ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ - ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Θέμα:

Προσομοίωση ροών με χρήση του λογισμικού πακέτου OpenFoam

Ονοματεπώνυμο: Γαυγιωτακής Κωνσταντίνος

Επιβλέπων καθηγητής: Κονταξάκης Κωνσταντίνος

Περιεχόμενα

Σκοπός-Αντικείμενο 3

Περίληψη διπλωματικής 3

Bachelor Thesis summary 3

Κεφάλαιο 1ο 4

1.1 Βασικές έννοιες 4

1.1.1Ορισμός ρευστού 4

1.1.2Διάκριση των ρευστών 4

1.1.3 ΜΑΖΑ 5

1.1.4 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 5

1.1.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 5

1.1.6 ΠΙΕΣΗ 6

1.1.7 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ 7

1.1.8 ΠΑΡΟΧΗ 8

1.1.9 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΡΟΗΣ 9

1.1.10 ΕΙΔΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ 9

1.1.11 ΑΡΙΘΜΟΣ REYNOLDS 10

1.1.12 Εισαγωγή στηΡοή Couette 12

1.1.13 Εισαγωγή στη Ροή Poiseuille 13

1.2OpenFoam 17

1.2.1 Εισαγωγή στο OpenFoam 17

1.2. Βασικά χαρακτηριστικά του OpenFOAM 17

1.2.1 Ανοιχτός κώδικας 17

1.2.3 Δυνατότητες Meshing 17

1.2.3 Εφαρμογές του OpenFOAM 19

1.2.4 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΙ 21

Κεφάλαιο 2ο 22

2.1Εγχειρίδιο Χρήσης OpenFoam 22

2.1.1Εγκατάσταση 22

2.1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΤΟΛΕΣ 24

2.1.3 Βασικοί φάκελοι 25

Κεφάλαιο 3ο 32

3.1.1 Ροή Couette 32

3.1.2Μεθοδολογία επίλυσης των ροών Couette 33

3.1.3.Φάκελος 0 34
3.1.4. Φάκελος constant 36
3.1.5 Φάκελος system 40
3.2.Λεπτομερής ανάλυση της Πρώτης Προσομοίωσης (Χαμηλό Ιξώδες) 44
3.2.1 Προφίλ Ταχύτητας 45
3.2.2.Περιγράμματα Ταχύτητας 48
3.2.3.Διανυσματική Ταχύτητα 51
3.2.4 Περιγράμματα Πίεσης 55
3.2.5. Διηγηματική Τάση Τοιχώματος 59
3.3.Ανάλυση της Δεύτερης και τρίτης Προσομοίωσης (Μεσαίο και Υψηλό Ιξώδες) αντίστοιχα 62
3.3.1. Προφίλ Ταχύτητας 63
3.3.2 Περίγραμμα ταχύτητας 67
3..3.4 Διατμητική Τάση Τοιχώματος 70
3.4. Συγκριτική ανάλυση των τριών προσομειώσεων 71
3.4.1 Σύγκριση Προφίλ Ταχύτητας 71
3.4.2 Σύγκριση Διατμητικής Τάσης Τοιχώματος 73
3.5 Η Ροή Poiseuille 75
3.5.1.Εξισώσεις που Διέπουν τη Ροή 76
3.5.2. Γεωμετρία και Πλέγμα 77
3.5.3. Οριακές Συνθήκες 77
3.5.4. Παράμετροι Προσομοίωσης 77
3.6. Πεδίο Ταχύτητας 79
3.6.1. Προφίλ Ταχύτητας 79
3.6.2. Διατμητική Τάση Τοιχώματος 91
3.7 Συγκριτική Ανάλυση 93
3.7.1. Σύγκριση Προφίλ ταχύτητας 93
3.7.2. Σύγκριση Διατμητικής Τάσης Τοιχώματος 94
3.7.3 Σύγκριση του διαφορετικού ιξώδες στη χρονική εξέλιξη της Ροής 94
3.7.4 Συμπέρασμα 96
Βιβλιογραφία 97

Σκοπός-Αντικείμενο

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας επικεντρώνεται στη προσημείωση διαφόρων ροών με τη χρήση του λογισμικού πακέτου OpenFoam . Θα μελετήσουμε τις ροές Couette και Poiseuille με διαφορετικά δεδομένα κάθε φορά και θα προσπαθήσουμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα για αυτές , καθώς επίσης με τη βοήθεια και του πακέτου paraView θα γίνει οπτικοποίηση του αποτελέσματος αυτού .

Περίληψη διπλωματικής

Στη συγκεκριμένη διπλωματική έγινε προσημείωση ροών ρευστού στις ροές coquette και poiseuille μέσω του λογισμικού πακέτου Openfoam. Με τη βοήθεια αυτή του πακέτου ο αναγνώστης είναι σε θέση να δει και να μελετήσει την ακριβή κίνηση του ρευστού καθώς γίνεται και οπτικοποίηση των προσομοιώσεων με τη βοήθεια του πακέτου paraview . Ωστόσο βέβαια γίνεται ανάλυση τη χρήσης του πακέτου OpenFoam πράγμα που συμβάλει στην εξοικείωση του αναγνώστη με το λογισμικό περιβάλλον του συγκεκριμένου προγράμματος . Τέλος πραγματοποιείται σύγκριση αποτελεσμάτων όπου αυτό είναι εφικτό .

Bachelor Thesis summary

This thesis simulates fluid flows using OpenFoam, focusing on Couette and Poiseuille flows. The objective is to analyze these flows under varying conditions and visualize results with paraView. The study begins by defining fundamental fluid dynamics concepts, including fluid types, properties like mass, density, temperature, pressure, and flow rate, and distinguishing between laminar and turbulent flows using the Reynolds number. It also provides an introduction to OpenFoam, covering installation and basic usage. The research details simulations of Couette flow with low, medium, and high viscosity fluids, analyzing velocity profiles, contours, vector velocity, pressure contours, and wall shear stress to understand viscosity's impact. Similarly, Poiseuille flow simulations are conducted, examining governing equations, geometry, mesh, boundary conditions, and simulation parameters, with a focus on velocity fields and wall shear stress. Comparative analyses highlight the influence of different viscosities on flow evolution.In conclusion, the thesis demonstrates OpenFoam and paraView's effectiveness in simulating and visualizing fluid dynamics, offering insights into fluid behavior and validating numerical models through result comparisons.

Κεφάλαιο 1ο

1.1 Βασικές έννοιες

Παρακάτω θα αναφερθούν βασικές έννοιες και ορισμοί τις οποίες πρέπει όποιος έρχεται σε επαφή με το συγκεκριμένο αντικείμενο να είναι σε θέση να τις γνωρίζει και να τις κατανοεί , επικεντρώνονται στη φύση των ρευστών και στη προέκταση αυτών βάζοντας θεμέλια για την ομαλή κατανόηση της εργασίας .

1.1.1Ορισμός ρευστού

Με το συγκεκριμένο όρο (ρευστό) χαρακτηρίζεται κάθε μια ουσία η οποία παρουσιάζει ροή . Τα πιο φημισμένα ρευστά είναι αυτά των υγρών και αερίων παρόλα αυτά υπάρχει άλλη μια κατηγορία ρευστών και αυτή είναι τα στερεά που βρίσκονται σε φάση ροή**ς** (δε θα γίνει παραπάνω επέκταση σε αυτή τη κατηγορία) . Όπως διαπιστώνετε και παραπάνω ρευστό θεωρείται το σώμα του οποίου οι δυνάμεις που το συγκρατούν στέρεο είναι εξασθενημένες με συνέπεια η μάζα τους να ολισθαίνετε ελεύθερα (υγρά) ή να μετατοπίζεται ανεξάρτητα (αέρια) , λαμβάνοντας έτσι κάθε φορά το σχήμα του χώρου που αυτά καταλαμβάνουν . Μια σημαντική επίσης ιδιότητα των ρευστών είναι ότι αυτά πάντα παρουσιάζουν μια μόνο δύναμη την οποία ασκούν προς τα έξω και η οποία εφαρμόζεται πάντα κάθετα στα τοιχώματα τα οποία αυτά καταλαμβάνουν , αυτή είναι η υδροστατική πίεση .

1.1.2Διάκριση των ρευστών

Τα ρευστά όπως και τα περισσότερα πράγματα που περιβάλλουν τον άνθρωπο χωρίζονται σε κατηγορίες , στη περίπτωση των ρευστών αυτές είναι 3

1.1.2.1. 1η Ιδανικά ρευστά ή αλλιώς τέλεια ρευστά

Το χαρακτηριστικό που τα κάνει τόσο ιδανικά έως και υποθετικά είναι ότι είναι τελείως ασυμπίεστα και δε αναπτύσσεται καμία εσωτερική τριβή των μορίων τους κατά τη ροή τους , συνήθως γίνεται η επίκληση τους για υγρά . Η χρήση τους γίνεται μόνο για επιστημονικούς σκοπούς αφού αυτά δεν υπάρχουν στη φύση γύρω μας, παρόλα τα ορισμένα ρευστά με πολύ χαμηλό ιξώδες και μικρή θερμική αγωγιμότητα λαμβάνονται υπόψη κατά προσέγγιση ως ιδανικά ρευστά .

1.1.2.2. 2η Φυσικά ρευστά ή και Νευτώνεια ρευστά

Είναι τα ρευστά τα οποία ακολουθούν τους νόμους του Νεύτωνα , ο συντελεστής ιξώδες είναι σταθερός και ανεξάρτητος από τη δύναμη που εφαρμόζεται στο ρευστό , χαρακτηριστικός τύπος που χρησιμοποιείται σε τέτοιου είδους ρευστά είναι :

- $\tau = \frac{F}{A}$

όπου

τ = διατμητική τάση

F = εφαπτόμενη δύναμη

A = επιφάνεια

Ουσιαστικά η διατμητική τάση (τ) ισούται με το λόγο της εφαρμοζόμενης δύναμης(F) προς την επιφάνεια (A) στην οποία εφαρμόζει . Τέτοια ρευστά είναι το νερό και ο αέρας .

1.1.2.3. 3η Θιξότροπα ρευστά ή Μη Νευτώνεια

Είναι τα ρευστά τα οποία δεν υπακούν στο νόμο του Νεύτωνα , δεν έχουν σταθερό συντελεστή ιξώδες αφού αυτός μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα με τη διατμητική τάση , το ρυθμό διάτμησης και το χρόνο .

1.1.3 ΜΑΖΑ

Μάζα είναι η ποσότητα της ύλης που περιέχεται σε ένα σώμα , όσο μεγαλύτερη η ποσότητα της ύλης τόσο μεγαλύτερη και η τιμή της μάζας και ανάποδα . Η μάζα έχει καίριο λόγω στη φυσική αφού συνδέεται με την αδράνεια της μεταφορικής κίνησης και με τη βαρύτητα .Γίνεται αναφορά για τη χρήση της πρώτης ιδιότητας καθώς στα ρευστά χρησιμοποιείται ευρέως για το τύπο

- $F = ma$

Όπου η εφαρμοζόμενη δύναμη F αυξάνεται ή μειώνεται αναλογικά με τη μάζα (m) και την επιτάχυνση (a) .

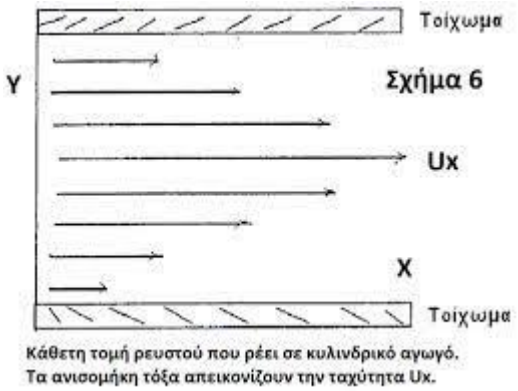
1.1.4 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Με τον όρο πυκνότητα ορίζουμε τη ποσότητα της μάζας ανά μονάδα όγκου , συμβολίζεται με ρ και μαθηματικά εκφράζεται από ρ=Δm/ΔV . Μέσω τη πυκνότητας αντλούμε πληροφορία για το χώρο που θα χρειαστεί να καταλάβει ένα ρευστό στη περίπτωση μας με συγκεκριμένη μάζα . Κάθε ρευστό διαφέρει από το άλλο είτε πολύ είτε λίγο με συνέπεια να έχουν διαφορετικές ιδιότητες και χρήσεις , χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το νερό (ρ=997 kg/ m^3) με το λάδι (ρ = 800 kg / m^3) όπου λόγω της μεταξύ τους διαφοράς και με τη βοήθεια της βαρύτητας γίνεται ο μεταξύ τους διαχωρισμός στα σύγχρονα ελαιοτριβεία μέσω και της φυγόκεντρης δύναμης . Διαφορά υπάρχει ακόμα και μεταξύ του θαλασσινού και του πόσιμου νερού , σημαντική παρατήρηση είναι η χαοτική διαφορά που εντοπίζεται και στα πιο διάσημα ρευστά μεταξύ δηλαδή του νερού και του αέρα, όπου η πυκνότητα του νερό είναι κοντά 1000 φορές πιο μεγάλη από αυτό του αέρα , σαν αποτέλεσμα για να «εγκλωβίσουμε» καθαρά 1 λίτρο αέρα θα χρειαστούμε 1000 φορές τον αντίστοιχο χώρου που χρειάζεται το 1 λίτρο νερού.

1.1.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Η ύλη αποτελείται από άτομα και μόρια , τα οποία όμως δε δρουν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο , στο εσωτερικό ενός σωλήνα σχεδόν πάντα υπάρχουν διαφορετικές ταχύτητες του

ρευστού ανάλογα με τη διανυσματική απόσταση των μορίων/ατόμων του ρευστού από τα τοιχώματα του σωλήνα .

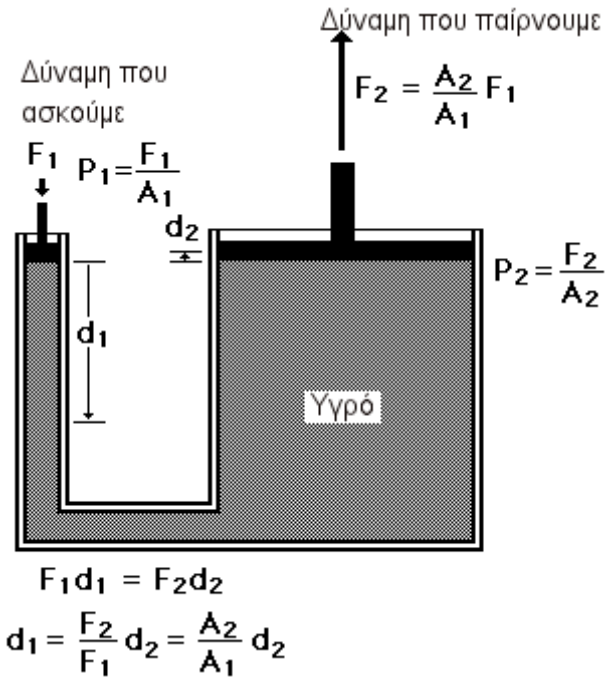


Εικόνα 1 απεικόνιση ταχύτητας σε προφίλ κάθετης τομής

Ετσι δημιουργούνται διαφορετικές (σημαντικές ή μη ανάλογα με τη περίσταση) ενεργειακές καταστάσεις για τα μόρια . Για να μη γίνεται μελέτη ξεχωριστά στο κάθε μόρια ανάλογα με τη θέση του , υιοθετείται η μέση θερμική ενέργεια ως ορισμός , που με ασφάλεια μπορεί να γίνει η διαπίστωση ότι είναι η μέση θερμοκρασία των συνόλων των μορίων/ατόμων που αποτελούν το σώμα στο οποίο γίνεται η μελέτη .Συμβολίζεται συνήθως με θ και έχει μονάδα μέτρησης βαθμός Κελισίου (C) ή Κέλβιν (K)

1.1.6 ΠΙΕΣΗ

Ο άνθρωπος από τα αρχαία κιόλας χρόνια έχει καταφέρει να εξηγήσει και να ελέγξει τη φύση γύρω του και να καλυτερέψει τη καθημερινή του διαβίωση , μια από τις δυνάμεις που κατάφερε να κατανοήσει είναι αυτή της πίεσης . Η πίεση υπάρχει παντού , είτε λέγεται ατμοσφαιρική είτε υδραυλική είτε στατική , ανάλογα με τις διατάξεις και το σκοπό που θέλουμε να επιτύχουμε γίνεται και η αντίστοιχη κατανομή . Στις επιστήμες ιδιαίτερα των μηχανικών η πίεση είναι καίριας σημασίας έννοια και χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες/ μηχανές , παρατηρείται συχνά η χρήση της πίεσης σε μηχανουργεία αυτοκινήτων όπου με τη βοήθειας της υδραυλική πίεσης σηκώνονται τα αυτοκίνητα , στα αυτοματοποιημένα μέρη μιας βιομηχανίας όπου γίνεται ευρεία χρήση πνευματικών συστημάτων καθώς και συμπιεστές αέρα (μοτέρ) , αλλά και σε πιο καθημερινές χρήσεις όπως το δίκτυο ύδρευσης / άρδευσης.



Εικόνα 2 Υδραυλικός ανυψωτήρας και η φυσική πίσω από αυτόν

Ορισμός της πίεσης είναι το μέτρο της δύναμης που εφαρμόζεται κάθετα σε μια επιφάνεια ενός αντικειμένου ανά μονάδα εμβαδού της επιφάνειας αυτής , με μονάδα μέτρησης 1 atm.

Αρχικός τύπος της πίεσης είναι

- $P = \frac{F}{A}$

1.1.7 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

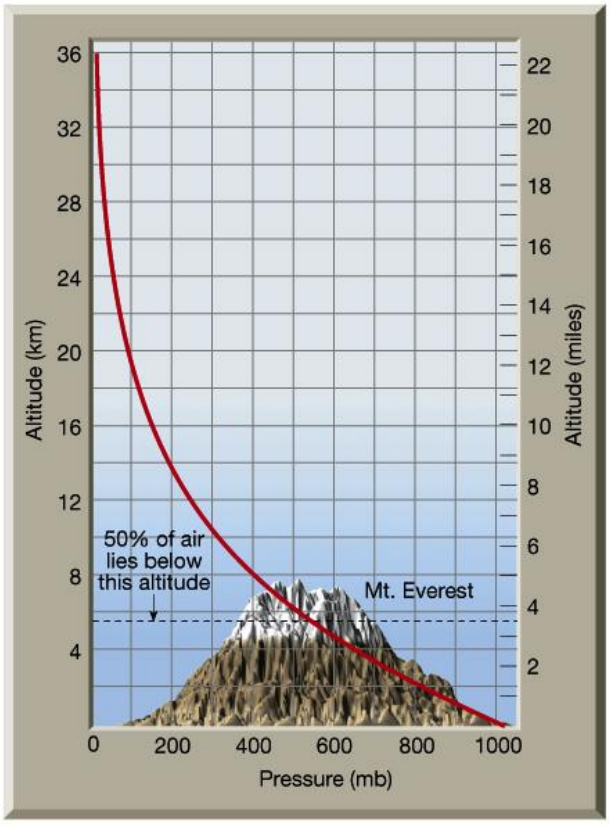
Η ατμόσφαιρα περιλαμβάνεται στη γη , η οποία ατμόσφαιρα είναι ένα συνονθύλευμα αερίων που αποκαλούνται ατμοσφαιρικά αέρια . Όπως και κάθε τι που βρίσκεται στη γη έτσι και το μείγμα των αερίων αυτών δέχεται τη δύναμη της , δηλαδή το βάρος καθώς έχει και μάζα . Αφού κάθε ρευστό σώμα ασκεί πίεση σε κάθε επιφάνεια που βρίσκεται αυτό έτσι και ο ατμοσφαιρικός αέρας ασκεί τη δικιά του πίεση , την ατμοσφαιρική . Η ατμοσφαιρική πίεση ορίζεται με τη τιμή της 1 atm (1 ατμόσφαιρας) στην επιφάνεια της θάλασσας , μια τιμή αντιστρόφως ανάλογη με την υψομετρική διαφορά από τη θάλασσα , μεγαλώνει δηλαδή η υψομετρική απόσταση από τη θάλασσα (σε βουνό πχ) μικραίνει η ατμοσφαιρική πίεση αφού η πίεση που ασκούν τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας πιέζουν λιγότερο (μικρότερο φορτίο) .

Μελετήθηκε πρώτα από τον Τορικέλι όπου έκανε το γνωστό πείραμα με τα συγκοινωνούντα δοχεία και τον υδράργυρο , παρατηρώντας την υψομετρική διαφορά των συγκοινωνούντων δοχείων βγήκε στο συμπέρασμα ότι η πίεση η πίεση και στα 2 δοχεία είναι η ίδια οπότε Pa = Pb , η υψομετρική διαφορά ήταν στα 76 εκατοστά (από το δοχείο του 1 μέτρου) οπότε :

$$Patm = P\upsilon\delta\rho = \rho \cdot g \cdot h = 1300\frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}8\frac{m}{s^2} \cdot 0{,}76m$$

Ισχύει γενικότερα

$$Patm = 101293\ Pa = 101\,KPa$$



Εικόνα 3 Διάφορες τιμές στο εσωτερικό της ατμόσφαιρας με σημείο αναφοράς το Έβερεστ

1.1.8 ΠΑΡΟΧΗ

Στη μηχανική των ρευστών αλλά και γενικότερα στην επιστήμη των ρευστών με τον όρο παροχή ενός αγωγού ή συστήματος εννοείται η παροχή (σταθερή ή μη) μάζας ή όγκου . Πιο δημοφηλής όμως είναι αυτή του όγκου , έτσι μετριέται ο όγκος του ρευστού που περνάει μέσα από τον αγωγό ανά τον χρόνο .

ισχύει $Q = \frac{dV}{dt}$

όπου Q η παροχή με μονάδες μετρήσεις στο S.I m^3/sec

Αφού V ο όγκος του ρευστού σε m^3

Και t ο χρόνος που στον οποίο εκτελείται η ροή

1.1.9 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΡΟΗΣ

Η ταχύτητα ροής του κάθε ρευστού συμβολίζεται με V , είναι σε συνάρτηση της θέσης του ρευστού σε x,y,z άξονες και του χρόνου t. Για τη μελέτη της ταχύτητας της ροής συχνά γίνεται ορθογώνιο σύστημα αξόνων με τα σύμβολα u,v,w να αντιστοιχούν στους άξονες x,y,z . Κινηματικά το ρευστό χωρίζεται σε 3 μεγάλες κατηγορίες , στη απόσταση ds που αυτό διανύει , στην επιτάχυνση α και την παροχή dQ που διαπερνάει από μια επιφάνεια εμβαδού dA που ορίζεται κάθετα στη ροή του . Σε καταστάσεις που μελετιέται ένα ρευστό ως προς τον ένα του μόνο άξονα(μονοδιάστατη ροή) τότε (έστω στη περίπτωση αυτή χ) ισχύει ότι v=w=0 m/s

Άρα ισχύουν οι παρακάτω τύποι

$$ds = u \cdot dt$$

$$a = \frac{du}{dt}$$

$$dQ = u \cdot dA$$

1.1.10 ΕΙΔΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

Τα είδη της ροής χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες τη στρωτή ροή (1) και τη τυρβώδη ροή (2) . Η παραπάνω διαφοροποίηση των ροών γίνεται για να διαχωριστούν αυτές με βάση τη δυναμική τους .

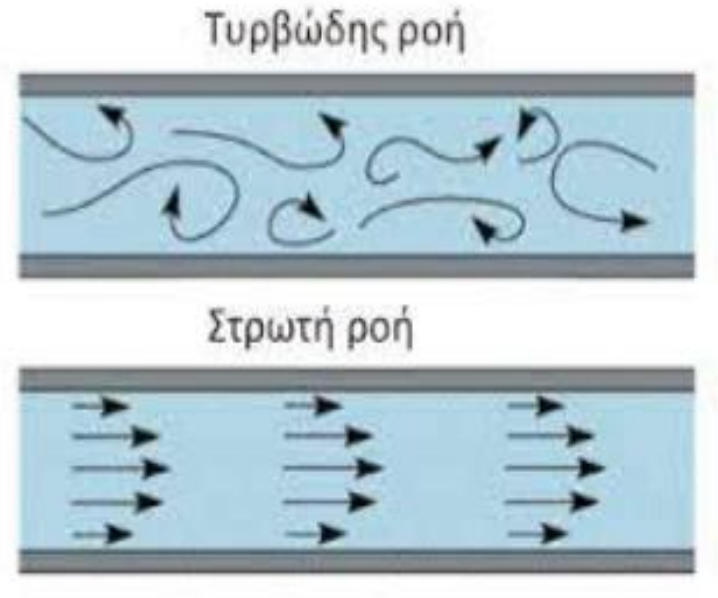
1.1.10.1 Στρωτή ροή

Κατά τη στρωτή ροή οι παράλληλες και σε επαφή στρώσεις του ρευστού κινούνται δημιουργώντας λείες γραμμές ροής , χωρίς να πραγματοποιούνται αναμίξεις μεταξύ των γειτονικών στρώσεων , τουλάχιστον στο βαθμό που μπορεί να παρατηρήσει το γυμνό ανθρώπινο μάτι .

Η στρωτή ροή πραγματοποιείται όταν οι δυνάμεις συνεκτικότητας (δυνάμεις τριβών λόγω στερεών τοιχωμάτων) είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις αδράνειας , όπως είναι λοιπόν λογικό αυτή η περίπτωση είναι θεωρητική και αποτελεί σπάνιο φαινόμενο στη φύση . Στη περίπτωση αυτή όλα τα σωματίδια που διέρχονται από ένα σημείο έχουν σχεδόν την ίδια ταχύτητα .

1.1.10.2 Τυρβώδη ροή

Στη ροή αυτή τα ρευστά σωματίδια κινούνται ακανόνιστα με διακυμαινόμενη κίνηση ,επίσης η ταχύτητα σε κάθε σημείο της κίνησης του ρευστού μεταβάλλεται με το χρόνο επιδρώντας με το μέγεθος και τη διεύθυνση . Η ροή που υπάρχει με την εμφάνιση στρωτής λείας γραμμής διασπάται εξ ολοκλήρου και με γυμνό μάτι γίνεται αντιληπτή μια έντονη μίξη ανάμεσα στα γειτονικά στρώματα .Η συγκεκριμένη ροή πραγματοποιείται όταν οι δυνάμεις αδράνειας είναι μεγαλύτερες από αυτές της συνεκτικότητας .



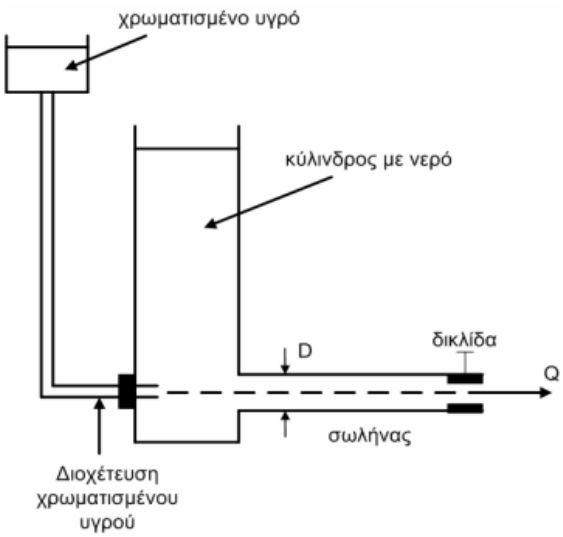
Εικόνα 4 Αναπαράσταση τυρβώδη και στρωτή ροή



Εικόνα 5 Ο καπνός από τα καμίνια χαρακτηριστικό παράδειγμα τυρβώδη ροής

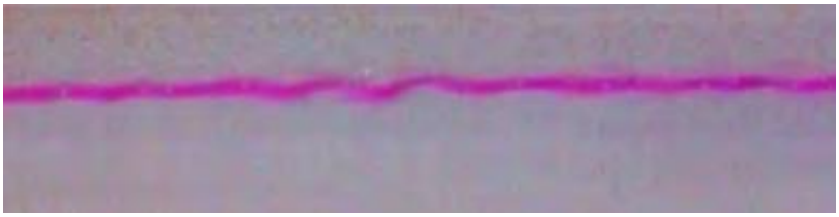
1.1.11 ΑΡΙΘΜΟΣ REYNOLDS

Ο Reynolds ήταν βρετανός μηχανολόγος μηχανικός , σπούδασε στο πανεπιστήμιο του Cambridge . Το 1883 πραγματοποίησε το πείραμα με το οποίο κατάφερε και εξήγησε τη διαφορά μεταξύ στρωτής και τυρβώδης ροής .



Εικόνα 6 Πείραμα Reynolds

Στη παραπάνω εικόνα φαίνεται η διάταξη με την οποία πραγματοποιήθηκε το διάσημο αυτό πείραμα . Στο κυλινδρικό σωλήνα που περιέχει το νερό προσαρμόστηκε μια μικρότερη οριζόντια σωλήνα με εσωτερική διάμετρο D , από πού βρίσκεται και η παροχή Q . Η παροχή ρυθμίζεται από τη δικλίδα που βρίσκεται στο άκρο του σωλήνα (τέρμα δεξιά της εικόνας). Από την αριστερή μεριά παρατηρείται ένας πολύ μικρός σωλήνας (δε επιδρά στις μαθηματικές πράξεις) όπου παρέχει το χρωματισμένο υγρό . Το πείραμα αρχίζει έχοντας τη δικλίδα ελαφρώς ανοιχτή , άρα μικρή παροχή και ταχύτητα ροής καθώς και στρωτή ροή .



Εικόνα 7 Το χρώμα όταν η δικλίδα είναι ελαφρώς ανοιχτή

Έπειτα η δικλίδα ανοίγει πολύ , μετατρέποντας τη παροχή από μικρή σε μεγάλη καθώς επίσης και τη ταχύτητα ροής , με αυτό τον τρόπο δημιουργείται τυρβώδη ροή .

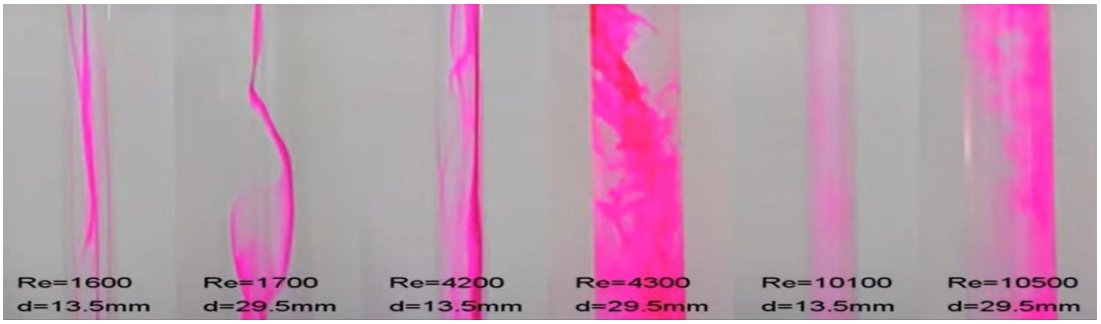


Εικόνα 8 Το χρώμα όταν η δικλίδα είναι πλήρως ανοιχτή

Ο Reynolds δημιούργησε τον αριθμό Reynolds για σωλήνες , ο οποίος προσδιορίζεται από το παρακάτω τύπο

$$\mathrm{Re} = \frac{VD}{v} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} \cdot \frac{D}{v} = \frac{4Q}{\pi D v}$$

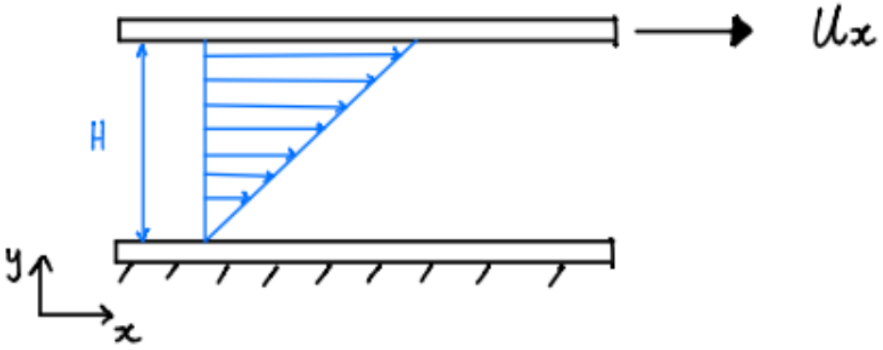
Επίσης παρατήρησε ότι ο συγκριμένος αριθμός χαρακτηρίζει το τύπο της ροής . Όταν Re<2300 τότε η ροή είναι στρωτή , αντίστοιχα όταν Re>4000 τότε η ροή είναι τυρβώδης , τέλος όταν ισχύει 2300<Re<4000 τότε το ρευστό βρίσκεται σε μια ενδιάμεση κατάσταση η μεταβατική τυρβώδη .



Εικόνα 9 Απεικόνιση ροών με διαφορετικών αριθμών Re

1.1.12 Εισαγωγή στηΡοή Couette

Η ροή Couette είναι ένας τύπος ροής ρευστού που εμφανίζεται μεταξύ δύο παράλληλων πλακών όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ τους . Αυτό το φαινόμενο πήρε το όνομα του από τον Maurice Couette , έναν Γάλλο φυσικό που μελέτησε για πρώτη φορά αυτή τη ροή στα τέλη του 19ου αιώνα. Η ροή χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη βαθμίδων ταχύτητας στο ρευστό , η οποία έχει ως αποτέλεσμα ένα φαινόμενο διάτμησης που μπορεί να προκαλέσει την παραμόρφωση του ρευστού και την αλλαγή του σχήματος του .



Εικόνα 10 Κλασικό παράδειγμα ροής Couette

Η ροή Couette χρησιμοποιείται συχνά ως μοντέλο για την κατανόηση πιο περίπλοκων φαινομένων ροής ρευστού ,όπως η ροή του οριακού στρώματος και η ροή σε σωλήνες . Χρησιμοποιείται επίσης σε διάφορες εφαρμογές μηχανικής , όπως ο σχεδιασμός λιπαντικών και η μελέτη της συμπεριφοράς των υγρών σε συσκευές μικροκλίμακας . Στην απλούστερη μορφή της , η ροή Couette αποτελείται από δύο παράλληλες πλάκες που χωρίζονται με απόσταση h, με τη μία πλάκα ακίνητη και την άλλη να κινείται με σταθερή ταχύτητα U . Το ρευστό , που είναι συνήθως υγρό ή αέριο , γεμίζει το χώρο μεταξύ των πλακών . Όταν η άνω πλάκα κινείται , σέρνει το ρευστό κοντά της μαζί της , γεγονός που δημιουργεί μια δύναμη διάτμησης στο όριο μεταξύ του ρευστού και της ακίνητης πλάκας.

Η συμπεριφορά του ρευστού στη ροή Couette περιγράφεται από τις εξισώσεις Navier – Stokes, οι οποίες είναι ένα σύνολο μερικών διαφορικών εξισώσεων που διέπουν την κίνηση των ρευστών . Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να λυθούν αναλυτικά για την περίπτωση της ροής Couette και το προκύπτουν προφίλ ταχύτητας είναι για γραμμική συνάρτηση της απόστασης από τη σταθερή πλάκα .Το προφίλ ταχύτητας είναι επίσης ευθέως ανάλογο με την απόσταση από την κινούμενη πλάκα και αντιστρόφως ανάλογο με την απόσταση μεταξύ των πλακών . Η διατμητική τάση στο ρευστό είναι ανάλογη με την κλίση της ταχύτητας , πράγμα που σημαίνει ότι η διατμητική τάση είναι μεγαλύτερη κοντά στη σταθερή πλάκα και χαμηλότερη κοντά στην κινούμενη πλάκα . Η πίεση στο ρευστό επηρεάζεται επίσης από τη ροή και υπάρχει μια κλίση πίεσης που είναι ανάλογη με την απόσταση μεταξύ των πλακών .

Η ροή Couette μπορεί να χαρακτηριστεί από πολλές σημαντικές παραμέτρους , συμπεριλαμβανομένου του αριθμό Reynolds , ο οποίος είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που αντιπροσωπεύει τον λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις ιξώδεις δυνάμεις . Όταν ο αριθμός Reynolds είναι χαμηλός , η ροή είναι στρωτή και ομαλή , ενώ σε υψηλούς αριθμούς Reynolds , η ροή γίνεται ταραχώδης και χαοτική .

Συνοπτικά , ροή Couette είναι ένα απλό αλλά σημαντικό φαινόμενο ροής ρευστού που εμφανίζεται μεταξύ δύο παράλληλων πλακών με σχετική κίνηση . Είναι ένα χρήσιμο μοντέλο για την κατανόηση πιο περίπλοκων φαινομένων ροής ρευστών και έχει σημαντικές εφαρμογές στη μηχανική και την επιστήμη .

1.1.13 Εισαγωγή στη Ροή Poiseuille

Η ροή Poiseuille πήρε το όνομα της από τον Γάλλο φυσικό Jean Louis Marie Poiseuille , είναι μια θεμελιώδης έννοια στη δυναμική των ρευστών που περιγράφει την κίνηση σταθερής κατάστασης ενός ασυμπίεστου ιξώδους ρευστού μέσω ενός κυλινδρικού αγωγού, όπως ενός σωλήνα ή αγωγού . Αυτός ο τύπος ροής χαρακτηρίζεται από μια κλίση πίεσης κατά μήκος του αγωγού , με αποτέλεσμα ένα προφίλ ταχύτητας που ποικίλει σε όλη τη διατομή . Για να κατανοήσουμε διεξοδικά τη ροή του Poiseuille , πρέπει να εμβαθύνουμε στις εξισώσεις , τις συνοριακές συνθήκες τις εφαρμογές και την υποκείμενη φυσική που διέπουν αυτήν την ενδιαφέρουσα συμπεριφορά ρευστού .

Πριν εμβαθύνουμε παραπάνω στις ιδιαιτερότητες της ροής Poiseuille , είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε δύο κρίσιμες έννοιες : το ιξώδες και το ασυμπίεστο. Το ιξώδες αναφέρεται

στην αντίσταση ενός ρευστού σε παραμόρφωση ή ροή , καθορίζοντας πόσο εύκολα μπορεί να διατμηθεί . Η ασυμπίεστη συνεπάγεται ότι η πυκνότητα του ρευστού παραμένει σταθερή υπό την εφαρμοζόμενη πίεση , μια λογική υπόθεση για υγρά όπως το νερό και τα λάδια .

Ο ακρογωνιαίος λίθος για την κατανόηση της ροής Poiseuille δεν είναι άλλος από την εξίσωση Hagen-Poiseuille και συσχετίζει τον ρυθμό ροής (Q) μέσω ενός κυλινδρικού αγωγού με την κλίση πίεσης (ΔP) και διάφορες γεωμετρικές και ρευστές ιδιότητες . Η εξίσωση δίνεται από :

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\eta L} \cdot \Delta \mathrm{P}$$

- Q είναι ο ογκομετρικός ρυθμός ροής
- r είναι η ακτίνα του αγωγού
- η είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού
- L είναι το μήκος του αγωγού
- ΔP είναι η πτώση πίεσης στον αγωγό

Αυτή η εξίσωση απεικονίζει την άμεση αναλογία μεταξύ του ρυθμού ροής και της ακτίνας του αγωγού υψωμένη στη τετάρτη , τονίζοντας τη σημαντική επίδραση του μεγέθους του αγωγού στα χαρακτηριστικά της ροής .

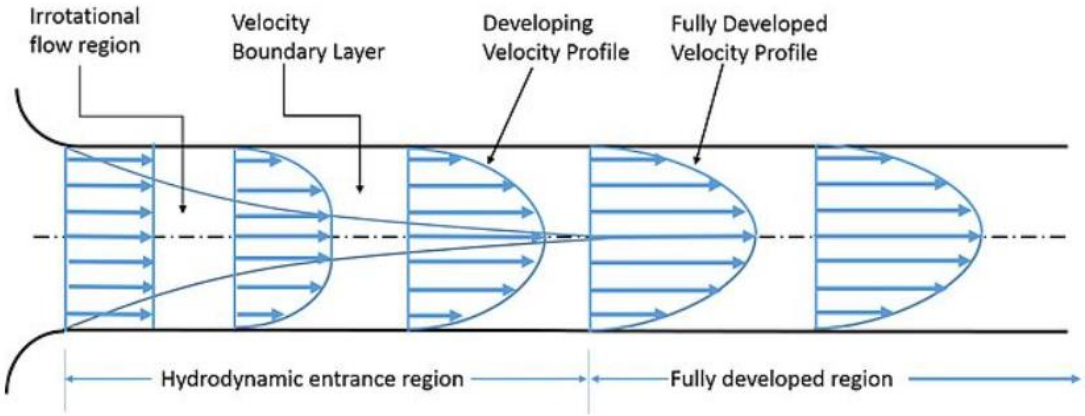
Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της ροής Poiseuille είναι το προφίλ παραβολικής ταχύτητας που δημιουργεί . Το ρευστό κοντά στα τοιχώματα του αγωγού παρουσιάζει υψηλότερη αντίσταση που προκαλείται από το ιξώδες , με αποτέλεσμα μια πιο αργή ροή . Αντίθετα το ρευστό στο κέντρο του αγωγού ταξιδεύει γρηγορότερα λόγω μειωμένης αντίστασης . Το προφίλ της ταχύτητας είναι :

$$u(r) = \frac{\Delta \mathrm{P}}{4\eta L}(R^2 - r^2)$$

όπου

- u(r) είναι η ταχύτητα σε ακτινική απόσταση
- R είναι η ακτίνα του αγωγού

Αυτή η παραβολική κατανομή της ταχύτητας παρέχει πληροφορίες για το πώς το ρευστό κινείται μέσα στον αγωγό , με τη μέγιστη ταχύτητα να εμφανίζεται στο κέντρο του αγωγού.



Εικόνα 11 Απεικόνιση κίνησης ροή Poiseuille

Η ροή Poiseuille διέπεται από δύο κρίσιμες οριακές συνθήκες . Η πρώτη είναι η "συνθήκη μη ολίσθησης" η οποία ορίζει ότι το ρευστό στα τοιχώματα του αγωγού προσκολλάται στην επιφάνεια και έχει μηδενική μηδενική ταχύτητα σε σχέση με το τοίχο . Αυτή η κατάσταση διασφαλίζει ότι το υγρό δε γλιστρά κατά μήκος των ορίων του αγωγού . Η δεύτερη οριακή συνθήκη προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας , η οποία υπαγορεύει ότι ο ογκομετρικός ρυθμός ροής παραμένει σταθερός σε οποιαδήποτε διατομή του αγωγού . Αυτή η συνθήκη σε συνδυασμό με την κατάσταση μη ολίσθησης , συμβάλλει στη δημιουργία του προφίλ της παραβολικής ταχύτητας .

Στη καθημερινή ζωή η ροή Poiseuille βρίσκει εφαρμογές σε ποικίλους τομείς , αρχίζοντας από τη βιοϊατρική μηχανική και φτάνουν έως διάφορες βιομηχανικές διεργασίες . Στα βιολογικά συστήματα είναι ζωτικής σημασίας για τη κατανομή της ροής τους αίματος στα αιμοφόρα αγγεία . Το ίδιο το κυκλοφορικό σύστημα βασίζεται στις αρχές της ροής Poiseuille για να εξασφαλίσει επαρκή μεταφορά οξυγόνου και θρεπτικών ουσιών στους ιστούς . Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν τις αρχές της ροής Poiseuille όταν σχεδιάζουν αγωγούς, μπεκ ψεκασμού καυσίμου και άλλα συστήματα μεταφοράς υγρών .

Η κατανόηση της συγκεκριμένης ροής είναι επίσης αναγκαία στη μικρορευστοποίηση , όπου διέπει τη συμπεριφορά των ρευστών σε μικροσκοπικά κανάλια και αγωγούς επηρεάζοντας πεδία όπως η τεχνολογία των τσιπ . Επιπλέον οι βιομηχανίες που περιλαμβάνουν τη μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου , τη χημική επεξεργασία και

την παραγωγή τροφίμων επωφελούνται από τις γνώσεις που παρέχονται από την ανάλυση ροών Poiseuille .

Παρόλο που η εξίσωση Hagen-Poiseuille παρέχει πολύτιμες γνώσεις για τη το πεδίο των ρευστών , βασίζεται σε ορισμένες υποθέσεις που μπορεί να μην ισχύουν πάντα . Η εξίσωση υποθέτει τη σταθερή , στρωτή ροή ενός ασυμπίεστου Νευτώνειου ρευστού μέσω ενός ευθύγραμμου κυλινδρικού αγωγού . Αποκλίσεις από αυτές τις συνθήκες όπως η εισαγωγή αναταράξεων , μη νευτώνειων ρευστών ή πολύπλοκων γεωμετριών πάνω σε ένα αγωγό , ενδέχεται να απαιτούν πιο εξελιγμένα μοντέλα για ακριβείς προβλέψεις .

Συνοπτικά λοιπόν , η ροή Poiseuille είναι μια θεμελιώδης έννοια στο κόσμο των ρευστών που ρίχνει φως στη συμπεριφορά των παχύρευστων ρευστών στους αγωγούς .Η εξίσωση Hagen- Poiseuille , το προφίλ ταχύτητας και οι οριακές συνθήκες παρέχουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη κατανόηση και την πρόβλεψη της κίνησης των ρευστών σε διάφορα μηχανολογικά και βιολογικά συστήματα . Οι εφαρμογές της ροής Poiseuille εκτείνονται σε διάφορους κλάδους τονίζοντας τη σημασίας της σε διάφορα σενάρια της καθημερινότητας . Ενώ το συγκεκριμένο μοντέλο έχει περιορισμούς ,η απλότητα και η δυνατότητα εφαρμογής του σε διάφορες περιπτώσεις τη καθιστούν στο βάθρο του πεδίου των ρευστών , ανοίγοντας με τη βοήθεια της τη πόρτα της εξέλιξης και περαιτέρω έρευνας και προόδου στη μηχανική των ρευστών .

1.2OpenFoam



Εικόνα 12 Λογότυπο OpenFOAM

1.2.1 Εισαγωγή στο OpenFoam

Αρχικά το όνομα του συγκεκριμένου λογισμικού το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την εργασία είναι OpenFOAM ή αλλιώς το αρκτικόλεξο γράφεται ως Open Field Operation and Manipulation δηλαδή Λειτουργία και χειρισμός ανοιχτού πεδίου . Είναι ένα ισχυρό πακέτο λογισμικού ανοιχτού κώδικα σχεδιασμένο για προσημειώσεις υπολογιστικής δυναμικής ρευστών (CFD) . Παρέχει μια ολοκληρωμένη σειρά εργαλείων και λύσεων για την αριθμητική επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων ροής ρευστού καθώς επίσης μεταφοράς θερμότητας και άλλων συναφών φαινομένων . Αναπτύχθηκε από το Ίδρυμα OpenFOAM , το προαναφερθέν λογισμικό έχει αποκτήσει ευρεία δημοτικότητα και χρησιμοποιείται ευρέως στον ακαδημαϊκό χώρο , την έρευνα και την βιομηχανία για την προσημείωση και την ανάλυση ροής ρευστού και μεταφοράς θερμότητας σε διάφορες εφαρμογές .

1.2. Βασικά χαρακτηριστικά του OpenFOAM

1.2.1 Ανοιχτός κώδικας

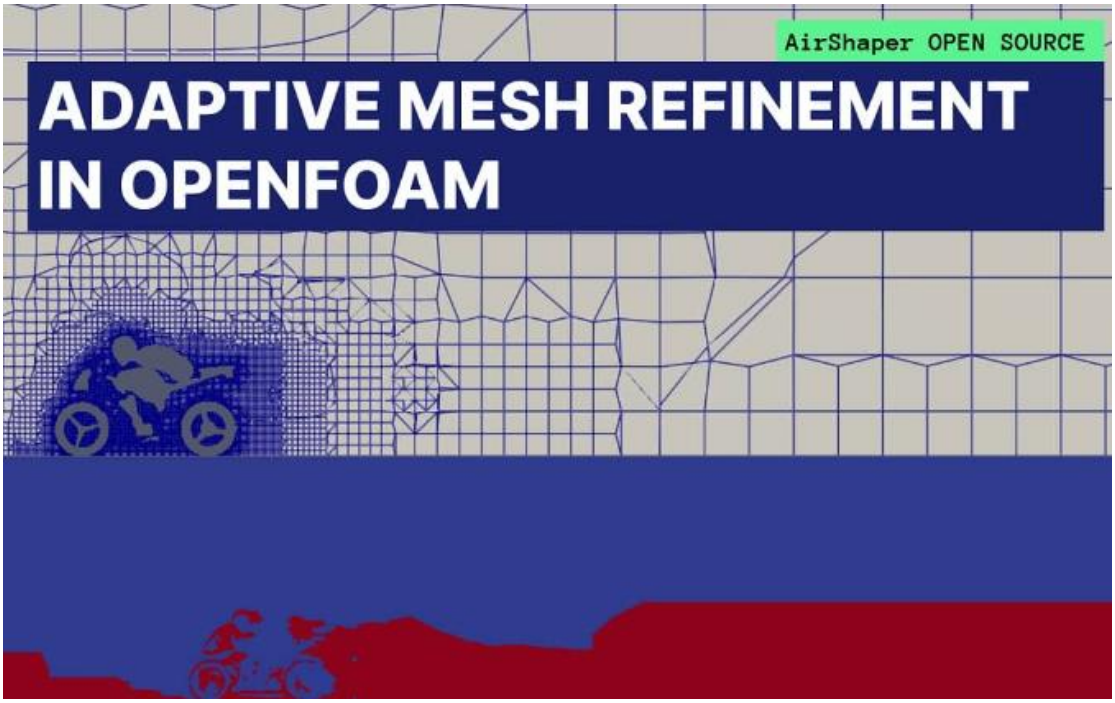
Το OpenFOAM είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα πράγμα που σημαίνει ότι ο πηγαίος κώδικας του είναι ελεύθερα διαθέσιμος στο κοινό .Αυτό δίνει τη δυνατότητα στου χρήστες να έχουν πρόσβαση , να τροποποιούν και να διανέμουν τον κώδικα σύμφωνα με τις ανάγκες τους . Ο ανοιχτός κώδικας του λογισμικού ενθαρρύνει τη συνεργασία , τη διαφάνεια και την ανάπτυξη μια βάσης γνώσεων με γνώμονα τη κοινότητα.

1.2.2 Extreme Solver Library

Το OpenFOAM παρέχει μια πλούσια συλλογή επιλύσεων για διάφορα προβλήματα ροής ρευστού και μεταφοράς θερμότητας . Τα παραπάνω εργαλεία επίλυσης προβλημάτων χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους για τη διακριτοποίηση και την επίλυση των εξισώσεων της ρευστοδυναμικής , προσφέροντας ευελιξία για την προσημείωση στρωτών και τυρβωδών ροών , συμπιεστών ροών και πολλά άλλα .

1.2.3 Δυνατότητες Meshing

Η δημιουργία πλέγματος είναι μια κρίσιμη πτυχή των προσομοιώσεων CFD . Το OpenFOAM περιλαμβάνει ισχυρά εργαλεία δικτύωσης για τη δημιουργία υπολογιστικών πλεγμάτων υψηλής ποιότητας. Η ευελιξία στη δημιουργία πλέγματος επιτρέπει στους χρήστες να προσαρμόζουν το πλέγμα στις συγκεκριμένες απαιτήσεις των προσομοιώσεων τους .



Εικόνα 13 Δείγμα πλέγματος meshing

1.2.4 Parallel Computing

Το OpenFOAM υποστηρίζει παράλληλους υπολογιστές , επιτρέποντας στους χρήστες να αξιοποιήσουν την υπολογιστική ισχύ πολλών επεξεργαστών ή συμπλεγμάτων υπολογιστών . Αυτή η ικανότητα επιταχύνει τους χρόνους προσομοίωσης , επιτρέποντας την ανάλυση πιο περίπλοκων και μεγάλης κλίμακας προβλημάτων .

1.2.5 Εργαλεία μετά την επεξεργασία

Η επεξεργασία είναι ένα κρίσιμο βήμα στις προσημειώσεις CFD για την εξαγωγή ουσιαστικών πληροφοριών από τα αποτελέσματα . Το OpenFOAM περιλαμβάνει μια σειρά από βοηθητικά προγράμματα μετα- επεξεργασίας και εργαλεία αστικοποίησης που βοηθούν τους χρήστες να αναλύουν και να ερμηνεύουν αποτελεσματικά τα δεδομένα προσομοίωσης .

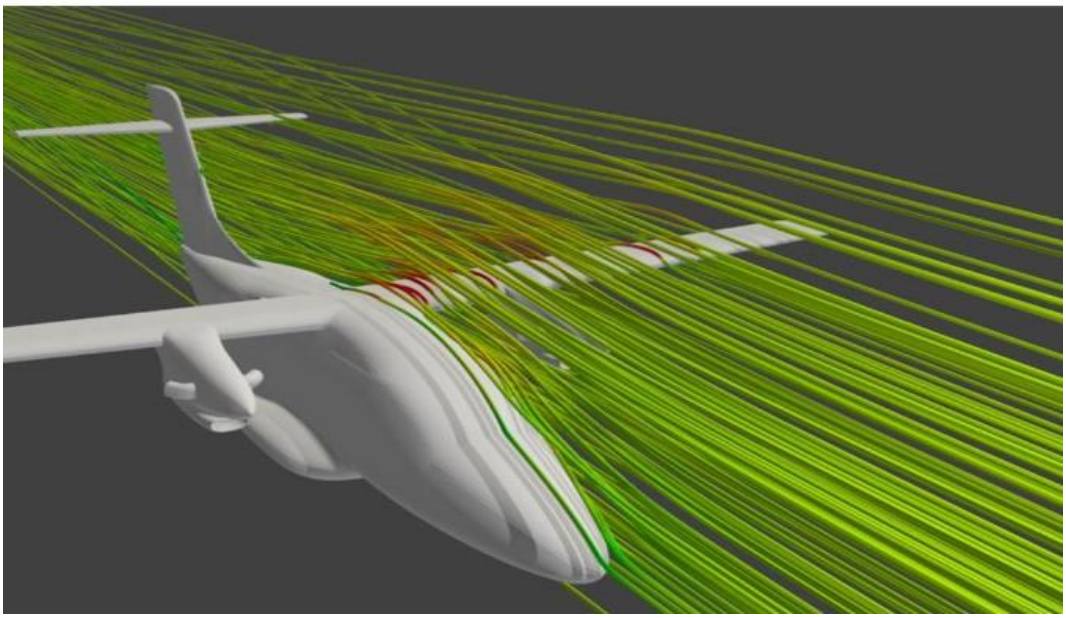
1.2.6 Προσαρμογή και Επεκτασιμότητα

Οι χρήστες μπορούν να προσαρμόσουν και να επεκτείνουν το OpenFOAM για να ταιριάζουν στις συγκεκριμένες ανάγκες τους . Αυτή η ευελιξία είναι πολύτιμη για ερευνητές και μηχανικούς που μπορεί να χρειαστούν εξειδικευμένα μοντέλα , οριακές συνθήκες ή αλγόριθμους για τις μοναδικές εφαρμογές τους .

1.2.3 Εφαρμογές του OpenFOAM

1.2.3.1 Αεροδιαστημική και Μηχανική

Το OpenFOAM χρησιμοποιείται ευρέως στην αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία για αεροδυναμικές προσημειώσεις , αναλύσεις μεταφοράς θερμότητας και μελέτες βελτιστοποίησης . Οι μηχανικοί μπορούν να προσημειώσουν τη ροή γύρω από τα φτερά του αεροσκάφους , τα αμαξώματα των αυτοκινήτων και άλλες συνθήκες γεωμετρίες για να βελτιώσουν το σχεδιασμό και την απόδοση.



Εικόνα 14 Προσημείωση CFD για τη ροή γύρω από το αεροσκάφος , με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου OpenFoam και ANSA

1.2.3.2 Περιβαλλοντική και ανανεώσιμη Ενέργεια

Οι προσημειώσεις CFD με OpenFoam εφαρμόζονται για τη μελέτη περιβαλλοντικών ροών , όπως η διασπορά της ρύπανσης του αέρα και των υδάτων . Επιπλέον χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συσκευών ανανεώσιμης ενέργειας ,

συμπεριλαμβανομένων των ανεμογεννητριών και των παλιρροϊκών συστημάτων ενέργειας

.

1.2.3.3 Βιοατρική Μηχανική

Σε βιοιατρικές εφαρμογές το OpenFoam βοηθά στη προσημείωση της ροής του αίματος στις αρτηρίες , στις αναπνευστικές ροές και στους μηχανισμούς χορήγησης φαρμάκων . Αυτές οι προσημειώσεις συμβάλουν στην κατανόηση των φυσιολογικών διεργασιών και στη βελτίωση των σχεδίων ιατρικών συσκευών .



Εικόνα 15 Αποτελέσματα ταχύτητας μέσω του OpenFoam για διάγνωση καρδιοπάθειας

1.2.3.4 Βιομηχανία Πετρελαίου και φυσικού αερίου

Το OpenFoam βρίσκει εφαρμογές στον τομέα του πετρελαίου και του φυσικού αερίου για προσημείωση διεργασιών όπως η ροή του ταμιευτήρα , οι πολυφασικές ροές και η μεταφορά θερμότητας σε αγωγούς . Αυτές οι προσημειώσεις βοηθούν στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών εξόρυξης και μεταφοράς .

1.2.3.5 Κτίριο και περιβαλλοντικός σχεδιασμός

Το OpenFoam χρησιμοποιείται στην αρχιτεκτονική και περιβαλλοντική μηχανική για την προσημείωση του φυσικού αερισμού , της ποιότητας του εσωτερικού αέρα και της θερμικής άνεσης μέσα στα κτίρια . Αυτό βοηθά στο σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικών και βιώσιμων κατασκευών.

1.2.4 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

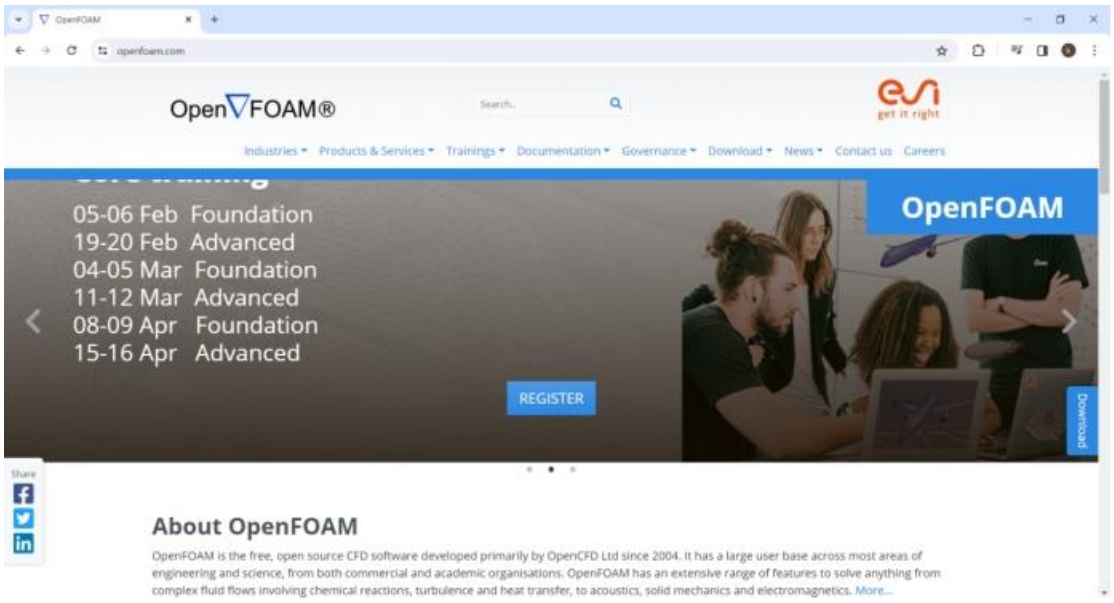
Ενώ το OpenFoam προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα , θέτει επίσης προκλήσεις .Η καμπύλη εκμάθησης για το mastering OpenFoam μπορεί να είναι απότομη , ειδικά για τους νέους χρήστες στο κόσμο του CFD. Επιπλέον η φύση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα σημαίνει ότι ενδέχεται να λείπουν ορισμένες από τις φιλικές προς τον χρήστη διεπαφές που βρίσκονται στα εμπορικά πακέτα λογισμικού τύπου CFD. Συμπερασματικά το OpenFoam διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην προώθηση των προσομοιώσεων CFD , παρέχοντας μια ευέλικτη πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα για αναλύσεις ροής ρευστού και μεταφοράς θερμότητας . Το ευρύ φάσμα ροών , η εκτεταμένη βιβλιοθήκη επιλυτών και η ευελιξία του το καθιστούν ένα πολύτιμο εργαλείο για ερευνητές ,μηχανικούς και επιστήμονες που εργάζονται σε διαφορετικούς τομείς που επιδιώκουν να κατανοήσουν και να βελτιστοποιήσουν τη δυναμική των ρευστών και τις θερμικές διεργασίες . Το μοντέλο ανάπτυξης με γνώμονα την κοινότητα εξασφαλίζει συνεχώς βελτίωση , καθιστώντας το OpenFoam σημαντικό πλεονέκτημα στον τομέα της υπολογιστικής δυναμικής των ρευστών .

Κεφάλαιο 2ο

2.1Εγχειρίδιο Χρήσης OpenFoam

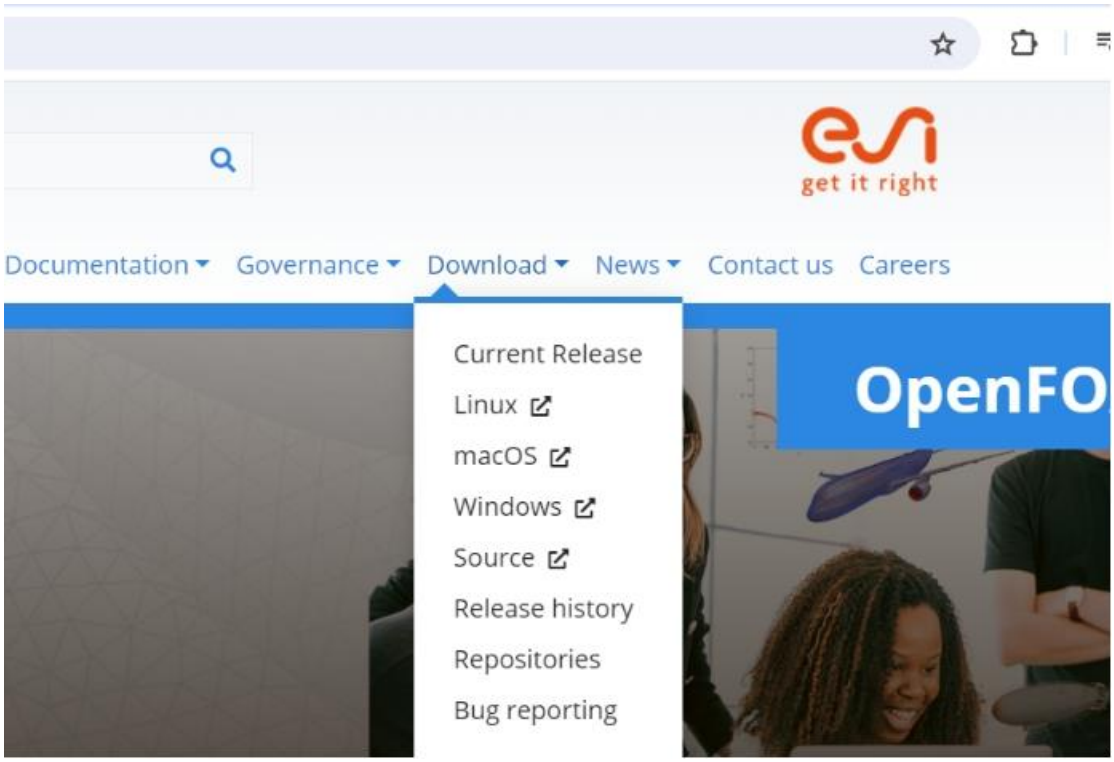
2.1.1Εγκατάσταση

Αρχικά για να γίνει η οποιαδήποτε χρήση του λογισμικού πακέτου OpenFoam θα χρειαστεί πρώτα να το κατεβάσουμε στον υπολογιστή με τον οποίο θα δουλέψουμε , εντελώς δωρεάν από την επίσημη σελίδα της εταιρίας www.openfoam.com .



Εικόνα 16 Αρχική σελίδα OpenFoam

Έπειτα πάμε στην επιλογή download όπου εμφανίζονται παραπάνω επιλογές οι οποίες προσφέρονται για διαφορετικά λογισμικά περιβάλλοντα

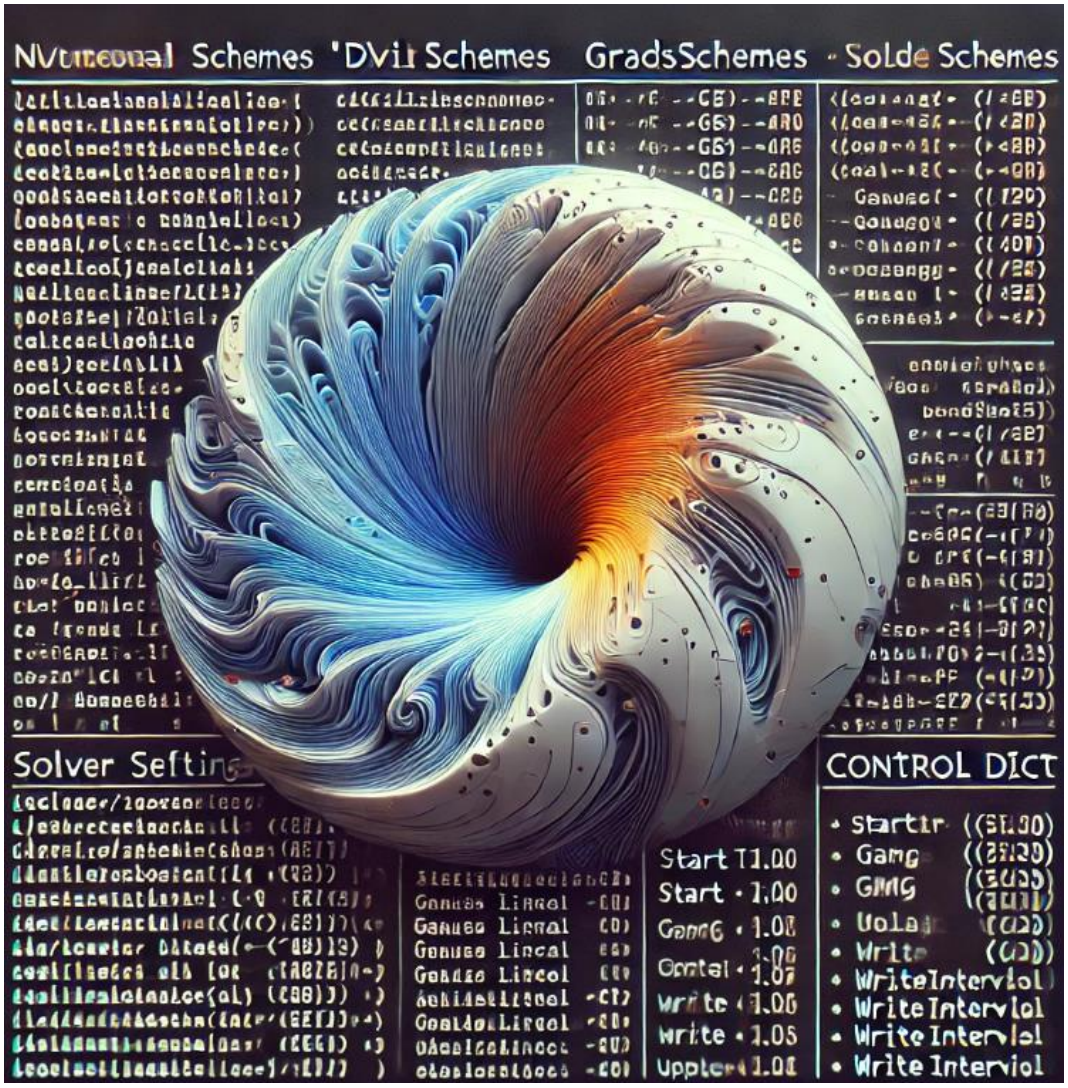


Εικόνα 17 Επιλογές για Downloading

Αφού γίνει επιλογή του περιβάλλοντος που θέλουμε προχωρούμε με την εγκατάσταση του λογισμικού ακολουθώντας βήμα προς βήμα τις οδηγίες οι οποίες δίνονται από τους κατασκευαστές .

Στην παρούσα εργασία θα γίνει χρήση του λογισμικού πακέτου OpenFoam μέσω Ubuntu & Linux .

Δυστυχώς το λογισμικό πακέτο ενώ προσφέρει online courses στην επίσημη σελίδα του , οι τιμές είναι πολύ υψηλές ακόμα και για το πιο αρχάριο επίπεδο . Πάντοτε υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης οδηγιών από τη σελίδα καθώς επίσης και online σελίδες εκμάθησης ή ψηφιακές κοινότητες οι οποίες αλληλουποστηρίζουν τα μέλη τους και εκπαιδεύονται σε διαφορετικά προγράμματα και γλώσσες προγραμματισμού (πχ GitHub) καθώς υπάρχουν και πολλά βιντεάκια εκμάθησης και στο youtube , τα οποία δυστυχώς συνήθως δεν είναι υψηλού ποιοτικού επιπέδου, έχουν αρχικής ή μέσης βαθμίδας θέματα και τέλος το υλικό είναι παλιό με διαφορετικό σε πολλές περιπτώσεις προγραμματικό περιβάλλον από αυτό που μπορεί ενδεχομένως να έχει συνηθίσει ο χρήστης.



2.1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΤΟΛΕΣ

Παρακάτω φαίνονται κάποιες από τις πιο χρήσιμες και βασικές εντολές τις οποίες χρειάζεται κάποιος να ξέρει για να αξιοποιήσει το πρόγραμμα .

cd dir1 -> change directory : Το cd σημαίνει “αλλαγή καταλόγου” η οποία είναι μια κοινή εντολή σε λειτουργικά συστήματα που μοιάζουν με Unix (συμπεριλαμβανομένου και του Linux) και χρησιμοποιείται για τη πλοήγηση στη δομή καταλόγου του συστήματος αρχείων. Το dir1 είναι στη συγκεκριμένη περίπτωση ένα τυχαίο όνομα για τη κράτηση θέσης ενός καταλόγου , ενός καταλόγου στον οποίο εμπεριέχει όλα τα απαραίτητα αρχεία και φακέλους για τη ρύθμιση και εκτέλεση μιας προσομοίωσης .

cd.. -> back folder : Είναι η εντολή η οποία είναι υπεύθυνη στο να «γυρίσουμε» φάκελο πίσω φτάνοντας ακόμα μέχρι και την αρχική πλοήγηση , το πρόγραμμα έχει πολλές διακλαδώσεις , με αποτέλεσμα να πρέπει να ανατρέχει ο χρήστης ιδίως όταν δεν είναι

εξοικειωμένος με το πρόγραμμα πίσω , μέχρι να βρει τα κατάλληλα αρχεία για μετατροπή και προσημείωση καθιστώντας την μια από τις πιο χρήσιμες εντολές.

cd~ -> back to home : Το σύμβολο «~»αντιπροσωπεύει τον αρχικό κατάλογο του χρήστη , όποτε εκτελείται αυτή η εντολή το σύστημα μας πετάει στην αρχική του μορφή ανεξαρτήτως σε ποιο σημείο του προγράμματος ήμασταν πιο πριν.

clear-> clear up terminal : Όταν εκτελείται προσημείωση ή εργασία στο OpenFoam πολλές φορές το τερματικό μπορεί να γεμίσει με διάφορα μηνύματα , εξόδους και εντολές που έχουν εισαχθεί , γεμίζοντας την οθόνη με όλες αυτές τις πληροφορίες δημιουργείται χάος και ακαταστασία πράγμα που δυσκολεύει το χρήστη να συγκεντρωθεί , με αυτή την εντολή καθαρίζει εντελώς το τερματικό (συνεχίζοντας τη προσημείωση).

cp-r-> copy folder : Η εντολή cp είναι μια εντολή αντιγραφής και γίνεται για την αντιγραφή αρχείων και καταλόγων από μια τοποθεσία σε μια άλλη . Το –r είναι ένα σημάδι επιλογής που χρησιμοποιείται με την εντολή cp και προέρχεται από το recursive που σημαίνει ότι αντιγραφή τους καταλόγους και τα περιεχόμενα τους αναδρομικά .

ls -> list : Η εντολή ls είναι από τις πιο χρήσιμες εντολές και έχει παρόμοια λειτουργία όπως στα συστήματα linux/unix , χρησιμοποιείται για τη λεπτομερή αναγραφή περιεχομένου του εκάστοτε φακέλου .

mkdir->make directory : Η χρήση είναι και εδώ παρόμοια με τα υπόλοιπα συστήματα linux/unix , είναι μια εντολή για τη δημιουργία καταλόγων(φακέλων) . Όταν εκτελείται το mkdir ακολουθείται από το όνομα ενός καταλόγου που χρειάζεται να δημιουργηθεί .

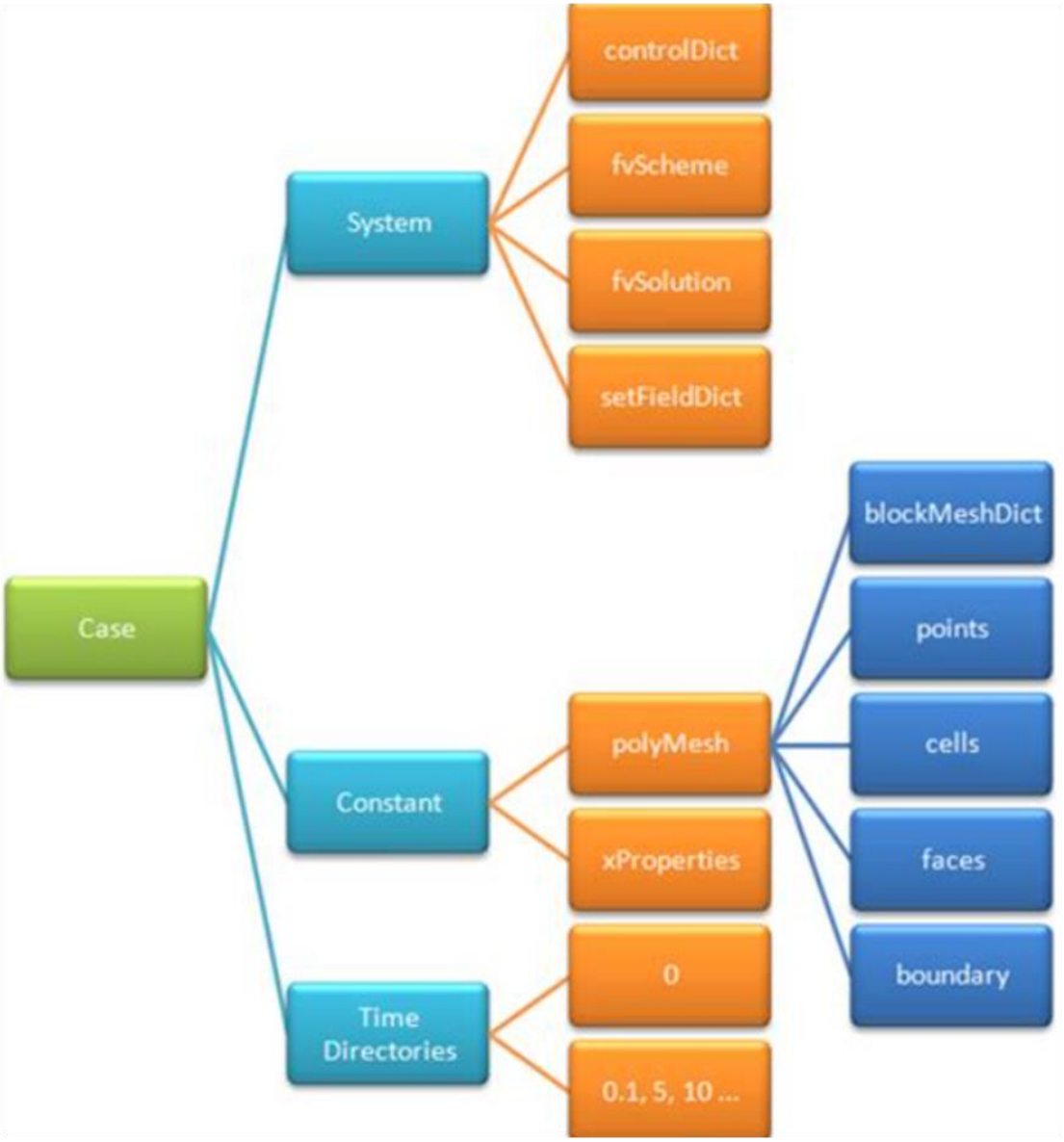
touch->create new tex file : Στο Openfoam η εντολή touch χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός νέου κενού αρχείου ή για την ενημέρωση της χρονικής σήμανσης ενός ήδη υπάρχοντος αρχείου χωρίς να τροποποιηθούν τα περιεχόμενα του .

paraFoam : Το paraFoam είναι το ενσωματωμένο εργαλείο του OpenFoam για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων προσημείωσης χρησιμοποιώντας το paraView, ένα λογισμικό οπτικοποίησης ανοιχτού κώδικα . Επιτρέπει στους χρήστες να εξερευνήσουν πεδία ταχύτητας , κατανομές πίεσης και ιδιότητες αναταράξεων .

simpleFoam : Το simpleFoam είναι ένας επιλυτής σταθερής κατάστασης για ασυμπίεστη , τρυβώδη ροή στο OpenFoam. Βασίζεται στον αλγόριθμο SIMPLE (Semi - Implicit - Method - for Pressure Linked Equeations) ο οποίος χρησιμοποιείται για την επαναληπτική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes . Δεδομένου ότι είναι ένας επιλυτής σταθερής κατάστασης , δεν λαμβάνει υπόψη τις εξαρτώμενες από το χρόνο αλλαγές ροής .

2.1.3 Βασικοί φάκελοι

Οι βασικοί φάκελοι για το πρόγραμμα OpenFoam τους οποίους θα χρησιμοποιήσουμε είναι αυτός του Case_Folder όπου περιλαμβάνει τους 3 (τρεις) φακέλους (system – Constant -0). Ο φάκελος «system» περιέχει αρχεία τα οποία είναι υπεύθυνα για τις αριθμητικές προσημειώσεις , τα σχέδια , τον έλεγχο επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων καθώς επίσης και τις ρυθμίσεις για τη γεωμετρία του κάθε πειράματος .



Εικόνα 18 Δίκτυο λειτουργείας βασικών φακέλων

2.1.3.1 System/ -Solver Control &Numerical Settings

Ο system/ κατάλογος στο OpenFoam ελέγχει τον τρόπο εκτέλεσης της προσημείωσης . Περιέχει βασικά αρχεία διαμόρφωσης που ορίζουν το χρονικό βήμα , τις ρυθμίσεις επίλυσης και αριθμητικά σχήματα . Το αρχείο controlDict υπαγορεύει βασικές παραμέτρους χρόνου εκτέλεσης , όπως οι χρόνοι έναρξης και λήξης , το μέγεθος του χρονικού βήματος και η συχνότητα εξόδου . Το αρχείο fvSchemes καθορίζει τις μεθόδους αριθμητικής διακριτοποίησης που χρησιμοποιούνται για διαφορικές εξισώσεις , συμπεριλαμβανομένων των σχημάτων παρεμβολής ,κλίσης και απόκλισης .

```
    object      fvSchemes;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

ddtSchemes
{
    default         Euler;
}

gradSchemes
{
    default         Gauss linear;
}

divSchemes
{
    div(rhoPhi,U)   Gauss linearUpwind grad(U);
    div(phi,alpha)  Gauss vanLeer;
    div(phirb,alpha) Gauss linear;
    div(rhoPhi,k)      Gauss upwind;
    div(rhoPhi,epsilon) Gauss upwind;
    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U))))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default         Gauss linear orthogonal;
}

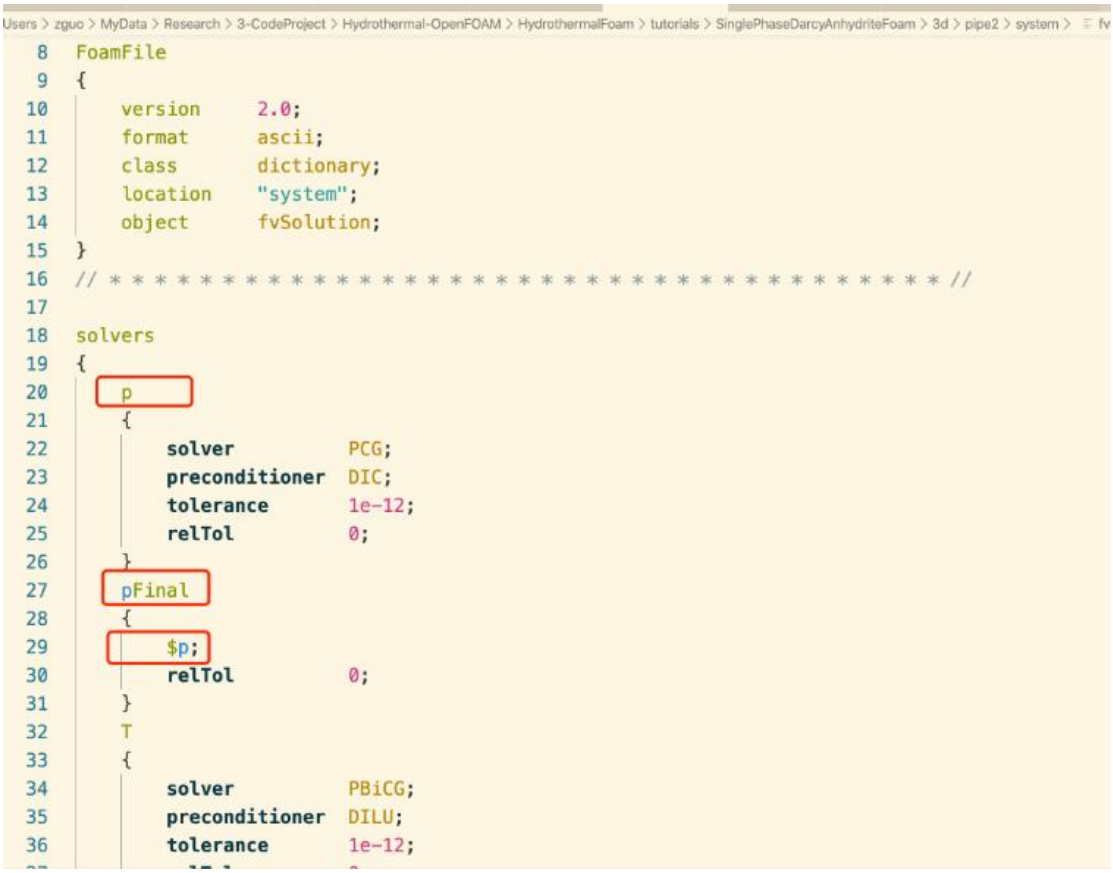
interpolationSchemes
{
    default         linear;
}

snGradSchemes
{
    default         orthogonal;
}


// ************************************************************************* //
                                                                   53,1          Bot
```

Εικόνα 19 κατάλογος system

Το αρχείο fvSolution ελέγχει τις ρυθμίσεις επίλυσης ,τους παράγοντες χαλάρωσης και τα όρια ανοχής για σύγκλιση . Αυτές οι ρυθμίσεις καθορίζουν την ακρίβεια ,τη σταθερότητα και την υπολογιστική απόδοση της προσημείωσης.

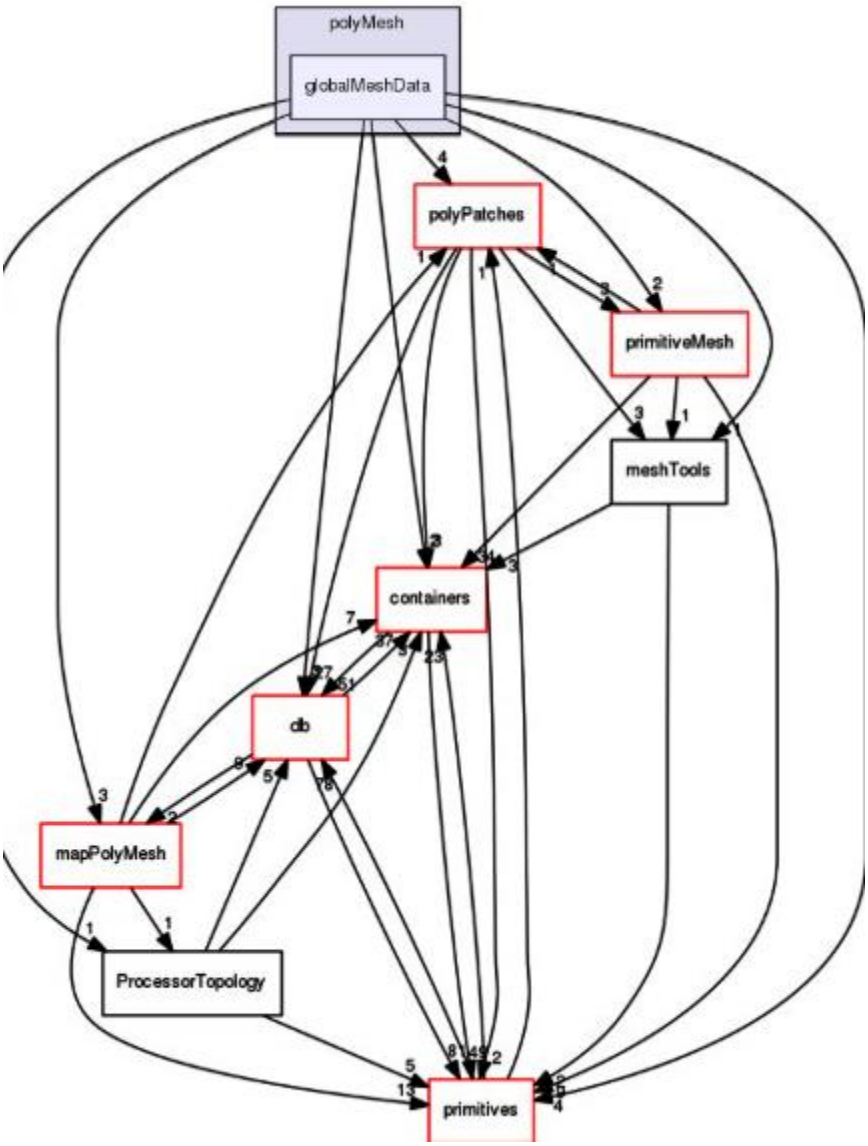


Εικόνα 20 περιβάλλον λειτουργείας

Οι ακατάλληλες επιλογές στο fvSchemes ή στο fvSolution μπορεί να οδηγήσουν σε απόκλιση ή μη φυσικά αποτελέσματα . Οι χρήστες πρέπει να επιλέγουν προσεκτικά solvers(λύτες) και σχήματα με βάση πάντα τη πολυπλοκότητα του προβλήματος και τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους . Ο φάκελος system/ λειτουργεί ουσιαστικά ως κέντρο ελέγχου , διασφαλίζοντας ότι παρασκηνιακά το πρόγραμμα λειτουργεί αποτελεσματικά διατηρώντας την αριθμητική ακρίβεια .

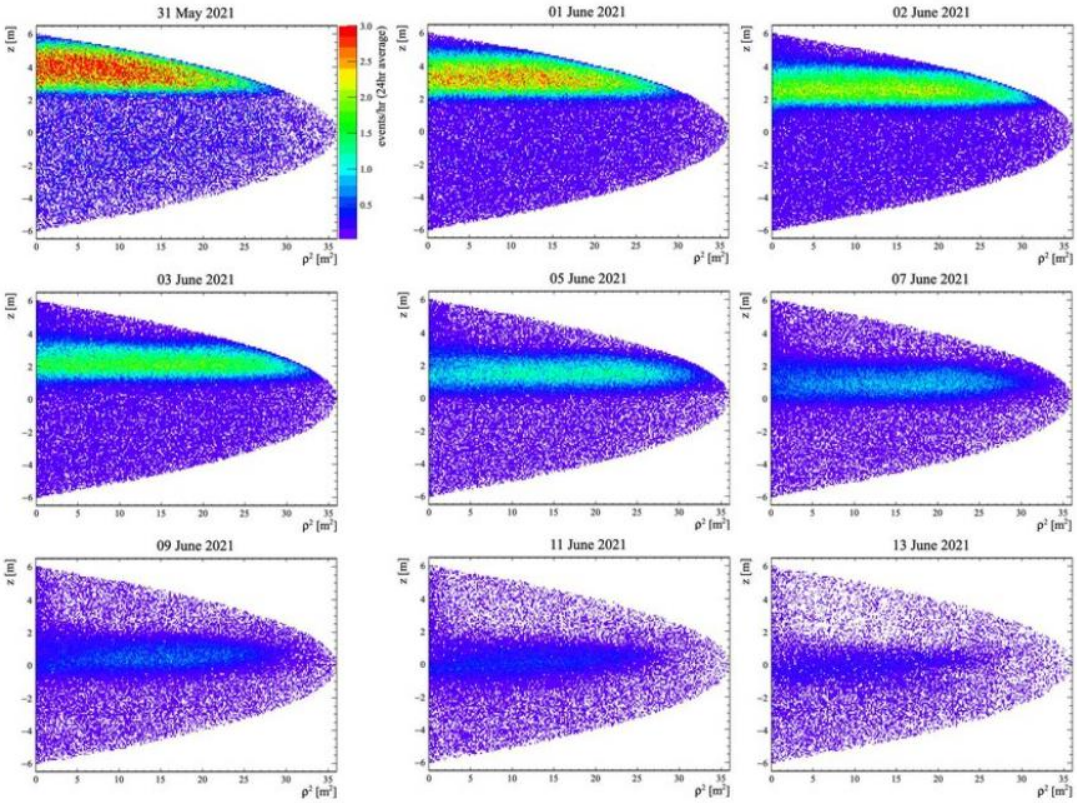
2.1.3.2 Constant/ - Mesh & Physical Properties

Ο κατάλογος constant/ στο OpenFoam περιέχει δεδομένα που καθορίζουν τις φυσικές ιδιότητες του προβλήματος και το υπολογιστικό πλέγμα (computational mesh) λειτουργώντας δηλαδή σα σταθερά . Περιλαμβάνει έ να υποκατάλογο polyMesh/ που αποθηκεύει αρχεία πλέγματος (mesh files) όπως δηλαδή σημεία ,πρόσωπα και κελιά ,τα οποία περιγράφουν τον χώρο .



Εικόνα 21 Λειτουργεία blockMesh

Αυτός ο κατάλογος περιέχει επίσης αρχεία φυσικών ιδιοτήτων που δρουν σα σταθερές ,όπως το αρχείο transportProperties που ορίζουν ιξώδες για στρωτές ροές και thermophysicalProperties για προσημειώσεις που περιλαμβάνουν τη μεταφορά θερμότητας. Εάν χρησιμοποιείται μοντελοποίηση αναταράξεων ,το αρχείο turbulenceProperties καθορίζει το μοντέλο αναταράξεων .



Εικόνα 22 οπτικά αποτελέσματα χρήσης openfoam μέσω αντίστοιχου εργαλείου

Αυτά τα αρχεία παραμένουν αμετάβλητα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης , εκτός εάν τροποποιηθούν από τον ίδιο το χρήστη ανάλογα πάντα τη περίσταση του κάθε προβλήματος . Η πληροφορία μέσα στον κατάλογο constant/ είναι κρίσιμη για τον καθορισμό του τρόπου με τον οποίο ο λύτης ερμηνεύει το μέσο στο οποίο εμφανίζεται η ροή . Οι ακριβείς ορισμοί ιδιοτήτων εξασφαλίζουν ρεαλιστικά αποτελέσματα στη προσημείωση . Οποιεσδήποτε ασυνέπειες στις ιδιότητες του υλικού ή στις ρυθμίσεις αναταράξεων μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένη φυσική συμπεριφορά ,καθιστώντας απαραίτητη την προσεκτική επιλογή των παραμέτρων . Στη συγκεκριμένη πτυχιακή δε χρειάζεται να γίνει εστίαση στις παραπάνω σταθερές .

2.1.3.3 0/ (Zero Directory)- Αρχικές συνθήκες

Ο κατάλογος 0/ στο OpenFoam περιέχει τις αρχικές συνθήκες για όλες τις μεταβλητές πεδίου που απαιτούνται στην προσημείωση . Κάθε αρχείο μέσα αντιπροσωπεύει μια φυσική μεταβλητή , όπως U (ταχύτητα) , p (πίεση) ή T(θερμοκρασία) . Αυτά τα αρχεία ορίζουν τις αρχικές τιμές για κάθε μεταβλητή και καθορίζουν οριακές συνθήκες για διαφορετικές περιοχές του τομέα . Η μορφή αρχείου περιλαμβάνει ενότητες για τιμές εσωτερικών πεδίων , τύπους ορίων και ιδιότητες για συγκεκριμένες ενημερώσεις κώδικα . Αυτός ο κατάλογος είναι κρίσιμος επειδή το OpenFoam αρχικοποιεί την προσομοί

ωση με βάση αυτές τις τιμές πριν λύσει τις εξισώσεις που ισχύουν . Η ποιότητα των αρχικών συνθηκών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη σταθερότητα και τη σύγκλιση του λύτη . Εάν οριστούν ακατάλληλες τιμές η προσομοίωση μπορεί να αποκλίνει ή να χρειαστεί περισσότερος χρόνος για να σταθεροποιηθεί . Οι χρήστες πρέπει να διασφαλίσουν ότι οι τιμές ταιριάζουν με τη φυσική του προβλήματος και την αναμενόμενη συμπεριφορά ροής για ακριβή αποτελέσματα .

Κεφάλαιο 3ο

3.1.1 Ροή Couette

Η ροή Couette αποτελεί μια από τις θεμελιώδεις ροές στη ρευστομηχανική, η οποία περιγράφει την κίνηση ενός ιξώδους ρευστού μεταξύ δύο παράλληλων πλακών, όπου η μία πλάκα κινείται με σταθερή ταχύτητα σε σχέση με την άλλη. Αυτή η απλή γεωμετρία επιτρέπει την αναλυτική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes υπό συγκεκριμένες συνθήκες, καθιστώντας τη ροή Couette ένα ιδανικό σημείο αναφοράς για την επικύρωση υπολογιστικών μεθόδων και την κατανόηση βασικών φαινομένων της ρευστομηχανικής.

Η ροή Couette ορίζεται ως η ροή ενός ιξώδους ρευστού μεταξύ δύο παράλληλων πλακών που απέχουν απόσταση h, όπου η κάτω πλάκα είναι ακίνητη και η άνω πλάκα κινείται με σταθερή ταχύτητα U. Λόγω της ιξώδους φύσης του ρευστού, αναπτύσσεται μια διατμητική τάση που οδηγεί στη δημιουργία ενός προφίλ ταχύτητας μεταξύ των δύο πλακών.

Για μόνιμη, στρωτή και πλήρως ανεπτυγμένη ροή, η αναλυτική λύση των εξισώσεων Navier-Stokes δίνει ένα γραμμικό προφίλ ταχύτητας:

$$u(y) = U \cdot (\frac{y}{h})$$

όπου:
u(y) είναι η ταχύτητα του ρευστού σε ύψος y από την κάτω πλάκα
U είναι η ταχύτητα της άνω πλάκας
h είναι η απόσταση μεταξύ των δύο πλακών

Η διατμητική τάση στο τοίχωμα (wall shear stress) δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_w = \mu \cdot (\frac{du}{dy}) = \mu \cdot (\frac{U}{h})$$

όπου μ είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

Ο αριθμός Reynolds για τη ροή Couette ορίζεται ως:

$Re = (\rho \cdot U \cdot h) / \mu = (U \cdot h) / \nu$

όπου:
ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού

ν = μ/ρ είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού

Για χαμηλούς αριθμούς Reynolds (Re < 1400 περίπου), η ροή παραμένει στρωτή. Για υψηλότερους αριθμούς Reynolds, η ροή μεταβαίνει σε τυρβώδη κατάσταση, όπου το προφίλ ταχύτητας δεν είναι πλέον γραμμικό.

3.1.2Μεθοδολογία επίλυσης των ροών Couette

Για τη μελέτη της ροής Couette, δημιουργήσαμε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις προσομοίωσης, οι οποίες διαφέρουν μόνο ως προς το κινηματικό ιξώδες του ρευστού:

1η Περίπτωση : Χαμηλό ιξώδες (ν = 0.005 m²/s)
2η Περίπτωση : Μεσαίο ιξώδες (ν = 0.01 m²/s)
3η Περίπτωση : Υψηλό ιξώδες (ν = 0.02 m²/s)

Οι υπόλοιπες παράμετροι της προσομοίωσης διατηρήθηκαν σταθερές για όλες τις περιπτώσεις ώστε να φαίνεται ακριβώς το πώς το διαφορετικό ιξώδες επηρεάζει τη κάθε ροή

Οι παράμετροι είναι οι εξής :

Γεωμετρία: Ορθογώνιο κανάλι διαστάσεων 1.0 × 1.0 × 0.1 m (μήκος × ύψος × πλάτος)
Πλέγμα: Ομοιόμορφο πλέγμα 50 × 50 × 1 κελιών
Ταχύτητα άνω πλάκας: U = 1.0 m/s
Χρόνος προσομοίωσης: 2.0 s
-Αριθμός χρονικών βημάτων: 10

Με βάση αυτές τις παραμέτρους, οι αριθμοί Reynolds για τις τρεις περιπτώσεις είναι:

1ή Περίπτωση : Re =1.0 × 1.0) / 0.005 = 200
2ή Περίπτωση : Re = (1.0 × 1.0) / 0.01 = 100
3ή Περίπτωση : Re = (1.0 × 1.0) / 0.02 = 50

Όλες οι περιπτώσεις αντιστοιχούν σε στρωτή ροή, καθώς οι αριθμοί Reynolds είναι αρκετά χαμηλοί , σε περίπτωση που γίνεται τυρβώδης ροή λόγω υψηλότερου αριθμού Reynolds το οπτικό αποτέλεσμα της προσημείωσης είναι πιο περίπλοκο.

3.1.3.Φάκελος 0

Στο φάκελο 0, δημιουργήσαμε δύο αρχεία για τον καθορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών:

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  10                                    |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
   version     2.0;
   format      ascii;
   class       volVectorField;
   object      U;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform (0 0 0);

boundaryField
{
   bottom
   {
      type          noSlip;
   }
   top
   {
      type          fixedValue;
      value         uniform (1 0 0);
   }
   left
   {
      type          cyclic;
```

```
    }
    right
    {
        type            cyclic;
    }
    frontAndBack
    {
        type            empty;
    }
}

// ************************************************************************* //
//
```

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  10                                    |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       volScalarField;
    object      p;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    bottom
```

```
    {
        type            zeroGradient;
    }
    top
    {
        type            zeroGradient;
    }
    left
    {
        type            cyclic;
    }
    right
    {
        type            cyclic;
    }
    frontAndBack
    {
        type            empty;
    }
}

// ************************************************************************
//
```

```
##
```

3.1.4. Φάκελος constant

Στο φάκελο constant, δημιουργήσαμε το αρχείο transportProperties για τον καθορισμό των φυσικών ιδιοτήτων του ρευστού:

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  10                                    |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
```

```
FoamFile
{
   version     2.0;
   format      ascii;
   class       dictionary;
   location    "constant";
   object      transportProperties;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

nu              [0 2 -1 0 0 0 0] 0.01;

// ************************************************************************* //
```

Για τις τρεις περιπτώσεις, αλλάξαμε μόνο την τιμή του κινηματικού ιξώδους (nu):

Περίπτωση $1^{η}$: nu = 0.005

Περίπτωση $2^{η}$: nu = 0.01

Περίπτωση $3^{η}$: nu = 0.02

Επίσης, στο φάκελο constant, δημιουργήσαμε το αρχείο blockMeshDict για τον καθορισμό της γεωμετρίας και του πλέγματος:

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  10                                    |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
   version     2.0;
   format      ascii;
   class       dictionary;
   object      blockMeshDict;
}
```

```
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

convertToMeters 1;

vertices
(
   (0 0 0)
   (1 0 0)
   (1 1 0)
   (0 1 0)
   (0 0 0.1)
   (1 0 0.1)
   (1 1 0.1)
   (0 1 0.1)
);

blocks
(
   hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (50 50 1) simpleGrading (1 1 1)
);

edges
(
);

boundary
(
   bottom
   {
      type wall;
      faces
      (
         (0 1 5 4)
      );
   }
   top
   {
      type wall;
      faces
```

```
        (
            (3 2 6 7)
        );
    }
    left
    {
        type cyclic;
        neighbourPatch right;
        faces
        (
            (0 3 7 4)
        );
    }
    right
    {
        type cyclic;
        neighbourPatch left;
        faces
        (
            (1 2 6 5)
        );
    }
    frontAndBack
    {
        type empty;
        faces
        (
            (0 1 2 3)
            (4 5 6 7)
        );
    }
);

mergePatchPairs
(
);

// ************************************************************************
//
```

```

##
```

3.1.5 Φάκελος system

Στο φάκελο system, δημιουργήσαμε τρία βασικά αρχεία για τον καθορισμό των παραμέτρων της προσομοίωσης:

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  10                                    |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    location    "system";
    object      controlDict;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

application     icoFoam;

startFrom       startTime;

startTime       0;

stopAt          endTime;

endTime         2;

deltaT          0.005;
```

```
writeControl    timeStep;

writeInterval   40;

purgeWrite      0;

writeFormat     ascii;

writePrecision  6;

writeCompression off;

timeFormat      general;

timePrecision   6;

runTimeModifiable true;

// ************************************************************************
//
```

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                                 |
| \\      /  F ield         | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  10                                    |
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org                      |
|    \\/     M anipulation  |                                                 |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    location    "system";
    object      fvSchemes;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //
```

```
ddtSchemes
{
   default       Euler;
}

gradSchemes
{
   default       Gauss linear;
}

divSchemes
{
   default       none;
   div(phi,U)     Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
   default       Gauss linear orthogonal;
}

interpolationSchemes
{
   default       linear;
}

snGradSchemes
{
   default       orthogonal;
}

// ************************************************************************
//
```

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                 |                                 |
```

```
| \\    /  F ield        | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox          |
| \\   /   O peration    | Version:  10                                   |
|  \\ /    A nd          | Web:      www.OpenFOAM.org                     |
|   \\/    M anipulation |                                                |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
   version    2.0;
   format     ascii;
   class      dictionary;
   location   "system";
   object     fvSolution;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

solvers
{
   p
   {
      solver         PCG;
      preconditioner  DIC;
      tolerance      1e-06;
      relTol         0.05;
   }

   pFinal
   {
      $p;
      relTol         0;
   }

   U
   {
      solver         smoothSolver;
      smoother       symGaussSeidel;
      tolerance      1e-05;
      relTol         0;
   }
}
```

```
PISO
{
    nCorrectors     2;
    nNonOrthogonalCcorrectors 0;
    pRefCell        0;
    pRefValue       0;
}

// ************************************************************************
//
```

```
#
```

Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων ακολουθούμε τα εξής 2 βήματα:

1ο δημιουργούμε το πλέγμα (περιβάλλον) με την εντολή blockMesh

2ο Εκτελούμε τη προσημείωση με τα στοιχεία που έχουμε ορίσει από πάνω με την εντολή icoFoam

3.2.Λεπτομερής ανάλυση της Πρώτης Προσομοίωσης (Χαμηλό Ιξώδες)

Σε αυτή την ενότητα, θα αναλύσουμε λεπτομερώς τα αποτελέσματα της πρώτης προσομοίωσης, η οποία αντιστοιχεί στην περίπτωση με το χαμηλότερο ιξώδες (ν = 0.005 m^2/s) και αριθμό Reynolds Re = 200.

Αφού έχει γίνει η προσημείωση με τη βοήθεια του ParaView γίνεται οπτικοποίηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Θα γίνει μελέτη για :

1.Προφίλ κίνησης : Γραφική παράσταση της ταχύτητας συνάρτηση του ύψους .

2.Περιγράμματα ταχύτητας : Χρωματική απεικόνιση του μέτρου της ταχύτητας .

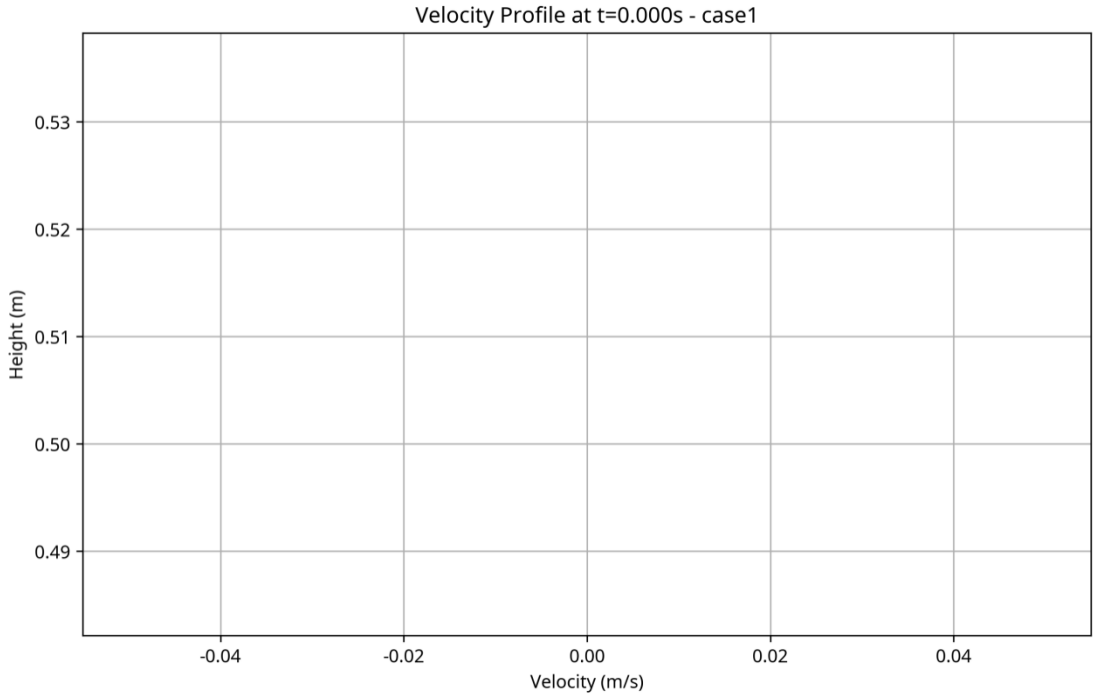
3.Διανύσματα ταχύτητας :Απεικόνιση των διανυσμάτων ταχύτητας στο xy επίπεδο.

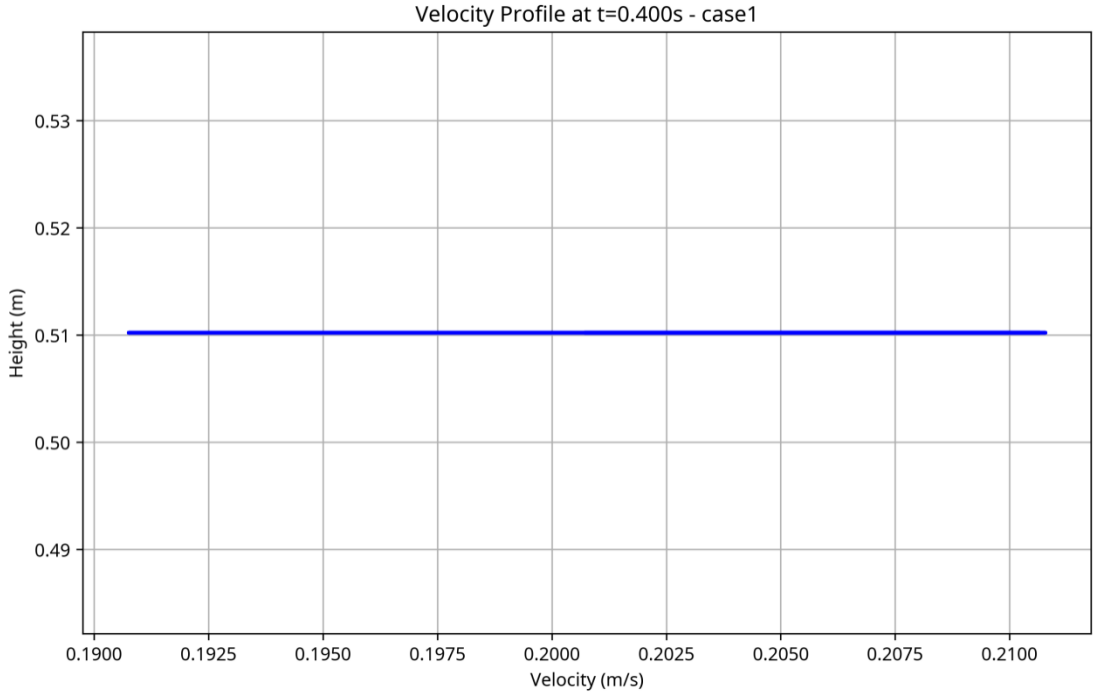
4.Περιγράμματα Πίεσης : Χρωματική απεικόνιση της πίεσης στο επίπεδο xy.

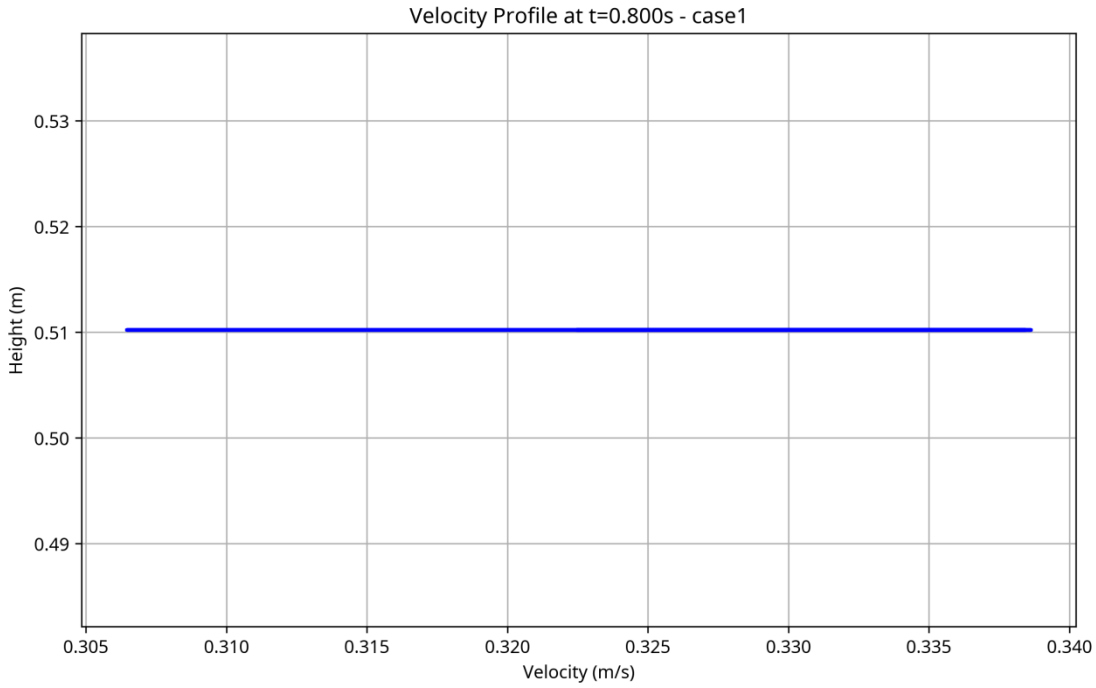
5.Διατμηματική τάση τοιχώματος : Γραφική παράσταση της διατμηματικής τάσης στο κάτω τοίχωμα.

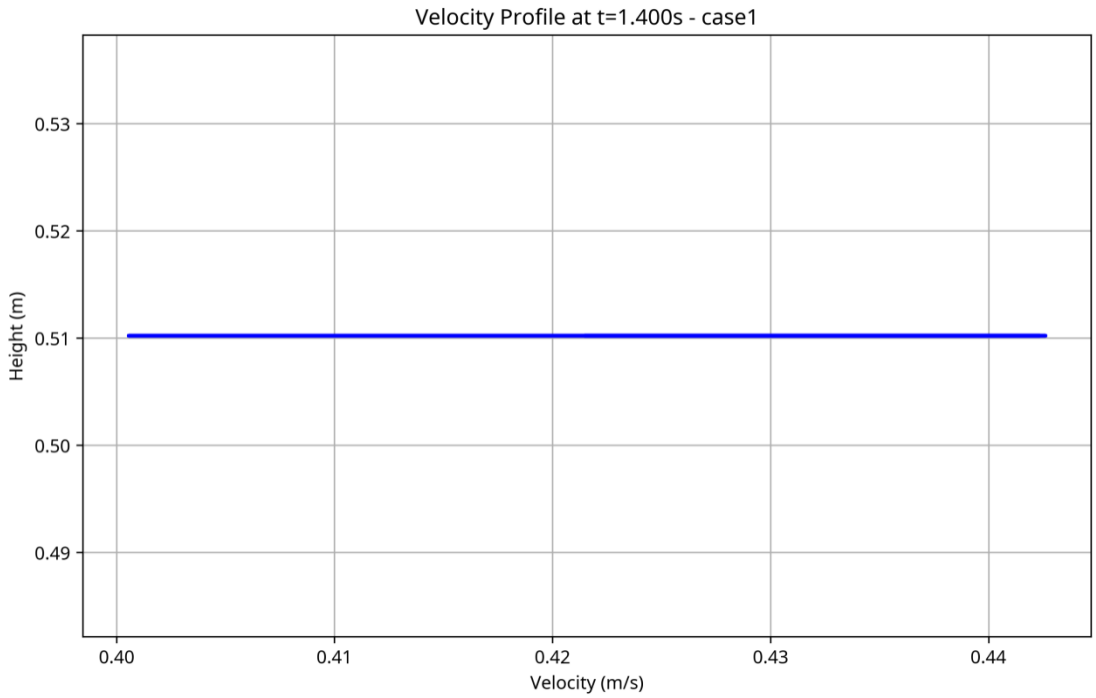
3.2.1 Προφίλ Ταχύτητας

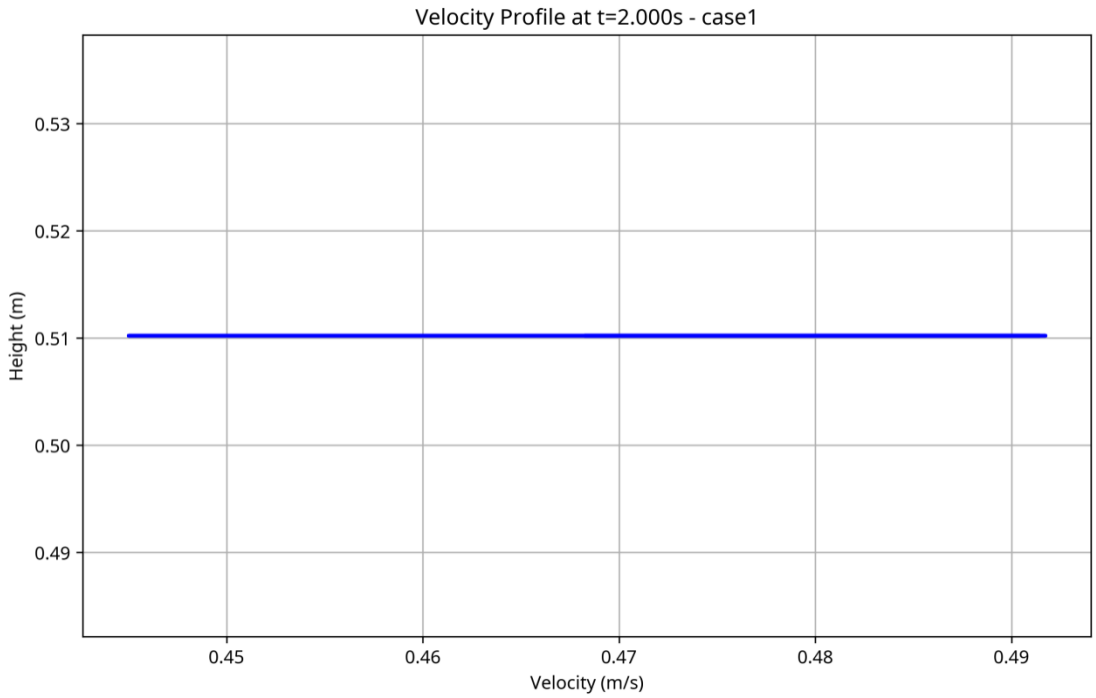
Το προφίλ ταχύτητας είναι από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της ροής Couette. Από κάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της 1ης ροής της οποίας μελετάμε λεπτομερώς

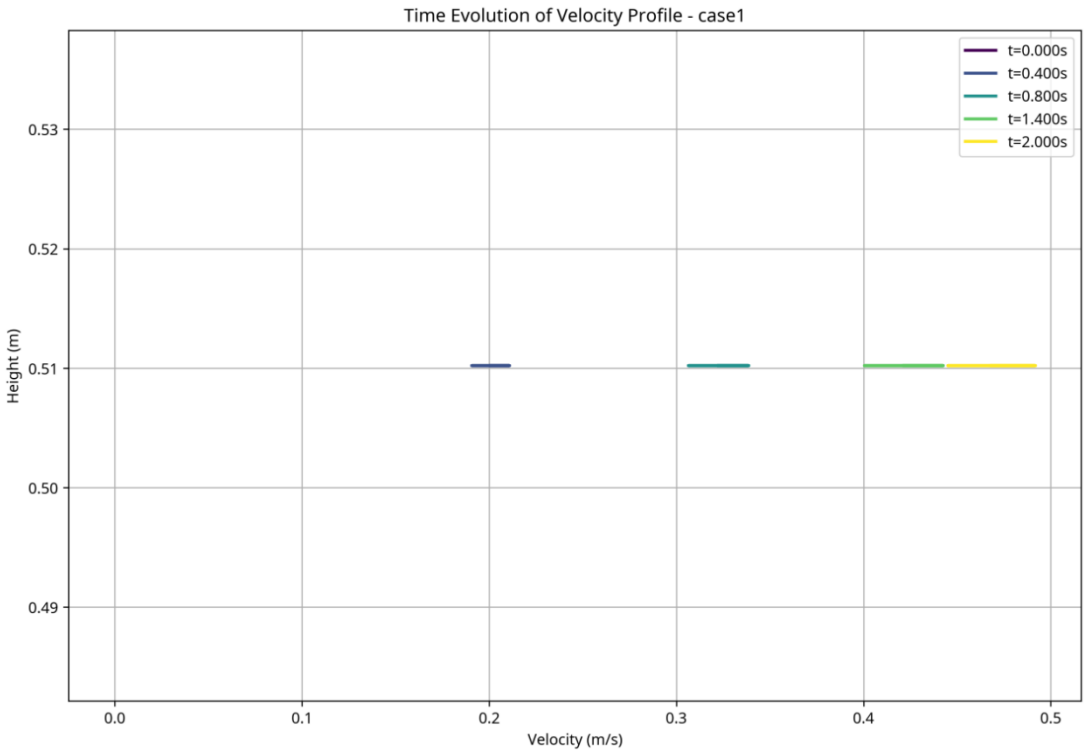





Velocity Profile at t=0.800s - case1
Height (m)
0.53
0.52
0.51
0.50
0.49
0.305
0.310
0.315
0.320
0.325
0.330
0.335
0.340
Velocity (m/s)


Velocity Profile at t=1.400s - case1
Height (m)
0.53
0.52
0.51
0.50
0.49
0.40
0.41
0.42
0.43
0.44
Velocity (m/s)





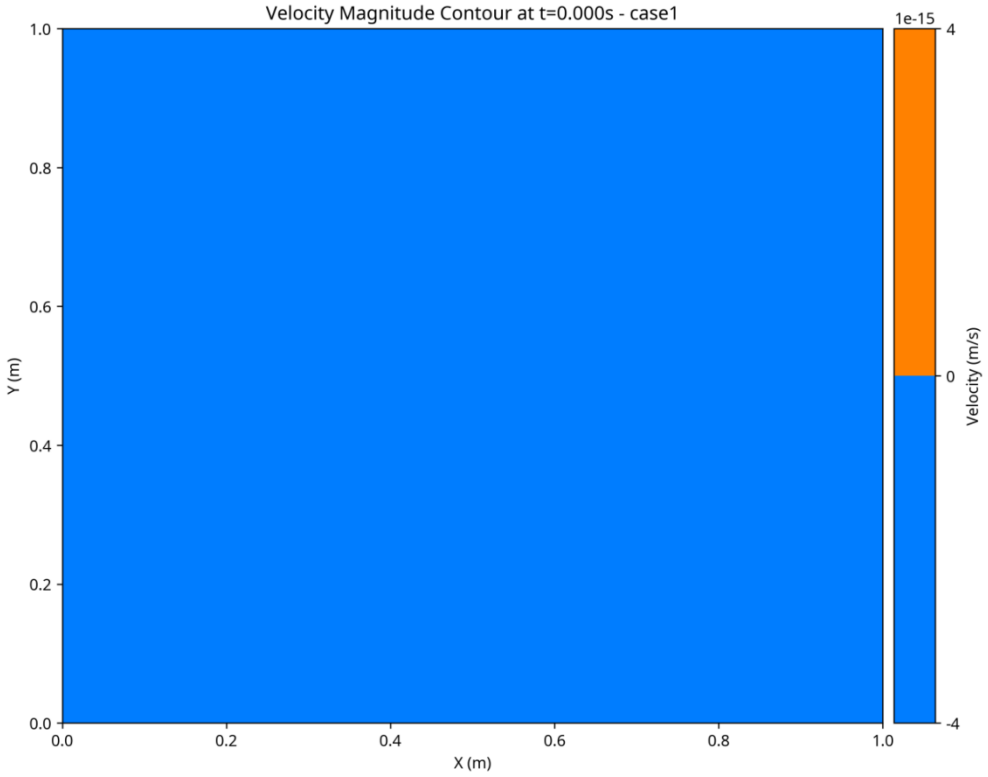
Από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε :

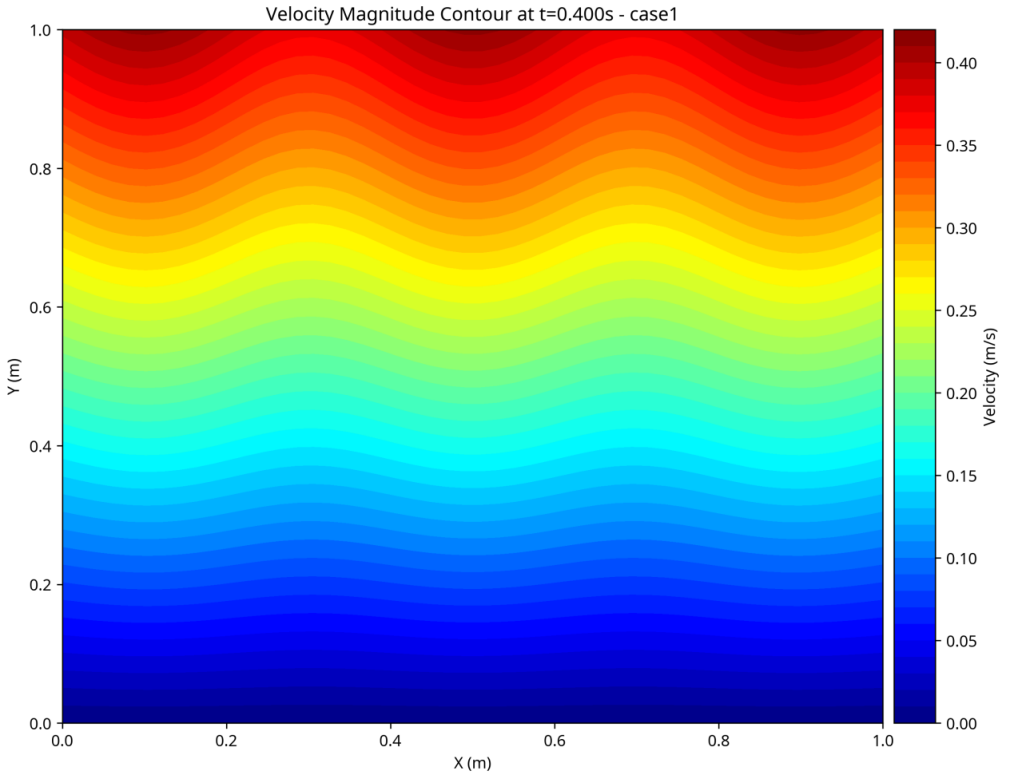
1. Στην αρχική κατάσταση όπου t=0.0 sec , η ταχύτητα είναι μηδενική σε όλο το πεδίο ροής , την αμέσως επόμενη στιγμή ορίζεται η συνθήκη όπου U=1 m/s με αποτέλεσμα να υπάρχει ταχύτητα μόνο στην πάνω πλάκα.
2. Καθώς η προσημείωση συνεχίζεται η ταχύτητα της άνω πλάκας διαδίδεται στο σύστημα προς τα κάτω λόγω της ιξώδους διάχυσης της ορμής.

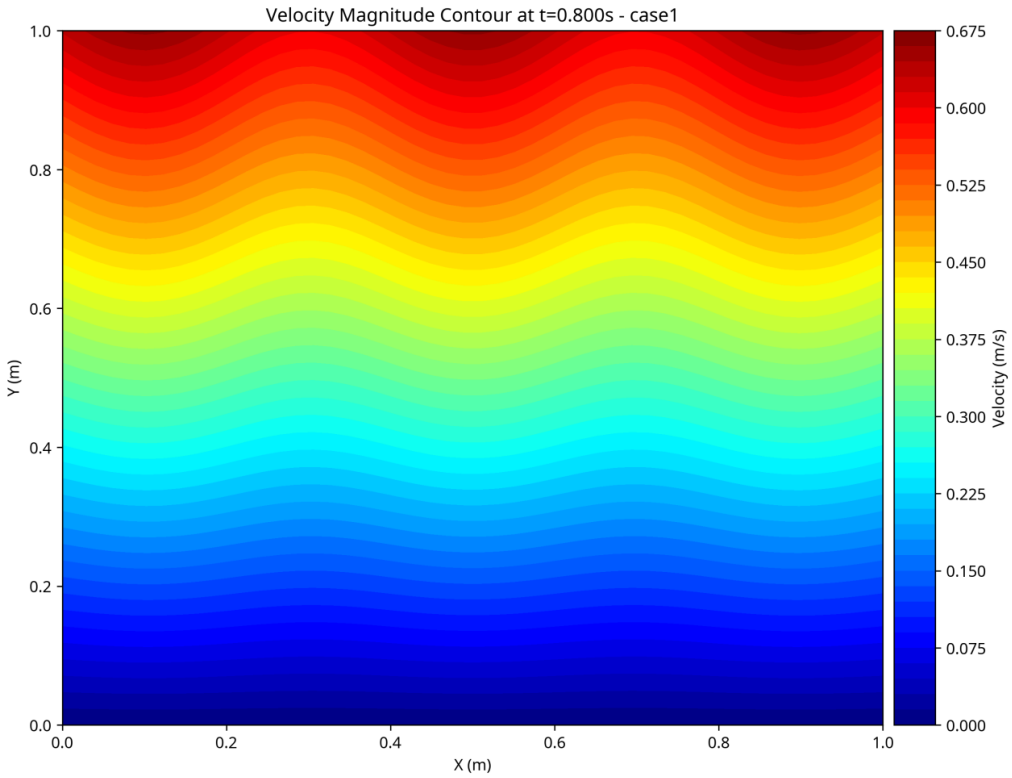
3. Στα αρχικά στάδια της προσομοίωσης έως βασικά και τα 0.8 sec το προφίλ δεν είναι απόλυτα γραμμικό , η ροή δεν είναι σε μόνιμη κατάσταση με αποτέλεσμα να υπάρχουν ανεβοκατεβάσματα στο προφίλ της ταχύτητας (στιγμιαία προσεγγίζει το γραμμικό αλλά μετά αλλοιώνεται ξανά).
4. Από το t= 1.4 s και ύστερα το προφίλ κίνησης προσεγγίζει το αναμενόμενο και όσο συνεχίζεται η ροή υπάρχει βελτίωση του αποτελέσματος που προσεγγίζει αυτό που περιμένουμε να δούμε σε μια ροή Couette. Όσο πιο μεγάλο χρονικό διάστημα κρατήσει η προσημείωση τόσο πιο κοντά στο επιθυμητό αποτέλεσμα θα είναι το προφίλ κίνησης.

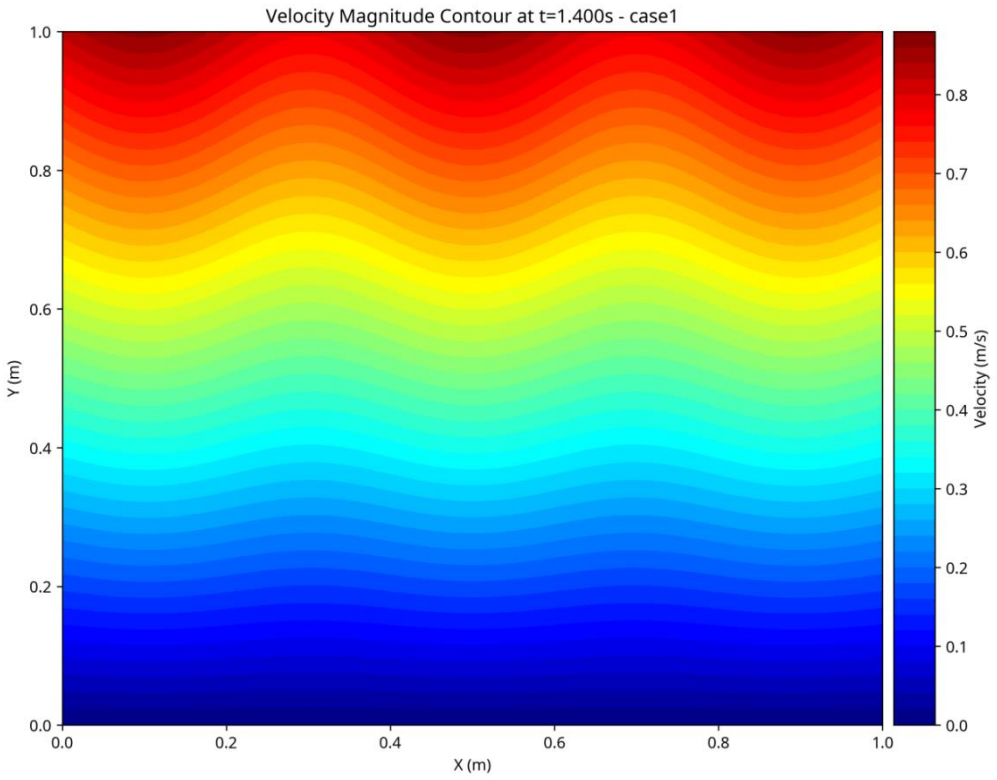
3.2.2.Περιγράμματα Ταχύτητας

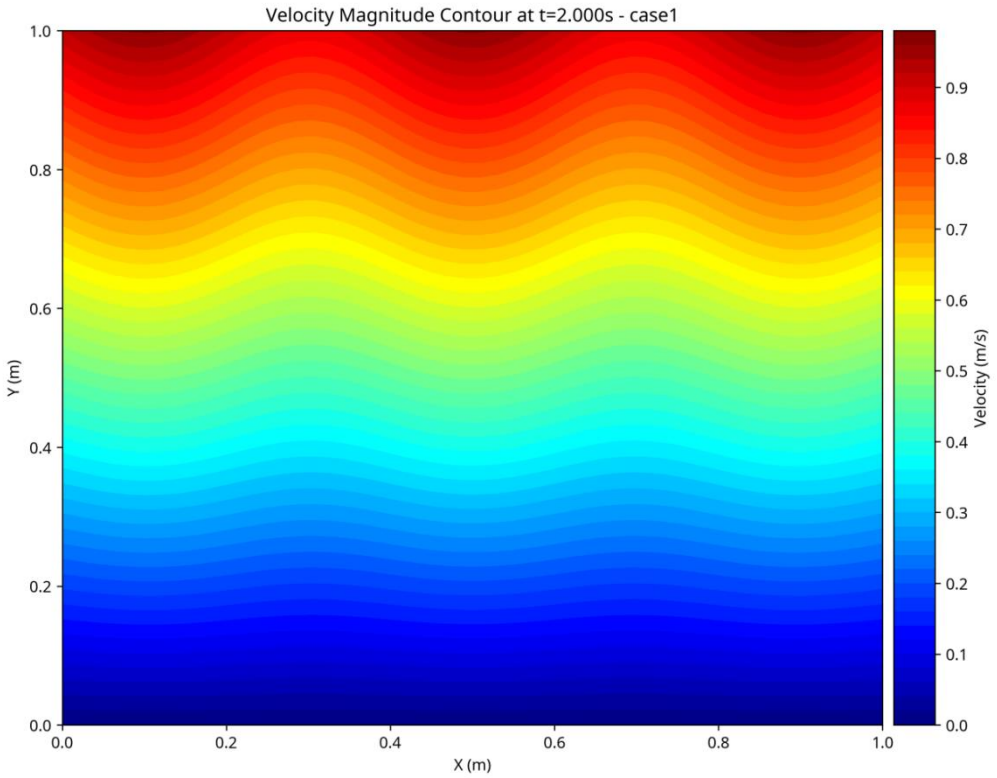
Τα περιγράμματα ταχύτητας παρέχουν μια χρωματική απεικόνιση του μέτρου της ταχύτητας σε όλο το πεδίο ροής .




Velocity Magnitude Contour at t=0.400s - case1
Y (m)
X (m)
Velocity (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
0.30
0.35
0.40


Velocity Magnitude Contour at t=0.800s - case1
Y (m)
X (m)
Velocity (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.000
0.075
0.150
0.225
0.300
0.375
0.450
0.525
0.600
0.675





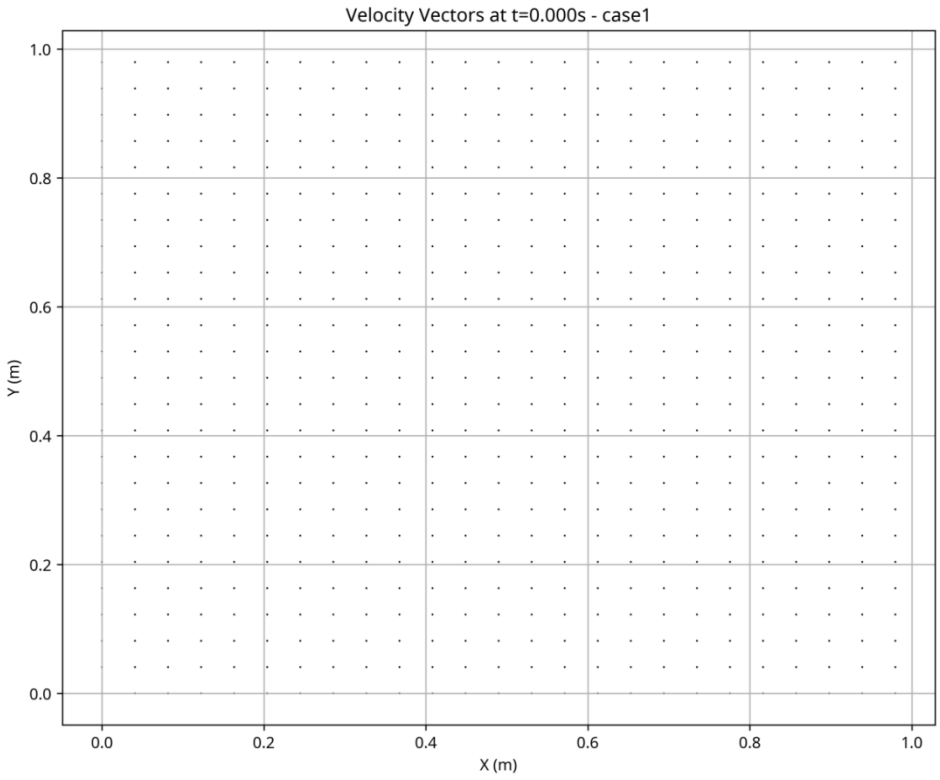
Από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε :

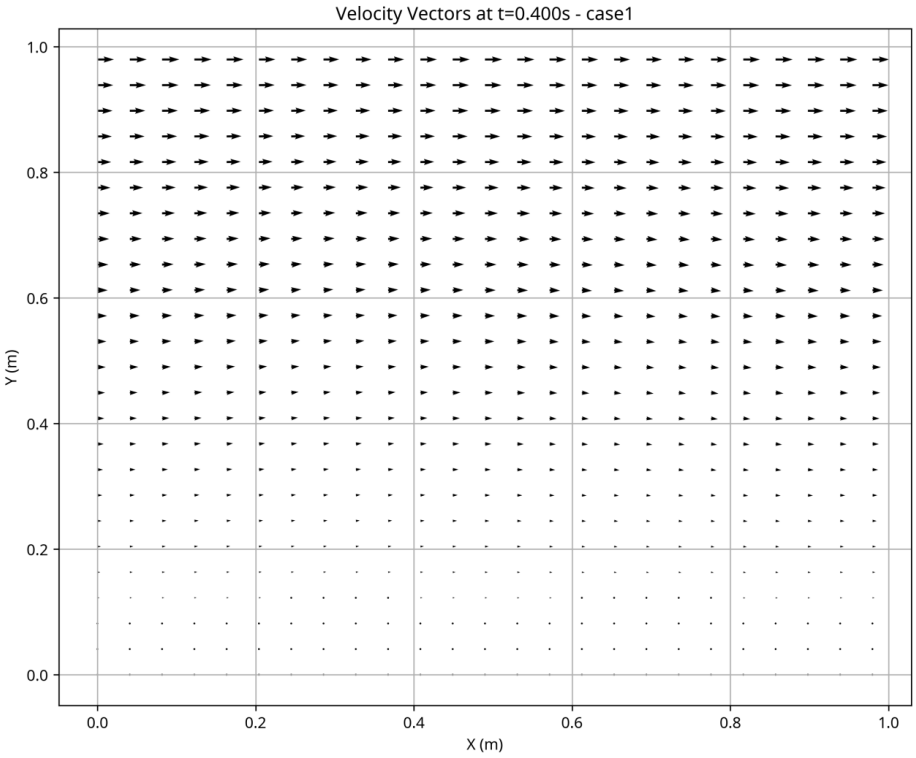
1. Στην αρχική κατάσταση (t=0.0 sec) η ταχύτητα είναι μηδέν σε όλο το πεδίο της ροής.

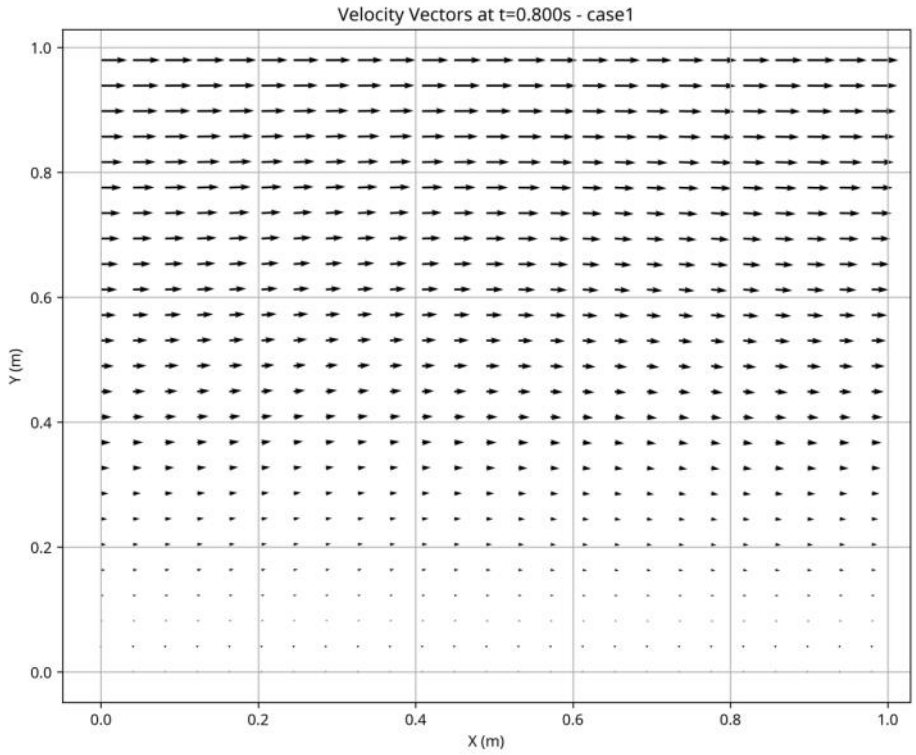
2. Καθώς η προσημείωση εξελίσσεται η ταχύτητα μεταδίδεται από την άνω πλάκα προς τα κάτω , δημιουργώντας έτσι διαφορετικές ζώνες ταχύτητας.
3. Στο αρχικό στάδιο της προσομοίωσης (έως και για t=0.8s) οι ζώνες ταχύτητας είναι πιο έντονες και ευμετάβλητες καθώς επίσης δεν υπάρχει ομοιομορφία μεταξύ τους κατά την οριζόντια διεύθυνση.
4. Σε δεύτερη φάση για t=1.4s και ύστερα, παρατηρούμε ότι αρχίζει να αποκτάει το σύστημα ομοιομορφία για την οριζόντια διεύθυνση και προσεγγίζει την αναμενόμενη μονοδιάστατη ροή Couette.
5. Στο τέλος της προσομοίωσης (t=2s) το περίγραμμα είναι σχεδόν οριζόντιο και έχει προσεγγίσει τη μόνιμη κατάσταση.

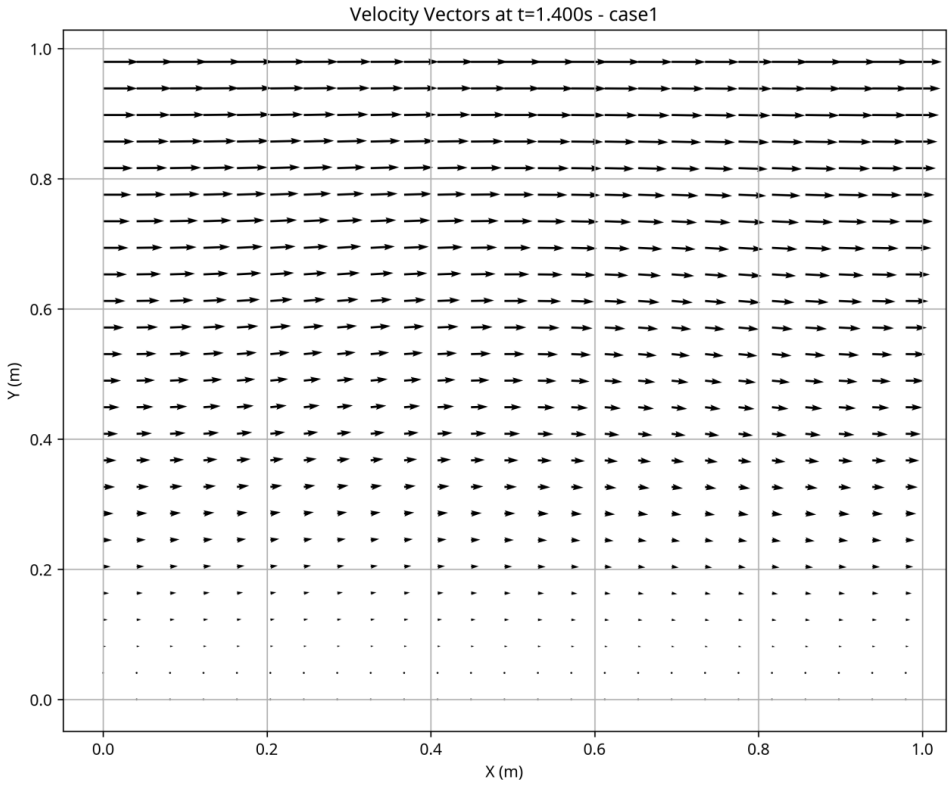
3.2.3.Διανυσματική Ταχύτητα

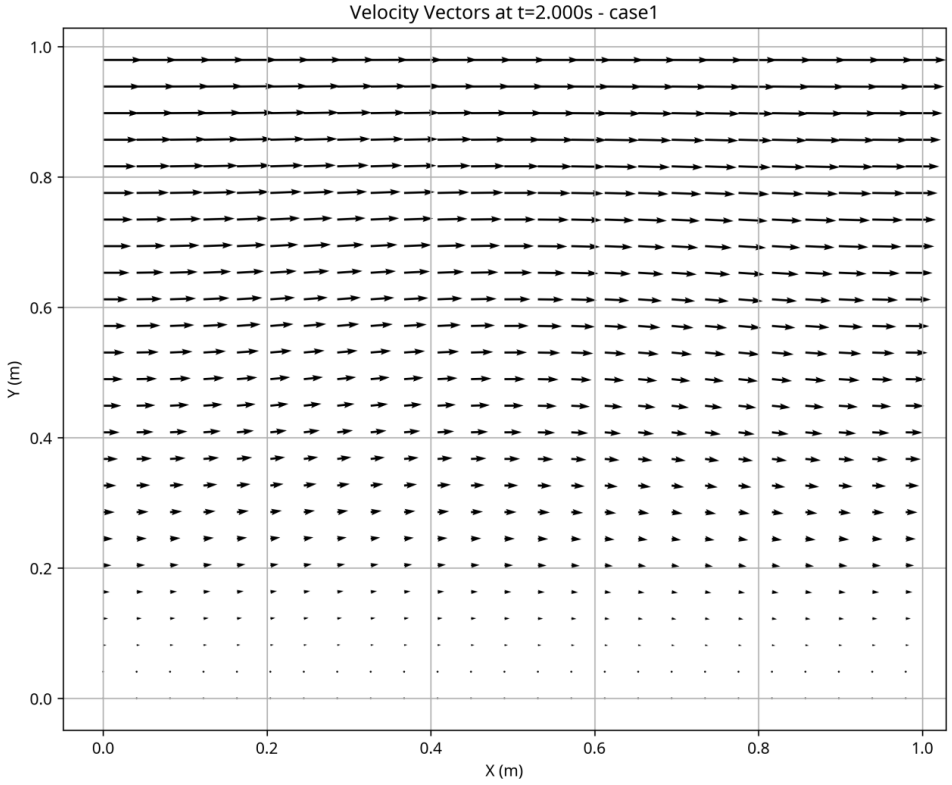
Τα διανύσματα της ταχύτητας εμπεριέχουν πληροφορίες για τη διεύθυνση και το μέτρο της ταχύτητας σε διάφορα σημεία του πεδίου ροής .




Velocity Vectors at t=0.400s - case1
Y (m)
X (m)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0


Velocity Vectors at t=0.800s - case1
Y (m)
X (m)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0





Από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι :

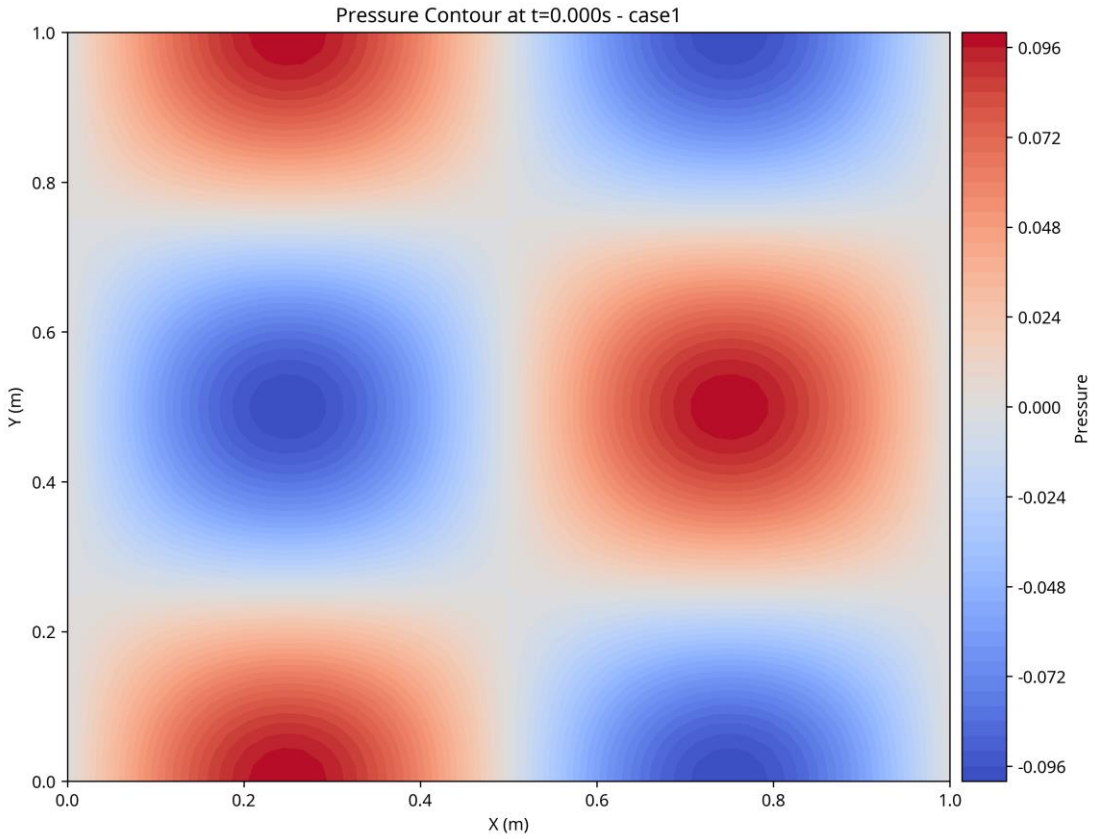
1. Στην αρχική κατάσταση (t=0.0s) , τα διανύσματα της ταχύτητας δεν είναι ορατά καθώς δεν υπάρχει καμία κίνηση .

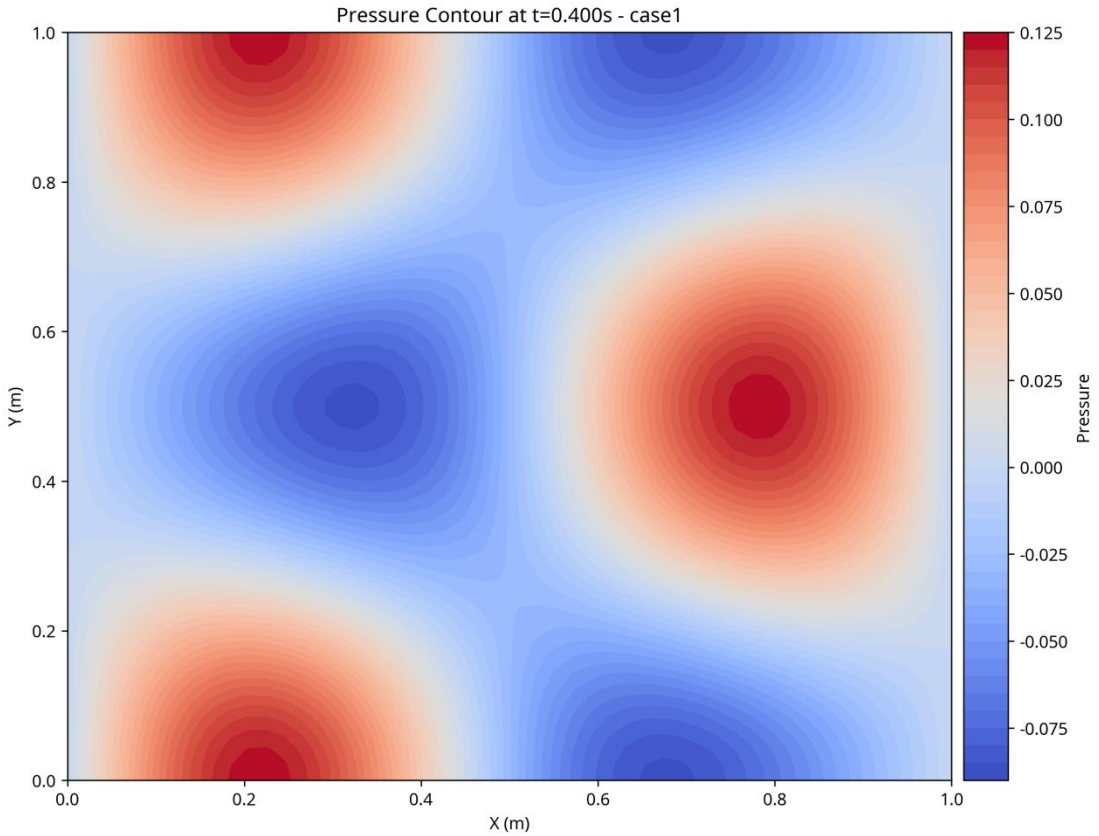
2. Καθώς η προσημείωση εκτυλίσσεται, τα διανύσματα της ταχύτητας είναι ορατά , εμφανίζονται έντονα στην άνω πλάκα και παρουσιάζονται σημάδια φθοράς όσο πλησιάζει προς την κάτω πλάκα.
3. Στην αρχή της προσομοίωσης έως και για t=0.8 sec τα διανύσματα ταχύτητας δείχνουν μικρότερη συνιστώσα υποδεικνύοντας ότι η ροή δεν είναι πλήρως μονοδιάστατη ακόμα.
4. Αφού η ροή τρέξει και περάσει το t=1.4s τα διανύσματα της ταχύτητας είναι σχεδόν παράλληλα με την οριζόντια διεύθυνση , δεδομένο το οποίο αποδεικνύει ότι η ροή προσεγγίζει τη μόνιμη , μονοδιάστατη κατάσταση της.
5. Στο τέλος της προσομοίωσης το αποτέλεσμα των διανυσμάτων της ταχύτητας υποδεικνύει ότι η ροή κινείται με βάση τις αρχές Couette.

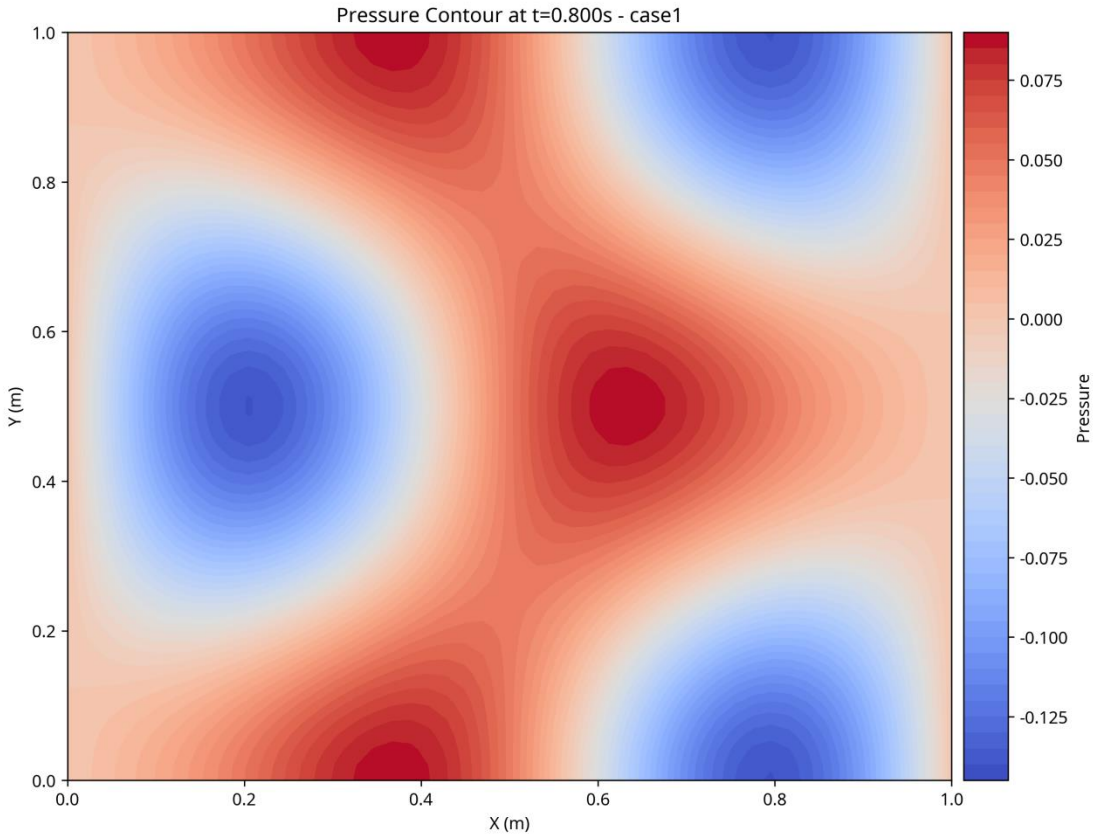
3.2.4 Περιγράμματα Πίεσης

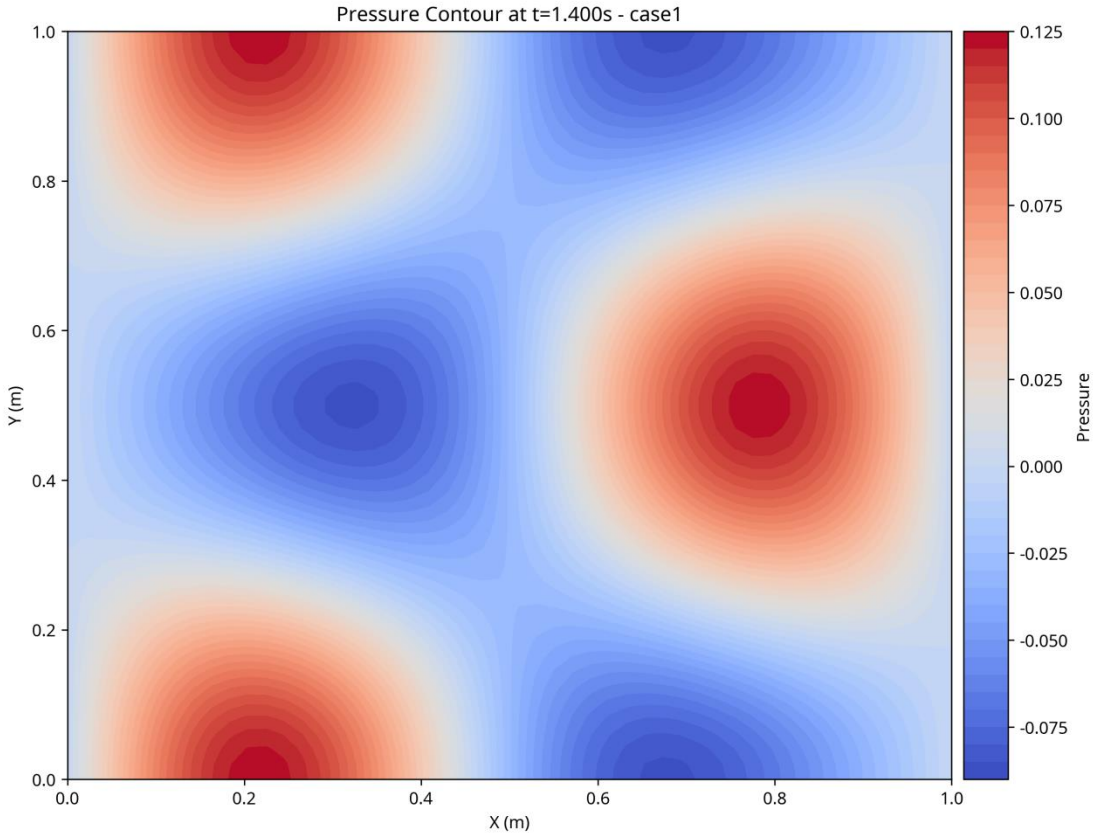
Τα περιγράμματα πίεσης παρέχουν μια χρωματική απεικόνιση της πίεσης σε όλο το πεδίο της ροής .

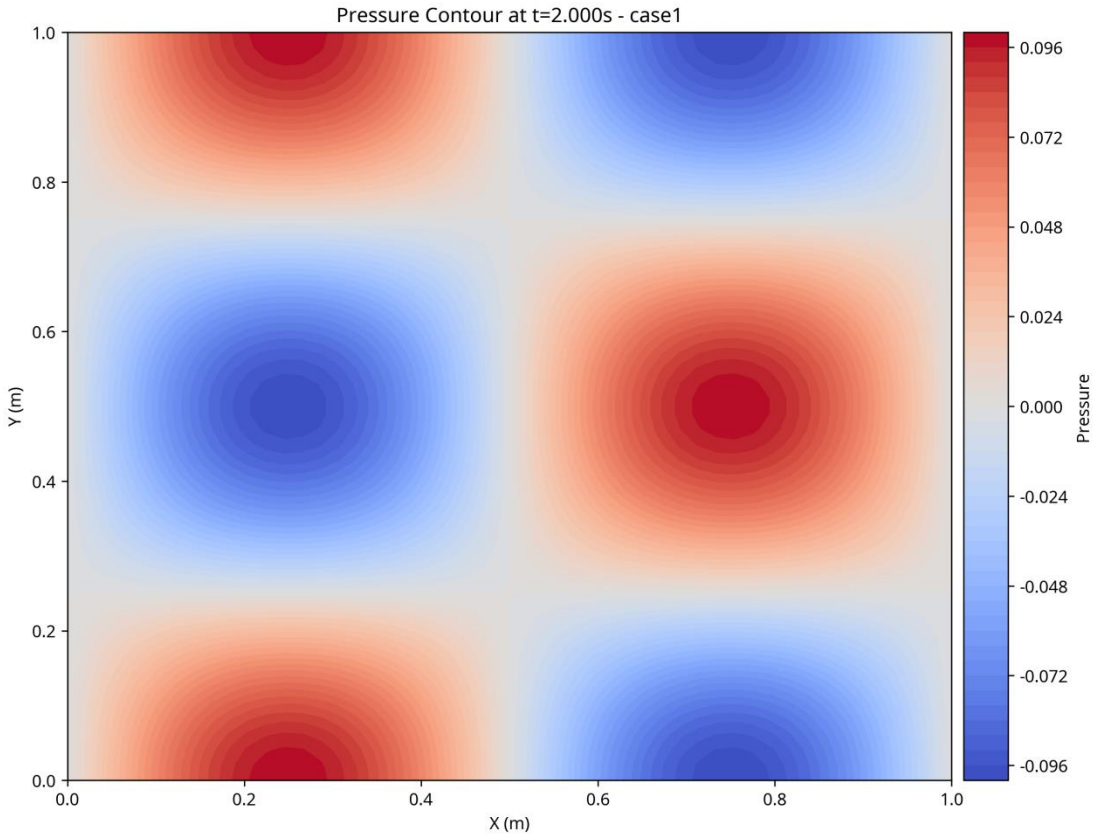
ω




Pressure Contour at t=0.400s - case1
Y (m)
X (m)
Pressure
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.125
0.100
0.075
0.050
0.025
0.000
-0.025
-0.050
-0.075


Pressure Contour at t=0.800s - case1
Y (m)
X (m)
Pressure
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.075
0.050
0.025
0.000
-0.025
-0.050
-0.075
-0.100
-0.125


Pressure Contour at t=1.400s - case1
Y (m)
X (m)
Pressure
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.125
0.100
0.075
0.050
0.025
0.000
-0.025
-0.050
-0.075

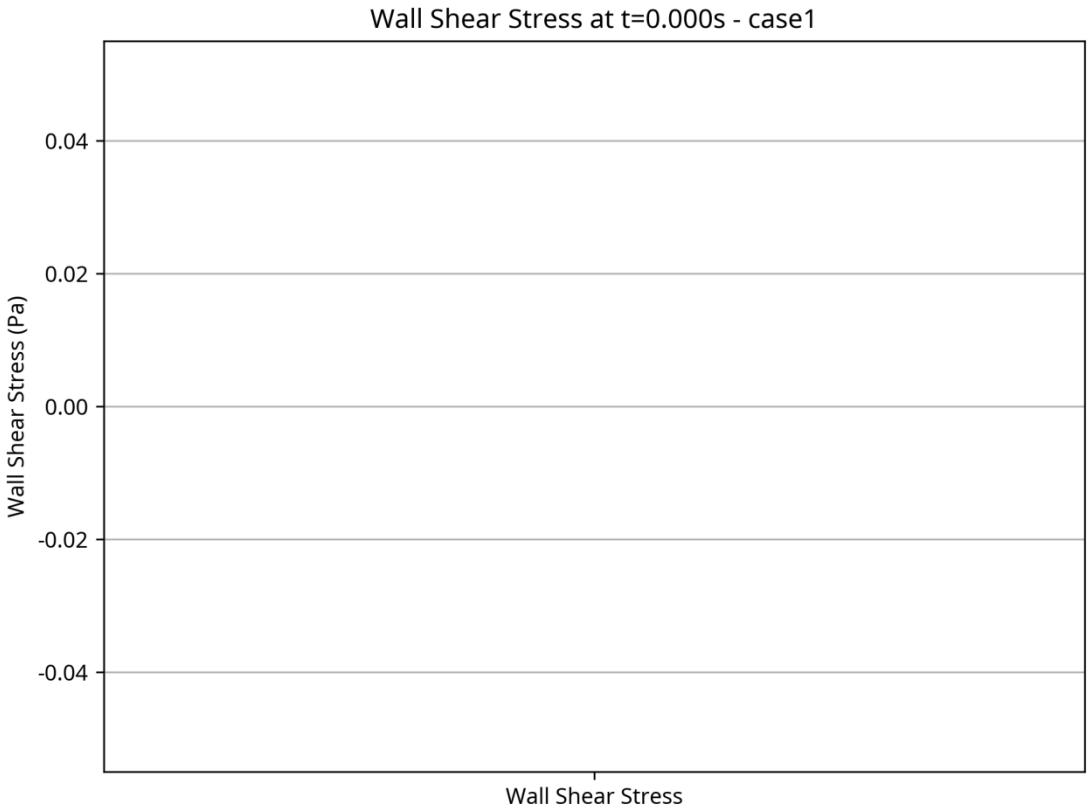


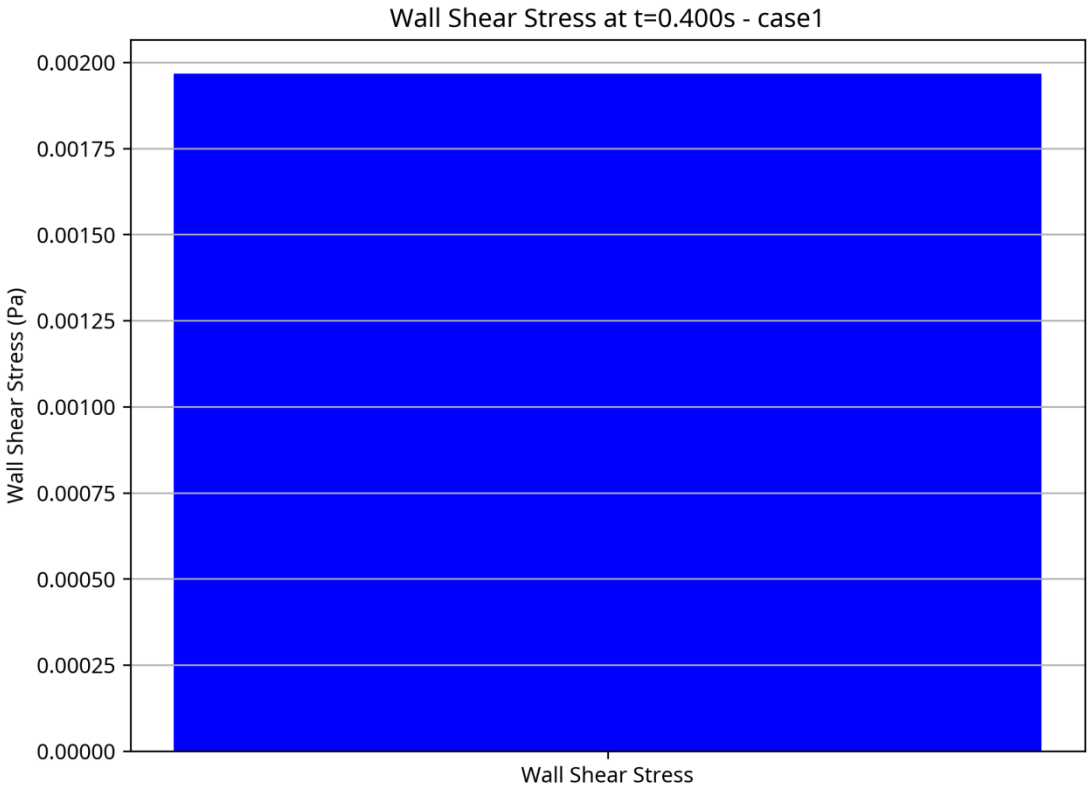
Από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι :

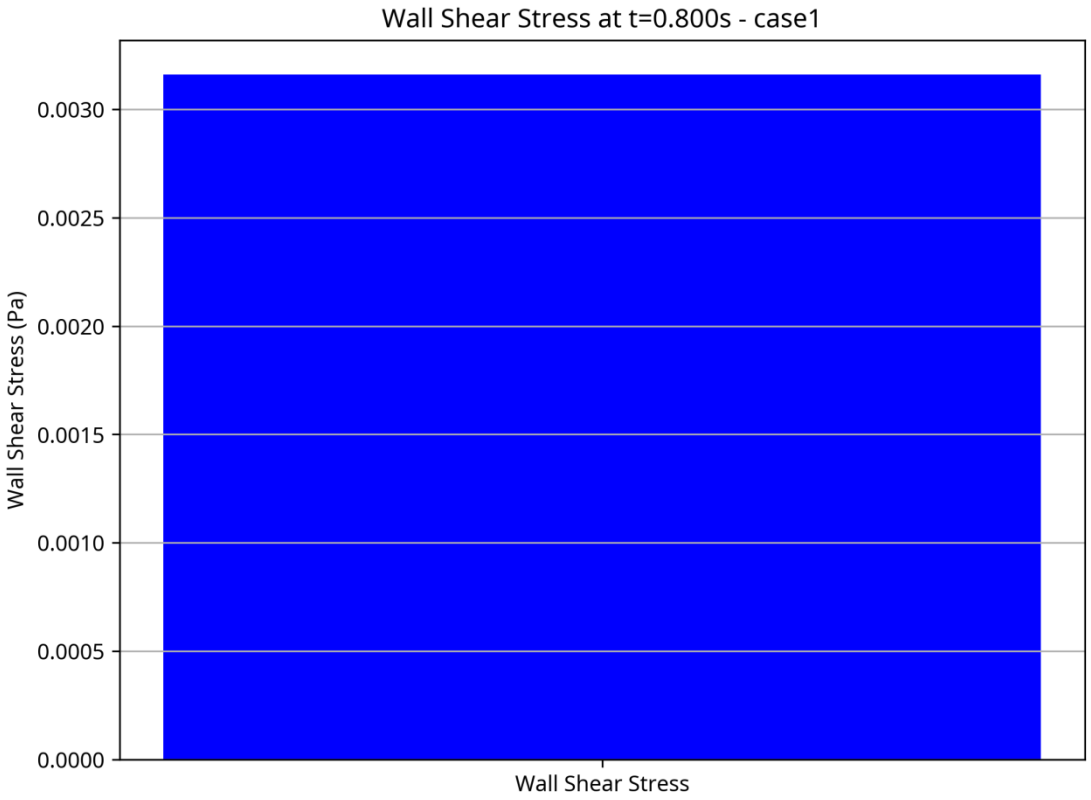
1. Στην αρχική κατάσταση (t=0sec) η πίεση είναι σχεδόν ομοιόμορφη σε όλο το πεδίο ροής , με μικρές διακυμάνσεις.
2. Καθώς η προσομοίωση εξελίσσεται , εμφανίζονται μικρές διακυμάνσεις πίεσης σε όλο το πεδίο ροής .
3. Οι διακυμάνσεις πίεσης είναι σχετικά μικρές σε μέγεθος , καθώς η ροή Couette είναι μια απλή ροή χωρίς σημαντικές κλίσεις πίεσης .
4. Στα μεταγενέστερα στάδια (από t=1.4 sec και ύστερα) οι διακυμάνσεις πίεσης μειώνονται καθώς η ροή προσεγγίζει τη μόνιμη κατάσταση .
5. Στο τέλος της προσομοίωσης (t= 2.0 sec) η πίεση είναι σχεδόν ομοιόμορφη όπως την αρχική κατάσταση .

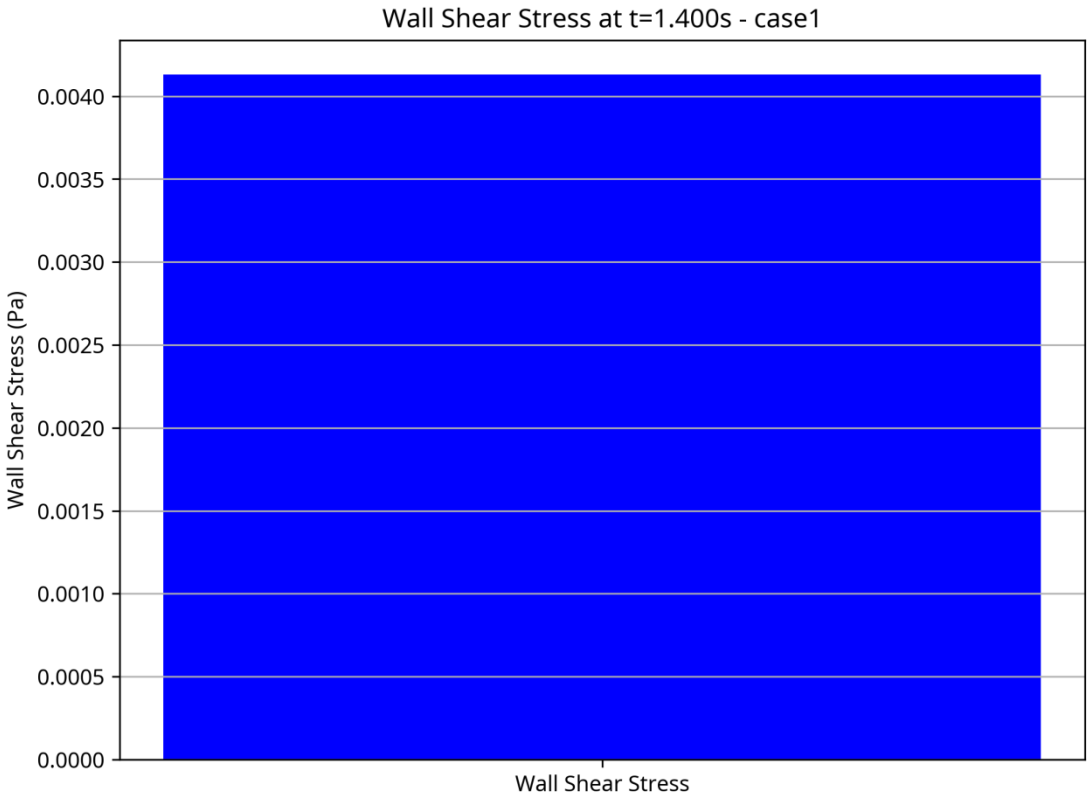
3.2.5. Διηγηματική Τάση Τοιχώματος

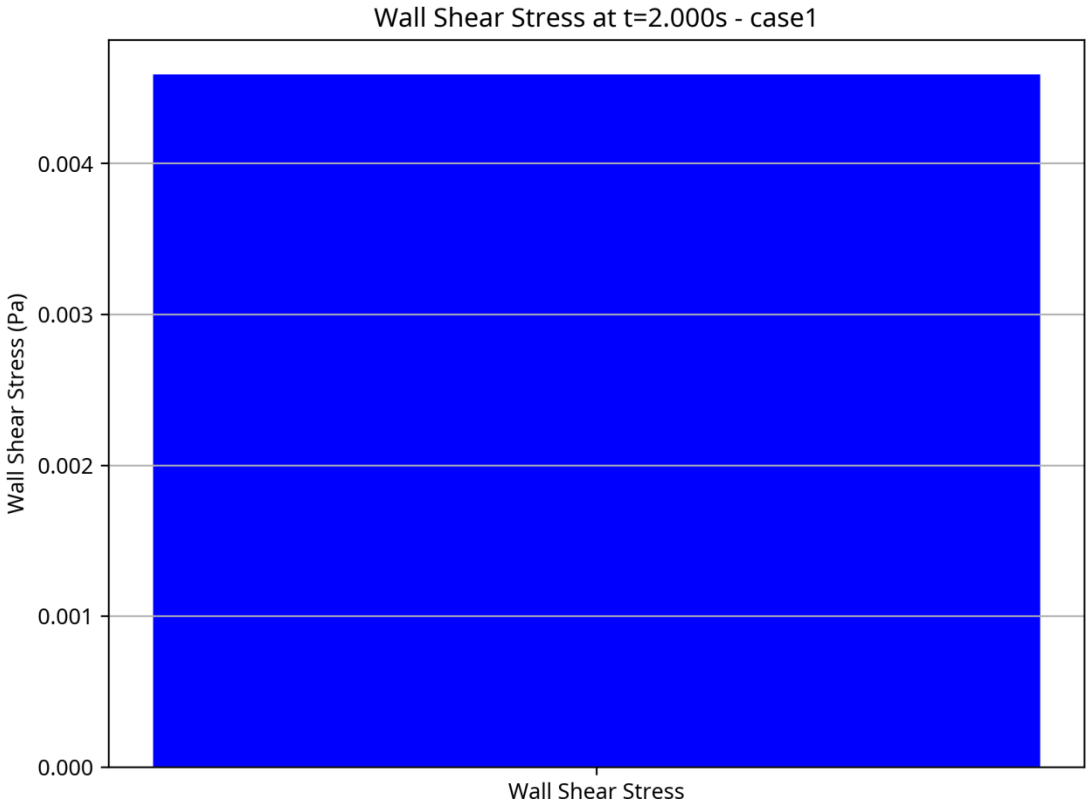
Η διατμηματική τάση τοιχώματος είναι ένα σημαντικό μέγεθος στη ροή Couette , καθώς σχετίζεται άμεσα με τη κλίση της ταχύτητας του τοιχώματος .




Wall Shear Stress at t=0.400s - case1
Wall Shear Stress (Pa)
0.00200
0.00175
0.00150
0.00125
0.00100
0.00075
0.00050
0.00025
0.00000
Wall Shear Stress


Wall Shear Stress at t=0.800s - case1
Wall Shear Stress (Pa)
0.0030
0.0025
0.0020
0.0015
0.0010
0.0005
0.0000
Wall Shear Stress





Από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι :

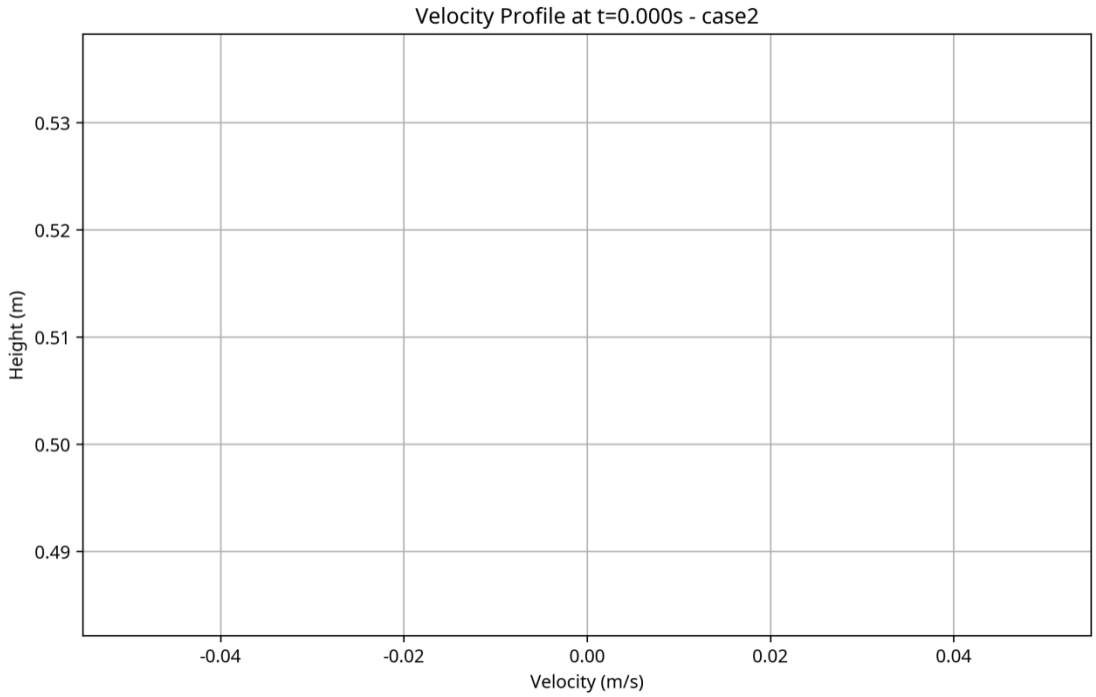
1. Στην αρχική κατάσταση (t=0sec) , η διατμηματική τάση τοιχώματος είναι μηδενική , καθώς η ταχύτητα είναι μηδενική σε όλο το πεδίο ροής .

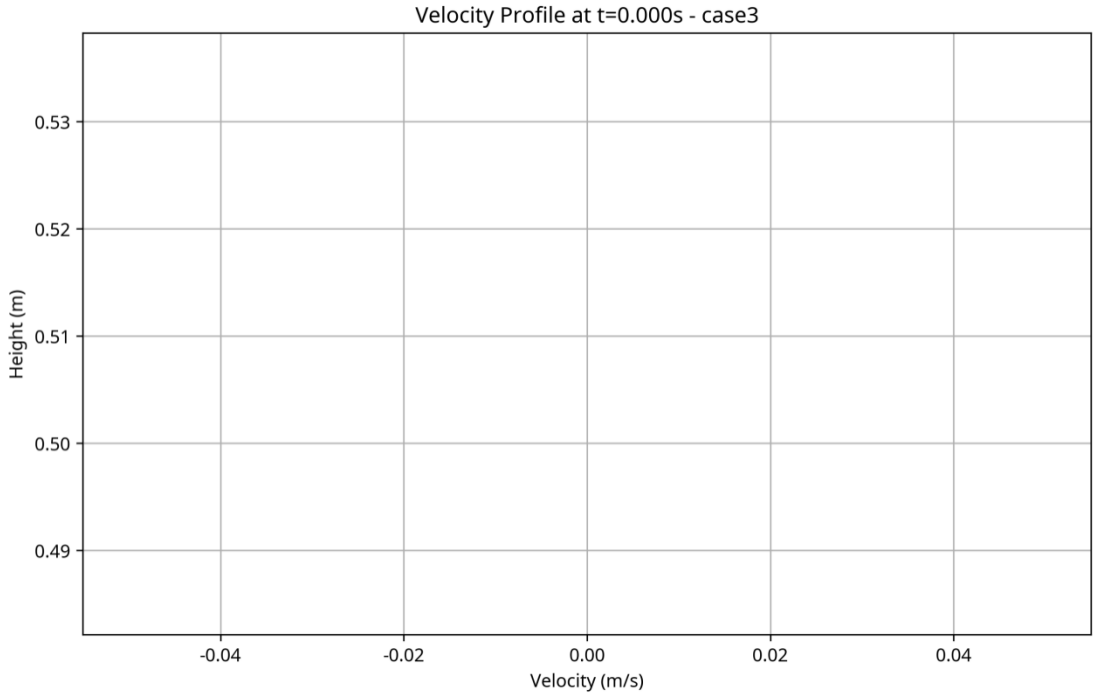
2. Καθώς η προσομοίωση εξελίσσεται , η διατμιματική τάση τοιχώματος αυξάνεται , καθώς η ταχύτητα διαδίδεται από την άνω πλάκα προς τα κάτω.
3. Η διατμηματική τάση τοιχώματος προσεγγίζει σταδιακά την αναλυτική τιμή για τη μόνιμη κατάσταση της ροής Couette , η οποία είναι
4. $\rho \cdot \nu \cdot (\frac{U}{h}) = 1 \cdot 0{,}005 \cdot (\frac{1}{1}) = 0{,}005 Pa$
5. Στο τέλος της προσομοίωσης η διατμηματική τάση έχει προσεγγίσει την αναλυτική τιμή , με μικρή απόκλιση η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι η ροή δεν έχει φτάσει ακόμα τη πλήρη μόνιμη κατάσταση (σε περίπτωση που γινόταν μελέτη της ροής για παραπάνω χρονικό διάστημα , η τιμή θα είχε πολύ μικρή απόκλιση αν όχι δεν ήταν ακριβώς).

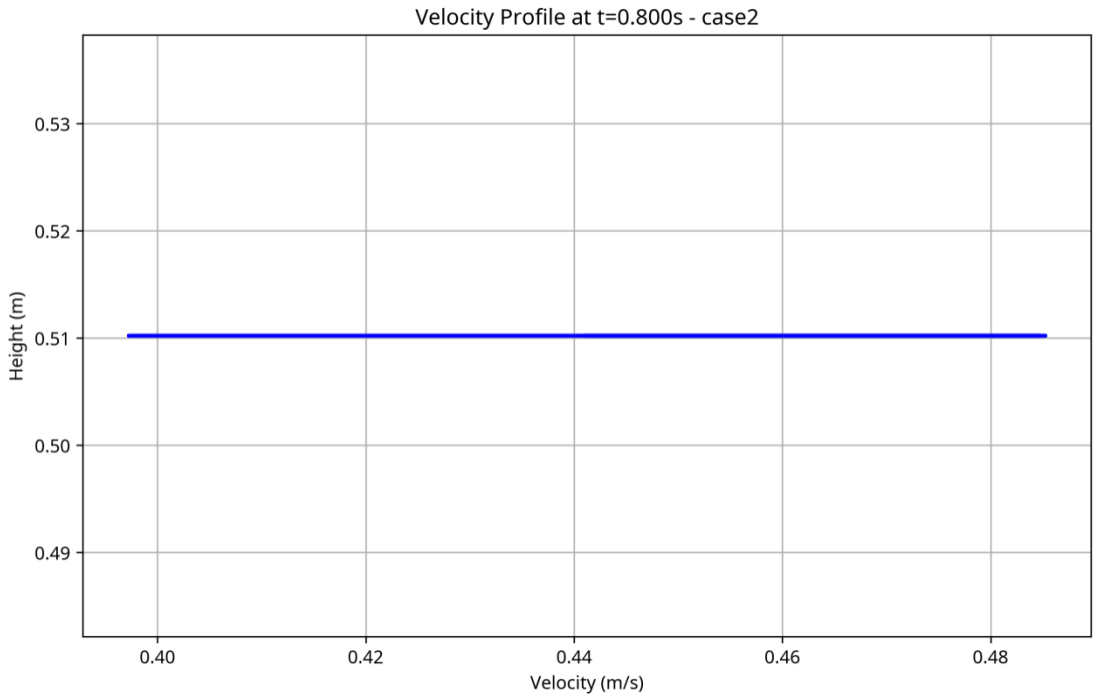
3.3.Ανάλυση της Δεύτερης και τρίτης Προσομοίωσης (Μεσαίο και Υψηλό Ιξώδες) αντίστοιχα

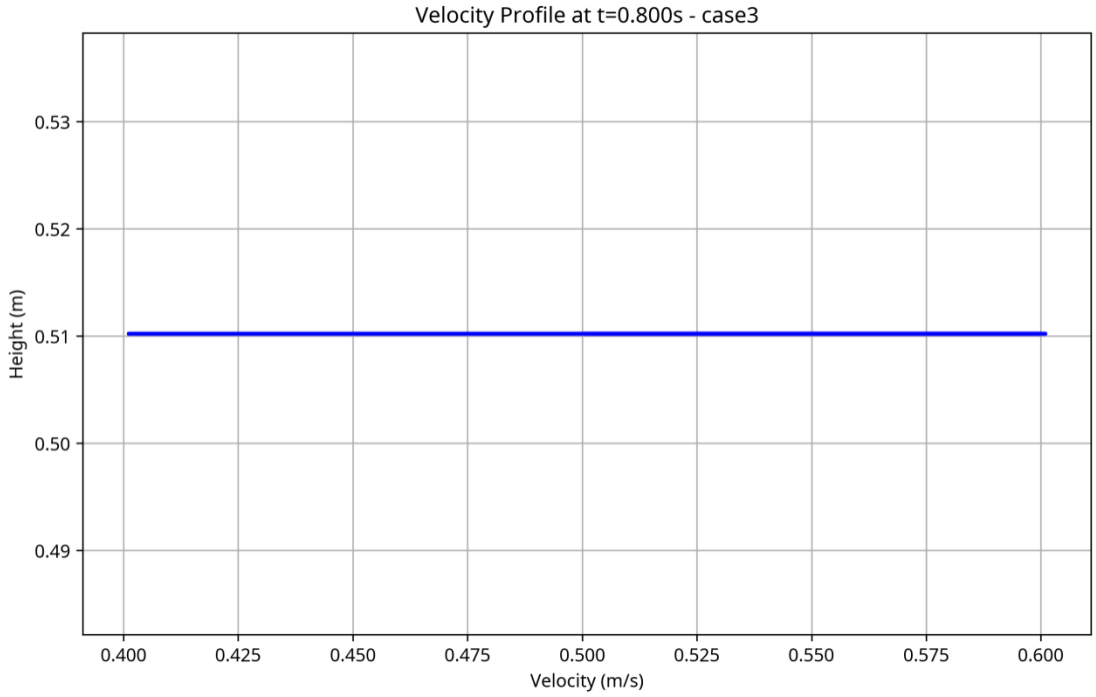
Σε αυτή την ενότητα θα γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων της δεύτερης και Τρίτης προσομοίωσης όπου το ιξώδες στη Δεύτερη περίπτωση είναι (ν = 0.01 m^2/s) και αριθμό Reynolds Re=100 , ενώ στη Τρίτη το ιξώδες είναι ν=0 (ν = 0.02 m^2/s) και αριθμό Reynolds Re = 50.

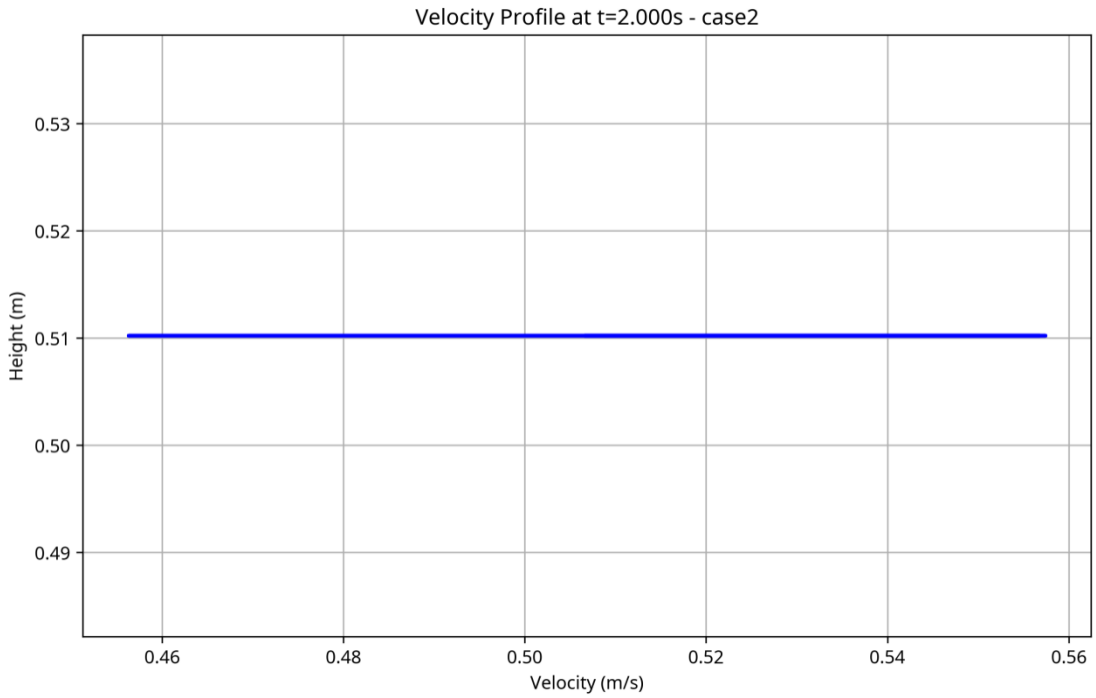
3.3.1. Προφίλ Ταχύτητας

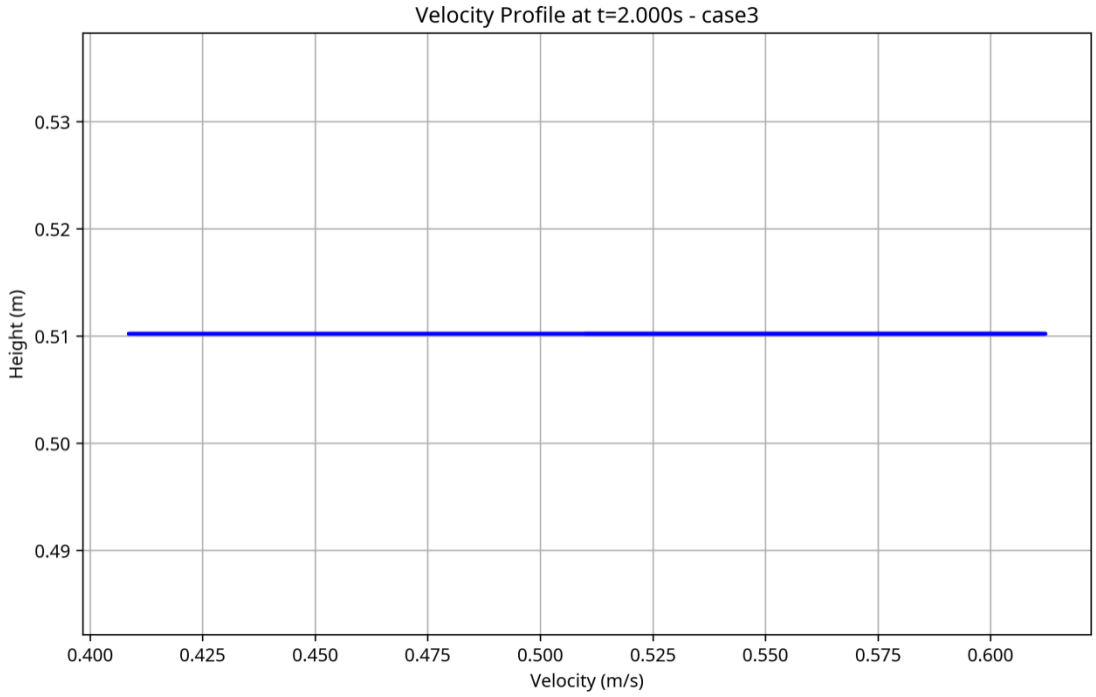


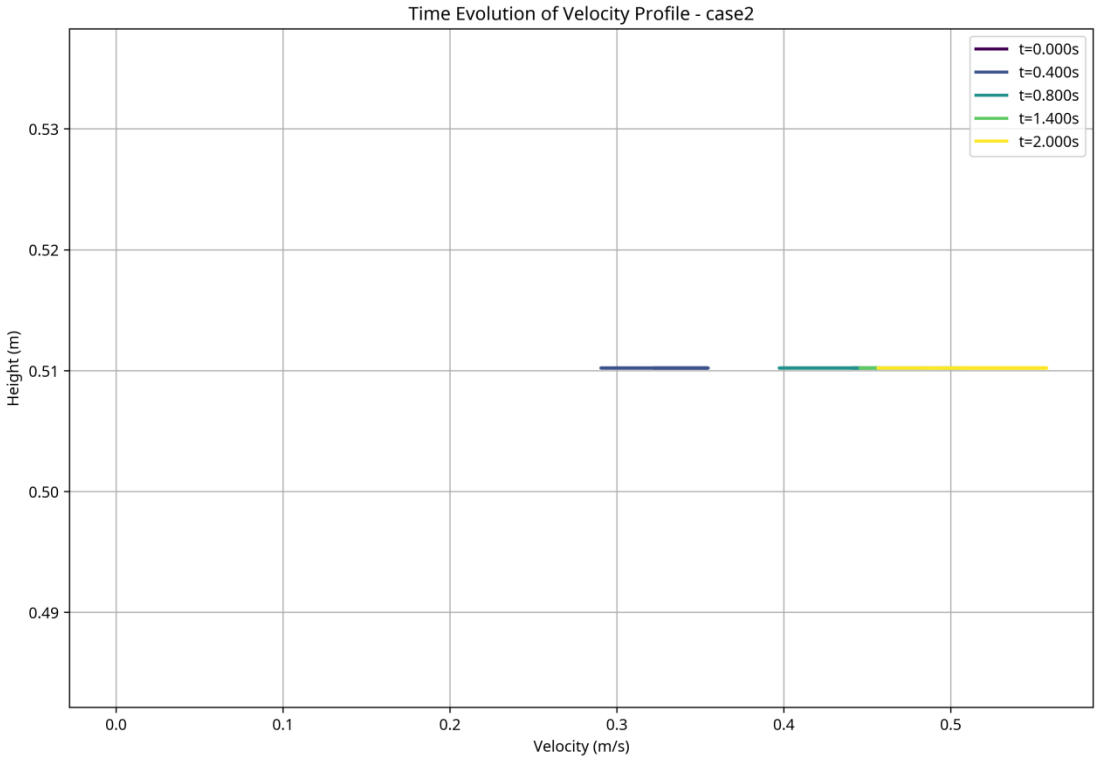


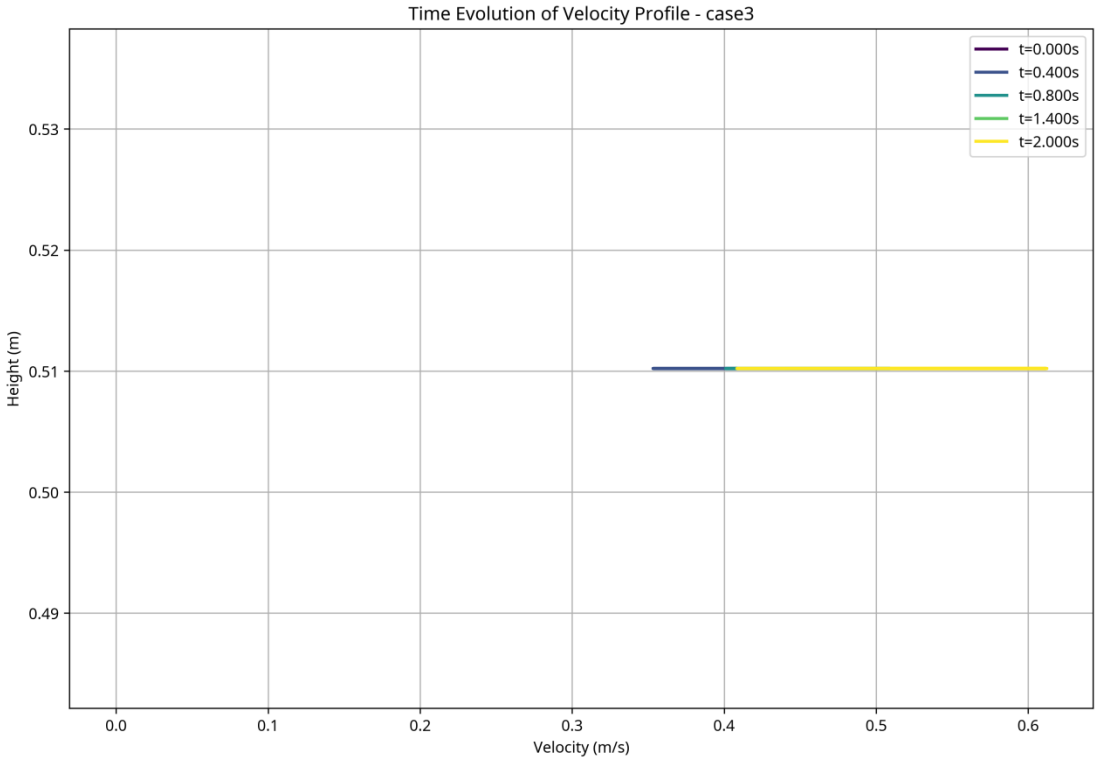

Velocity Profile at t=0.800s - case2
Height (m)
0.53
0.52
0.51
0.50
0.49
0.40
0.42
0.44
0.46
0.48
Velocity (m/s)


Velocity Profile at t=0.800s - case3
Height (m)
0.53
0.52
0.51
0.50
0.49
0.400
0.425
0.450
0.475
0.500
0.525
0.550
0.575
0.600
Velocity (m/s)

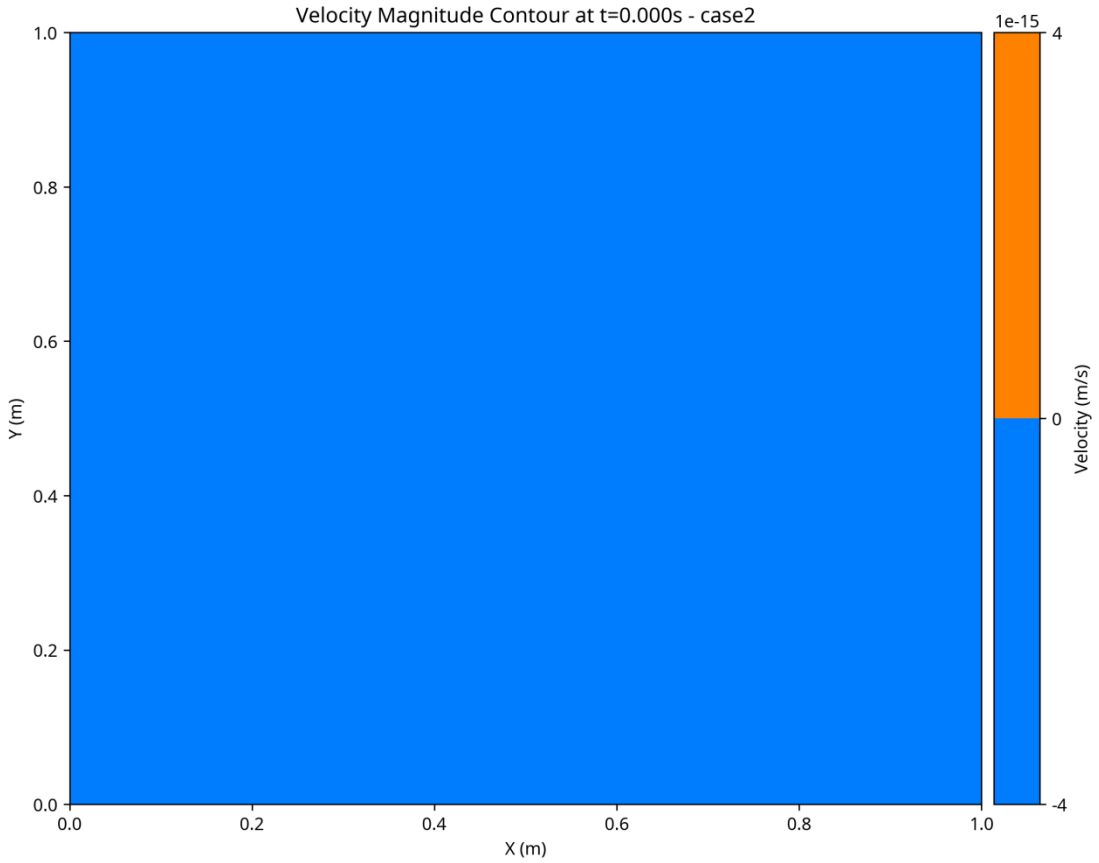

Velocity Profile at t=2.000s - case2
Height (m)
0.53
0.52
0.51
0.50
0.49
0.46
0.48
0.50
0.52
0.54
0.56
Velocity (m/s)

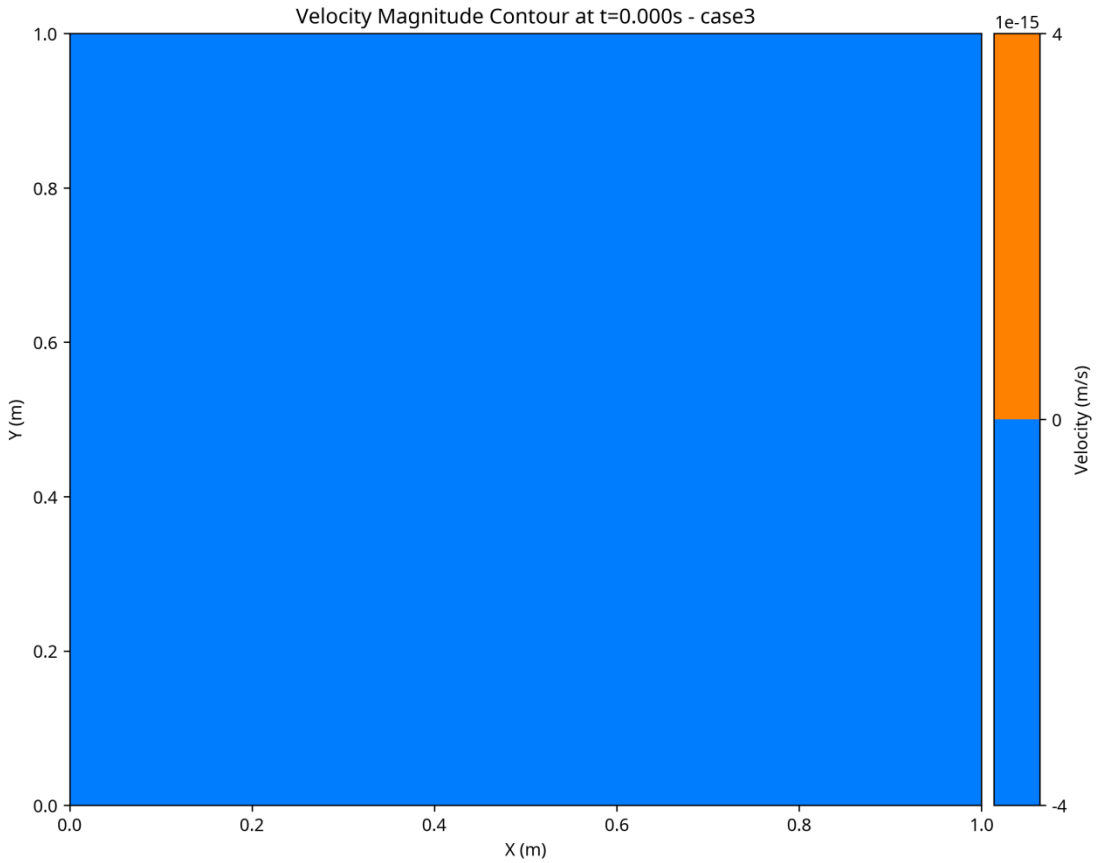

Velocity Profile at t=2.000s - case3
Height (m)
0.53
0.52
0.51
0.50
0.49
0.400
0.425
0.450
0.475
0.500
0.525
0.550
0.575
0.600
Velocity (m/s)

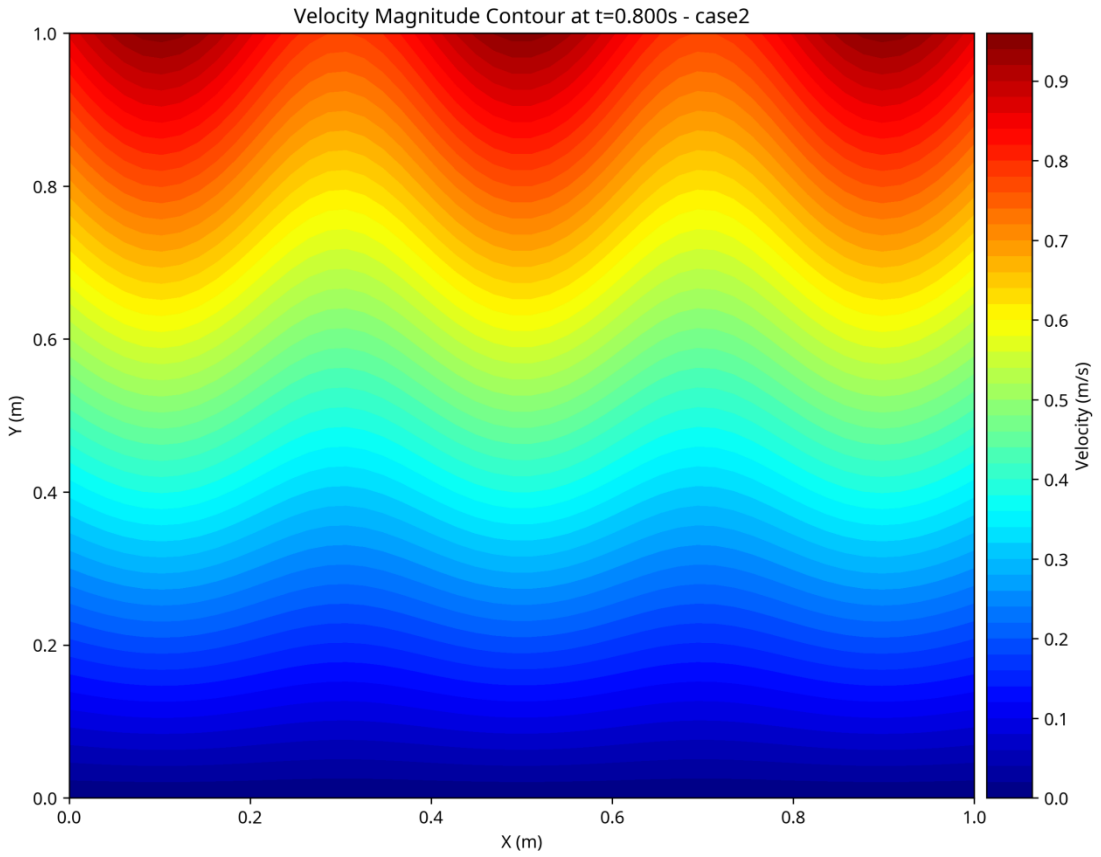

Time Evolution of Velocity Profile - case2
t=0.000s
t=0.400s
t=0.800s
t=1.400s
t=2.000s
Height (m)
0.53
0.52
0.51
0.50
0.49
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
Velocity (m/s)

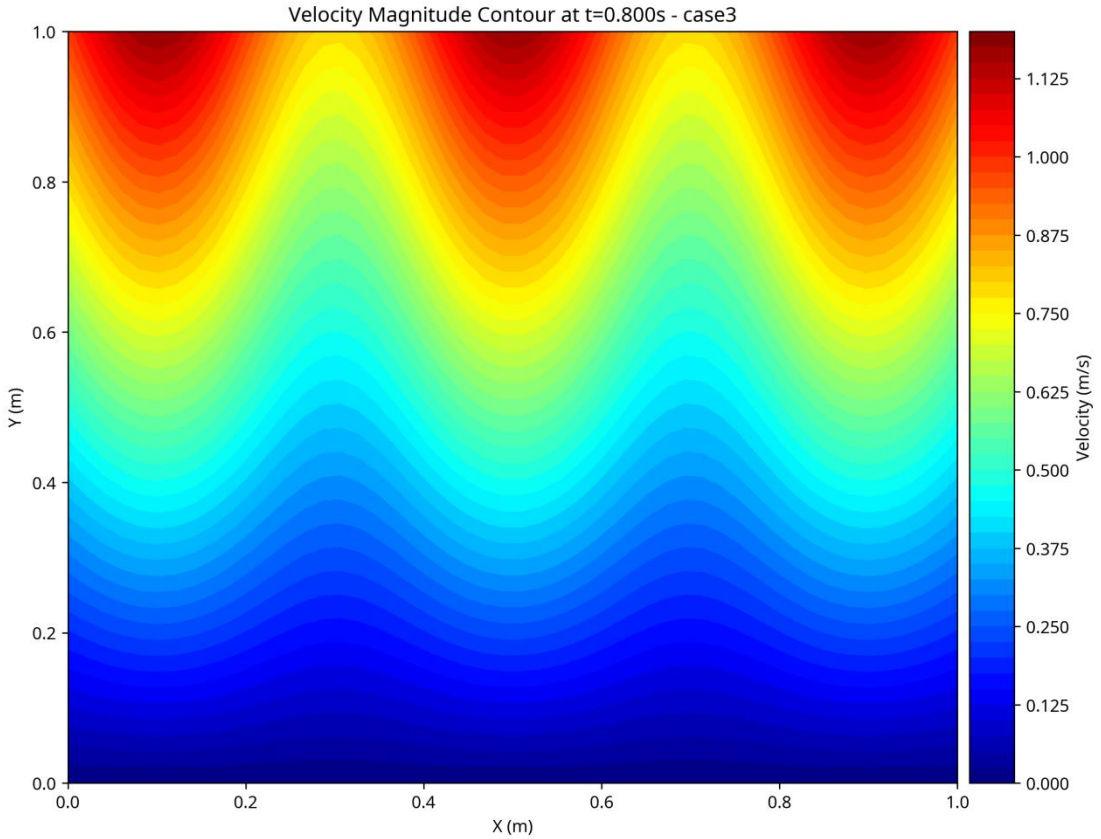

Time Evolution of Velocity Profile - case3
t=0.000s
t=0.400s
t=0.800s
t=1.400s
t=2.000s
Height (m)
0.53
0.52
0.51
0.50
0.49
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
Velocity (m/s)

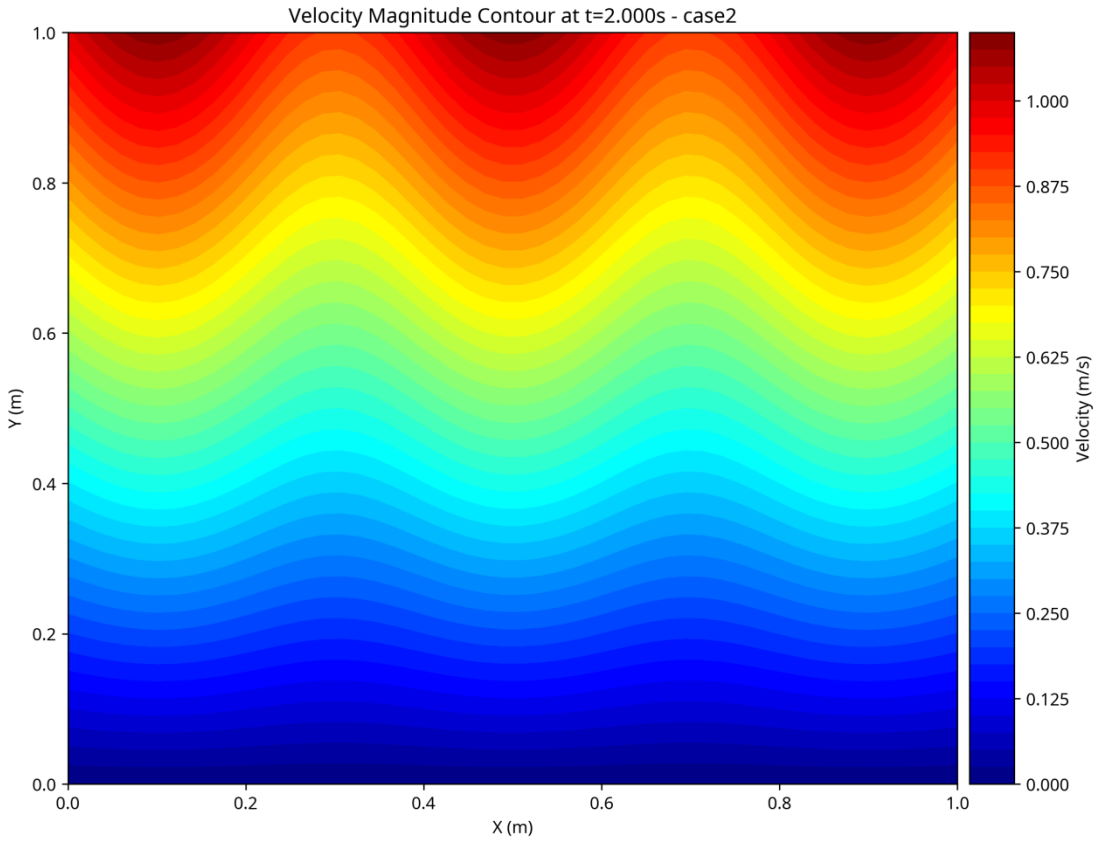
3.3.2 Περίγραμμα ταχύτητας

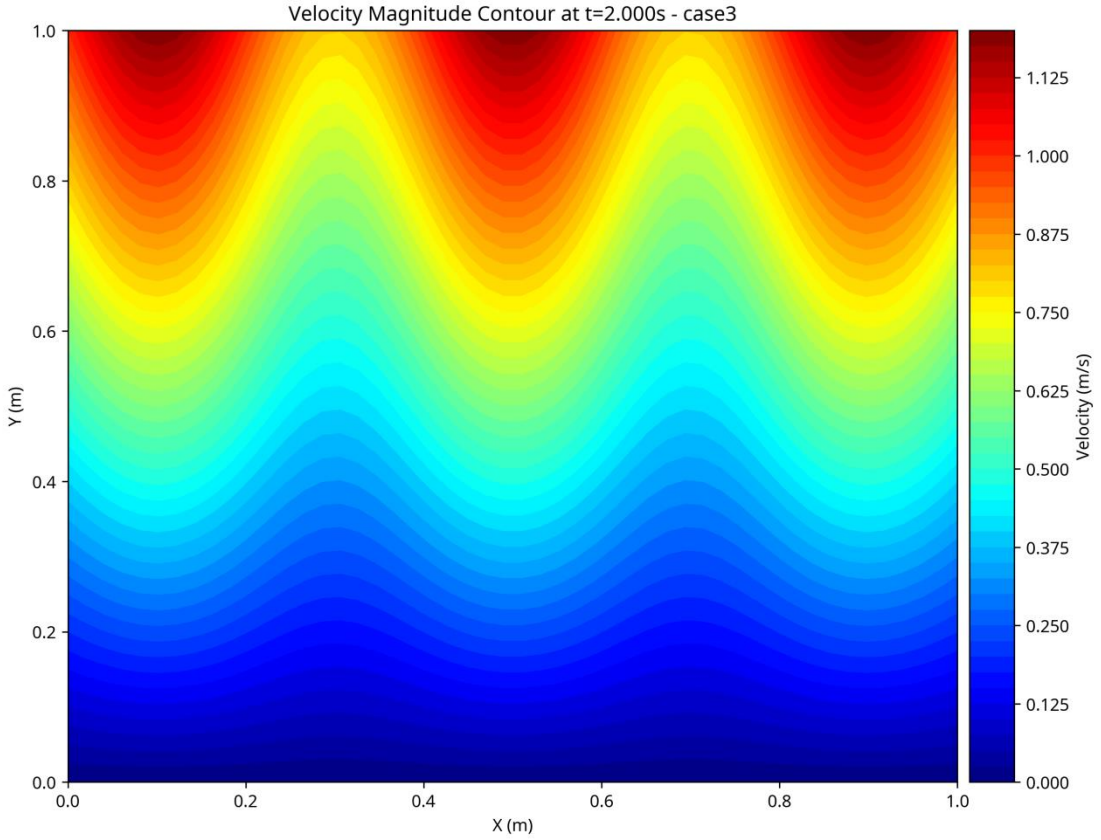




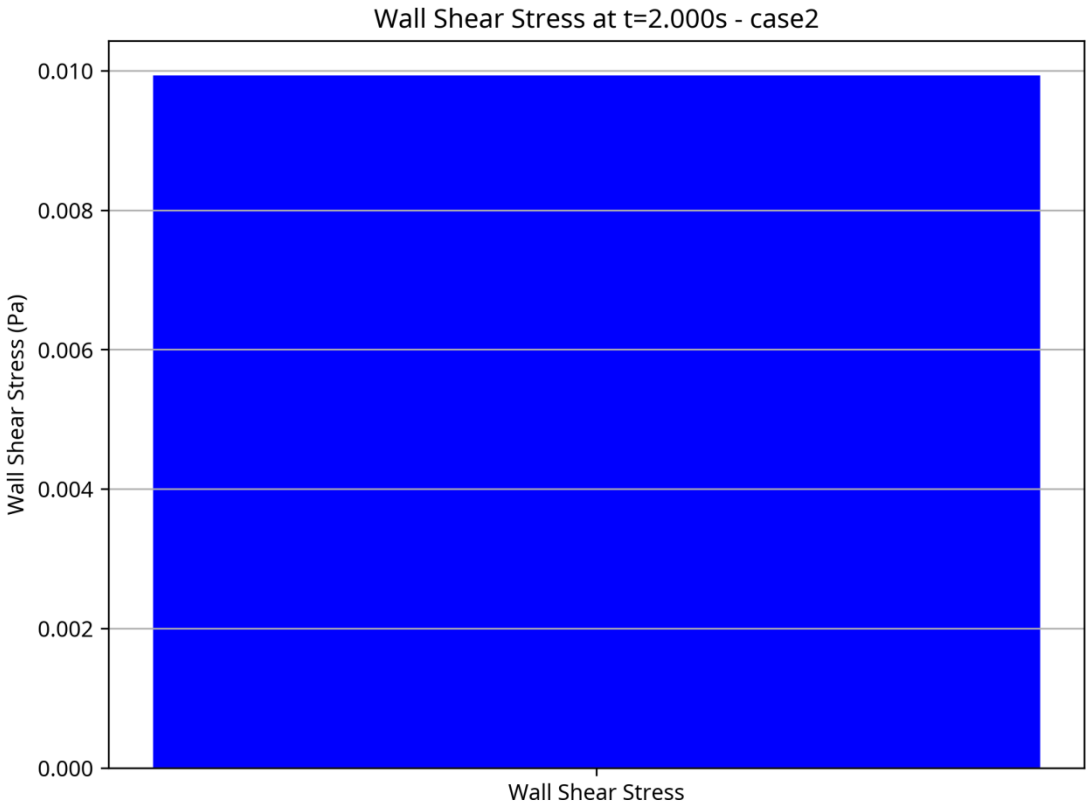

Velocity Magnitude Contour at t=0.800s - case2
Y (m)
X (m)
Velocity (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.1
0.3
0.5
0.7
0.9

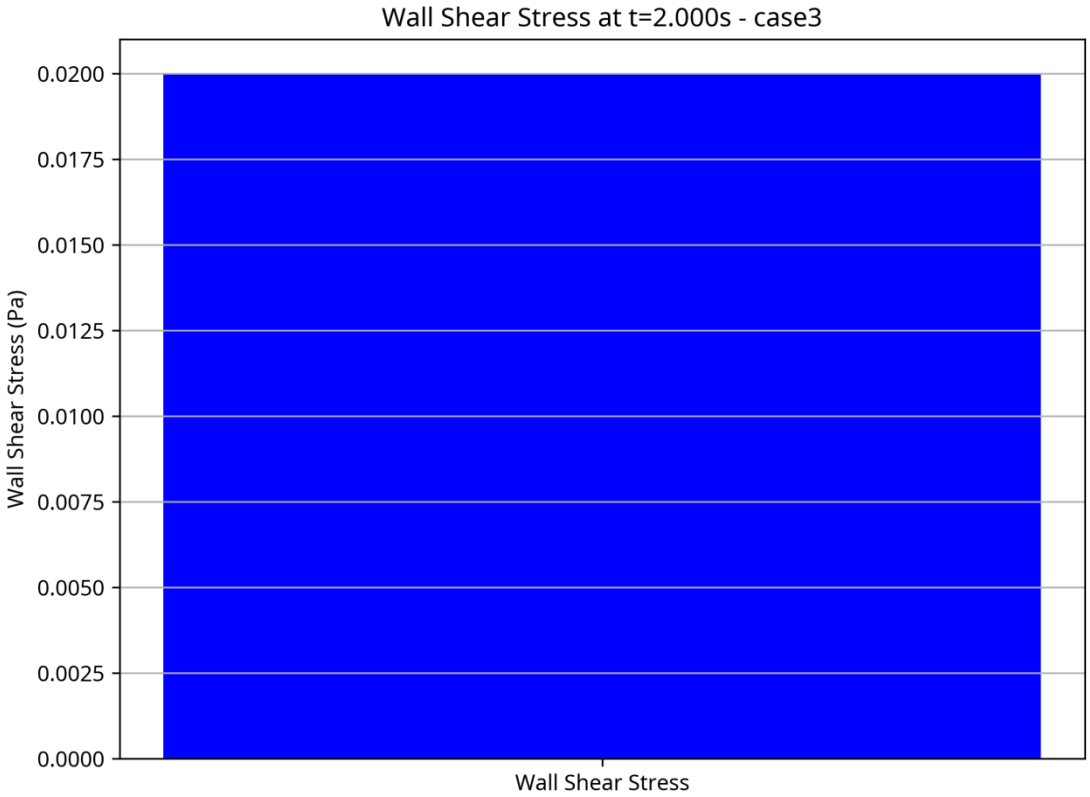

Velocity Magnitude Contour at t=0.800s - case3
Y (m)
X (m)
Velocity (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.000
0.125
0.250
0.375
0.500
0.625
0.750
0.875
1.000
1.125


Velocity Magnitude Contour at t=2.000s - case2
Y (m)
X (m)
Velocity (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.000
0.125
0.250
0.375
0.500
0.625
0.750
0.875
1.000


Velocity Magnitude Contour at t=2.000s - case3
Y (m)
X (m)
Velocity (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.000
0.125
0.250
0.375
0.500
0.625
0.750
0.875
1.000
1.125

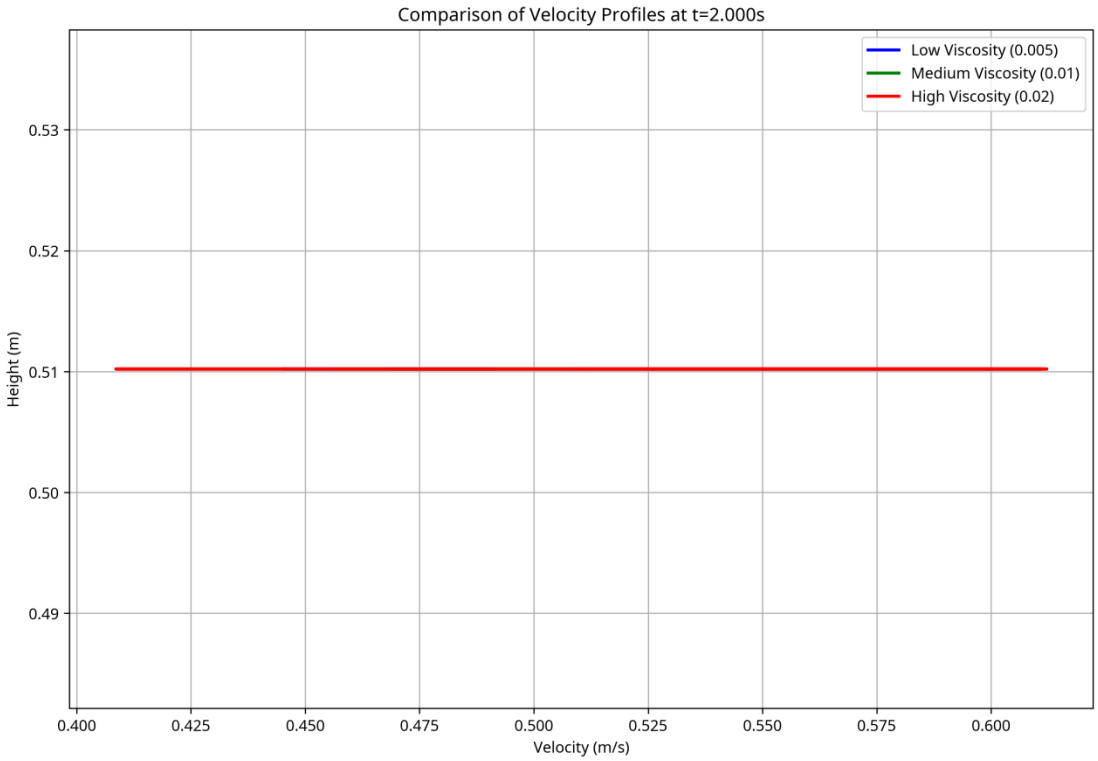
3..3.4 Διατμητική Τάση Τοιχώματος





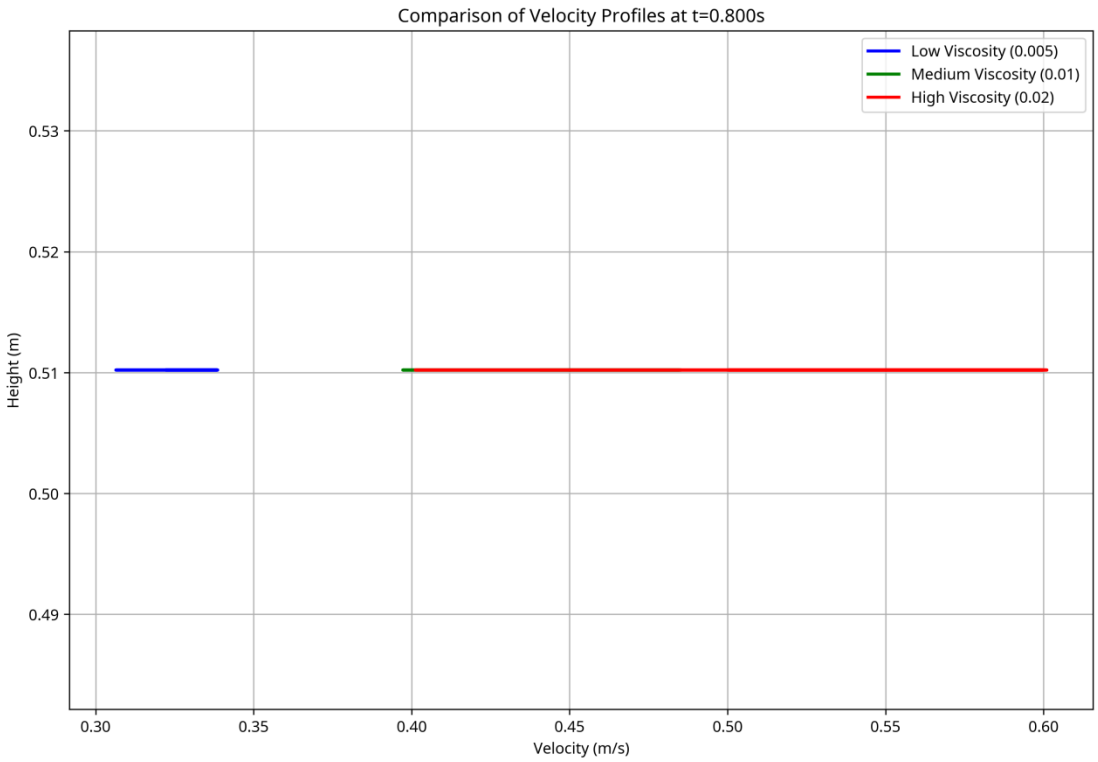
3.4. Συγκριτική ανάλυση των τριών προσομειώσεων

3.4.1 Σύγκριση Προφίλ Ταχύτητας



Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η σύγκριση των προφίλ ταχύτητας και για τις 3 περιπτώσεις στο τέλος της προσομοίωσης όπου t =2 sec. Παρατηρούμε ότι και οι 3 περιπτώσεις έχουν προσεγγίσει το γραμμικό προφίλ ταχύτητας της μόνιμης κατάστασης της ροής Couette .

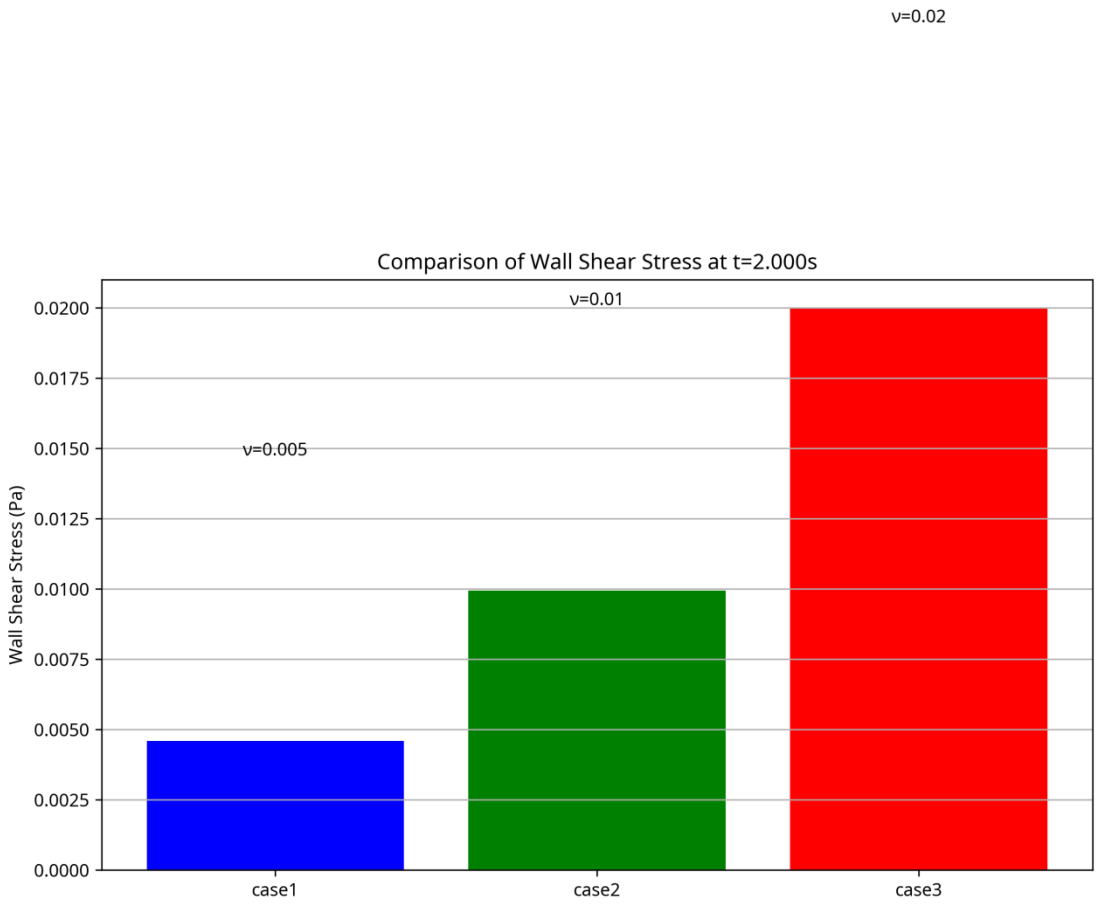
Για τη καλύτερη κατανόηση της επίδρασης του ιξώδες στη πορεία της ροής θα χρησιμοποιηθεί και ένας ενδιάμεσος χρόνος όπου το t = 0.8 sec



Από τη παραπάνω εικόνα της σύγκρισης των προφίλ της ταχύτητας παρατηρούμε ότι οι διαφορές μεταξύ των 3 περιπτώσεων είναι πιο αισθητές . Διακρίνεται εδώ πιο έντονα ότι η $3^{η}$ περίπτωση όπου το ιξώδες δηλαδή είναι μεγαλύτερο γίνεται καλύτερη προσέγγιση του γραμμικού προφίλ της μόνιμης κατάστασης , ακολουθώντας από τη $2^{η}$ περίπτωση (μεσαίο ιξώδες) και ύστερα από τη $1^{η}$ περίπτωση (μικρό ιξώδες) .Επίσης από τις εικόνες τη σύγκριση των αποτελεσμάτων διαπιστώνουμε ότι η ταχύτητα στο κάτω μέρος του καναλιού είναι υψηλότερη για την $3^{η}$ περίπτωση , ακλουθώντας η $2^{η}$ και τελευταία η $1^{η}$.

Αυτές οι παρατηρήσεις συμπίπτουν με τη θεωρία , καθώς το ιξώδες καθορίζει το ρυθμό διάχυσης της ορμής του ρευστού . Υψηλότερες τιμές ιξώδους ισοδυναμούν με μεγαλύτερη ταχύτητα διάχυσης της ορμής , οπότε και σε ταχύτερη προσέγγιση της μόνιμης κατάστασης.

3.4.2 Σύγκριση Διατμητικής Τάσης Τοιχώματος



Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η σύγκριση της διατμητικής τάσης τοιχώματος και για τις 3 περιπτώσεις στο τέλος της προσομοιώσεις δηλαδή όπου t= 2 sec. Όπως αναμενόταν από τη θεωρία η διατμητική τάση τοιχώματος αυξάνεται γραμμικά με το ιξώδες . Οι αναλογίες μεταξύ των τιμών της διατμητικής τάσης τοιχώματος (1:2:4) αντιστοιχούν στις ανάλογες μεταξύ των τιμών ιξώδους αντίστοιχα (0.005: 0.01: 0.02). Αυτές οι παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν τη θεωρητική σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης τοιχώματος και του ιξώδους στη ροή Couette:

$$\tau_w = \mu(\frac{du}{dy}) = \mu(\frac{U}{h}) = \rho \cdot \nu(\frac{U}{h})$$

όπου:
τ_w είναι η διατμητική τάση τοιχώματος
μ είναι το δυναμικό ιξώδες
ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού
ν είναι το κινηματικό ιξώδες
U είναι η ταχύτητα της άνω πλάκας

h είναι η απόσταση μεταξύ των δύο πλακών

Για σταθερές τιμές των U, h και ρ, η διατμητική τάση τοιχώματος είναι ανάλογη του κινηματικού ιξώδους ν.

3.5 Η Ροή Poiseuille

Η ροή Poiseuille, που πήρε το όνομά της από τον Γάλλο φυσικό Jean Louis Marie Poiseuille, περιγράφει τη στρωτή ροή ενός νευτώνειου ρευστού σε κανάλι ή σωλήνα υπό την επίδραση μιας σταθερής κλίσης πίεσης. Για την περίπτωση της ροής μεταξύ δύο παράλληλων πλακών (επίπεδη ροή Poiseuille), η αναλυτική λύση των εξισώσεων Navier-Stokes δίνει το ακόλουθο προφίλ ταχύτητας στη μόνιμη κατάσταση:

$$u(y) = (\frac{1}{2\mu})(\frac{dp}{dx})(h-y)\cdot y$$

όπου:
u(y) είναι η ταχύτητα σε απόσταση y από το κάτω τοίχωμα
μ είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού
dp/dx είναι η κλίση πίεσης κατά μήκος του καναλιού
h είναι το ύψος του καναλιού

Η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στο κέντρο του καναλιού $y = \frac{h}{2}$ και δίνεται από τη σχέση:

$$u\max = (\frac{dp}{dx})(\frac{h^2}{8\mu})$$

Η παροχή όγκου ανά μονάδα πλάτους του καναλιού είναι:

$$Q = (\frac{dp}{dx})(\frac{h^3}{12\mu})$$

Η διατμητική τάση στα τοιχώματα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_w = \mu(\frac{du}{dy})_wall = (\frac{dp}{dx})(\frac{h}{2})$$

#

3.5.1.Εξισώσεις που Διέπουν τη Ροή

Η ροή Poiseuille προκύπτει από τις εξισώσεις Navier-Stokes για ασυμπίεστο ρευστό

1. Εξίσωση συνέχειας (διατήρηση μάζας):

$$\nabla \cdot u = 0$$

2. Εξίσωση ορμής (διατήρηση ορμής):

$$\rho(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u$$

όπου:

u είναι το διανυσματικό πεδίο ταχύτητας

p είναι η πίεση

ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού

μ είναι το δυναμικό ιξώδες

Για τη μόνιμη, πλήρως ανεπτυγμένη ροή Poiseuille, οι εξισώσεις απλοποιούνται σημαντικά, καθώς η ροή είναι μονοδιάστατη (u = u(y), v = w = 0) και δεν υπάρχει εξάρτηση από το χρόνο (∂u/∂t = 0).

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις ροής Poiseuille με τη χρήση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation). Οι προσομοιώσεις διαφοροποιούνται ως προς το κινηματικό ιξώδες του ρευστού, επιτρέποντας τη μελέτη της επίδρασης αυτής της παραμέτρου στα χαρακτηριστικά της ροής. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι εξής περιπτώσεις:

1. Περίπτωση (case1) 1: Χαμηλό ιξώδες (ν = 0.005 m²/s)
2. Περίπτωση (case2) 2: Μεσαίο ιξώδες (ν = 0.01 m²/s)
3. Περίπτωση (case3) 3: Υψηλό ιξώδες (ν = 0.02 m²/s)

Για κάθε περίπτωση, παρουσιάζονται και αναλύονται διάφορες φάσεις της προσομοίωσης, από την αρχική κατάσταση μέχρι την πλήρη ανάπτυξη της ροής. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με το λογισμικό ParaView, το οποίο επιτρέπει την αναλυτική απεικόνιση των πεδίων ταχύτητας, πίεσης και διατμητικής τάσης. Τέλος, γίνεται συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων μεταξύ των τριών περιπτώσεων, με έμφαση στην επίδραση του ιξώδους στα χαρακτηριστικά της ροής.

3.5.2. Γεωμετρία και Πλέγμα

Η γεωμετρία του προβλήματος αποτελείται από ένα ορθογώνιο κανάλι με διαστάσεις:
Μήκος: 2 m
Ύψος: 1 m
Πλάτος: 01 m (με συνθήκες συμμετρίας στην τρίτη διάσταση)

Το υπολογιστικό πλέγμα δημιουργήθηκε με το εργαλείο blockMesh του OpenFOAM και αποτελείται από 50 × 50 × 1 κελιά, με ομοιόμορφη κατανομή. Η ανάλυση του πλέγματος επιλέχθηκε ώστε να παρέχει επαρκή ακρίβεια για την αποτύπωση των χαρακτηριστικών της ροής, ιδιαίτερα κοντά στα τοιχώματα όπου εμφανίζονται οι μεγαλύτερες κλίσεις ταχύτητας.

3.5.3. Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στις προσομοιώσεις είναι οι εξής:

1. Είσοδος (x = 0):
   - Πίεση: σταθερή τιμή p = 1 Pa
   - Ταχύτητα: μηδενική ταχύτητα (u = 0)

2. Έξοδος (x = 2 m):
   - Πίεση: σταθερή τιμή p = 0 Pa
   - Ταχύτητα: μηδενική κλίση $(\frac{\partial u}{\partial x} = 0)$

3. Άνω και κάτω τοιχώματα (y = 0 και y = 1 m):
   - Ταχύτητα: συνθήκη μη-ολίσθησης (u = 0)
   - Πίεση: μηδενική κλίση $(\frac{\partial p}{\partial y} = 0)$

4. Μπροστινή και πίσω επιφάνεια (z = 0 και z = 0.1 m):
   - Συνθήκη συμμετρίας (empty)

Η διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου δημιουργεί την κλίση πίεσης που οδηγεί τη ροή.

3.5.4. Παράμετροι Προσομοίωσης

Οι τρεις προσομοιώσεις διαφοροποιούνται ως προς το κινηματικό ιξώδες του ρευστού:

1. Περίπτωση 1: ν = 0.005 m^2/s
2. Περίπτωση 2: ν = 0.01 m^2/s
3. Περίπτωση 3: ν = 0.02 m^2/s

Οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές:

Πυκνότητα ρευστού: ρ = 1 kg/m^3

Χρονικό βήμα: Δt = 0.005 s

Συνολικός χρόνος προσομοίωσης: t = 2 s

Συχνότητα αποθήκευσης αποτελεσμάτων: κάθε 40 χρονικά βήματα

Οι αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν:

Σχήμα Euler για τη χρονική διακριτοποίηση

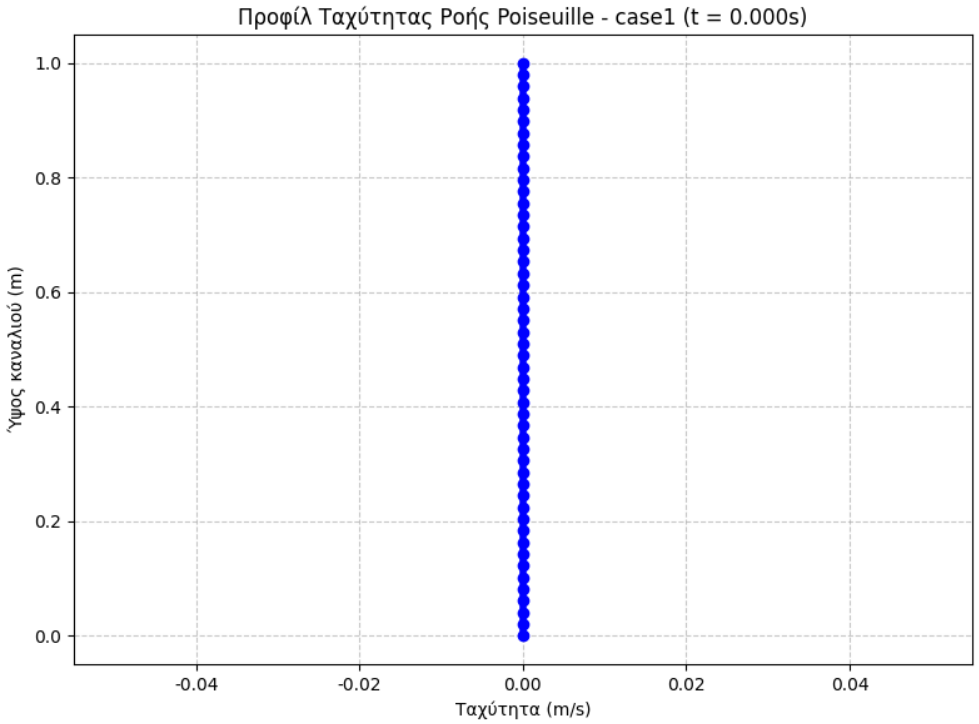
Γραμμικό σχήμα Gauss για τους όρους συναγωγής

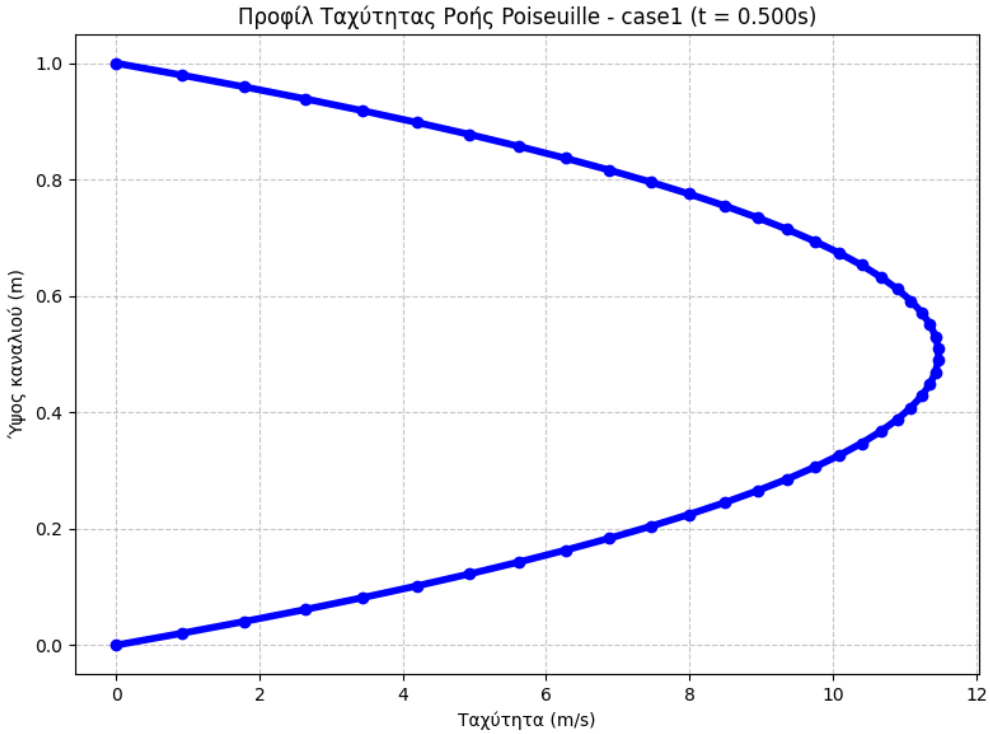
Γραμμικό σχήμα Gauss για τους όρους διάχυσης

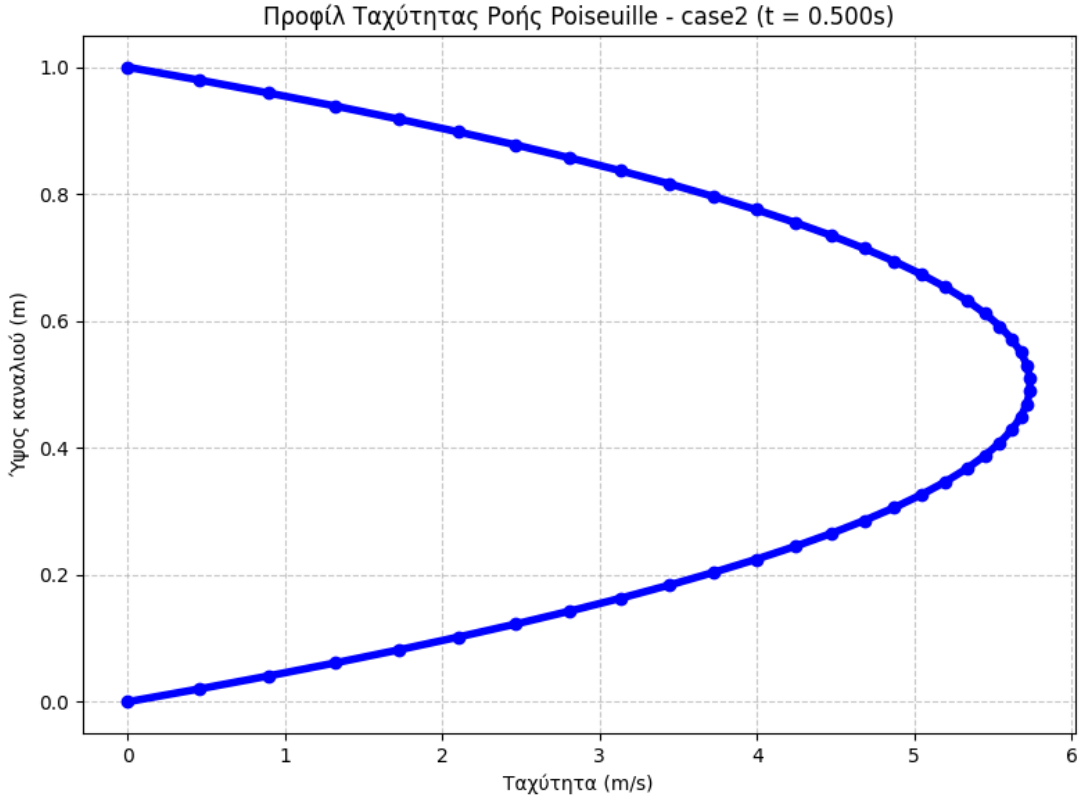
Αλγόριθμος PISO με 2 διορθωτές για τη σύζευξη πίεσης-ταχύτητας

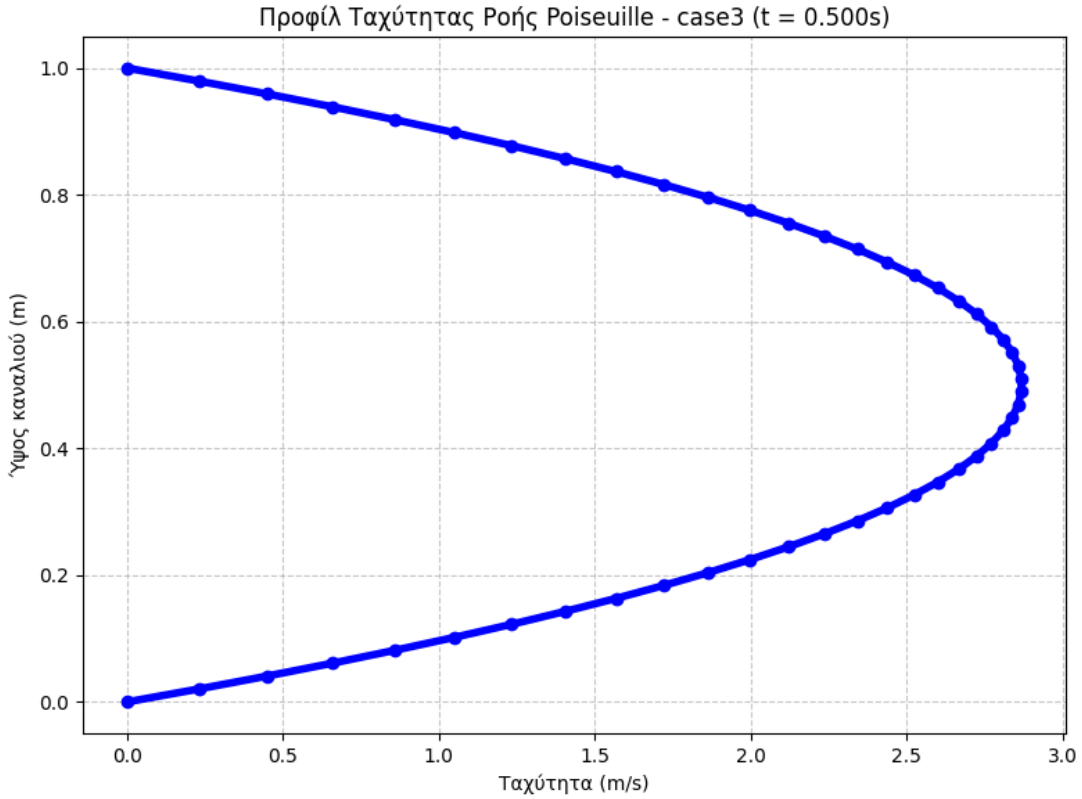
3.6. Πεδίο Ταχύτητας

3.6.1. Προφίλ Ταχύτητας



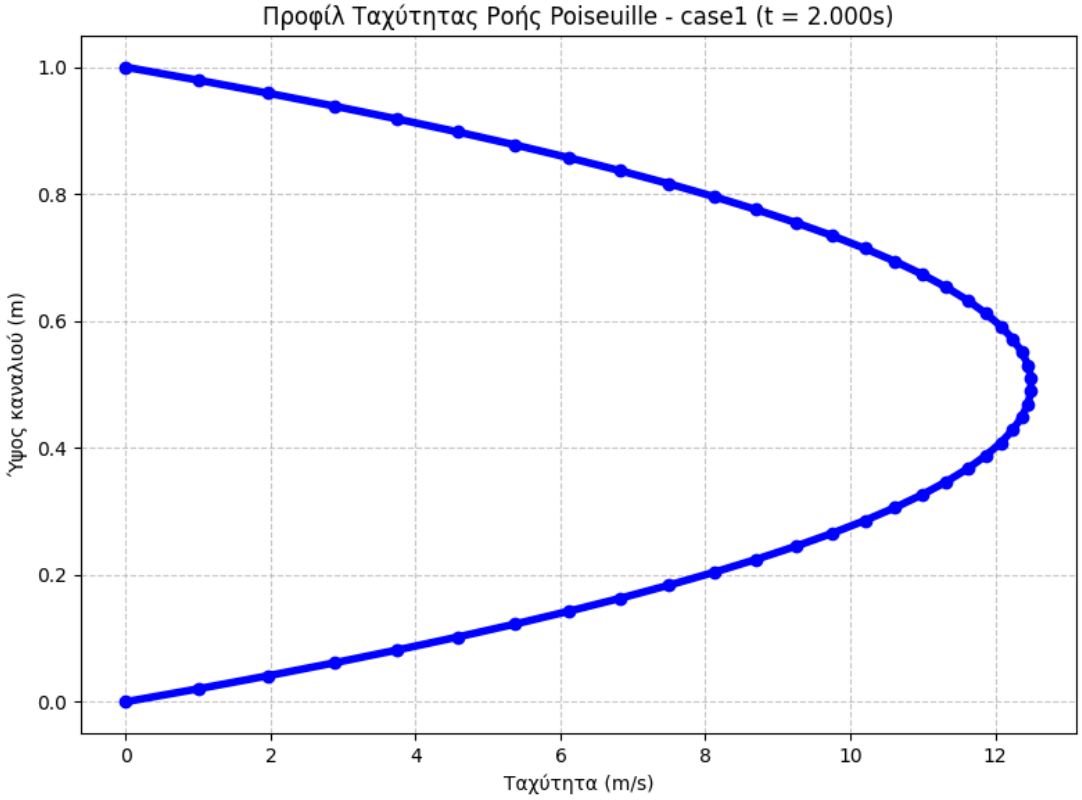


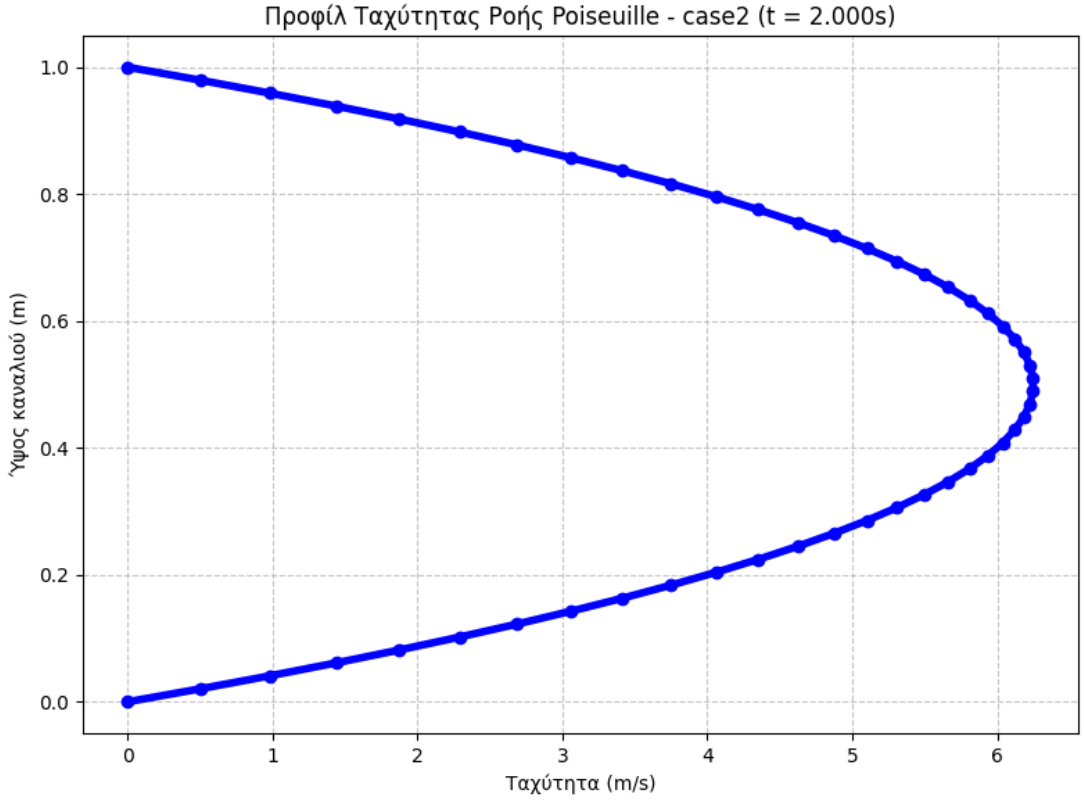


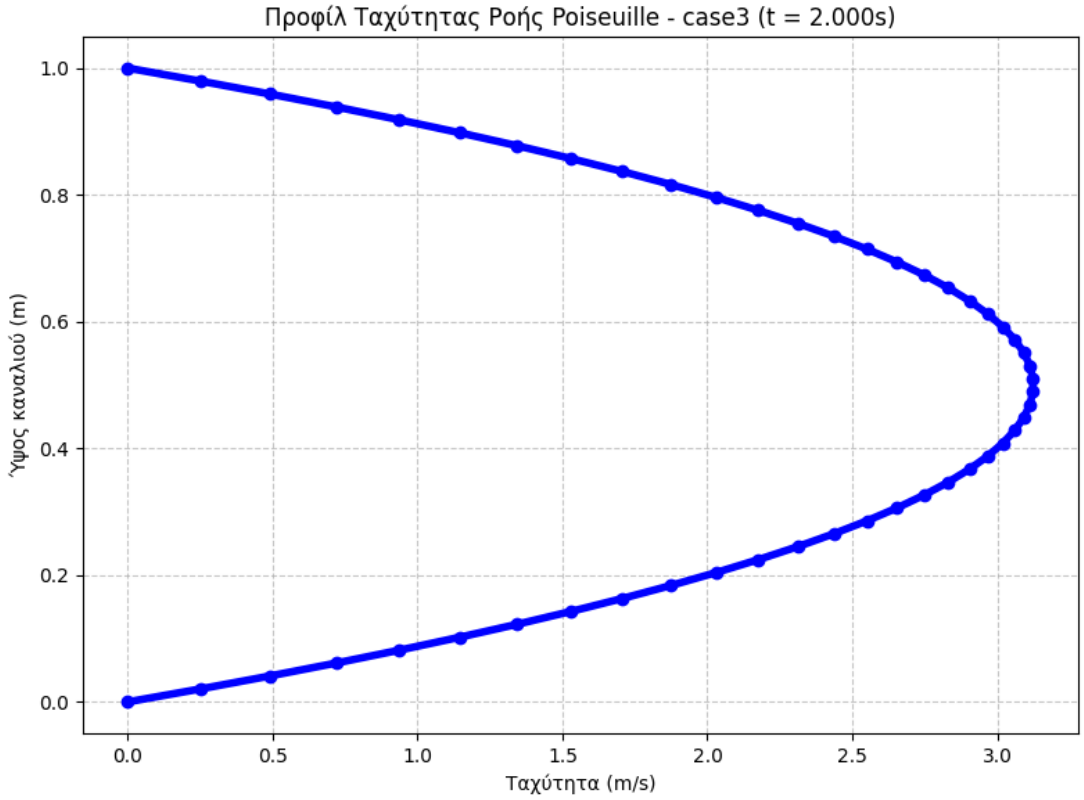


Καθώς η προσημείωση προχωράει στο χρόνο t=0.5 sec παρατηρούμε την έναρξη ανάπτυξης του προφίλ ταχύτητας, το προφίλ έχει ήδη αποκτήσει τη χαρακτηριστική παραβολική

μορφή της ροής Poiseuille και στις 3 περιπτώσεις παρόλο που δεν έχει φτάσει ακόμα τη μόνιμη κατάσταση .

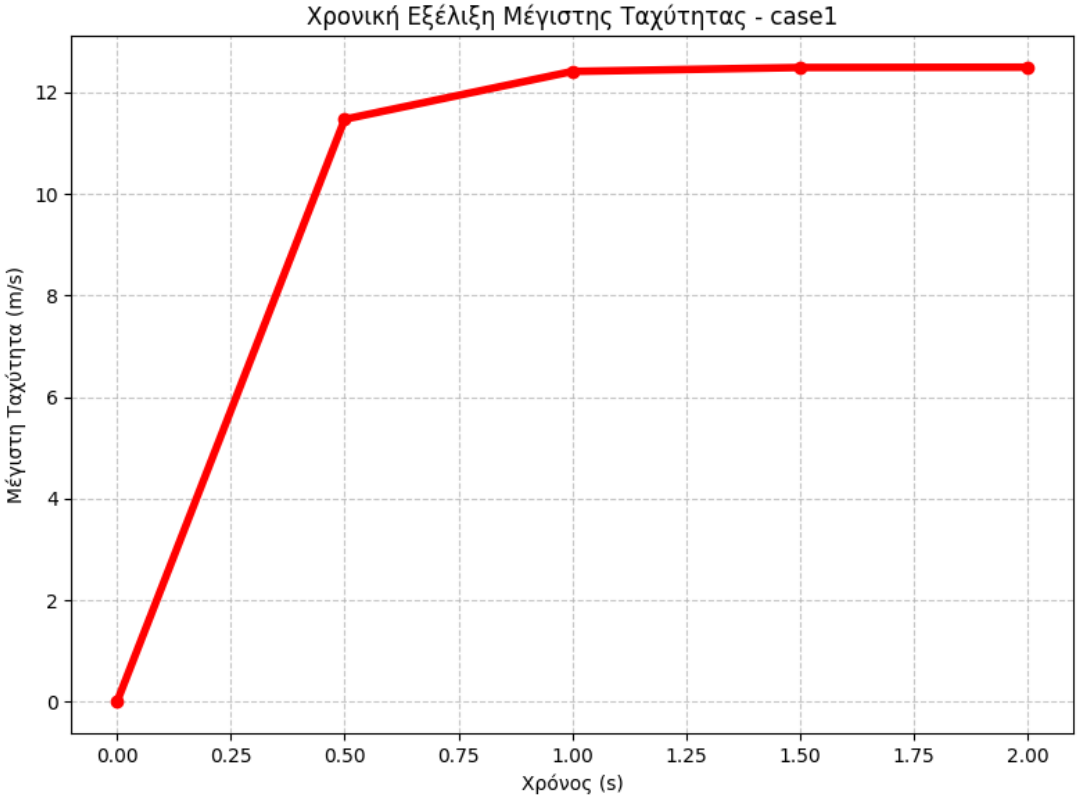


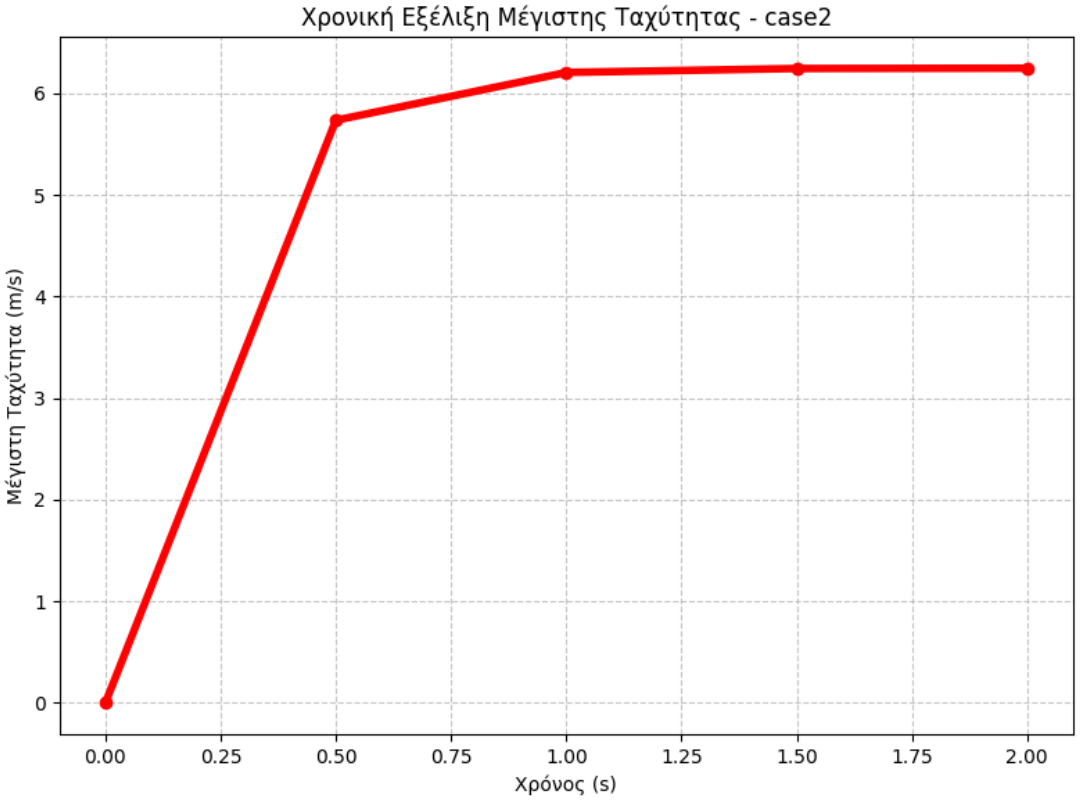

Προφίλ Ταχύτητας Ροής Poiseuille - case2 (t = 2.000s)
Ύψος καναλιού (m)
Ταχύτητα (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0
1
2
3
4
5
6

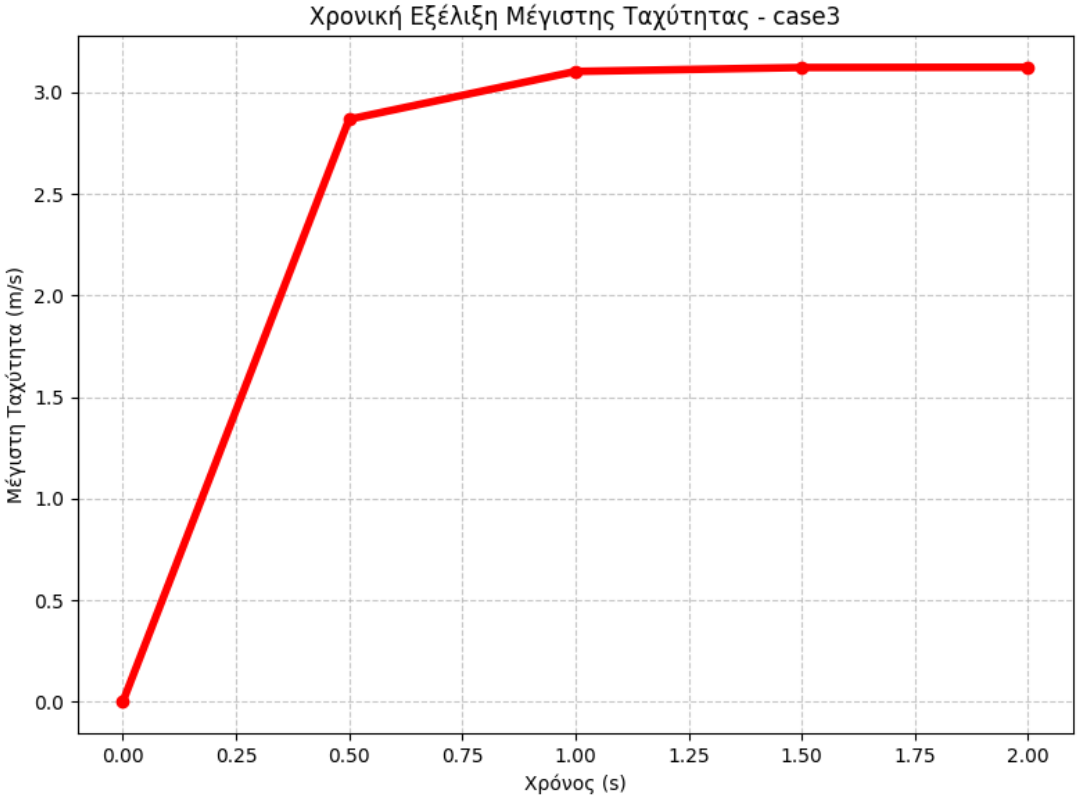

Προφίλ Ταχύτητας Ροής Poiseuille - case3 (t = 2.000s)
Ύψος καναλιού (m)
Ταχύτητα (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0

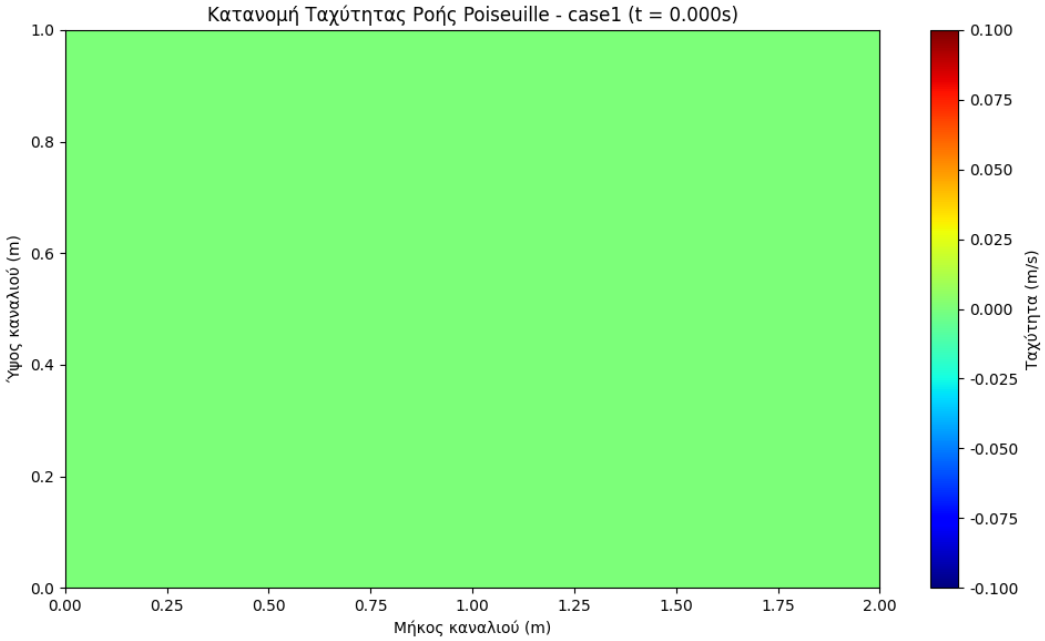
,

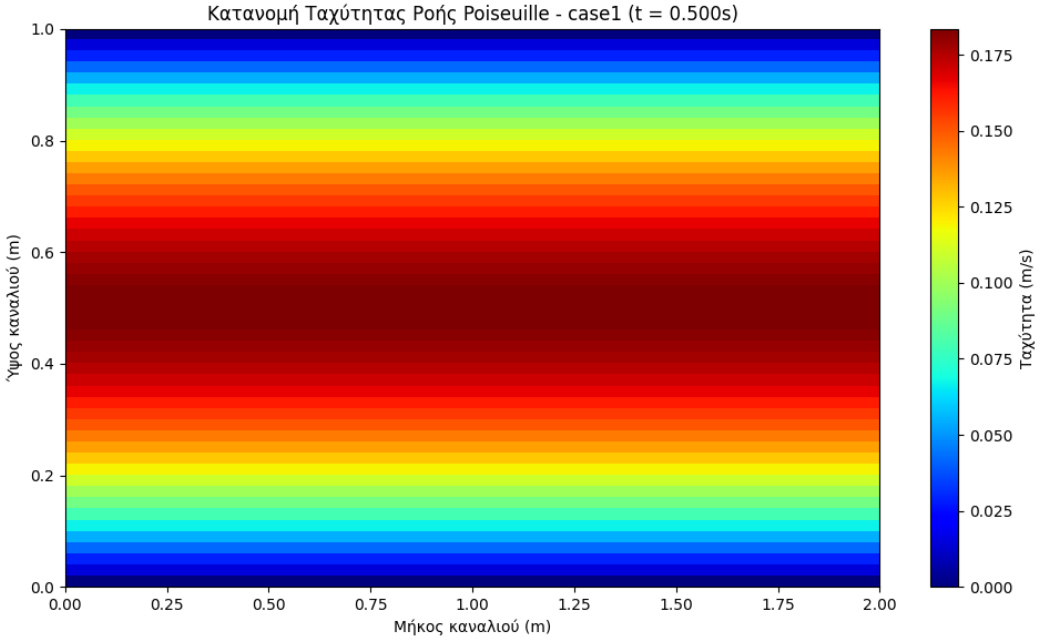
Για χρόνο t=2 sec όπου είναι και το χρονικό τέλος της εξίσωσης της ροής , αυτή έχει φτάσει στη μόνιμη κατάσταση , με το προφίλ ταχύτητας να έχει την πλήρη παραβολική μορφή που προβλέπεται και από τη θεωρία .

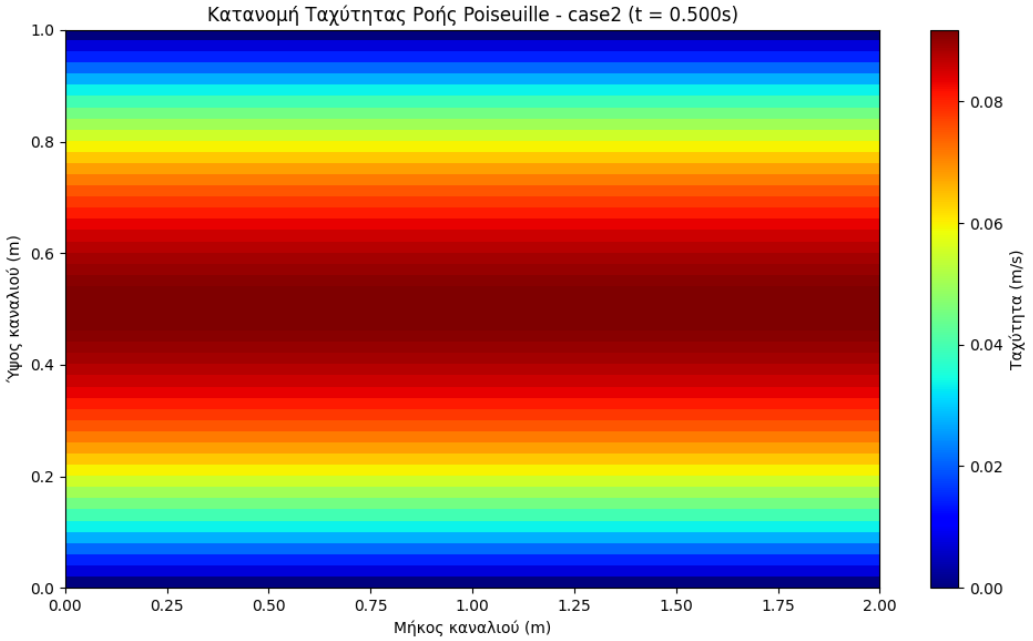

Χρονική Εξέλιξη Μέγιστης Ταχύτητας - case1
Μέγιστη Ταχύτητα (m/s)
Χρόνος (s)
0
2
4
6
8
10
12
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00

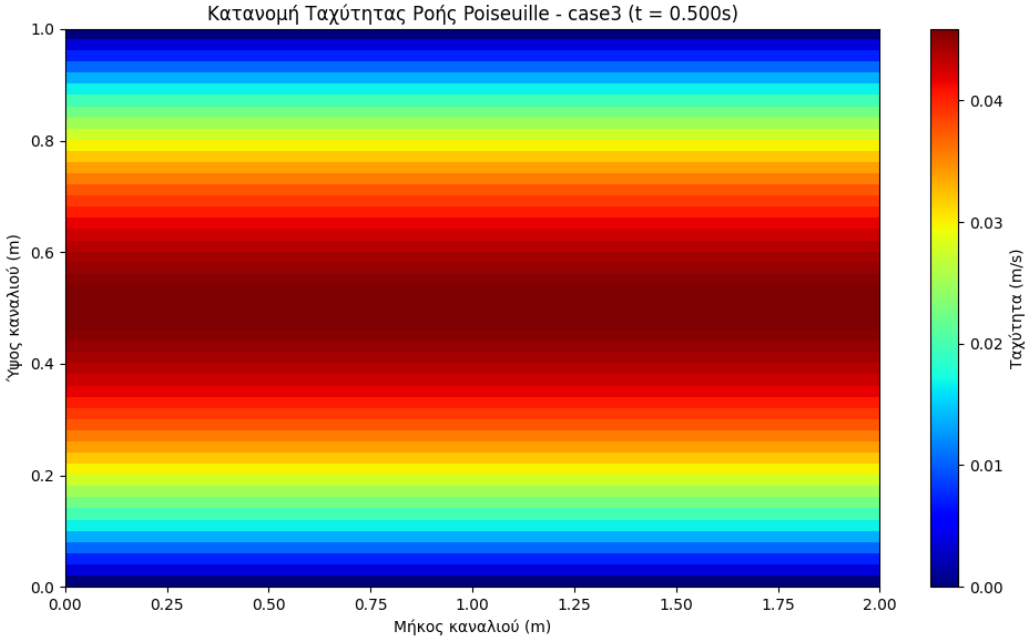

Χρονική Εξέλιξη Μέγιστης Ταχύτητας - case2
Μέγιστη Ταχύτητα (m/s)
Χρόνος (s)
0
1
2
3
4
5
6
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00

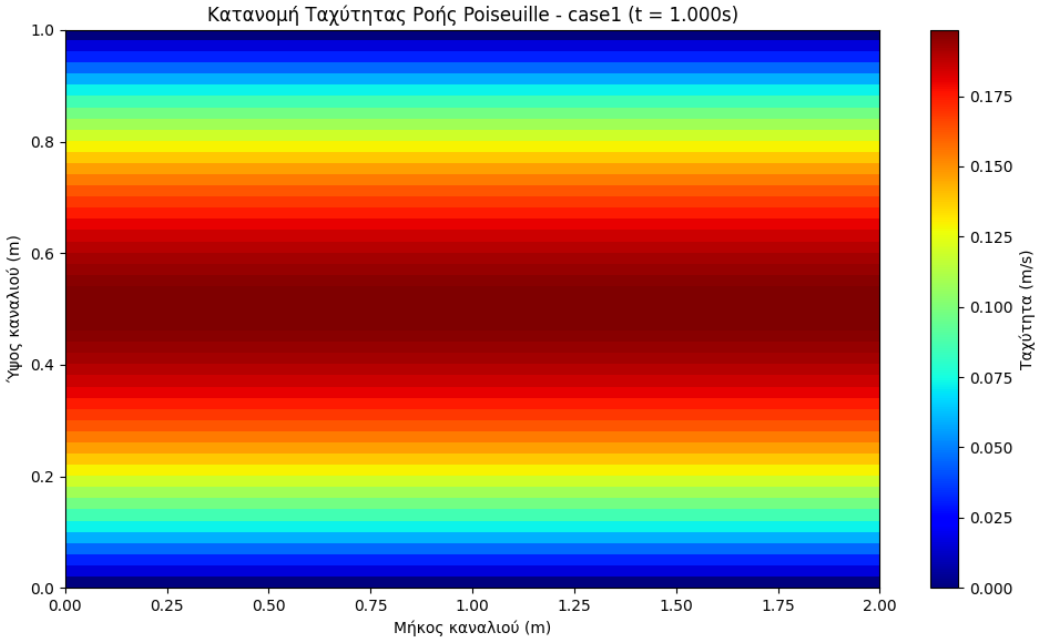

Χρονική Εξέλιξη Μέγιστης Ταχύτητας - case3
Μέγιστη Ταχύτητα (m/s)
Χρόνος (s)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00

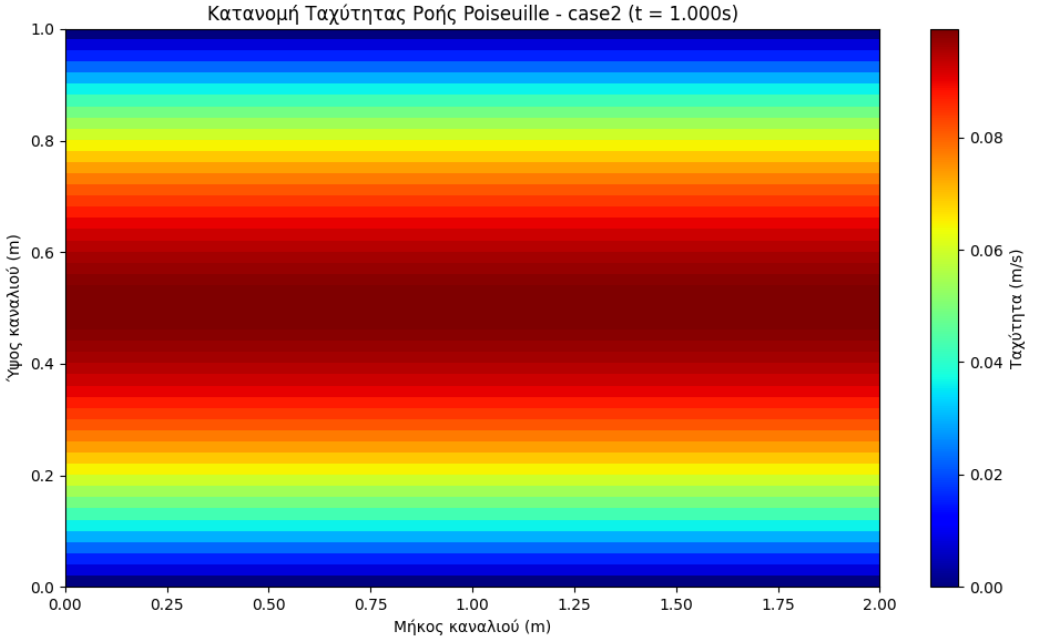

Κατανομή Ταχύτητας Ροής Poiseuille - case1 (t = 0.000s)
Ύψος καναλιού (m)
Μήκος καναλιού (m)
Ταχύτητα (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00
0.100
0.075
0.050
0.025
0.000
-0.025
-0.050
-0.075
-0.100

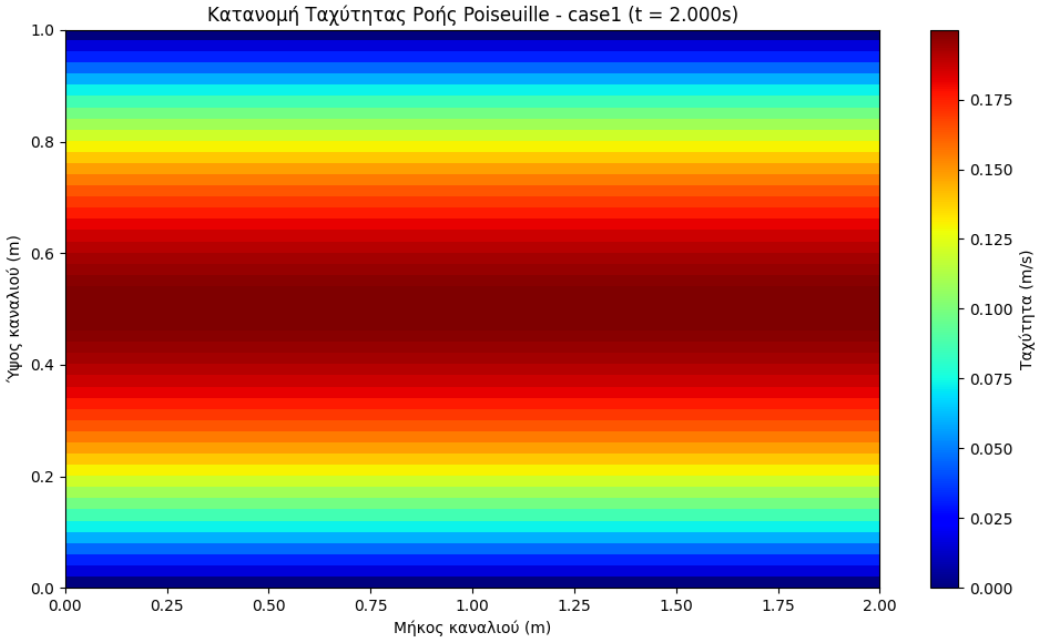

Κατανομή Ταχύτητας Ροής Poiseuille - case1 (t = 0.500s)
Ύψος καναλιού (m)
Μήκος καναλιού (m)
Ταχύτητα (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00
0.175
0.150
0.125
0.100
0.075
0.050
0.025
0.000

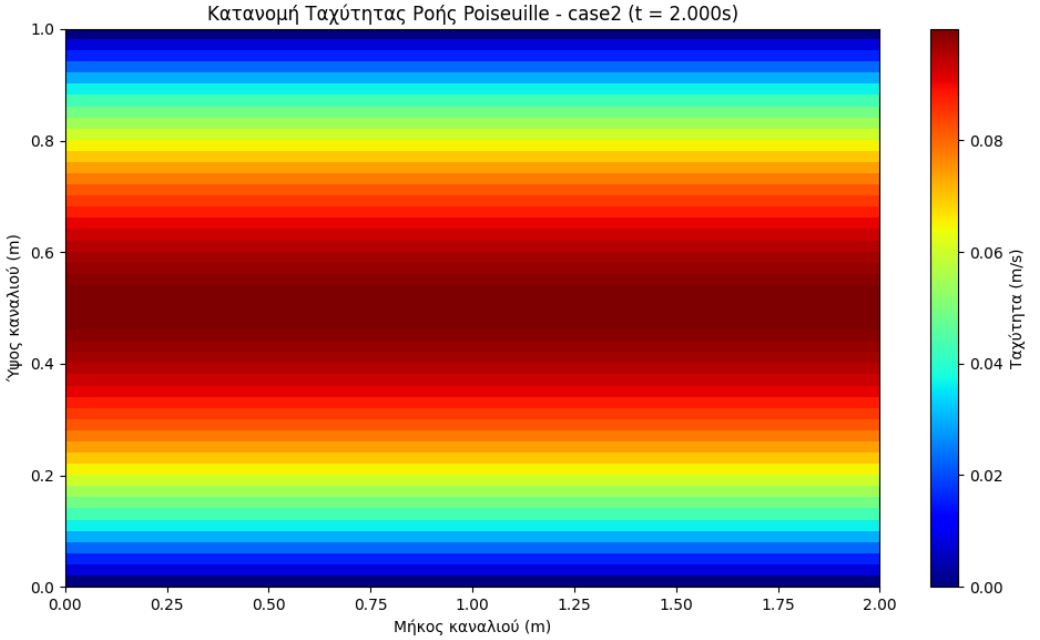

Κατανομή Ταχύτητας Ροής Poiseuille - case2 (t = 0.500s)
Ύψος καναλιού (m)
Μήκος καναλιού (m)
Ταχύτητα (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00
0.00
0.02
0.04
0.06
0.08

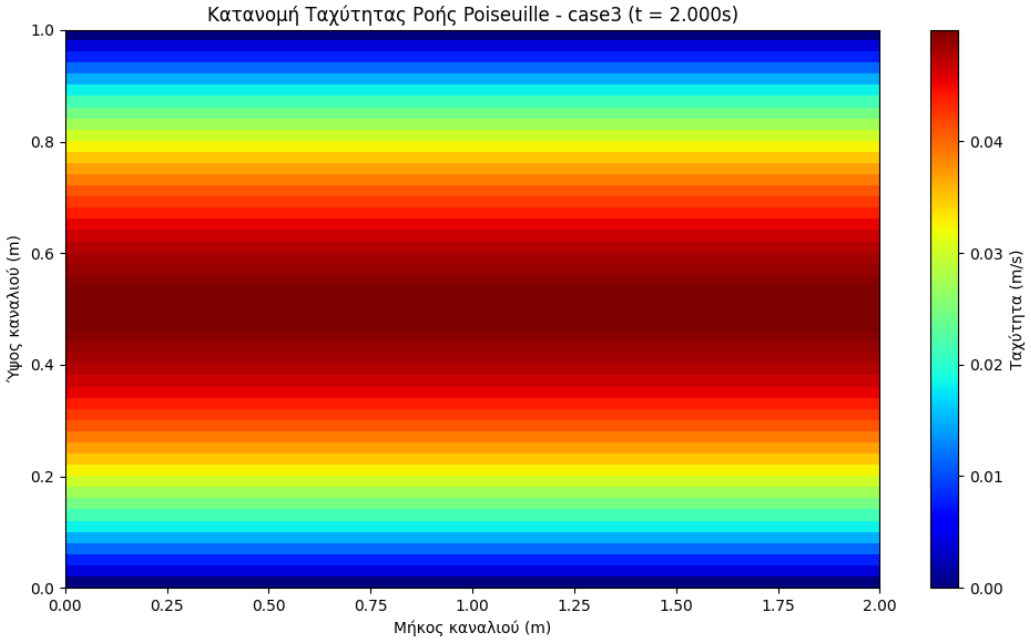

Κατανομή Ταχύτητας Ροής Poiseuille - case3 (t = 0.500s)
Ύψος καναλιού (m)
Μήκος καναλιού (m)
Ταχύτητα (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00
0.00
0.01
0.02
0.03
0.04

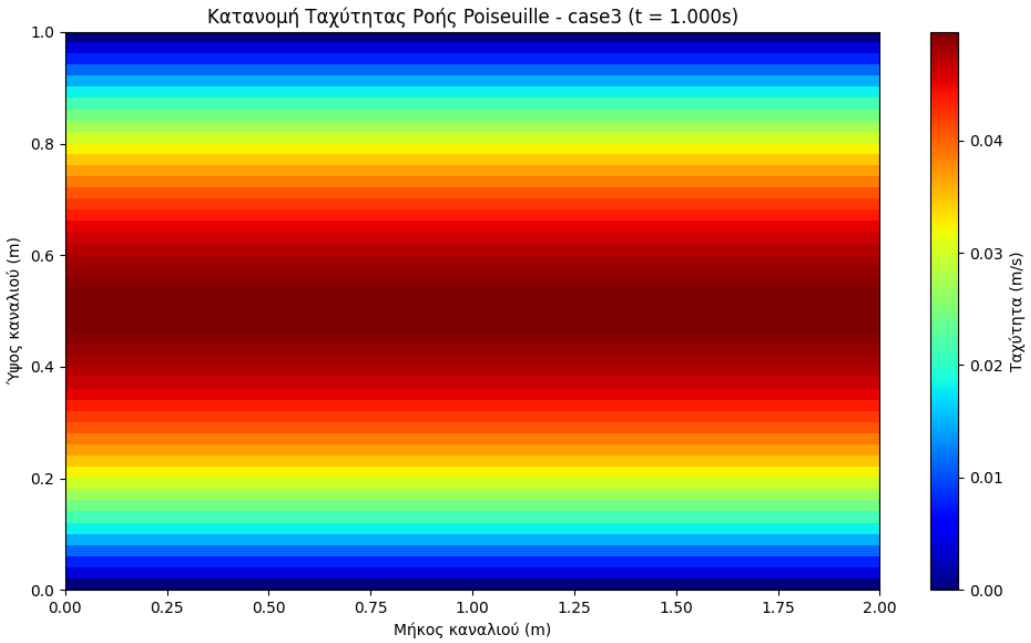

Κατανομή Ταχύτητας Ροής Poiseuille - case1 (t = 1.000s)
Ύψος καναλιού (m)
Μήκος καναλιού (m)
Ταχύτητα (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00
0.000
0.025
0.050
0.075
0.100
0.125
0.150
0.175


Κατανομή Ταχύτητας Ροής Poiseuille - case2 (t = 1.000s)
Ύψος καναλιού (m)
Μήκος καναλιού (m)
Ταχύτητα (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00
0.00
0.02
0.04
0.06
0.08


Κατανομή Ταχύτητας Ροής Poiseuille - case1 (t = 2.000s)
Ύψος καναλιού (m)
Μήκος καναλιού (m)
Ταχύτητα (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00
0.000
0.025
0.050
0.075
0.100
0.125
0.150
0.175

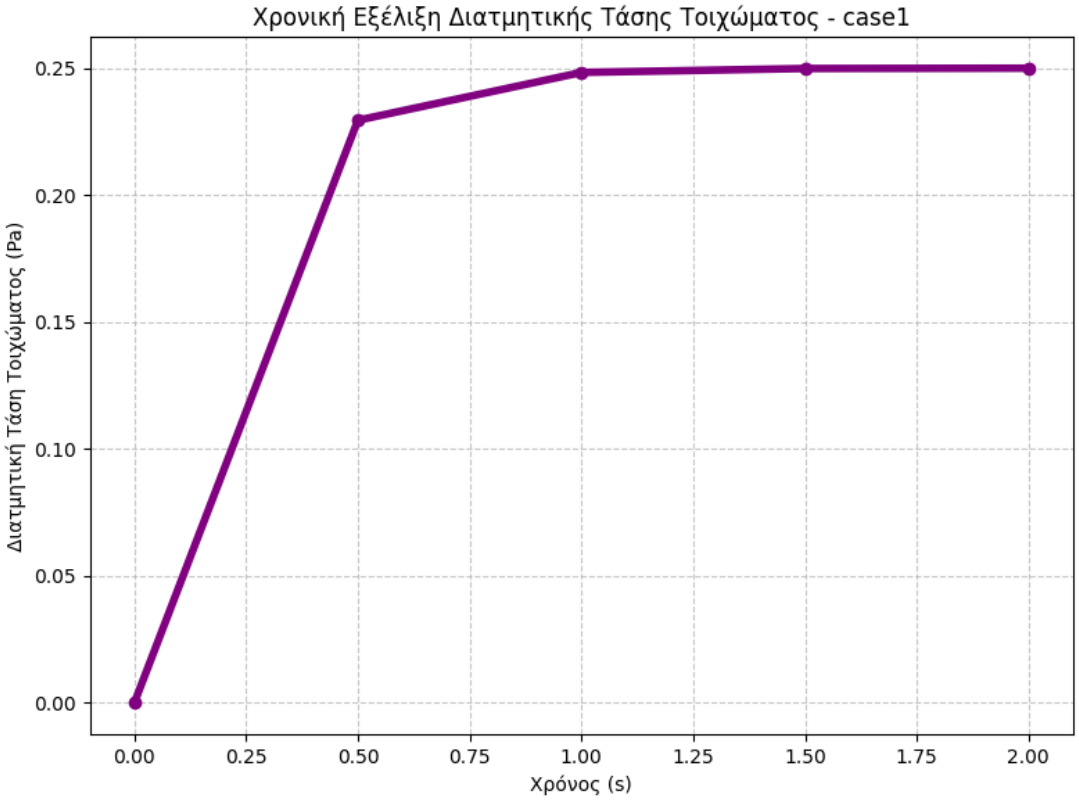

Κατανομή Ταχύτητας Ροής Poiseuille - case2 (t = 2.000s)
Ύψος καναλιού (m)
Μήκος καναλιού (m)
Ταχύτητα (m/s)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00
0.00
0.02
0.04
0.06
0.08

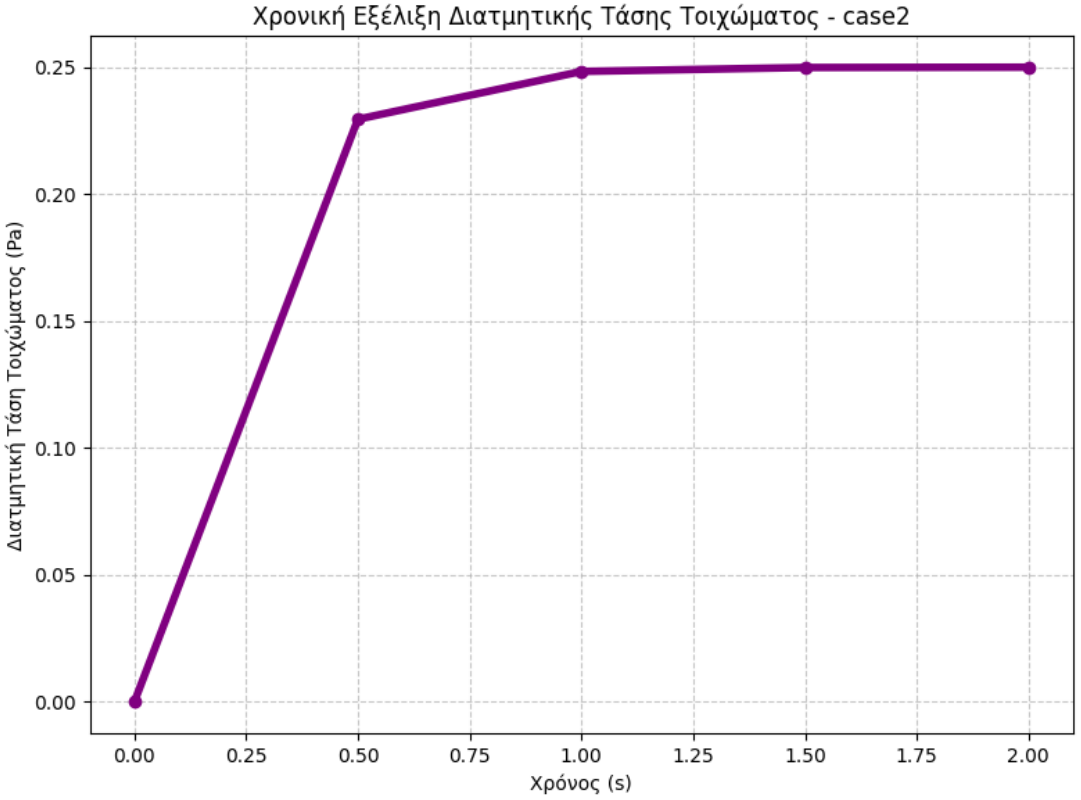


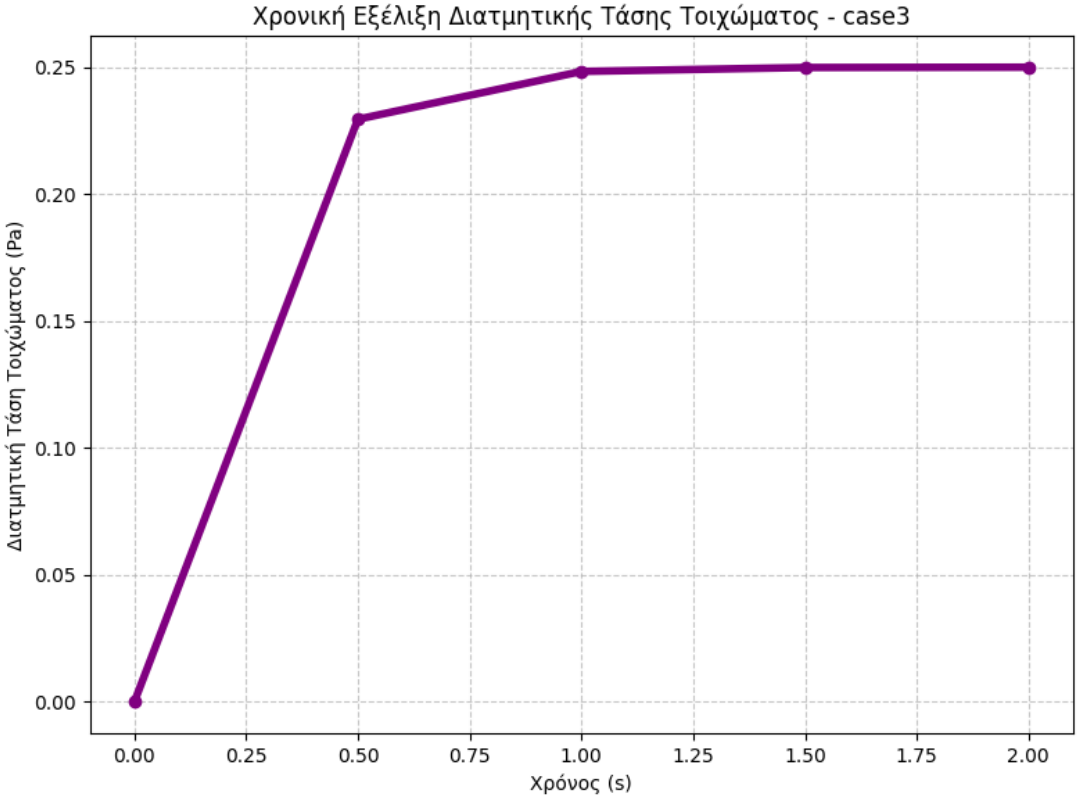


Παρατηρούμε από τις εικόνες της κατανομής της ταχύτητας ότι με το που αρχίσει η ροή (t=0.5 sec) ήδη στο κέντρο του καναλιού η ταχύτητα είναι υψηλότερη από τι στα τοιχώματα, όσο περνάει ο χρόνος τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα που έχει αναπτυχθεί στο κέντρο . Όσο μεγαλώνει το ιξώδες τόσο πιο αργή είναι η κίνηση του ρευστού ,πράμα που συμπίπτει απόλυτα με τη θεωρία.

3.6.2. Διατμητική Τάση Τοιχώματος

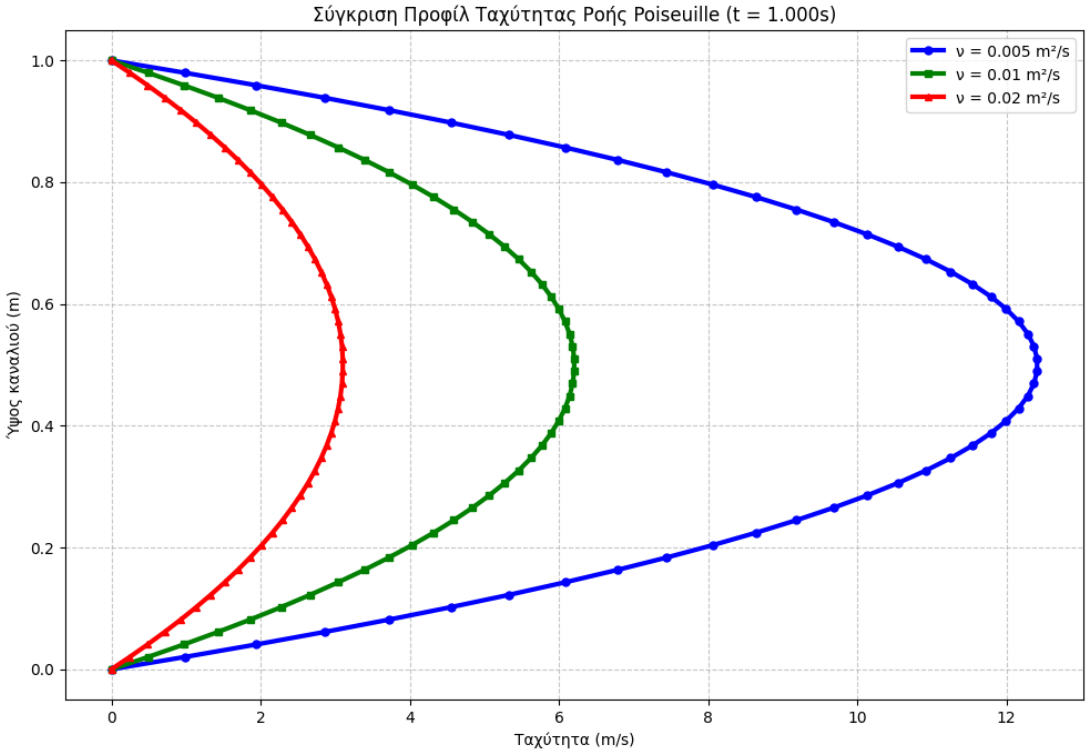


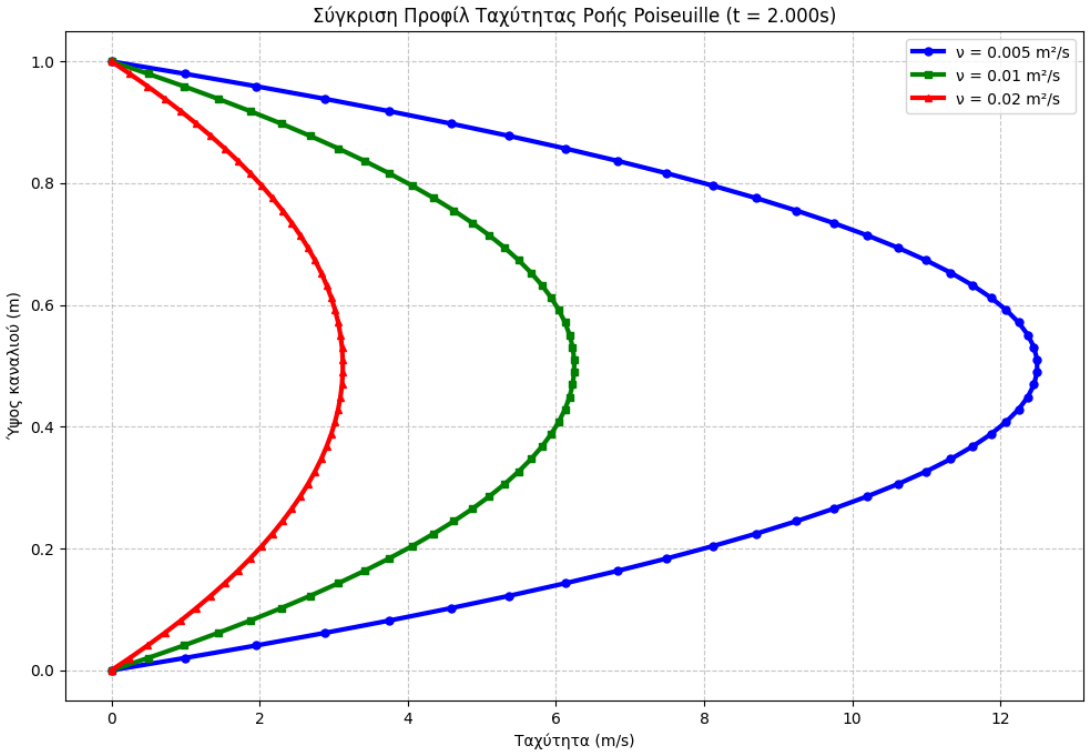

Χρονική Εξέλιξη Διατμητικής Τάσης Τοιχώματος - case2
Διατμητική Τάση Τοιχώματος (Pa)
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00
Χρόνος (s)


Χρονική Εξέλιξη Διατμητικής Τάσης Τοιχώματος - case3
Διατμητική Τάση Τοιχώματος (Pa)
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
1.25
1.50
1.75
2.00
Χρόνος (s)

3.7 Συγκριτική Ανάλυση

3.7.1. Σύγκριση Προφίλ ταχύτητας

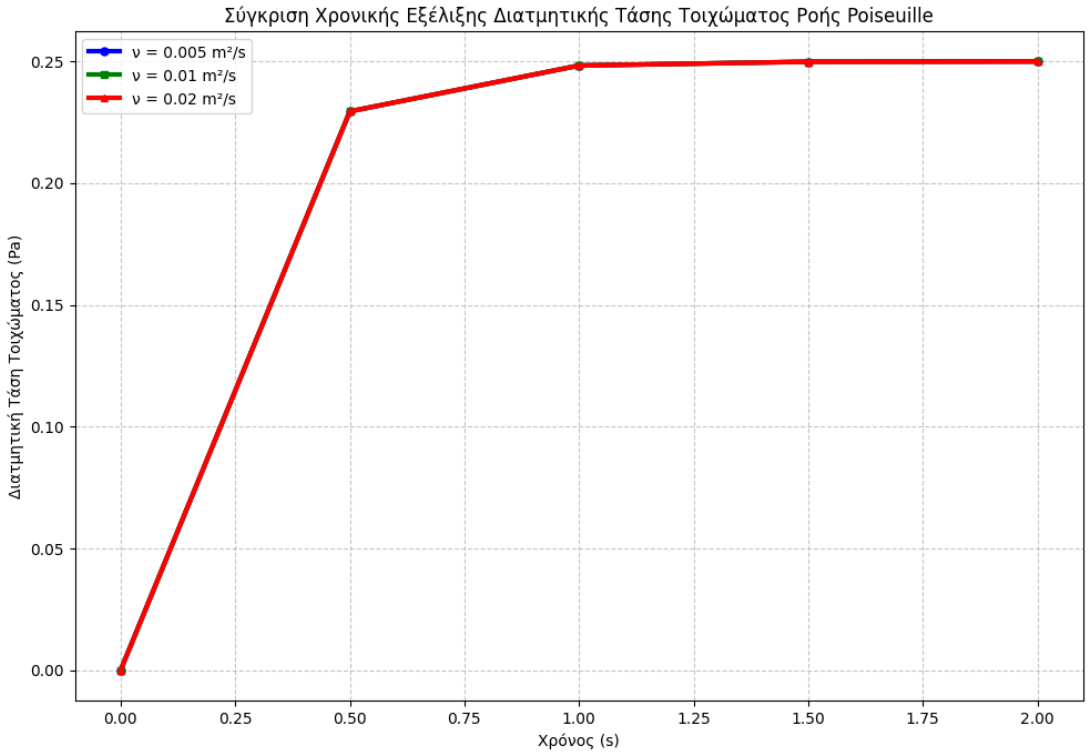




Από τη σύγκριση των προφίλ ταχυτήτων για τις 3 περιπτώσεις βλέπουμε ότι το ιξώδες είναι καίριας σημασίας , επιδρόντας διαφορετικά για τη κάθε περίπτωση . Παρατηρούμε ότι και

τα 3 προφίλ έχουν παραβολική μορφή πράγμα με διαφορετικές μέγιστες τιμές στη κάθε περίπτωση επιβεβαιώνοντας έτσι και τη θεωρία . Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι το χαμηλότερο ιξώδες έχει τη μέγιστη ταχύτητα και μάλιστα είναι σχεδόν διπλάσιο από το μεσαίο ιξώδες και σχεδόν τετραπλάσιο από το μέγιστο ιξώδες .

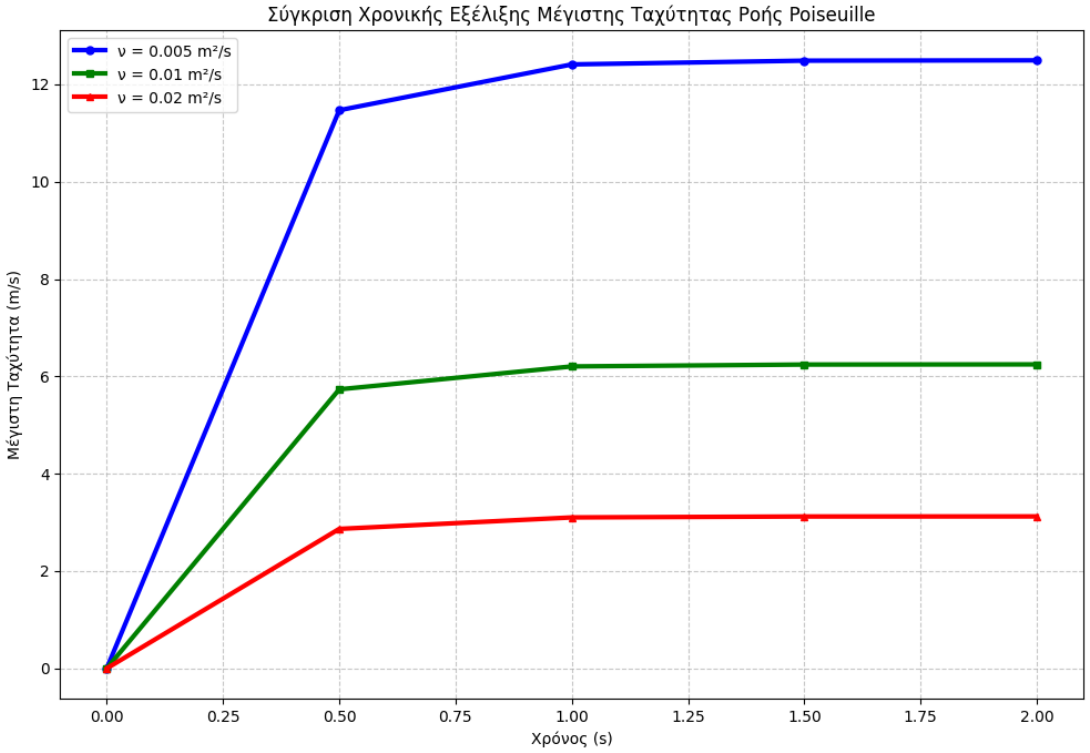
3.7.2. Σύγκριση Διατμητικής Τάσης Τοιχώματος



Η σύγκριση της διτμητικής τάσης στο τοίχωμα παρέχει σημαντικές πληροφορίες για το ιξώδες . Για t=0sec οι τιμές είναι ίδιες καθώς το ρευστό είναι αρχικά ακίνητο . Για t=1sec και για t=2 sec παρατηρούμε ότι ενώ το ρευστό είναι σε κίνηση οι τιμές είναι σχεδόν ίδιες , αυτό είναι απόλυτα φυσιολογικό καθώς η διατμητική τάση εξαρτάται τόσο από το ιξώδες όσο και από τη κλίση της ταχύτητας (τ= μ * du/dy) , και οι 2 αυτοί παράγοντες αντισταθμίζουν ο ένας τον άλλον.

3.7.3 Σύγκριση του διαφορετικού ιξώδες στη χρονική εξέλιξη της Ροής

Συγκρίνοντας τις εικόνες που παρουσιάζουν τη χρονική εξέλιξη της μέγιστης ταχύτητας για τις τρεις περιπτώσεις, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την επίδραση του ιξώδους στη χρονική εξέλιξη της ροής.



Παρατηρούμε ότι:

1. Η μέγιστη ταχύτητα στη μόνιμη κατάσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη του ιξώδους, σύμφωνα με τη θεωρητική σχέση u_max ~ 1/μ.
2. Ο ρυθμός με τον οποίο η ροή πλησιάζει στη μόνιμη κατάσταση είναι επίσης αντιστρόφως ανάλογος του ιξώδους. Δηλαδή, η ροή με χαμηλό ιξώδες φτάνει πιο γρήγορα στη μόνιμη κατάσταση σε σύγκριση με τη ροή με υψηλό ιξώδες.
3. Η χρονική σταθερά της εξέλιξης της ροής είναι ανάλογη του ιξώδους. Αυτό σημαίνει ότι η ροή με υψηλό ιξώδες χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να φτάσει σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό της τελικής της κατάστασης.

3.7.4 Συμπέρασμα

1. Η ροή Poiseuille χαρακτηρίζεται από παραβολικό προφίλ ταχύτητας στη μόνιμη κατάσταση, με μηδενική ταχύτητα στα τοιχώματα και μέγιστη ταχύτητα στο κέντρο του καναλιού.

2. Η μέγιστη ταχύτητα στη μόνιμη κατάσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη του ιξώδους του ρευστού, σύμφωνα με τη θεωρητική σχέση u_max = (-dp/dx) * h²/(8μ). Αυτό επιβεβαιώθηκε από τις προσομοιώσεις, όπου η μέγιστη ταχύτητα για το χαμηλό ιξώδες (ν = 0.005 m²/s) ήταν περίπου διπλάσια από αυτή για το μεσαίο ιξώδες (ν = 0.01 m²/s) και περίπου τετραπλάσια από αυτή για το υψηλό ιξώδες (ν = 0.02 m²/s).

3. Η διατμητική τάση στα τοιχώματα είναι παρόμοια για τις τρεις περιπτώσεις, παρά τις διαφορές στο ιξώδες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διατμητική τάση εξαρτάται τόσο από το ιξώδες όσο και από την κλίση της ταχύτητας (τ = μ * du/dy), και οι δύο αυτοί παράγοντες αντισταθμίζουν ο ένας τον άλλον.

4. Η χρονική εξέλιξη της ροής επηρεάζεται σημαντικά από το ιξώδες. Η ροή με χαμηλό ιξώδες φτάνει πιο γρήγορα στη μόνιμη κατάσταση σε σύγκριση με τη ροή με υψηλό ιξώδες. Αυτό είναι σημαντικό για εφαρμογές όπου ο χρόνος απόκρισης του συστήματος είναι κρίσιμος.

5.Οι δυνατότητες του λογισμικού πακέτου OpenFoam είναι αξιόλογες , μέσα από τη παρούσα εργασία διακρίνονται κάποιες από αυτές χωρίς να γίνεται εμβάθυνση όμως των πραγματικών προοπτικών του σε κάποιο πρακτικό κομμάτι της παραγωγής (πχ βιομηχανία) . Το συγκεκριμένο εργαλείο ωστόσο δεν είναι φιλικό προς το χρήστη εάν δε κατέχει καλή γνώση προγραμματισμού , υπάρχει φτωχό δημόσιο και δωρεάν εκπαιδευτικό υλικό στο διαδίκτυο τόσο στην ελληνική όσο και στην ξένη κοινότητα. Επίσης αποτελούν φραγμό για περεταίρω εμβάθυνση οι κοστοβόρες τιμές των σεμιναρίων ,στα οποία βέβαια γίνεται πιο ουσιαστική εκμάθηση του προγράμματος.

Βιβλιογραφία

1. Batchelor, G. K. (2000). An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press.

2. Greenshields, C. J. (2015). OpenFOAM User Guide. OpenFOAM Foundation Ltd.

3. Jasak, H. (1996). Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows. PhD thesis, Imperial College, University of London.

4. Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab. Springer.

5. Schlichting, H., & Gersten, K. (2016). Boundary-Layer Theory. Springer.

6. Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Pearson Education.

7. Weller, H. G., Tabor, G., Jasak, H., & Fureby, C. (1998). A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. Computers in Physics, 12(6), 620-631.

8. Ahrens, J., Geveci, B., & Law, C. (2005). ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization. In The Visualization Handbook (pp. 717-731). Elsevier.

9. Ayachit, U. (2015). The ParaView Guide: A Parallel Visualization Application. Kitware, Inc.