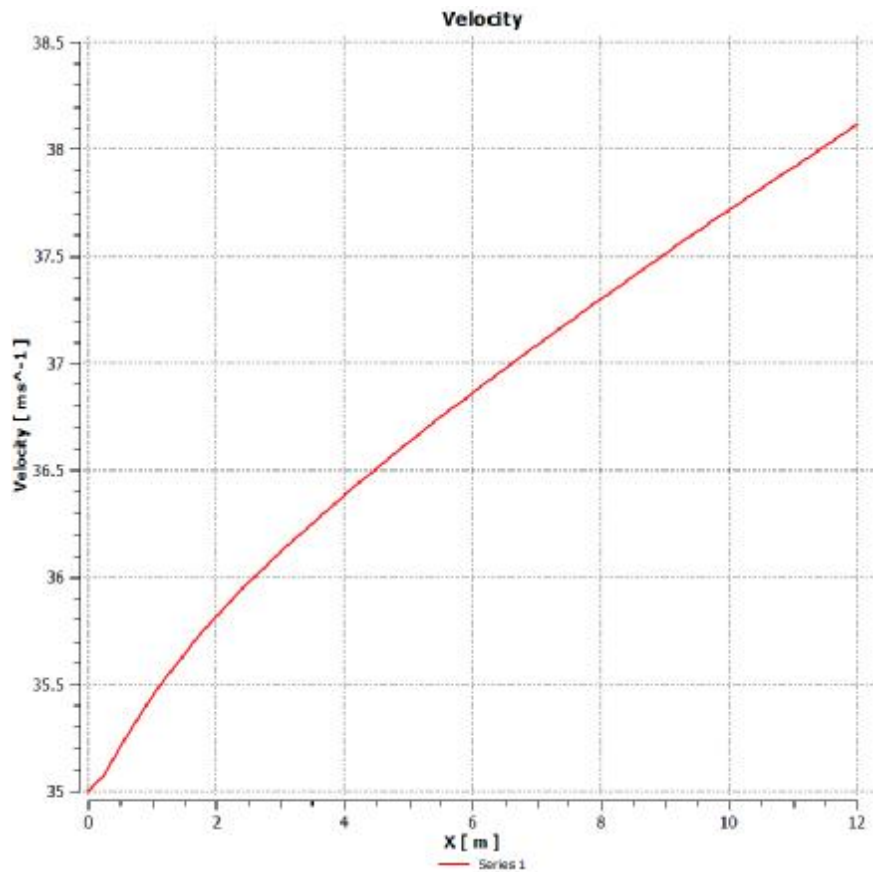


Σχήμα 5.1.14: Καμπύλη στατικής πίεσης στην κεντρική γραμμή ροής

Η αύξηση της ταχύτητας του μίγματος γίνεται σε σημείο ακόμη πιο κοντά στην είσοδο του αγωγού. Η αύξηση της ταχύτητας είναι από 35 m/s στα 38.2 m/s.

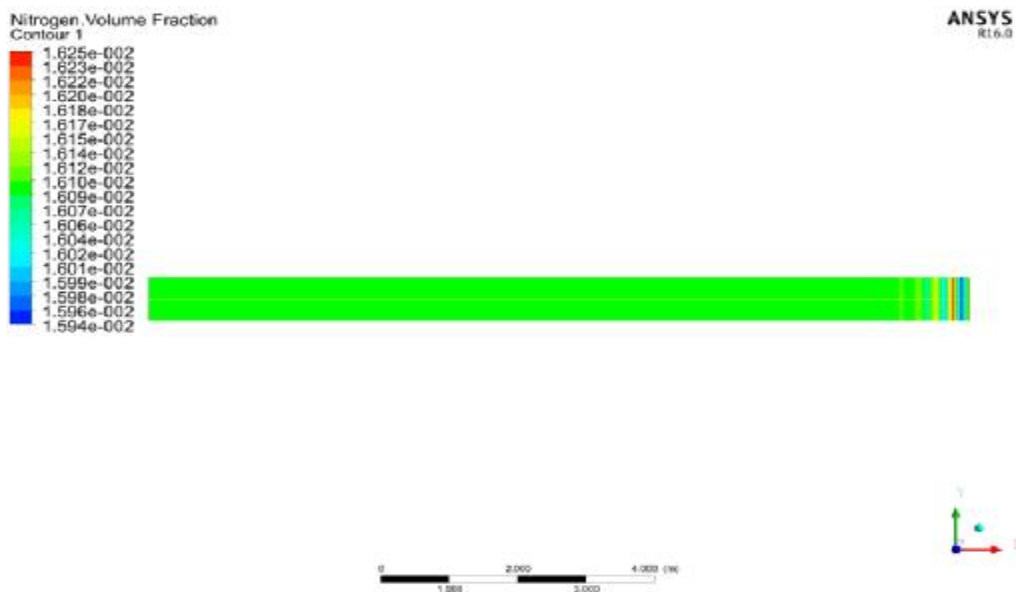


Σχήμα 5.1.15: Κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο XY

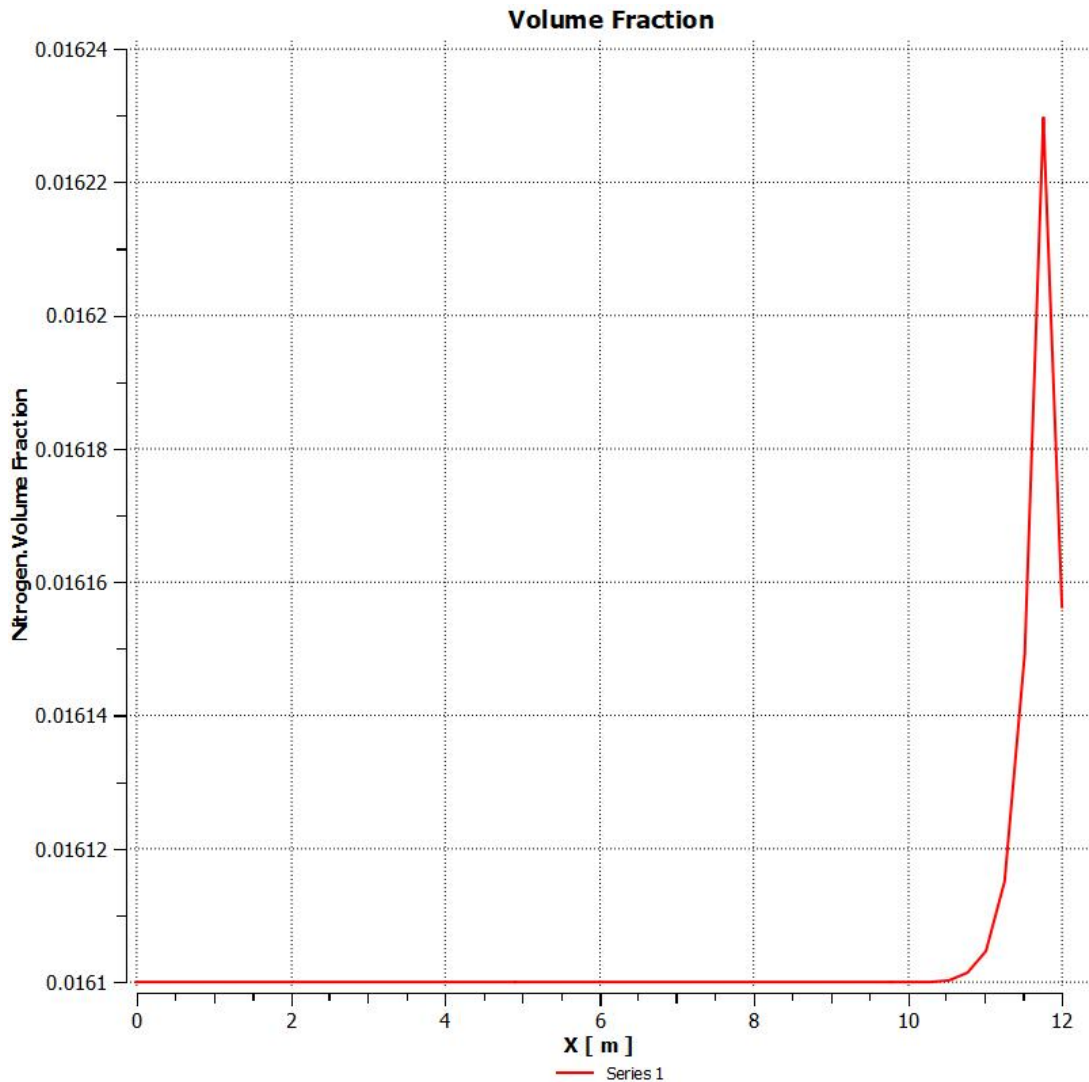


Σχήμα 5.1.16: Καμπύλη ταχύτητας στην κεντρική γραμμή ροής

Η κατανομή του κλάσματος όγκου της δεύτερης φάσης παραμένει ίδια με τις προηγούμενες παροχές.



Σχήμα 5.1.17: Κατανομή κλάσματος όγκου αζώτου – XY επίπεδο

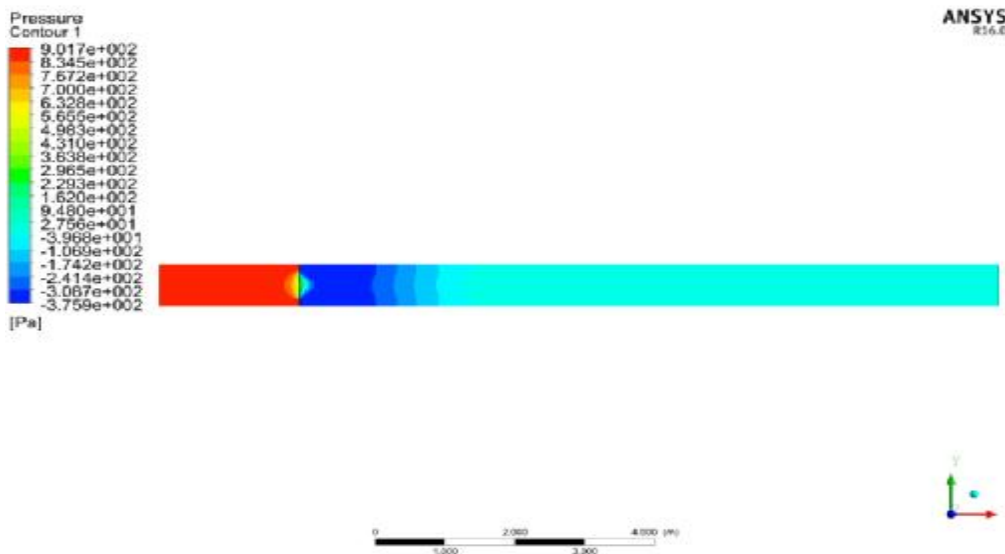


Σχήμα 5.1.18: Καμπύλη στατικής πίεσης στην κεντρική γραμμή ροής

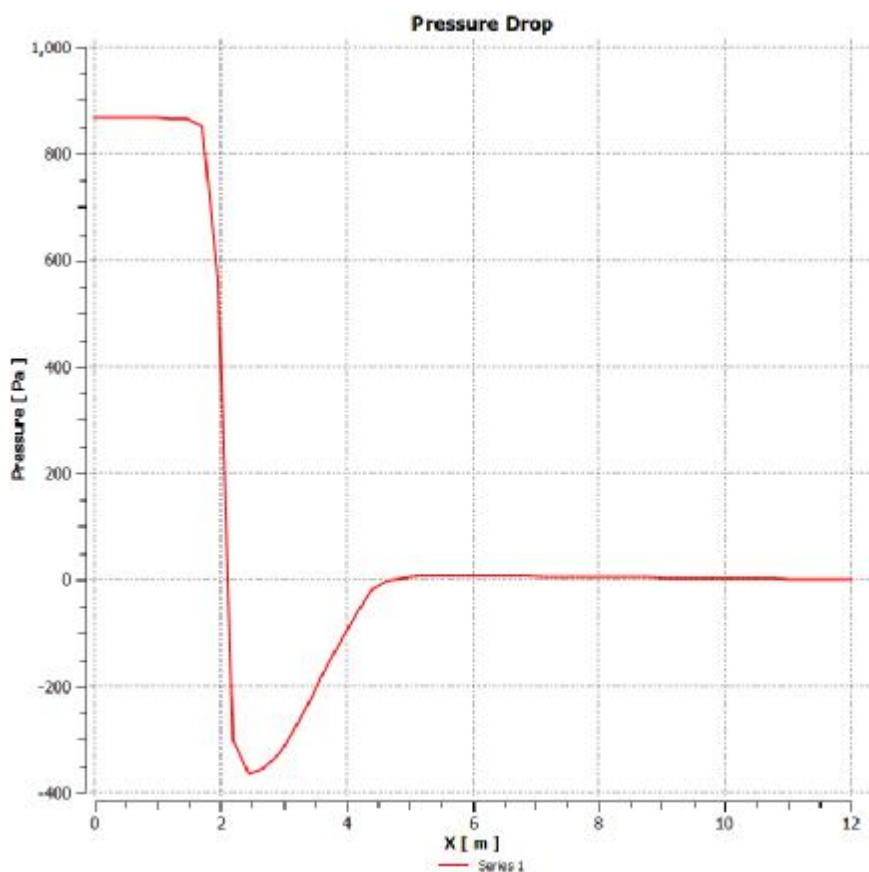
5.2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ ΠΛΑΚΑ – ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ

- **40 kg/s**

Για την περίπτωση της διφασικής ροής με πλάκα εντός του αγωγού τα αποτελέσματα λαμβάνουν άκρως ενδιαφέρουσες κατανομές. Παρατηρείται υψηλή πτώση πίεσης μόλις η ροή περάσει από τη στένωση της διατομής, στη συνέχεια λαμβάνει αρνητικές τιμές και στη συνέχεια επανέρχεται σε θετικά επίπεδα. Η μετάβαση αυτή της πίεσης από υψηλή τιμή σε αρνητικά επίπεδα και τέλος σε θετική σταθερή τιμή απεικονίζεται στα Σχήμα 5.2.1 και 5.2.2.

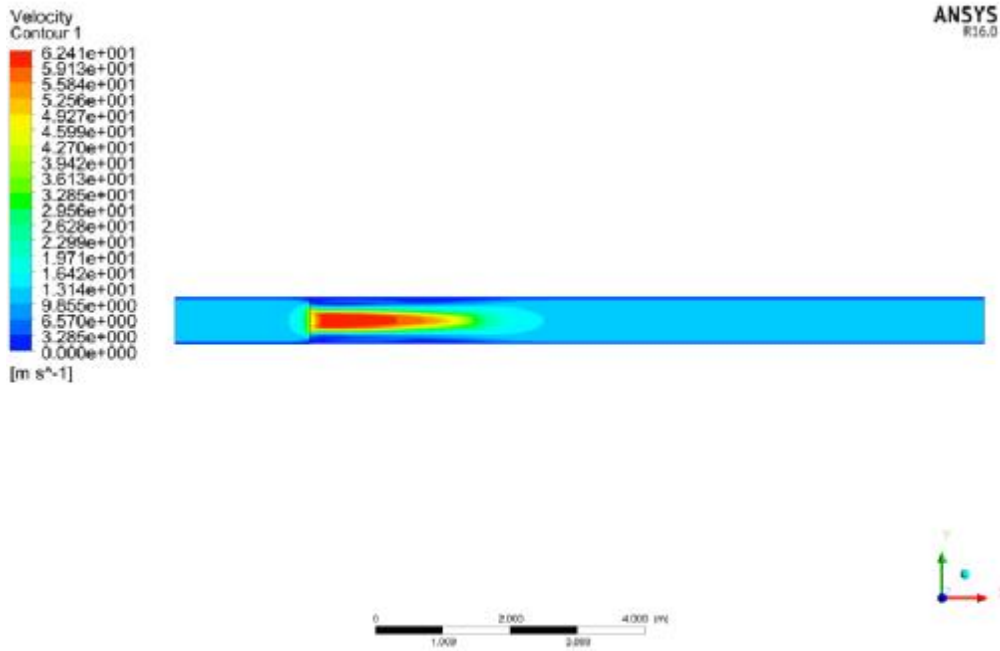


Σχήμα 5.2.1: Κατανομή στατικής πίεσης στο επίπεδο XY

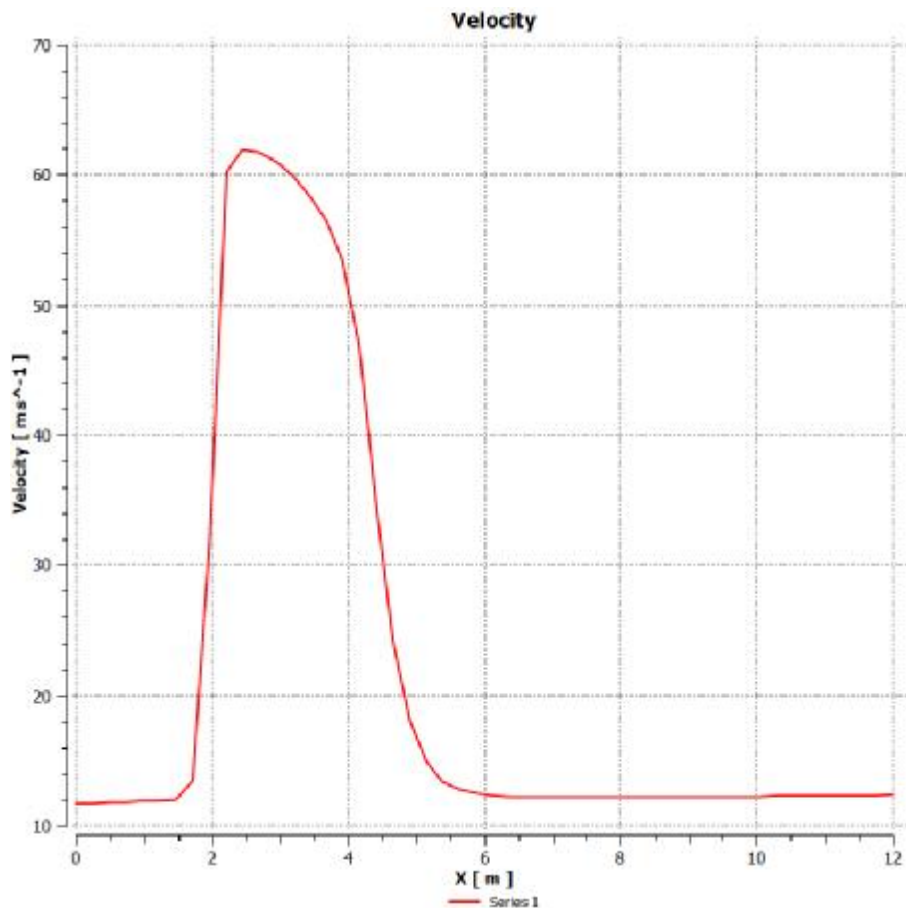


Σχήμα 5.2.2: Καμπύλη στατικής πίεσης στην κεντρική γραμμή ροής

Σύμφωνα με τον νόμο Bernoulli στα σημεία χαμηλής πίεσης θα υπάρχει υψηλή ταχύτητα. Αυτό επιβεβαιώνεται με την κατανομή της ταχύτητας καθώς και την χρωματική απεικόνιση του jet της ταχύτητας να διέρχεται με μεγάλες τιμές τη μικρή διατομή.

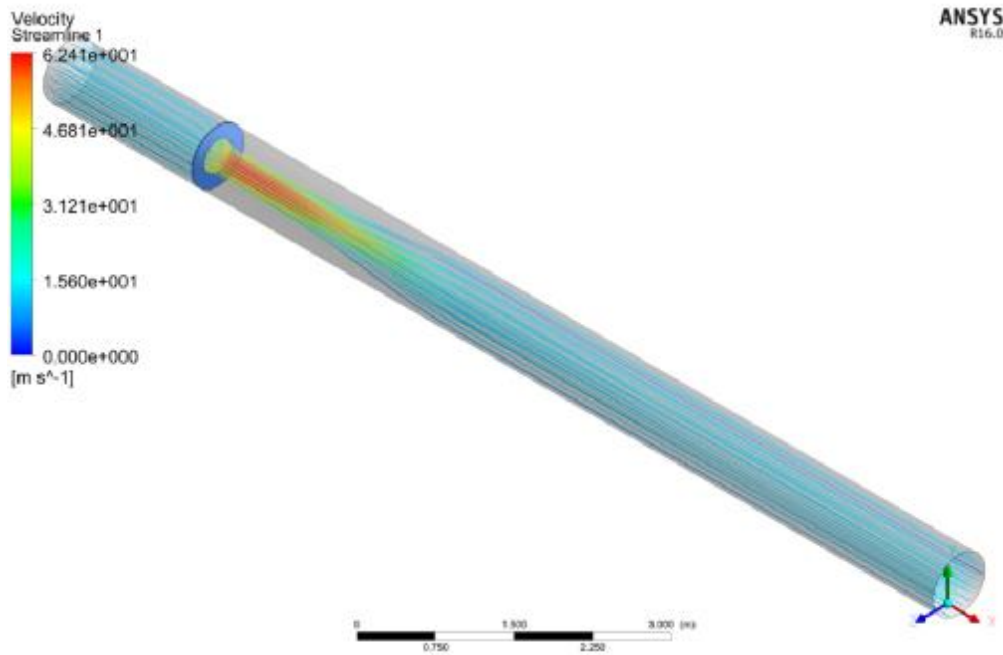


Σχήμα 5.2.3: Κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο XY



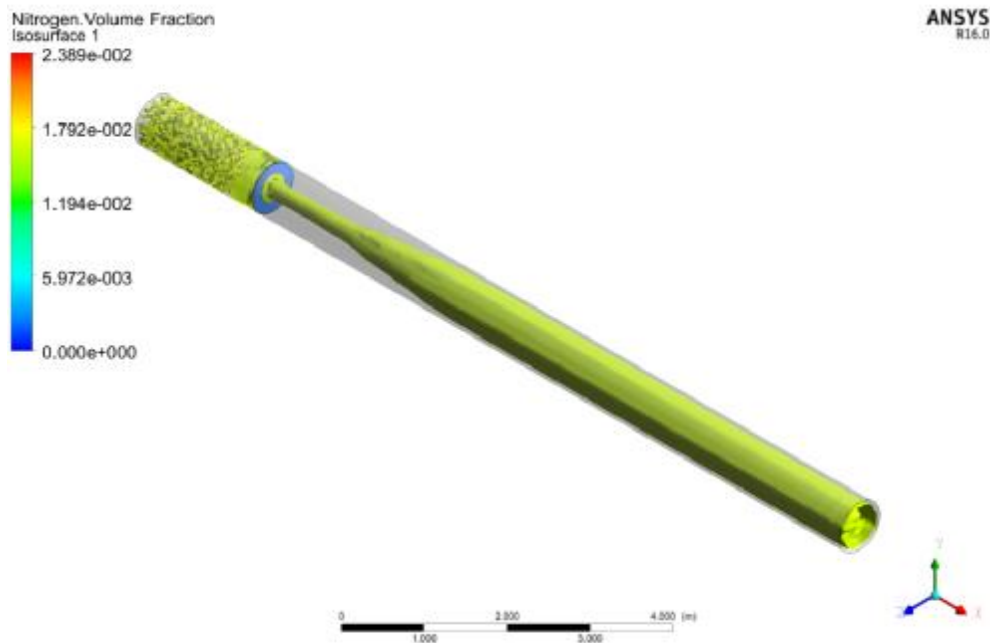
Σχήμα 5.2.4: Καμπύλη ταχύτητας στην κεντρική γραμμή ροής

Η περιοχή αυξημένης ταχύτητας επιβεβαιώνεται και με τις έντονες ροϊκές γραμμές που περνούν μέσα από τη στενή διατομή λόγω της ύπαρξης της πλάκας (Σχήμα 5.2.5).

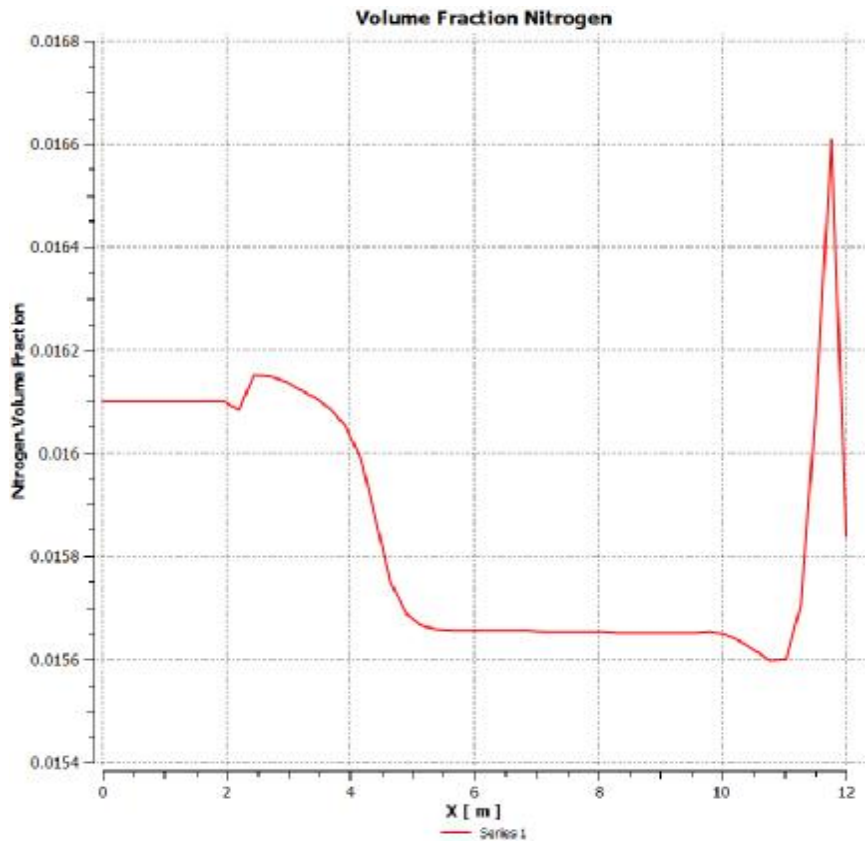


Σχήμα 5.2.5: Ροϊκές γραμμές ταχύτητας μίγματος

Εντυπωσιακό αποτέλεσμα εξάγει και το κλάσμα όγκου της δεύτερης φάσης. Στο Σχήμα 5.2.6 παρουσιάζεται ο γεωμετρικός τόπος που το κλάσμα όγκου της ροής είναι ίσο με 0.0161, όσο δηλαδή η τιμή που ορίστηκε στην είσοδο.



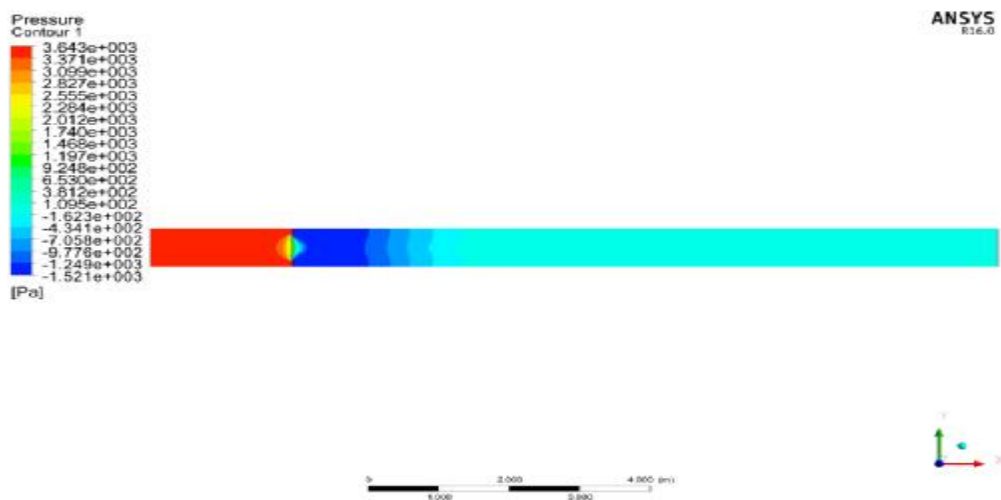
Σχήμα 5.2.6: Κλάσμα όγκου αζώτου



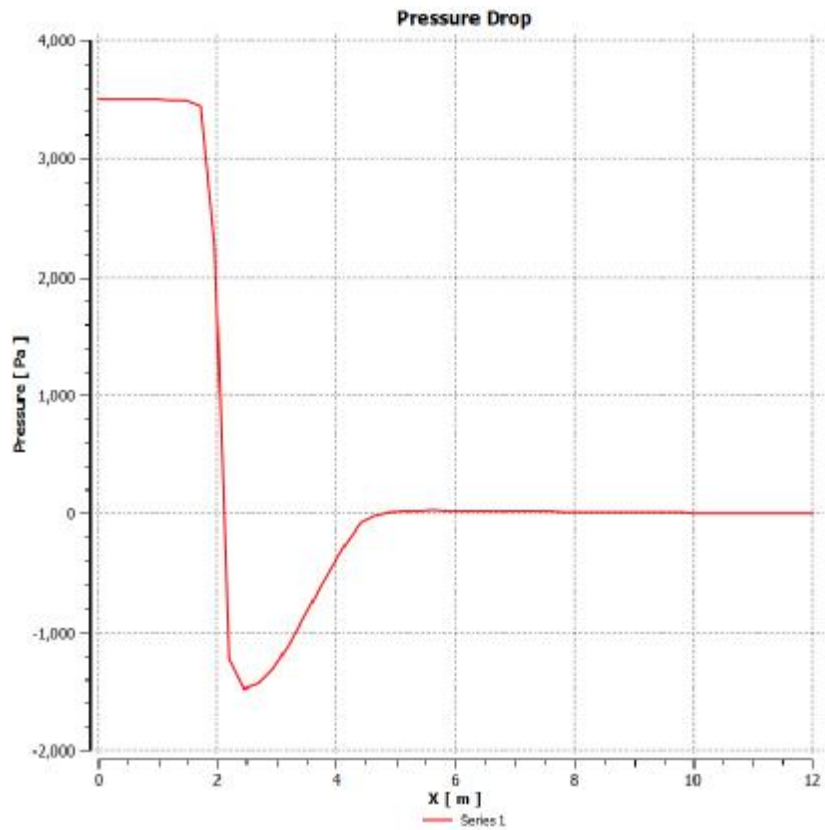
Σχήμα 5.2.7: Καμπύλη κατανομής κλάσματος όγκου αζώτου στην κεντρική γραμμή της ροής

• **80 kg/s**

Η κατανομή της πίεσης στο XY επίπεδο για την παροχή των 80 kg/s παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2.8. Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση περιοχή υψηλής πίεσης πριν την πλάκα, η πίεση μετά την πλάκα και τη μείωση της διατομής πέφτει απότομα σε αρνητικά επίπεδα και στη συνέχεια σταθεροποιείται όπως αποδεικνύεται και από την καμπύλη του Σχήματος 5.2.9.

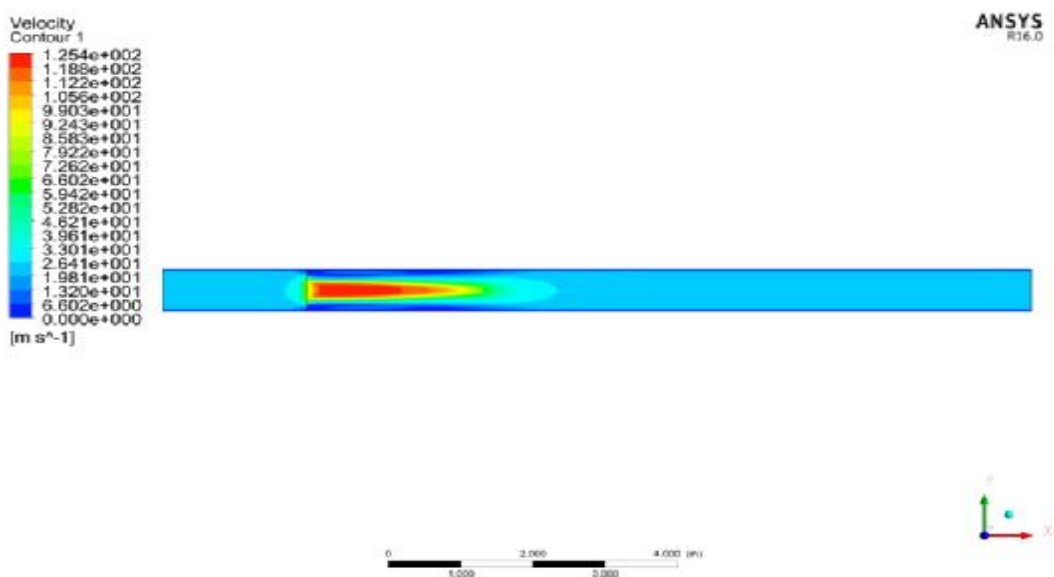


Σχήμα 5.2.8: Κατανομή στατικής πίεσης στο επίπεδο XY

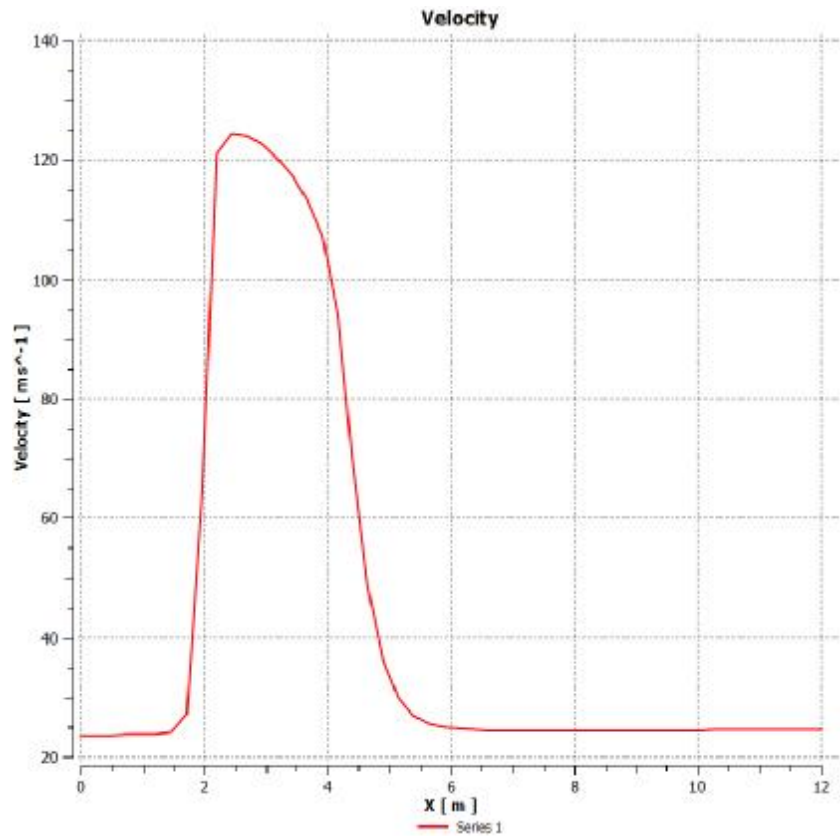


Σχήμα 5.2.9: Καμπύλη στατικής πίεσης στην κεντρική γραμμή ροής

Η ορατοποίηση της κατανομής της ταχύτητας για τα 80 kg/s παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2.10. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται περιοχή όπου η ροή διέρχεται με υψηλές ταχύτητες από την μικρή διατομή και στη συνέχεια επανέρχεται στις αρχικές περίπου τιμές, όπως αποδεικνύεται και από το διάγραμμα με δεδομένα από την κεντρική ροϊκή γραμμή.

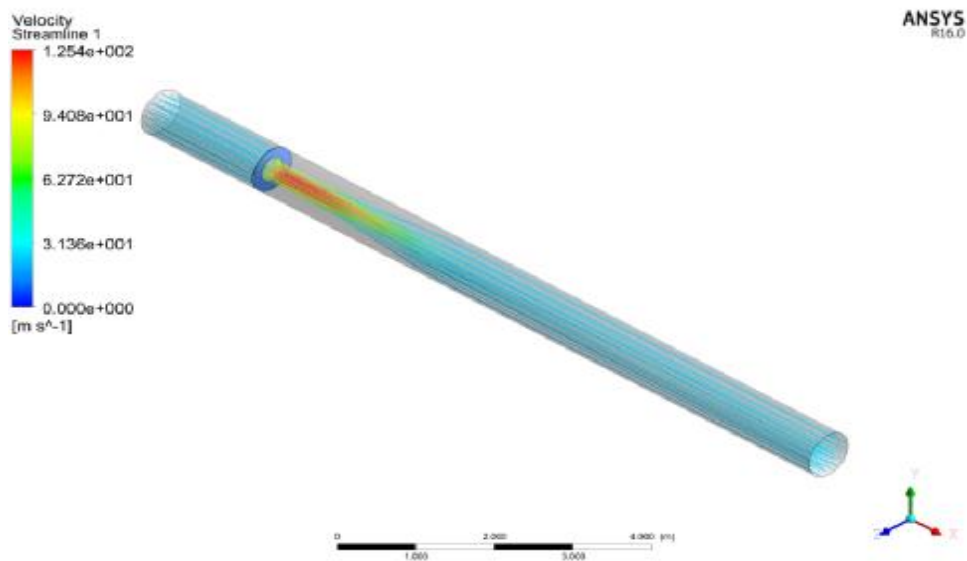


Σχήμα 5.2.10: Κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο XY



Σχήμα 5.2.11: Καμπύλη ταχύτητας στην κεντρική γραμμή ροής

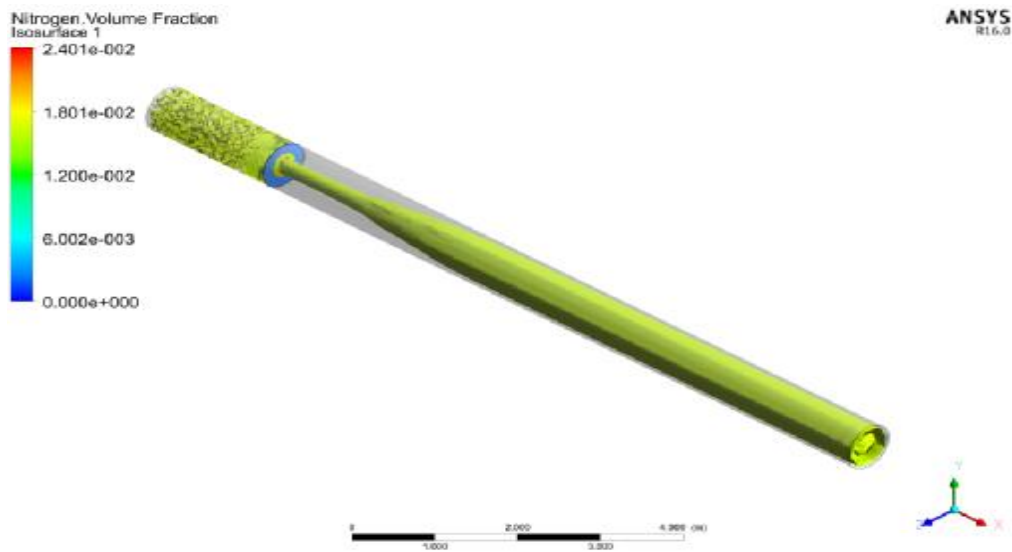
Επιπλέον δεδομένα για την ορατοποίηση της ροής δίνονται παρουσιάζοντας την κίνηση των ροϊκών γραμμών εντός του αγωγού. Όπως και με την κατανομή της ταχύτητας έτσι και οι ροϊκές γραμμές παρουσιάζονται πιο πυκνές στο σημείο αυξημένης ταχύτητας ροής.



Σχήμα 5.2.12: Ροϊκές γραμμές ταχύτητας μίγματος

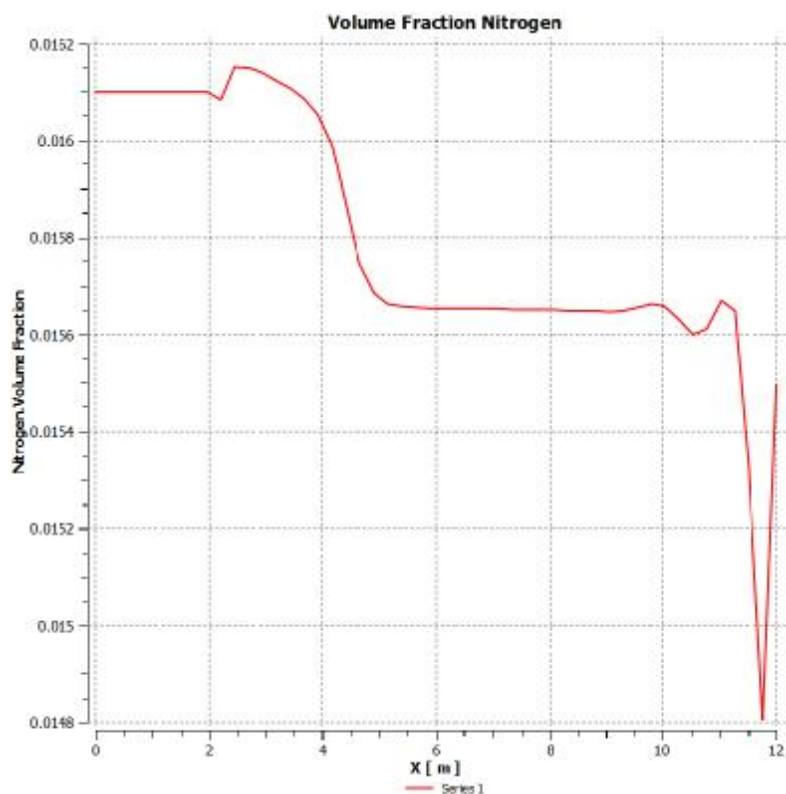
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατανομή του κλάσματος όγκου της δευτερεύουσας φάσης. Πριν την πλάκα η δευτερεύουσα φάση βρίσκεται σε μορφή σωματιδίων/φουσαλίδων

εντός του αγωγού. Μετά τη στένωση ακολουθεί την κατεύθυνση των ροϊκών γραμμών του Σχήματος 5.2.12.



Σχήμα 5.2.13:Κλάσμα όγκου αζώτου

Τέλος στο Σχήμα 5.2.13 παρουσιάζεται η τιμή του κλάσματος όγκου του αζώτου επί της κεντρικής ροϊκής γραμμής.

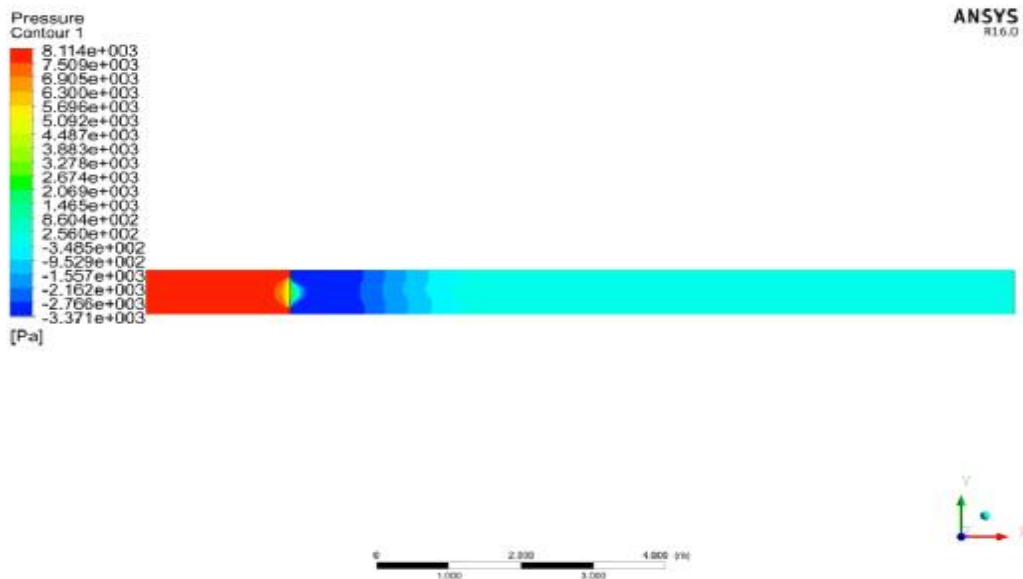


Σχήμα 5.2.14: Καμπύλη κατανομής κλάσματος όγκου αζώτου στην κεντρική γραμμή της ροής

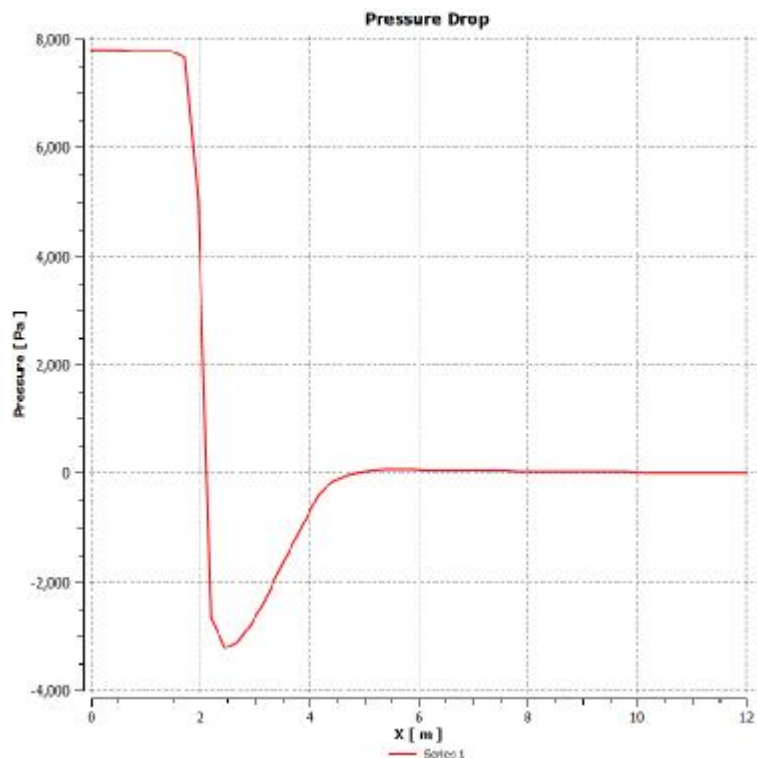
- **120 kg/s**

Η κατανομή της πίεσης στο XY επίπεδο για την παροχή των 80 kg/s παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2.16. Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση περιοχή υψηλής πίεσης πριν την

πλάκα, η πίεση μετά την πλάκα και τη μείωση της διατομής πέφτει απότομα σε αρνητικά επίπεδα και στη συνέχεια σταθεροποιείται όπως αποδεικνύεται και από την καμπύλη του Σχήματος 5.2.17.

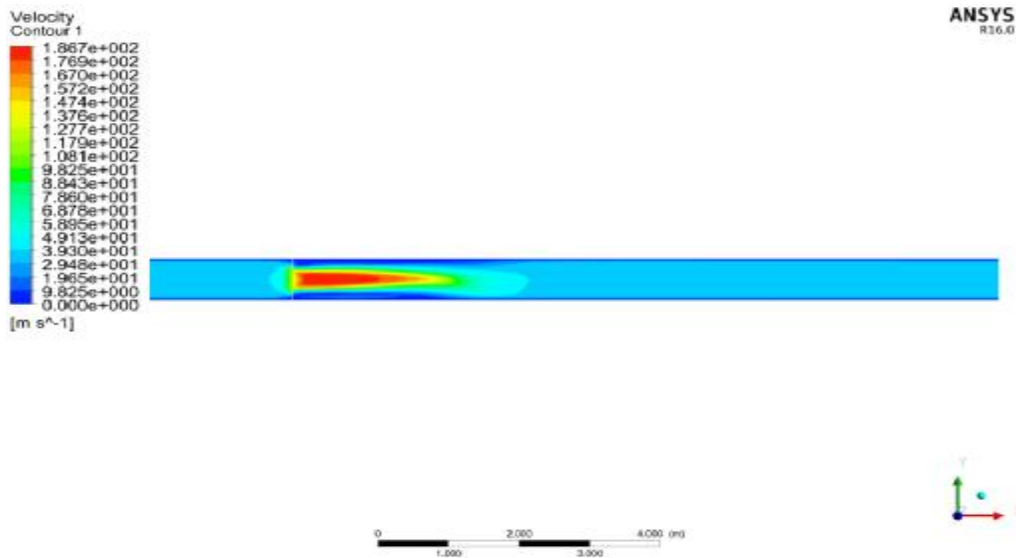


Σχήμα 5.2.15: Κατανομή στατικής πίεσης στο επίπεδο XY

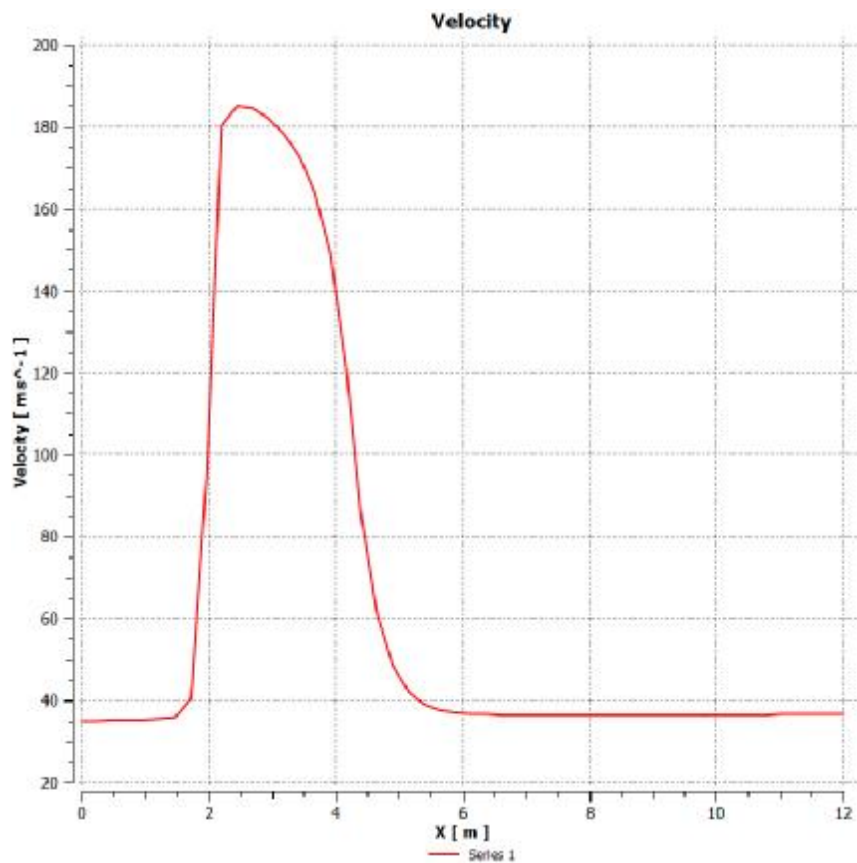


Σχήμα 5.2.16: Καμπύλη στατικής πίεσης στην κεντρική γραμμή ροής

Η κατανομή της ταχύτητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2.17. παρατηρείται η δέσμη υψηλής ταχύτητας εντός της στένωσης του αγωγού και στη συνέχεια η ταχύτητα ομαλοποιείται. Αντίστοιχα η καμπύλη της ταχύτητας στην κεντρική ροϊκή γραμμή φαίνεται στο Σχήμα 5.2.18.

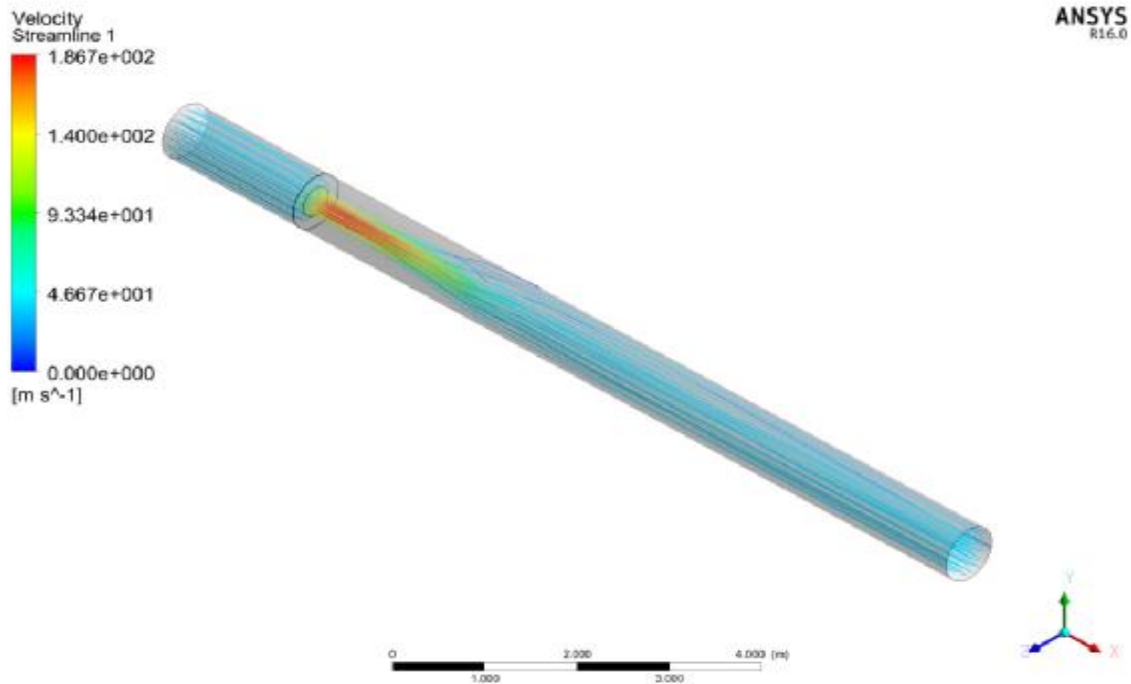


Σχήμα 5.2.17: Κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο XY



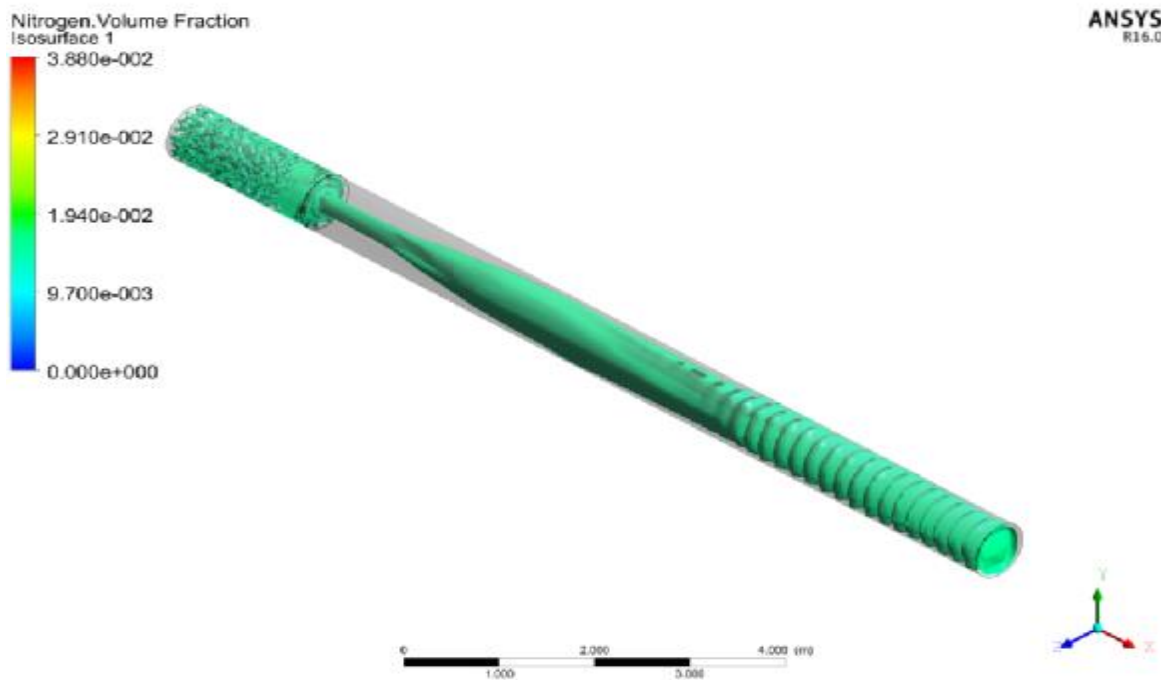
Σχήμα 5.2.18: Καμπύλη ταχύτητας στην κεντρική γραμμή ροής

Η περιοχή υψηλής ταχύτητας επιβεβαιώνεται και από την περιοχή ύπαρξης ροϊκών γραμμών υψηλής ταχύτητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.19.



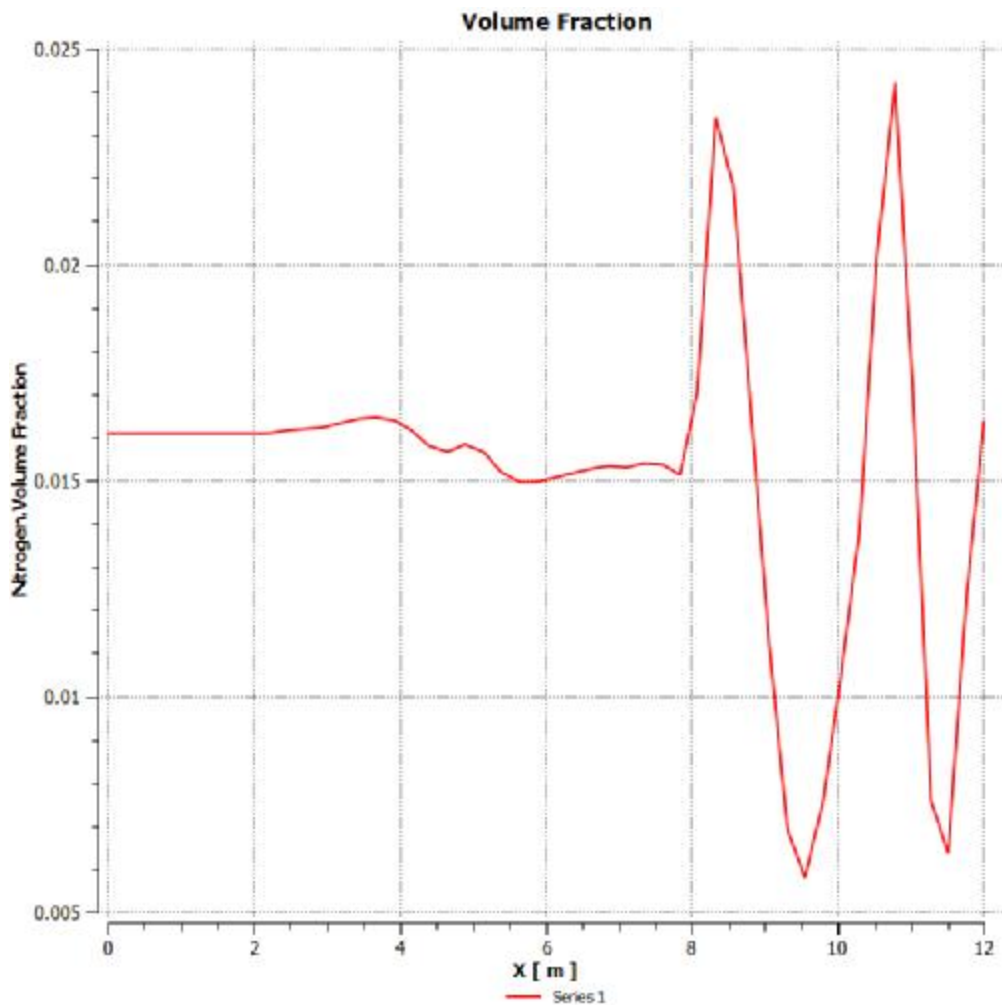
Σχήμα 5.2.19: Ροϊκές γραμμές ταχύτητας μίγματος

Τέλος παρατηρείται διαφορά στην κατανομή του κλάσματος όγκου καθώς στην παροχή των 120 kg/s οι αρχικές φυσαλίδες ενώνονται σε μία ενιαία δομή αλλά μετά το μέσον του αγωγού διασπώνται ξανά σε μικρότερες δομές που καταλαμβάνουν όλη τη διατομή του αγωγού σαν φέτες.



Σχήμα 5.2.20: Κλάσμα όγκου αζώτου

Η αλλαγή και η διάσπαση που περιγράφεται παραπάνω για το κλάσμα όγκου του αζώτου παρουσιάζεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 5.2.21 όπου μετά τα 8 m αρχίζει μια αυξομείωση στην κατανομή της ποσότητας του αζώτου στα σημεία ελέγχου της κεντρικής γραμμής ροής.



Σχήμα 5.2.21: Καμπύλη κατανομής κλάσματος όγκου αζώτου στην κεντρική γραμμή της ροής

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παραμόρφωση λόγω της πλάκας – μετρητή έχει μεγάλη επίδραση στο πεδίο ροής σε αγωγό υψηλής πίεσης. Η παραμόρφωση του σχήματος προκαλεί διαφορετική συμπεριφορά στο ρεύμα φυσικού αερίου. Τα πεδία ταχύτητας και οι φορείς ταχύτητας άλλαξαν, γεγονός που επηρέασε τα πεδία πίεσης. Το πεδίο ταχύτητας με τιμή κοντά στο μηδέν αυξήθηκε ακριβώς πίσω από την άκρη της πλάκας.

Από την άλλη πλευρά, οι ταχύτητες του φυσικού αερίου πίσω από την πλάκα αυξήθηκαν και η περιοχή των πεδίων ταχύτητας έγινε μεγαλύτερη. Οι τιμές εμφανίζονται σε διαφορετικές περιοχές. Τέλος προκαλεί μεταβλητές διαφορές πίεσης παρόλο που οι οριακές συνθήκες και των δύο μοντέλων είναι ίδιες.

Παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές παρατηρήσεις για κάθε περίπτωση.

ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ

- **Αγωγός με πλάκα – Μονοφασική ροή**
 - Περιοχή μεγάλης πίεσης στην είσοδο μέχρι η ροή να προσκρούει στις πλάκες και απότομη πτώση πίεσης καθώς η ροή διέρχεται από τη μικρή διατομή.
 - Απότομη αύξηση ταχύτητας στην μικρή διατομή, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την εξίσωση Bernoulli και στη συνέχεια η πίεση αυξάνεται και ομαλοποιείται στις αρχικές τιμές.
 - Ύπαρξη περιοχών ανακυκλοφορίας πίσω από την πλάκα.
 - Περιοχές ανακυκλοφορίας πίσω από τις πλάκες, το μήκος των οποίων αυξάνεται με την αύξηση της παροχής.
- **Αγωγός με πλάκα – Διφασική ροή**
 - Περιοχή υψηλής πίεσης μέχρι τις πλάκες, μεγάλη πτώση πίεση αμέσως μετά τις πλάκες και σταθεροποίηση σε χαμηλή θετική τιμή.
 - Μεγαλύτερο μήκος στροβιλισμών της διφασικής ροής (φουσαλίδων αζώτου) πίσω από τις πλάκες.
- **Αγωγός χωρίς πλάκα – Διφασική ροή**
 - Πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού.
 - Αμετάβλητη αξονική ταχύτητα μεταξύ εξόδου – εισόδου.
 - Φουσαλίδες αζώτου που διασπώνται προς την έξοδο και προσκολλώνται προς τα τοιχώματα.

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ

Στην τρισδιάστατη ροή εξετάστηκαν οι περιπτώσεις του αγωγού χωρίς πλάκα και αγωγού με πλάκα πτώσης πίεσης μόνο για τη διφασική ροή, όπου υπάρχει και μεγαλύτερο ενδιαφέρον στα αποτελέσματα.

Τα βασικά συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

- **Αγωγός χωρίς πλάκα – διφασική ροή**
 - Η πτώση πίεσης αυξάνεται με την αύξηση της παροχής.

- Η ταχύτητα εντός του αγωγού παρουσιάζει αύξηση στα σημεία που πέφτει η πίεση.
- Παρατηρείται απότομη αύξηση της δευτερεύουσα φάσης στο τέλος του αγωγού για όλες τις παροχές.
- **Αγωγός με πλάκα – διφασική ροή**
 - Παρατηρείται περιοχή υψηλής πίεσης πριν την πλάκα, στη συνέχεια η πίεση γίνεται χαμηλή και τέλος σταθεροποιείται σε θετικές τιμές.
 - Η ταχύτητα αυξάνεται απότομα όταν η ροή περνάει μέσα από τη στένωση της διατομής.
 - Οι ροϊκές γραμμές επιβεβαιώνουν την αύξηση της ταχύτητας από τη στένωση.
 - Πριν την πλάκα η δευτερεύουσα φάση είναι υπό μορφή φυσαλίδων, μετά τη στένωση ακολουθούν την ροή των ροϊκών γραμμών σε πιο ενιαίες δομές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία - Σημειώσεις

1. Λέφας, Κ., Εισαγωγή στην τεχνολογία του φυσικού αερίου, Εκδ.ΣΕΛΚΑ-4Μ, Αθήνα, 2004
2. Ν. Ανδρίτσος και Β. Μποντόζογλου, ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (Πρόχειρες Σημειώσεις), Βόλος 2012 (http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/ANDRITSOS_TwoPhaseFlow_and_HeatTransfer.pdf)
3. ANSYS User's Guide (<http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>)

Επιστημονικές δημοσιεύσεις

4. R. Kiš, M. Malcho, M. Janovcová, A CFD Analysis of Flow through a High-Pressure Natural Gas Pipeline with an Undeformed and Deformed Orifice Plate, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol:8, No:3, 2014.

Ιστοσελίδες

5. http://www.pgesafetyeducation.com/school/ngas_safety-smart/66721_natural_gas_science/dinosaurs.html
6. <http://www.allaboutenergy.gr/NaturalGas.html>
7. <http://www.potto.org/fluidMech/phase.php>
8. [https://www.thermalfuidscentral.org/encyclopedia/index.php/File:Chapter11j_\(3\).jpg](https://www.thermalfuidscentral.org/encyclopedia/index.php/File:Chapter11j_(3).jpg)
9. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%B1%CE%AD%CF%81%CE%B9%CE%BF
10. <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/The+Blackbox>
11. <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/Computational+Fluid+Dynamics>
12. http://cyrus.tcdn.teicrete.gr/Portals/23/Shmeioseis/udrodunamiki/9_%CE%A3%CF%89_%CE%BB%CE%B7%CE%BD%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82.pdf
13. http://www.oocities.org/venkatej/mech/fluid_mechanics/fluid_mechanics.html