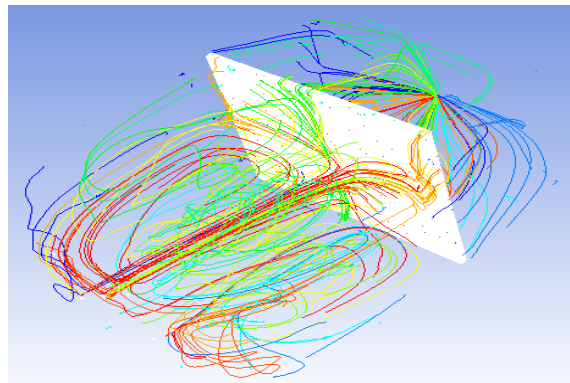
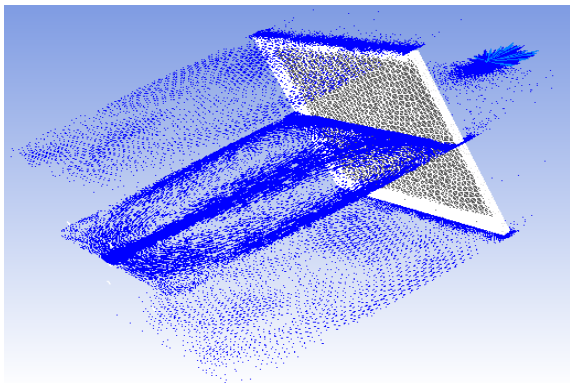




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΘΑΛΑΜΟ ΈΚΘΕΣΗΣ ΈΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΣ



ΦΥΤΕΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (5065) - ΑΡΜΕΝΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ (7302)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΚΑΛΑΡΑΚΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2020 - 2021

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου κατά την χρονική περίοδο 2020-2021. Στόχος αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η προσομοίωση ροής ρευστού σε καμβά έργων τέχνης που περιέχεται σε εργαστηριακό θάλαμο με την χρήση του υπολογιστικού προγράμματος ρευστοδυναμικής (ansys fluent). Τα αποτελέσματα τα οποία θα προκύψουν, θα βοηθήσουν μελλοντικά σε μελέτες που διεξάγονται όσον αφορά την γήρανση ενός έργου τέχνης σε καμβά αλλά και τους παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά ένα τέτοιο έργο με την πάροδο του χρόνου. Έχοντας λοιπόν δεδομένα αυτά τα αποτελέσματα, μπορούν να κατασκευαστούν νέα υλικά που θα χρησιμοποιούνται για την προστασία τέτοιων έργων και να βελτιωθούν οι μέθοδοι συντήρησης τους. Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κύριο Καλαράκη Αλέξανδρο, επίκουρο καθηγητή, επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μας εργασίας για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μας παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή του τμήματος Χημικών Μηχανικών κ. Πανδή για την φιλοξενία στο εργαστήριο «Εργαστήριο Μελέτης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης» στο ΙΕΧΜΗ για τις απαραίτητες μετρήσεις την πειραματικής διάταξης.

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες και τους φίλους μας που μας βοήθησαν και μας στήριξαν ηθικά και υλικά.

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

Οι Φοιτητές

Αρμενάκης Εμμανουήλ

Φυτέας Γεώργιος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα μελετηθεί η ροή ενός ρευστού και συγκεκριμένα διοξειδίου του άνθρακα μέσα σε ένα πρότυπο θάλαμο στον οποίο έχουμε τοποθετήσει έναν καμβά. Με τον τρόπο αυτό προσπαθούμε να προσομοιάσουμε την επίδραση που έχει ο ατμοσφαιρικός αέρας στο ύφασμα-καμβά ενός έργου τέχνης με τη πάροδο του χρόνου.

Στο πρώτο κεφάλαιο θα γίνει μια αναφορά στον πρότυπο θάλαμο που έχει κατασκευαστεί για την διεξαγωγή του πειράματος αλλά και στο τρόπο λειτουργίας του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στο Fluent, το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιούμε ώστε να μοντελοποιήσουμε τη ροή του ρευστού μέσα στο θάλαμο. Δηλαδή θα αναφερθούμε στη γεωμετρία στις σωστές οριακές συνθήκες, το σωστό μοντέλο επίλυσης, τη διακριτοποίηση αλλά και το πλέγμα, ώστε να διεξαχθεί σωστά η προσομοίωση.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά τον ορισμό των κριτηρίων σύγκλισης, την αρχικοποίηση του πεδίου ροής και τέλος την επίλυση του προβλήματος SOLUTION.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων των διάφορων εκδοχών του προβλήματος αλλά και η ερμηνεία αυτών μέσα από διάφορα διαγράμματα vector plots και contours.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	vii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΕΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΣ.....	1
2. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ο ΠΡΟΤΥΠΟΣ ΘΑΛΑΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	3
1.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΑΛΑΜΟΥ	3
1.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FLUENT	7
2.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	7
2.1.1 Εισαγωγή γεωμετρίας.....	7
2.1.2 Σχεδιασμός με το σχεδιαστικό πρόγραμμα solidworks.	7
2.1.3 Εισαγωγή του στο υπολογιστικό πρόγραμμα fluent	8
2.1.4 Σχεδιασμός θαλάμου στο design modeler του fluent	9
2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	12
2.2.1 Ονομασία περιοχών	12
2.2.2 Διακριτοποίηση (mesh)	13
2.3 ΈΝΑΡΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FLUENT.....	25
2.3.1 Έλεγχος του mesh και στατιστικά στοιχεία.	26
2.3.2 Επιλογή λύτη.....	28
2.3.3 Επιλογή ροϊκού μοντέλου.	29
2.3.4 Καθορισμός υλικών και ιδιοτήτων τους.....	35
2.3.5 Συνοριακές συνθήκες.	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ - SOLUTION	47
3.1 Ορισμός κριτηρίων σύγκλισης.	48
3.2 Έναρξη υπολογισμού.	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	53
4.1 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ.	53
4.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΡΟΗΣ ΜΕ ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ.....	69
4.2.1 Πρόβλημα με $c = 0$ στην εμπρόσθια όψη του καμβά.....	69
4.2.2 Πρόβλημα με $c = 0.5$ στην εμπρόσθια όψη του καμβά.....	88

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΕΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΣ

Είναι κοινά αποδεκτό πως τα έργα τέχνης αποτελούν ένα μεγάλο κομμάτι της πολιτιστικής κληρονομιάς κάθε λαού και για αυτό το λόγο αποτελεί επιτακτική ανάγκη η συντήρηση και η αποκατάσταση τους. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν γίνεται λόγος για μια νέα επιστήμη, η οποία περιλαμβάνει και την τεχνογνωσία διάφορων ειδικών αλλά και τη συνεργασία πολλών επιστημών όπως η επιστήμη των υλικών. Στόχος της είναι η καταγραφή, η ανάλυση και η πρόβλεψη επίδρασης του χρόνου πάνω σε ένα έργο, χωρίς όμως να παρέμβει σε αυτό. [1]

Οι αιτίες που ευθύνονται για την αλλοίωση των χαρακτηριστικών αλλά και την καταστροφή ενός τέτοιου έργου είναι διαφόρων ειδών. Η επαφή, οι κακοτεχνίες και η κακομεταχείριση κατά την επισκευή αλλά και η ρύπανση καθιστούν τον ανθρώπινο παράγοντα σημαντικό υπαίτιο για την καταστροφή ενός έργου τέχνης. Επίσης οι περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η υγρασία ακόμη και ο ατμοσφαιρικός αέρας με τον οποίο έρχεται σε επαφή ένας καμβάς, αποτελούν μια σοβαρή αιτία που ευθύνεται για την αλλοίωση των χαρακτηριστικών ενός πολύτιμου πίνακα.

Σκοπός μας σε αυτή την εργασία λοιπόν είναι να ασχοληθούμε με την επίδραση του ατμοσφαιρικού αέρα κυρίως επάνω σε έργα ζωγραφικής με υφασμάτινο φορέα (καμβά).

Συνήθως ένα έργο τέχνης σε καμβά αποτελείται κυρίως από :

- i) τον καμβά ο οποίος μπορεί να είναι κάποιο λινό η βαμβακερό ύφασμα.
- ii) την κόλλα η οποία συνήθως είναι οργανικής φύσης.
- iii) το χρώμα, το οποίο είναι χρωστικές ουσίες μαζί με λινέλαιο ή κάποιου άλλου είδους έλαιο.
- iv) το βερνίκι το οποίο είναι κάποιου είδους ρητίνη, είτε φυσική είτε οργανική.

Όσο πιο παλιά είναι τα έργα αυτά τόσο αυξάνεται ο βαθμός δυσκολίας και το κόστος στην συντήρηση αλλά και αποκατάστασης τους. [2]

Δημοσιεύσεις και αναφορές του τύπου για πολύτιμα και περίφημα έργα τέχνης :

«Τα διάσημα «ηλιοτρόπια» του Βίνσεντ βαν Γκογκ χάνουν το εντυπωσιακό τους κίτρινο και ο πορτοκαλί ορίζοντας στην «Κραυγή» του Εντβαρντ Μουνχ ξεθωιάζει. Μερικά από τα πιο πολύτιμα έργα τέχνης παγκοσμίως, κινδυνεύουν από τη φθορά του χρόνου και οι επιστήμονες κάνουν έκκληση για την συντήρησή τους.»

«Εάν δεν δράσουμε, οι μελλοντικές γενιές δεν θα δουν αυτά τα έργα με τον ίδιο τρόπο που τα βλέπουμε εμείς» προειδοποίησε ο Βαν Λανγκ (Διευθυντής στο μουσείο Rijksmuseum του Άμστερνταμ). [3]

Στην συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία καλούμαστε να εντοπίσουμε με βάση την υπολογιστική ρευστοδυναμική, με το πρόγραμμα Fluent το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα το οποίο επικάθεται στον εκάστοτε καμβά που έχουμε τοποθετήσει εντός του θαλάμου δοκιμών. Αυτό θα επιτευχθεί εφόσον δημιουργήσουμε την κατάλληλη γεωμετρία και ορίσουμε τις σωστές συνθήκες ώστε η προσομοίωση μας να είναι όσο το δυνατόν πιο πραγματική.

2. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Το πρόγραμμα Fluent χρησιμοποιείται από εταιρίες έρευνας, κατασκευής και ανάπτυξης ναυπηγικής, αεροναυπηγικής, παραγωγής ενέργειας, παραγωγής χημικών προϊόντων και γενικά όπου χρήζει εφαρμογή προσομοίωσης φαινομένων ροής.

Για επίλυση προβλημάτων τα οποία περιέχουν ροή ρευστών το πρόγραμμα αυτό αποτελεί μονόδρομο αφού μας δίνει την ικανότητα της πρόβλεψης συμπεριφοράς ενός ρευστού μιας και χρησιμοποιεί αλγορίθμους και άλλες αριθμητικές μεθόδους όπως εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας, συνέχειας και ορμής με οριακές συνθήκες και γεωμετρία την οποία ορίζουμε εμείς ως χρήστες. [4]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ο ΠΡΟΤΥΠΟΣ ΘΑΛΑΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

1.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΑΛΑΜΟΥ

Ο θάλαμος δοκιμών έχει κατασκευαστεί στο «Εργαστήριο Μελέτης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης» του καθηγητή κ. Πανδή, στο Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής (ΙΤΕ/ΙΕΧΜΗ).

Ο πρότυπος θάλαμος έχει κατασκευαστεί από ανοξείδωτη λαμαρίνα πάχους 1mm . Οι διαστάσεις του είναι 60·41·31 (μήκος·πλάτος·ύψος) cm και εσωτερικά έχει τοποθετηθεί η βάση που θα τοποθετείται ο καμβάς. Η βάση είναι στην ουσία μια διάτρητη λαμαρίνα στο εσωτερικό του θαλάμου (εικόνα 1.1.4), η οποία έχει στερεωθεί στα 40 cm του μήκους από την είσοδο (εικόνα 1.1.2). Στην είσοδο υπάρχουν πέντε οπές διαμέτρου 1/4' από τις οποίες θα διοχετεύουμε το ρευστό (εικόνα 1.1.1, εικόνα 1.1.3) και στο πίσω τοίχωμα – έξοδο μία οπή αντίστοιχου διαμετρήματος. Επίσης στην πίσω όψη παρατηρούμε πως υπάρχει μια πόρτα η οποία κλείνει αεροστεγώς, από την οποία μπορούμε να επέμβουμε στο εσωτερικό του θαλάμου και να στερεώσουμε το καμβά μας.



Εικόνα 1.1.1: Εμπρός όψη θαλάμου, οπές εισαγωγής ρευστού.



Εικόνα 1.1.2: Πίσω όψη θαλάμου, βάση καμβά.



Εικόνα 1.1.3: Σωλήνες παροχής ρευστού



Εικόνα 1.1.4: Εσωτερικό θαλάμου

1.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούμε στον τρόπο λειτουργίας του θαλάμου δοκιμών. Αρχικά πρέπει να στερεώσουμε το έργο τέχνης πάνω στην διάτρητη βάση που αναφέραμε προηγουμένως (εικόνα 1.1.2). Εδώ παρατηρούμε πως ο

καμβάς δεν έχει το ίδιο πλάτος και ύψος με τον θάλαμο εφόσον οι διαστάσεις του είναι 40·30 cm. Το μικρότερο μέγεθος σε σχέση με το εσωτερικό του θαλάμου αλλά και η χρήση διάτρητης λαμαρίνας ως βάση έχουν ως σκοπό την ομαλή ροή του ρευστού σε όλο το μήκος του θαλάμου.

Για αυτό το λόγο θα πρέπει ο καμβάς να τοποθετηθεί ακριβώς στο κέντρο της βάσης και να μείνει περιμετρικά ένα κενό 0.5 cm από το οποίο το εισερχόμενο ρευστό θα περάσει στο πίσω μέρος του καμβά και του θαλάμου και οδηγηθεί στην έξοδο. Αφού στερεωθεί λοιπόν ο καμβάς στο κέντρο της βάσης με φορά προς την είσοδο του αερίου, ασφαλίζουμε αεροστεγώς την πίσω πόρτα και μπορούμε να εισάγουμε το ρευστό.

Στις σωλήνες εισόδου του ρευστού (εικόνα 1.1.3), συνδέεται η παροχή του διοξειδίου του άνθρακα με συγκεκριμένη ταχύτητα και προκαθορισμένη συγκέντρωση. Στη συνέχεια το αέριο εισέρχεται στο θάλαμο, προσκρούει στον καμβά και στα τοιχώματα του θαλάμου, στροβιλίζεται και περνάει από το κενό περιμετρικά του καμβά στον πίσω χώρο του θαλάμου, στροβιλίζεται και εξέρχεται από την έξοδο όπου εκεί μετριέται η συγκέντρωση του αερίου και μπορούμε να έχουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FLUENT

2.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

2.1.1 Εισαγωγή γεωμετρίας

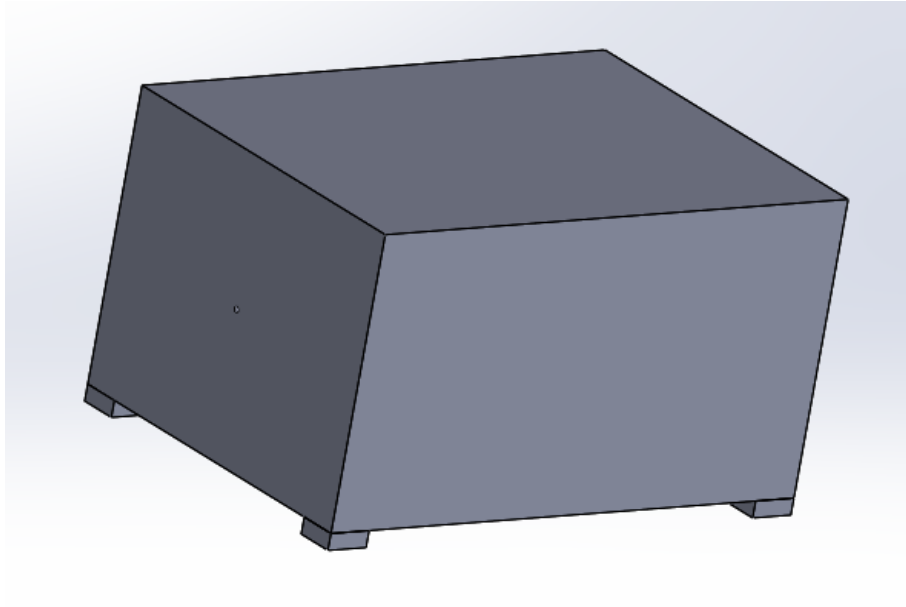
Ένα σημαντικό κομμάτι για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος που είναι προς μελέτη και επεξεργασία, είναι ο ορισμός της γεωμετρίας του αντικειμένου και του χώρου που αυτό περιβάλλεται. Για αυτό το λόγο λοιπόν, θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα πλήρες και πιστό αντίγραφο με όλες τις παραμέτρους ώστε να πετύχουμε όσο δυνατόν ακριβή αποτελέσματα .

Στο συγκεκριμένο υπολογιστικό πρόγραμμα η γεωμετρία μπορεί είτε να εισαχθεί έτοιμη από διαφορετικό σχεδιαστικό πρόγραμμα, είτε να δημιουργηθεί από τον χρήστη εντός του προγράμματος. Στην περίπτωση μας καλούμαστε να σχεδιάσουμε ένα πιστό αντίγραφο του θαλάμου δοκιμών αλλά και του καμβά που περιέχεται εντός του θαλάμου.

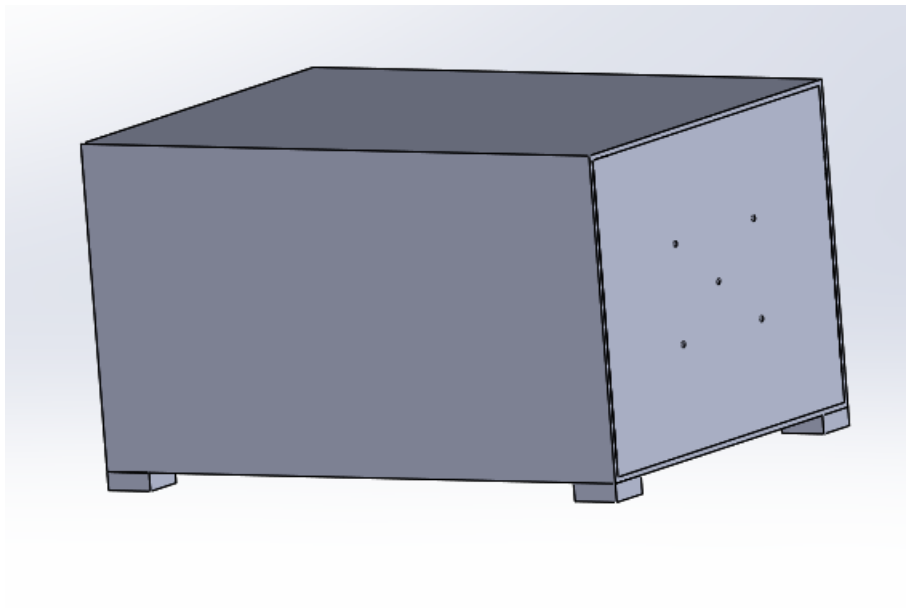
Αρχικά ο σχεδιασμός έγινε με το σχεδιαστικό πρόγραμμα solidworks και στη συνέχεια έγινε εισαγωγή της γεωμετρίας του στο Fluent.

2.1.2 Σχεδιασμός με το σχεδιαστικό πρόγραμμα solidworks.

Ο παρακάτω θάλαμος (εικόνα 2.1.2.1, εικόνα 2.1.2.2) έχει δημιουργηθεί σαν assembly από μεμονωμένα parts που σχεδιάσαμε ξεχωριστά σύμφωνα με τις διαστάσεις που είχε ο πρότυπος στο εργαστήριο. Το συγκεκριμένο αρχείο έχει αποθηκευτεί με τη μορφή .iges έτσι ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή του στο Fluent.



Εικόνα 2.1.2.1: Πίσω όψη πρότυπου θαλάμου solidworks.

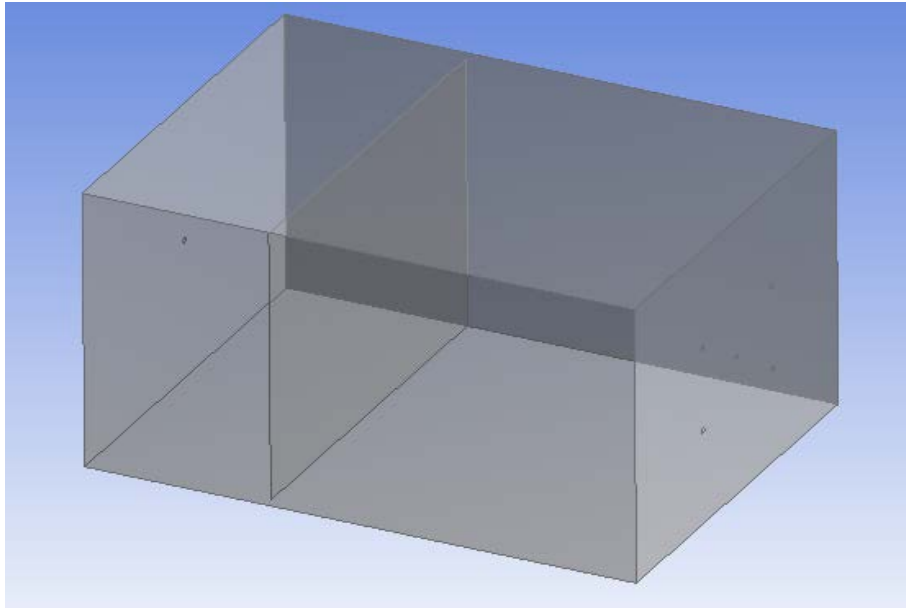


Εικόνα 2.1.2.2: Εμπρός όψη πρότυπου θαλάμου solidworks.

2.1.3 Εισαγωγή του στο υπολογιστικό πρόγραμμα fluent.

Η εισαγωγή του αρχείου έγινε στο Fluent ως εξής:

File→ Import External Geometry File → Επιλογή αρχείου γεωμετρίας



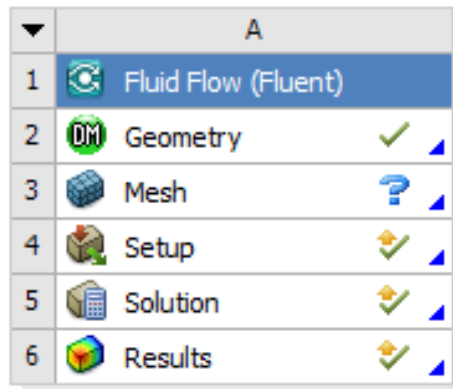
Εικόνα 2.1.3.1: Εισαγωγή γεωμετρίας στο fluent.

Παρατηρούμε εδώ πως έχουμε τροποποιήσει το κουτί και έχουμε αφαιρέσει τα στηρίγματα από το κάτω μέρος του θαλάμου διότι ενώ δεν είχαμε αλλοίωση στους υπολογισμούς μας, μας επηρέαζαν στον χρόνο των υπολογισμών (εικόνα 2.1.3.1).

Η αδυναμία επιλογής των επιφανειών ξεχωριστά, για τον ορισμό συνοριακών συνθηκών αργότερα, σε συνδυασμό με την μη δυνατότητα επιλογής μηδενικού πάχους στα τοιχώματα του θαλάμου μας οδήγησαν στην απόρριψη του συγκεκριμένου σχεδίου και στην επιλογή του σχεδιασμού εκ νέου μέσα από το Fluent.

2.1.4 Σχεδιασμός θαλάμου στο design modeler του fluent

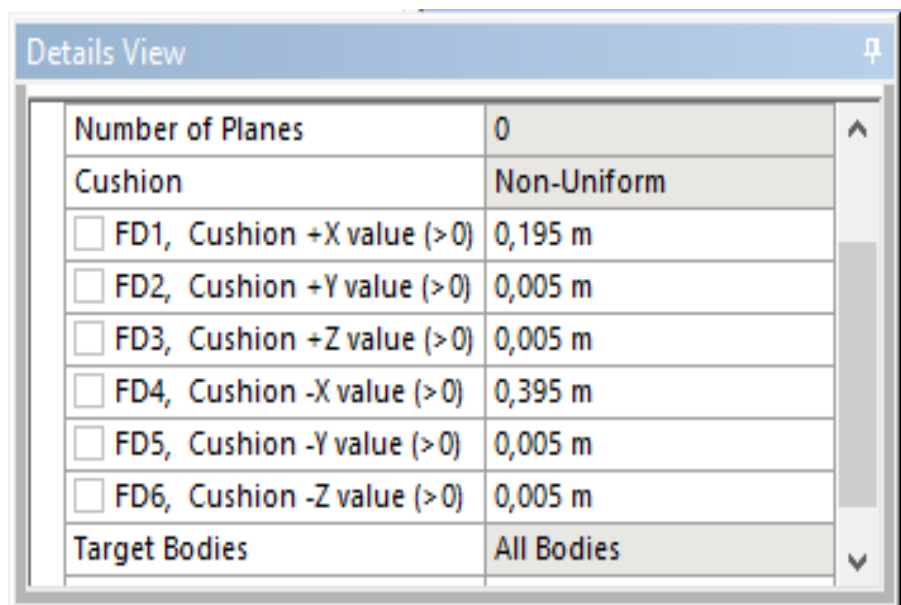
Αρχικά αφού ανοίξουμε το πρόγραμμα (Workbench project page) και πάμε στην καρτέλα geometry (εικόνα 2.1.4.1) πρέπει να επιλέξουμε το κατάλληλο plane και να σχεδιάσουμε τον καμβά.



Εικόνα 2.1.4.1: Πρόγραμμα fluent- geometry.

Έπειτα αφού επιλέξουμε το κατάλληλο plane, στην περίπτωση μας το y,z, δίνουμε το πλάτος και το ύψος του θαλάμου και κάνουμε extrude στον άξονα x. Ορίζουμε το πάχος του καμβά 1cm. Η δημιουργία του πρότυπου θαλάμου θα γίνει με τον ορισμό του ως μορφή enclosure. Έτσι για να εισάγουμε τον καμβά στο θάλαμο ακολουθούμε τα εξής βήματα:

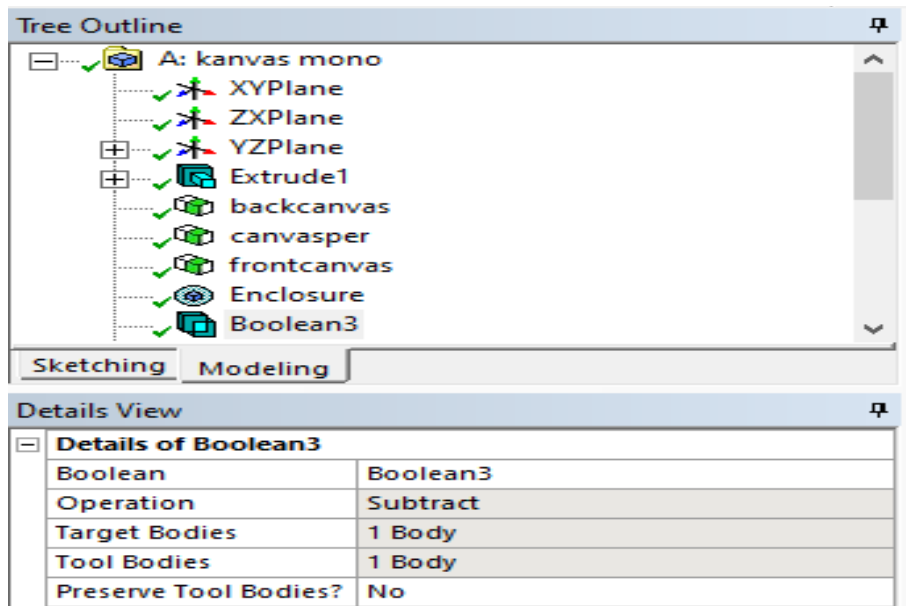
Tools → Enclosure



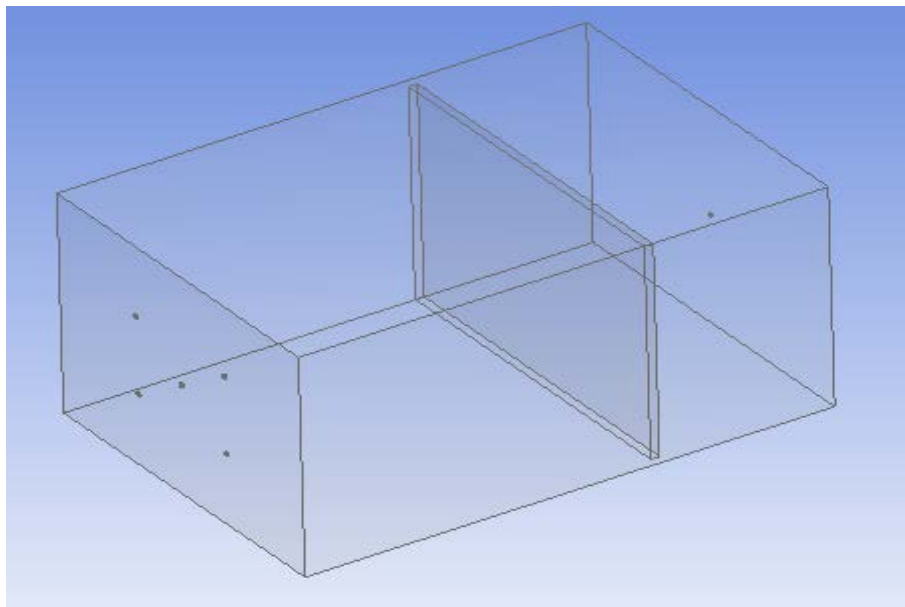
Εικόνα 2.1.4.2: Συντεταγμένες για τη δημιουργία του enclosure.

Στον πίνακα που εμφανίζεται (εικόνα 2.1.4.2) επιλέγουμε τις κατάλληλες συντεταγμένες σύμφωνα με την αρχή των αξόνων που την έχουμε ορίσει στο

σημείο που βρίσκεται ο καμβάς. Στη συνέχεια αφαιρούμε τον καμβά μέσα από το enclosure που δημιουργήσαμε με την εντολή Boolean. Επιλέγουμε δηλαδή ως target body το enclosure και ως tool body τον καμβά και κάνουμε subtract (εικόνα 2.1.4.3). Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι διότι η ροή πρέπει να περνάει μέσα από το θάλαμο και από τα κενά περιμετρικά του καμβά αλλά όχι μέσα από τον ίδιο. Τέλος δημιουργούμε τις οπές εισόδου και εξόδου του ρευστού και έχει ολοκληρωθεί το κομμάτι σχεδιασμού της γεωμετρίας (εικόνα 2.1.4.4).



Εικόνα 2.1.4.3: Εντολή Boolean (subtract).

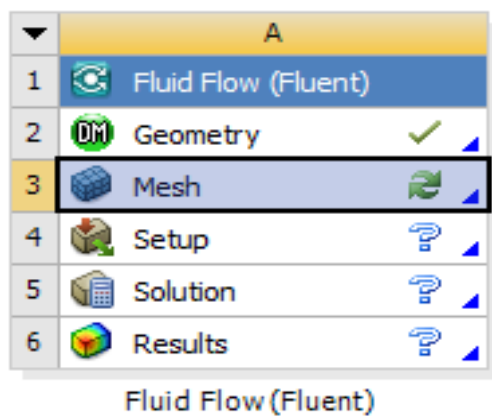


Εικόνα 2.1.4.4: Ολοκληρωμένη δημιουργία γεωμετρίας στο fluent.

Έπειτα μπορούμε να κλείσουμε το παράθυρο του design modeler και να επιστρέψουμε στο Workbench project page.

2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Για να ξεκινήσουμε τη διαδικασία του meshing, Αφού πάμε στην καρτέλα του Workbench project κάνουμε διπλό κλικ στο mesh (εικόνα 2.2.1).



Εικόνα 2.2.1: Πρόγραμμα fluent-mesh.

2.2.1 Ονομασία περιοχών.

Πριν προχωρήσουμε στο mesh, ονοματίζουμε ξεχωριστά τις περιοχές του προβλήματος (εικόνα 2.2.1.1) που μας ενδιαφέρουν για να μπορέσουμε στη συνέχεια να ορίσουμε τη διακριτοποίηση του πλέγματος αλλά και τις επιμέρους συνοριακές συνθήκες στα επόμενα βήματα.

Επιλέγοντας την κάθε περιοχή που θέλουμε με δεξί κλικ → create named selection δίνουμε το κατάλληλο όνομα. Έτσι έχουμε ορίσει:

Inlet: Τις πέντε οπές εισόδου του ρευστού.

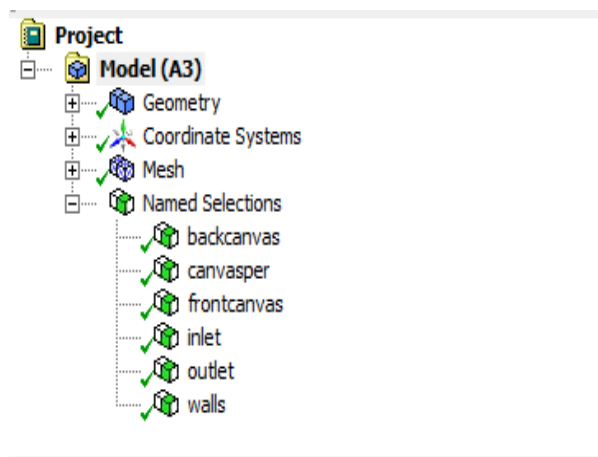
Outlet: Την οπή εξόδου του ρευστού.

Front canvas: Την εμπρός όψη του καμβά.

Back canvas: Την πίσω όψη του καμβά.

Canvasper: Την περίμετρο του καμβά.

Walls: Τα υπόλοιπα τέσσερα τοιχώματα του θαλάμου.



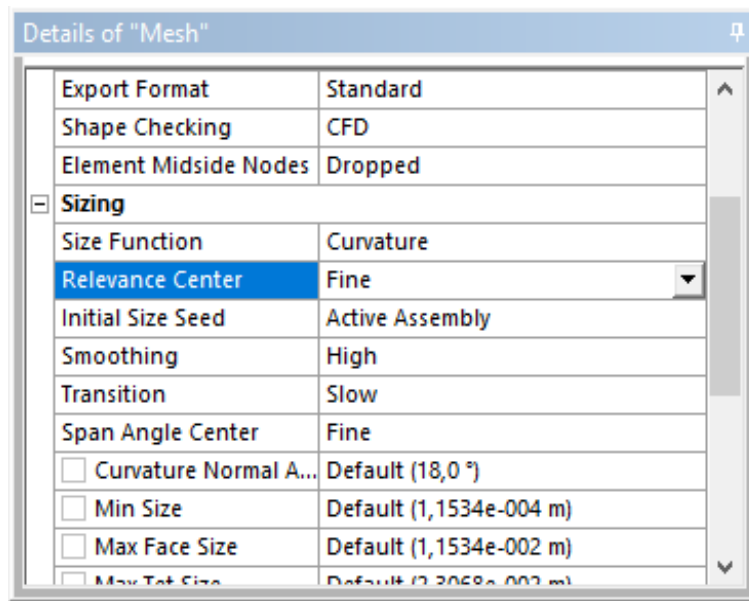
Εικόνα 2.2.1.1: Ονοματισμένες περιοχές του προβλήματος.

2.2.2 Διακριτοποίηση (mesh).

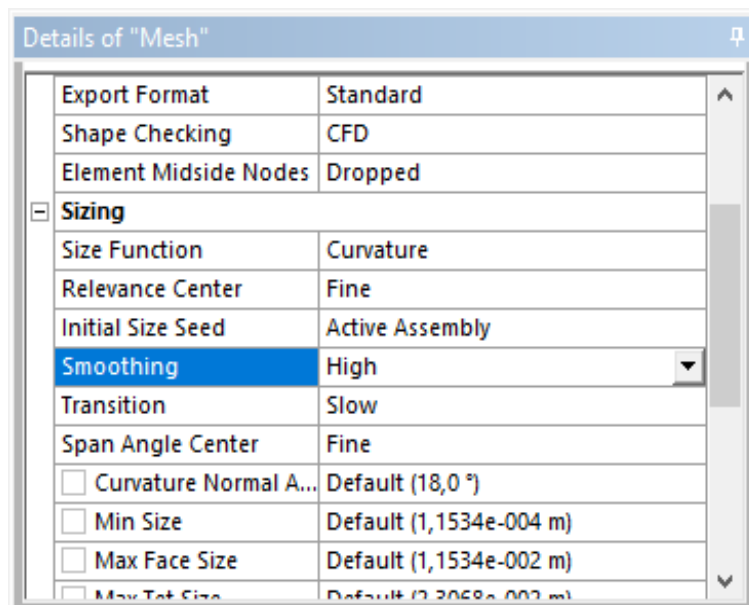
Στο σημείο αυτό, από τη στιγμή που έχουμε ορίσει την γεωμετρία του προβλήματος θα πρέπει να δημιουργήσουμε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο στη συνέχεια θα το πυκνώσουμε στα σημεία όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια. Ως πλέγμα ορίζεται το σύνολο των πεπερασμένων όγκων της γεωμετρίας που έχει διακριτοποιηθεί.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα τα σημεία που έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι τα σημεία εισόδου και εξόδου του ρευστού όπως και η εμπρόσθια και οι περιμετρικές πλευρές του καμβά. Έτσι θα πρέπει στα σημεία αυτά να έχουμε πιο πυκνό πλέγμα για να λάβουμε πιο ακριβή αποτελέσματα, καθότι στα σημεία αυτά έχουμε μεταβολές πίεσης και ταχύτητας του ρευστού.

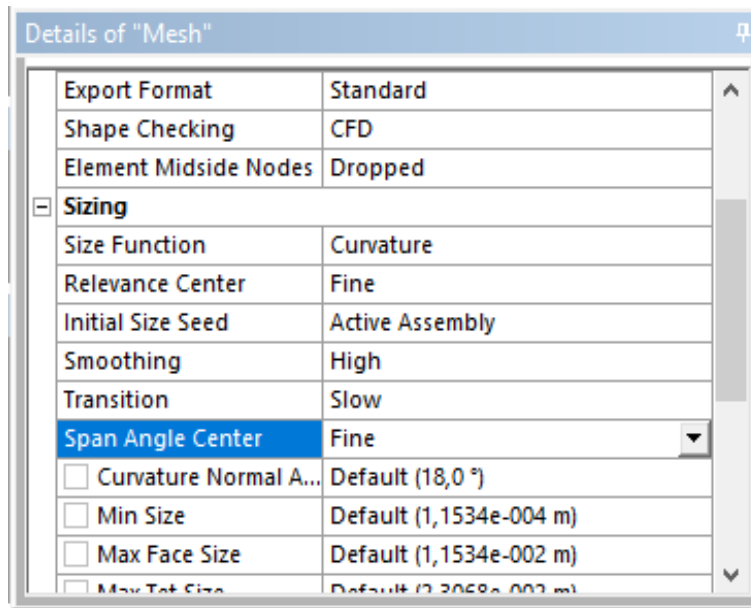
Παρακάτω φαίνονται ενδεικτικές ρυθμίσεις βελτιστοποίησης της διακριτοποίησης σε σχέση με τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του εξομοιωτή.



Εικόνα 2.2.2.1: Relevance center.



Εικόνα 2.2.2.2: Smoothing.

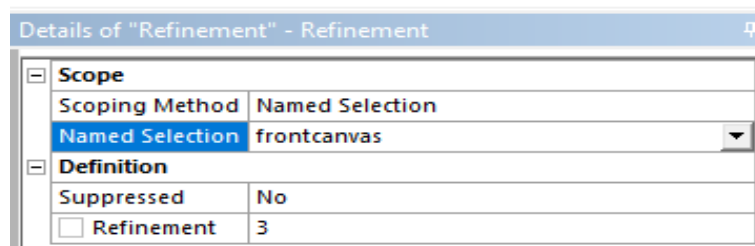
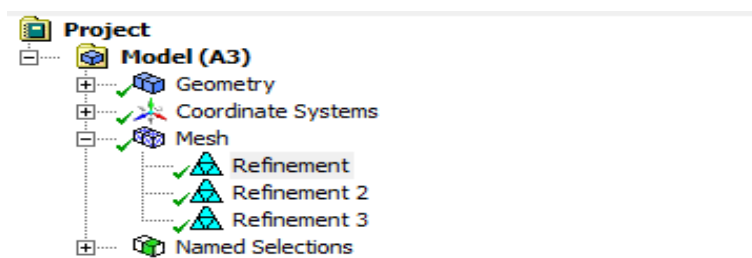


Εικόνα 2.2.2.3: Span angle center.

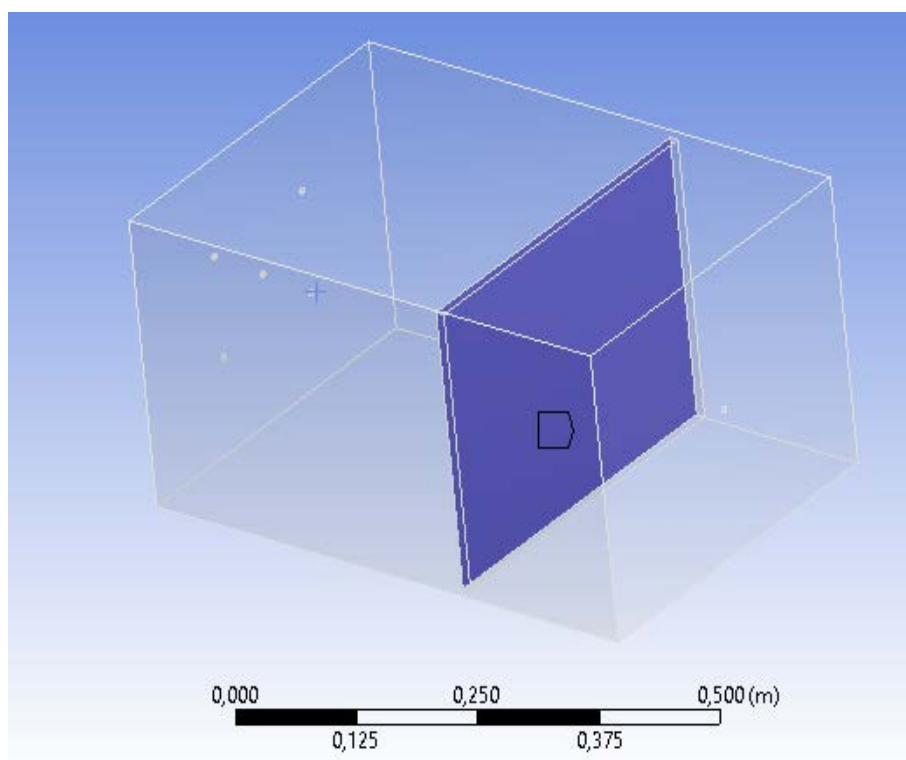
Πέραν του κανονικού mesh που θέσαμε, ήταν αναγκαίο να πυκνώσουμε παραπάνω το πλέγμα στα σημεία ενδιαφέροντος. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή inflation ή refinement. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η εντολή inflation αλλά δε λειτούργησε ικανοποιητικά και έτσι επιλέχθηκε η εντολή refinement.

scoping method → named selection (εικόνα 2.2.2.4) και στη συνέχεια επιλέγουμε την πρώτη περιοχή που μας ενδιαφέρει (εικόνα 2.2.2.5), η οποία είναι η εμπρόσθια πλευρά του καμβά (εικόνα 2.2.2.6).

Εικόνα 2.2.2.4: Τρόπος επιλογής περιοχής.

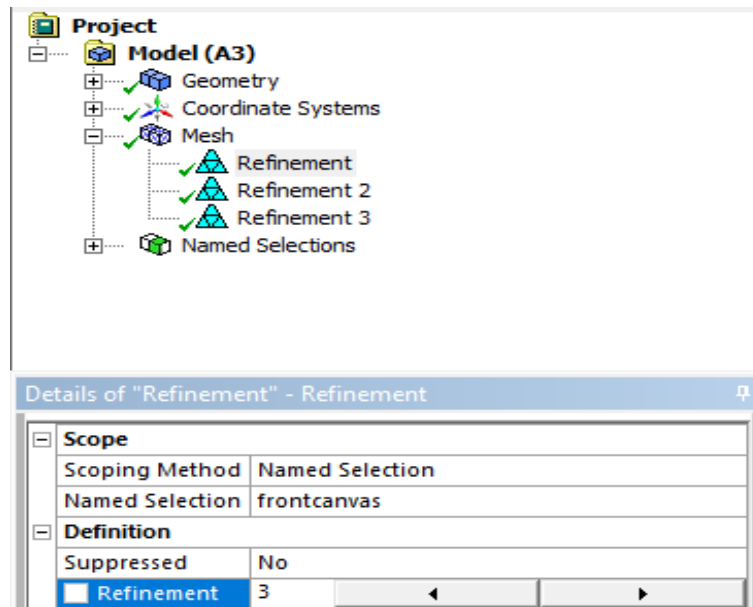


Εικόνα 2.2.2.5: Επιλογή της εμπρόσθιας όψης του καμβά.



Εικόνα 2.2.2.6: Προβολή εμπρόσθιας όψης του καμβά.

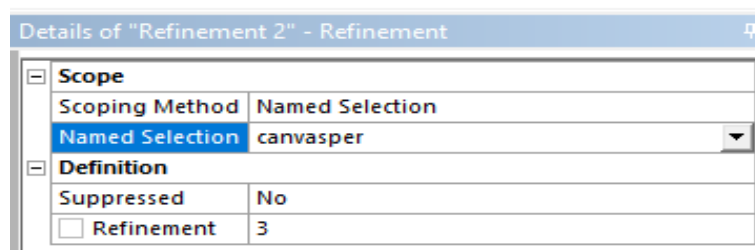
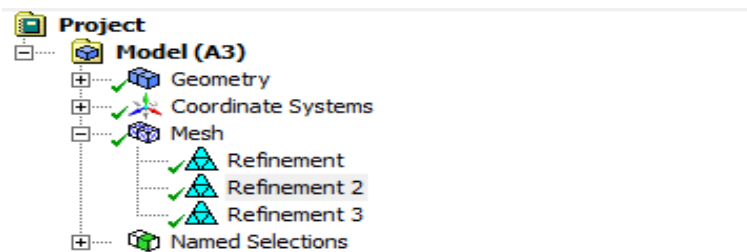
Επειδή κύριο αντικείμενο μελέτης του προβλήματος είναι ο καμβάς, αφού επιλέξουμε την όψη που μας ενδιαφέρει, ορίζουμε το μέγιστο βαθμό πύκνωσης σε αυτή την περιοχή. Στην περίπτωση του refinement ο αριθμός αυτός είναι το 3 (εικόνα 2.2.2.7).



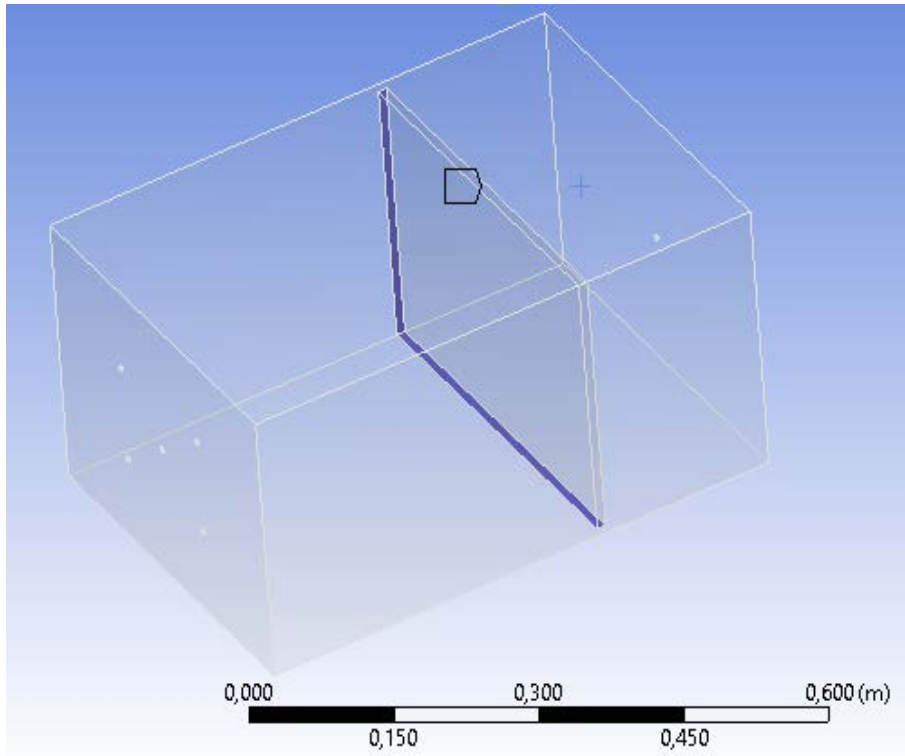
Εικόνα 2.2.2.7: Βαθμός πύκνωσης πλέγματος.

scoping method → named selection (εικόνα 2.2.2.8) και στη συνέχεια επιλέγουμε την δεύτερη περιοχή που μας ενδιαφέρει (εικόνα 2.2.2.9), η οποία είναι ο χώρος περιμετρικά του καμβά (εικόνα 2.2.2.10).

Εικόνα 2.2.2.8: Τρόπος επιλογής δεύτερης περιοχής.

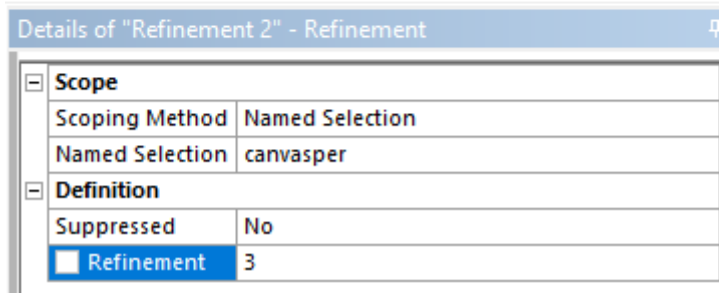
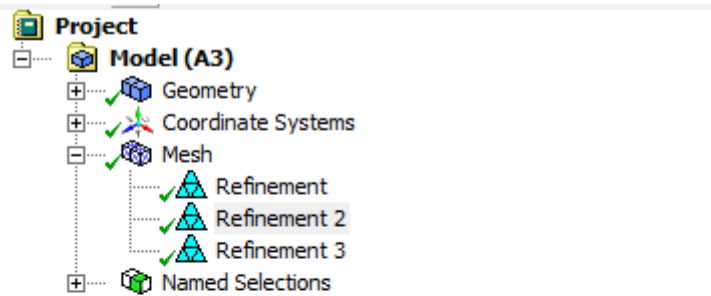


Εικόνα 2.2.2.9: Επιλογή περιμετρικής όψης καμβά.



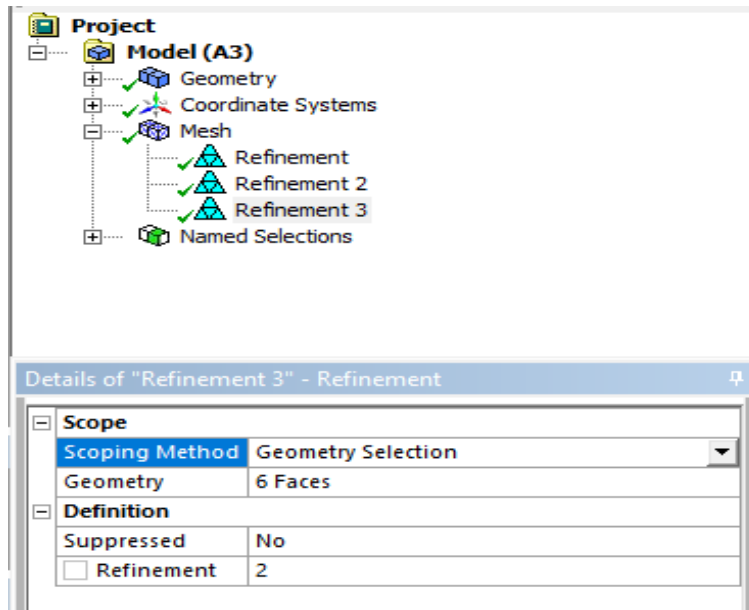
Εικόνα 2.2.2.10: Προβολή περιμετρικής όψης καμβά.

Και σε αυτή τη περιοχή ορίζουμε το μέγιστο βαθμό πύκνωσης. Στην περίπτωση του refinement ο αριθμός αυτός είναι το 3 (εικόνα 2.2.2.11).

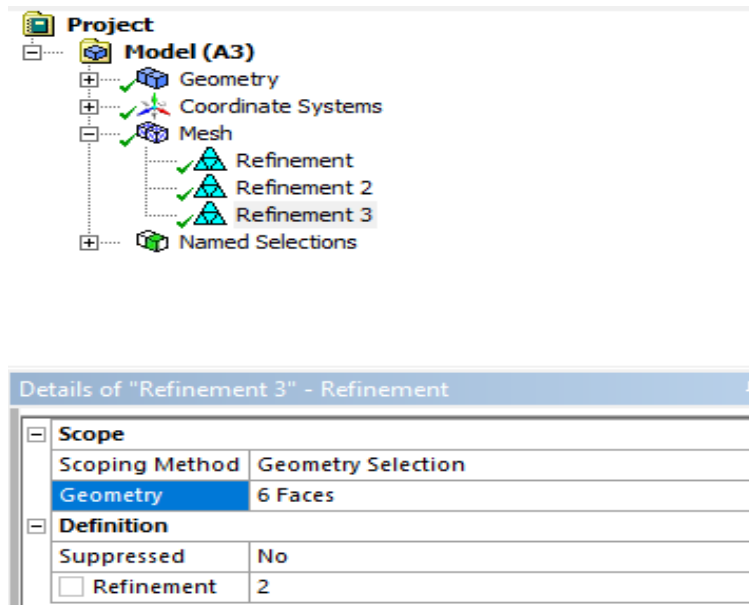


Εικόνα 2.2.2.11: Βαθμός πύκνωσης πλέγματος.

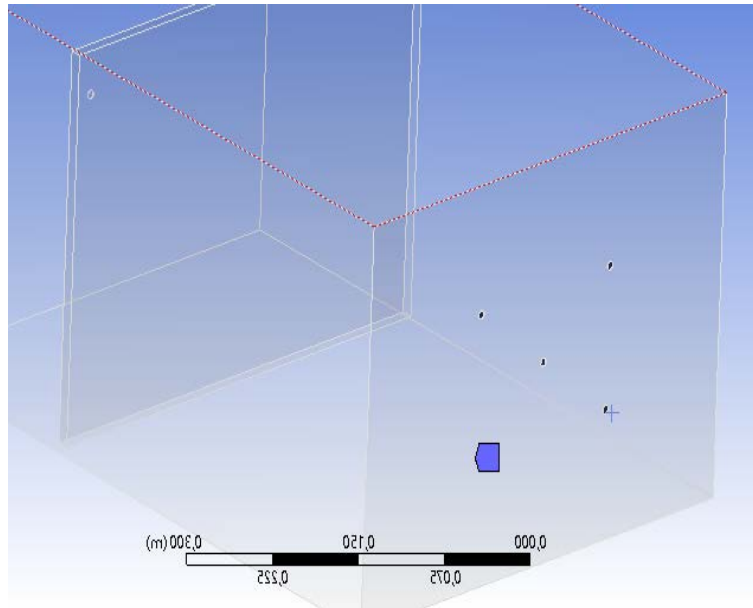
scoping method → geometry selection (εικόνα 2.2.2.12) και στη συνέχεια επιλέγουμε την τρίτη περιοχή που μας ενδιαφέρει (εικόνα 2.2.2.13), οι οποίες είναι οι σπές εισόδου και εξόδου του ρευστού (εικόνα 2.2.2.14, 2.2.2.15).



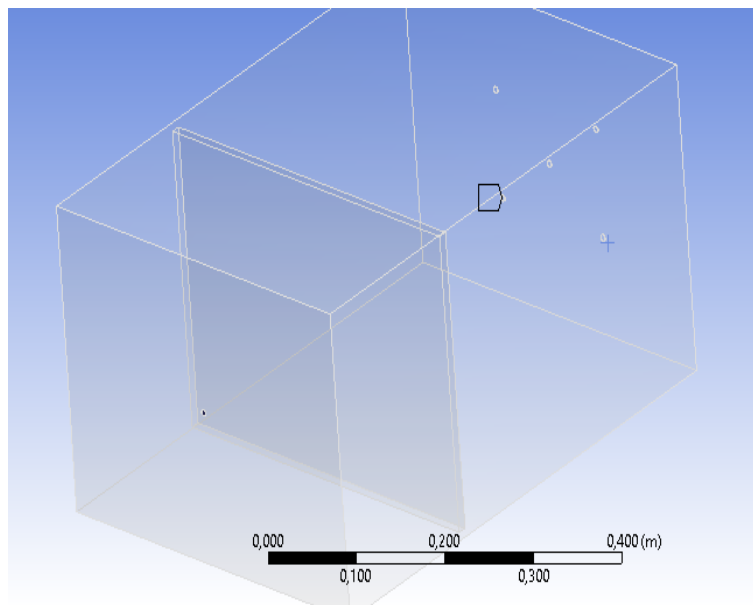
Εικόνα 2.2.2.12: Τρόπος επιλογής τρίτης περιοχής.



Εικόνα 2.2.2.13: Επιλογή οπών εισόδου – εξόδου.

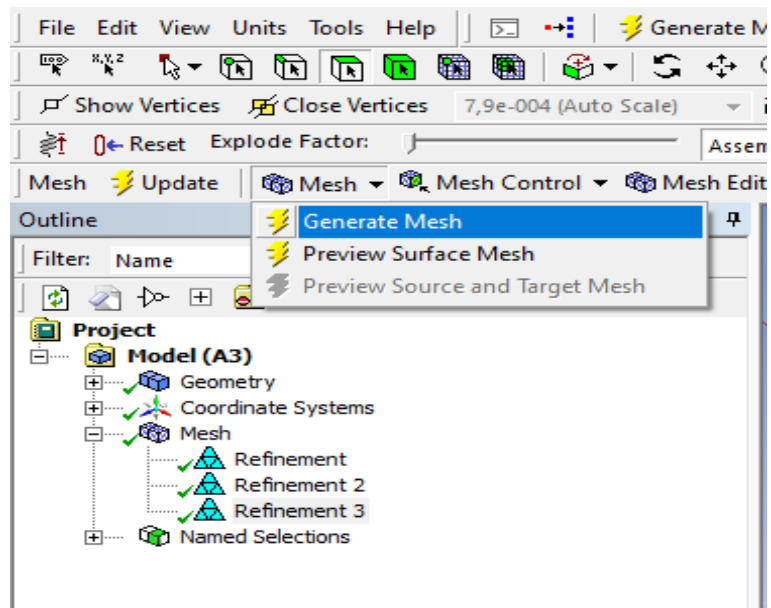


Εικόνα 2.2.2.14: Προβολή οπών εισόδου.

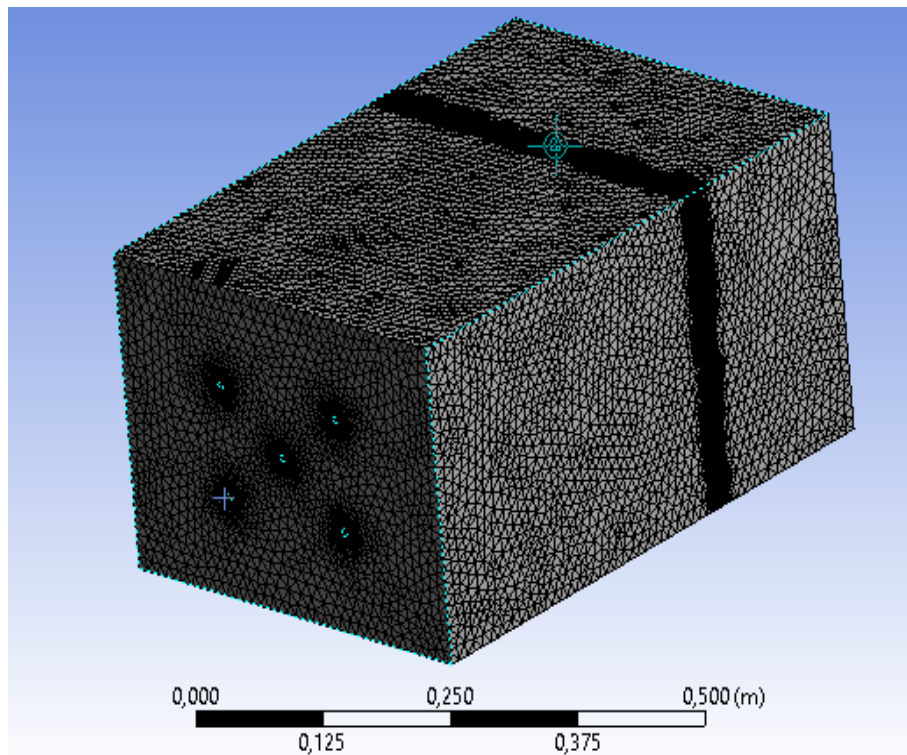


Εικόνα 2.2.2.15: Προβολή οπών εξόδου.

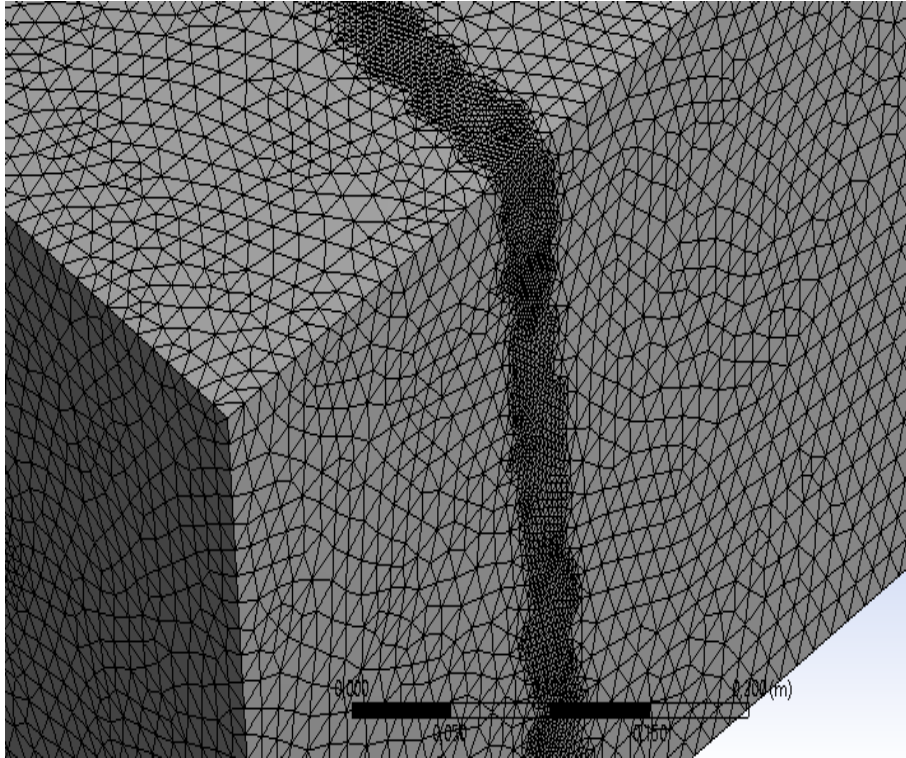
Αφού λοιπόν τελειώσουμε τη διαστασιολόγηση του προβλήματος, θα πρέπει να δημιουργήσουμε το πλέγμα. Αυτό θα επιτευχθεί αφού κάνουμε κλικ στο mesh → generate mesh (εικόνα 2.2.2.16) και θα λάβουμε τα εξής αποτελέσματα (εικόνα 2.2.2.17, 2.2.2.18, 2.2.2.19)



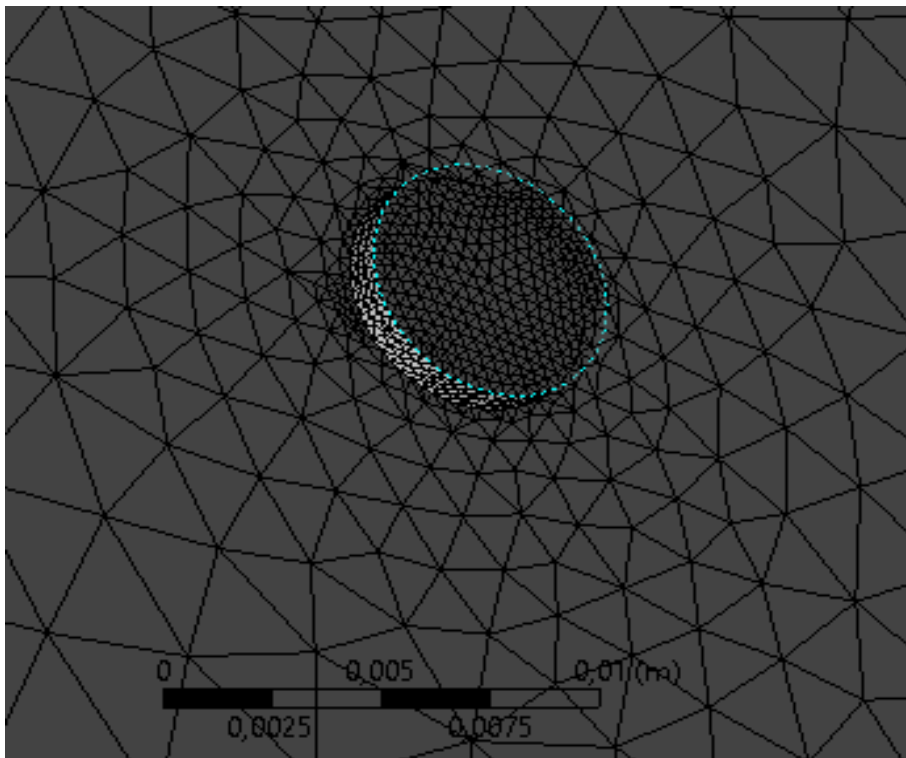
Εικόνα 2.2.2.16: Δημιουργία mesh.



Εικόνα 2.2.2.17: Διακριτοποίηση θαλάμου προσομοίωσης.

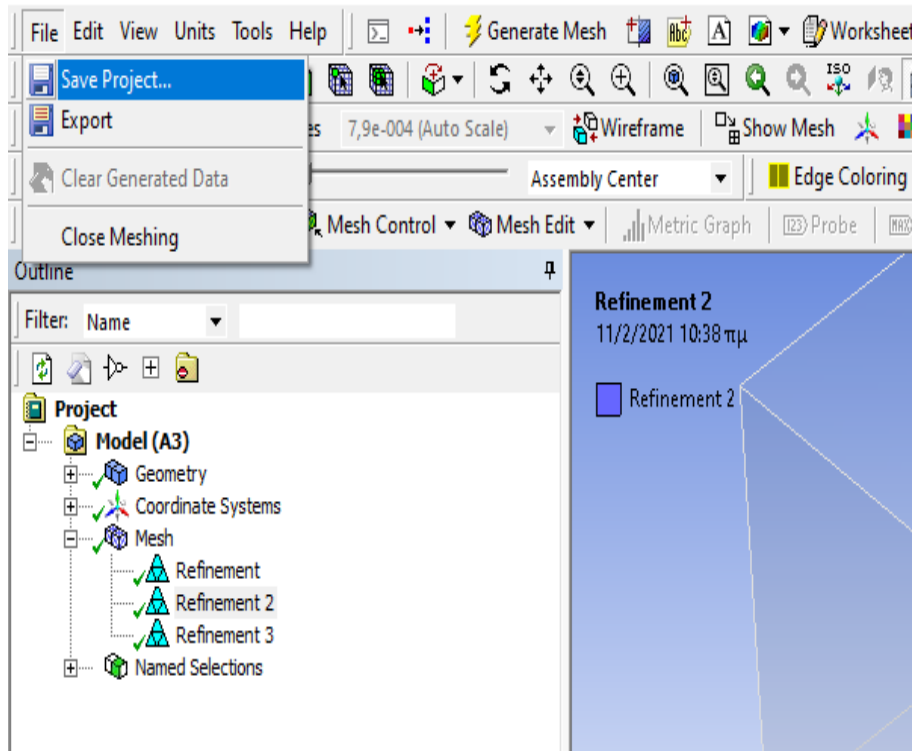


Εικόνα 2.2.2.18: Εστίαση στη διακριτοποίηση της περιοχής του καμβά.



Εικόνα 2.2.2.19: Εστίαση στη διακριτοποίηση της περιοχής των οπών.

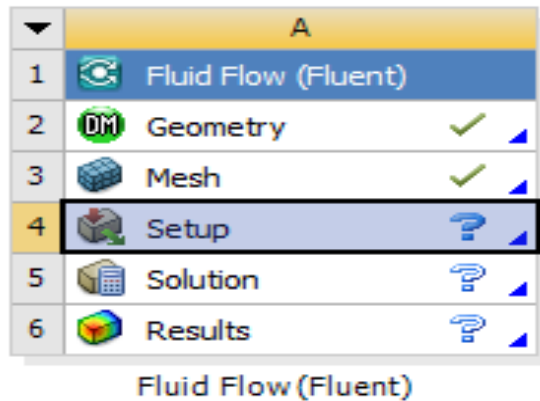
Τέλος πηγαίνουμε στη καρτέλα file → save project (εικόνα 2.2.2.20) και αφού αποθηκεύσουμε το πρόγραμμα, κλείνουμε το παράθυρο του mesh.



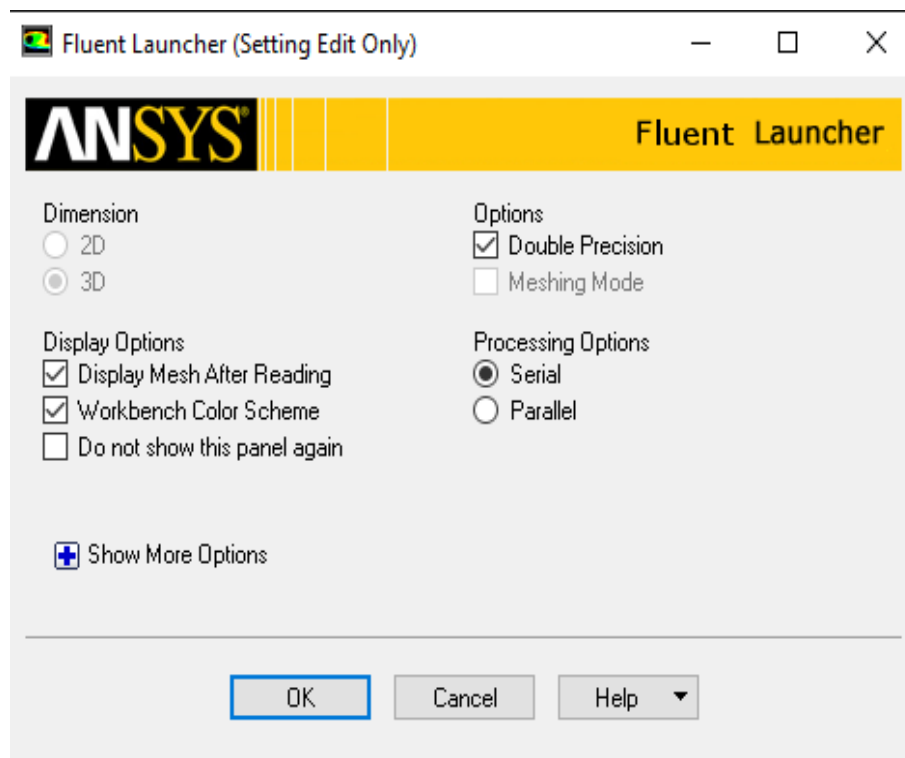
Εικόνα 2.2.2.20: Αποθήκευση επιλογών.

2.3 ΎΝΑΡΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FLUENT.

Μετά το κομμάτι του mesh, συνεχίζουμε με το κομμάτι του setup. Στο Workbench project page λοιπόν, κάνουμε διπλό κλικ στην επιλογή setup (εικόνα 2.3.1) και εμφανίζεται ένα παράθυρο ως fluent launcher (εικόνα 2.3.2) στο οποίο δεχόμαστε την επιλογή double precision και συνεχίζουμε πατώντας OK στο κάτω μέρος του παραθύρου. Με την επιλογή της διπλής ακρίβειας στην επίλυση του προβλήματος μας , κάθε αριθμός αντιπροσωπεύεται από 64 bits, ενώ στις μονής ακρίβειας επίλυση, αντιπροσωπεύεται από 32 bits. Ο μεγαλύτερος αριθμός bits προϋποθέτει μεν μεγαλύτερη μνήμη στον υπολογιστή αλλά αυξάνει την ακρίβεια και το εύρος των μεγεθών τα οποία αντιπροσωπεύονται στο πρόβλημα. [9]



Εικόνα 2.3.1: Πρόγραμμα Fluent- setup.

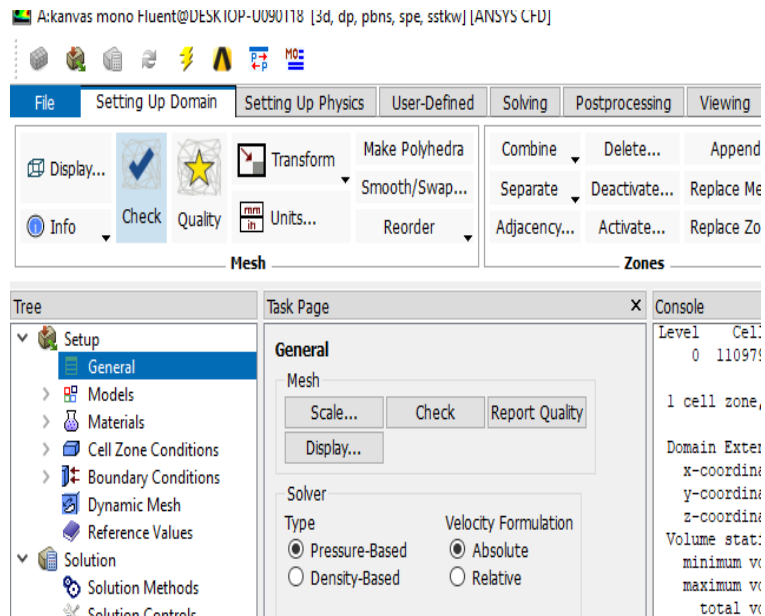


Εικόνα 2.3.2: Αποδοχή επιλογής double precision.

2.3.1 Έλεγχος του mesh και στατιστικά στοιχεία.

Αρχικά αφού ανοίξει το παράθυρο του setup, ελέγχουμε το mesh για να βεβαιωθούμε ότι το έχουμε εισάγει σωστά από το Workbench. Ελέγχουμε για τυχόν λάθη στο πλέγμα, επιλέγοντας την καρτέλα Setting Up Domain → Check (εικόνα 2.3.1.1). Στο κομμάτι του command του προγράμματος (εικόνα 2.3.1.2)

παρατηρούμε πως έχει ολοκληρωθεί ο έλεγχος και δεν μας έχει εμφανιστεί κάποιο μήνυμα σφάλματος.



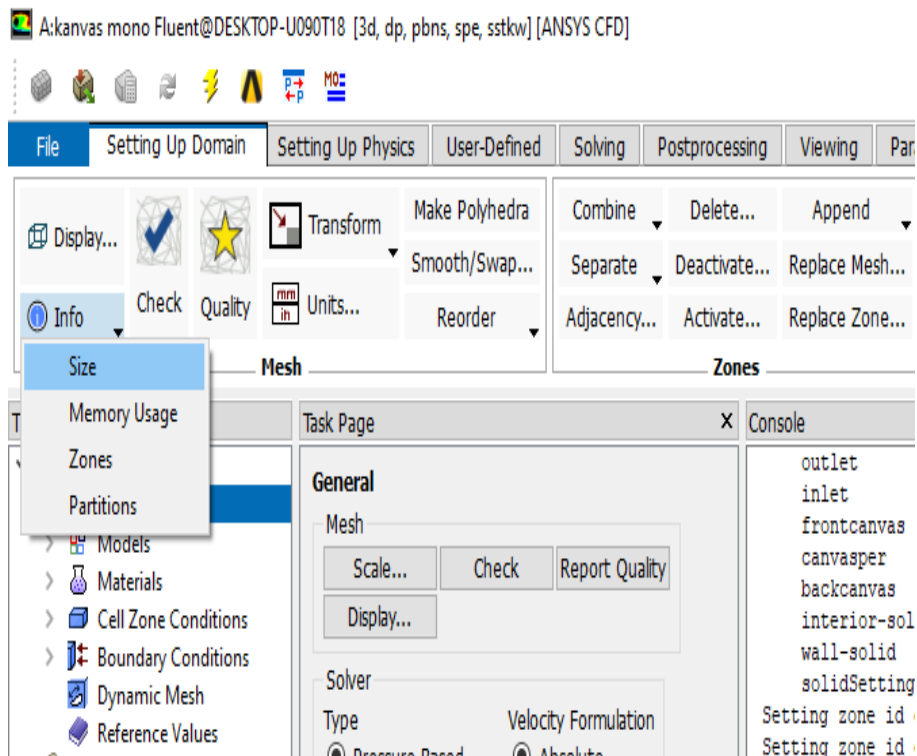
Εικόνα 2.3.1.1: Επιλογή ελέγχου πλέγματος.

```

Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = -3.950000e-01, max (m) = 2.050000e-01
  y-coordinate: min (m) = -5.000000e-03, max (m) = 3.050000e-01
  z-coordinate: min (m) = -5.000000e-03, max (m) = 4.050000e-01
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 8.281779e-13
  maximum volume (m3): 2.926143e-06
  total volume (m3): 7.505981e-02
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 1.282601e-08
  maximum face area (m2): 4.473680e-04
Checking mesh.....
Done.
  
```

Εικόνα 2.3.1.2: Αποτελέσματα ελέγχου πλέγματος.

Στη συνέχεια επιλέγοντας την καρτέλα Setting Up Domain → Info → Size (εικόνα 2.3.1.3) μπορούμε να δούμε τα στατιστικά στοιχεία της διακριτοποίησης (εικόνα 2.3.1.4).



Εικόνα 2.3.1.3: Επιλογή για προβολή στατιστικών σημείων.

```

Level      Cells      Faces      Nodes      Partitions
0          1109791    2260337    207172     1

1 cell zone, 7 face zones.

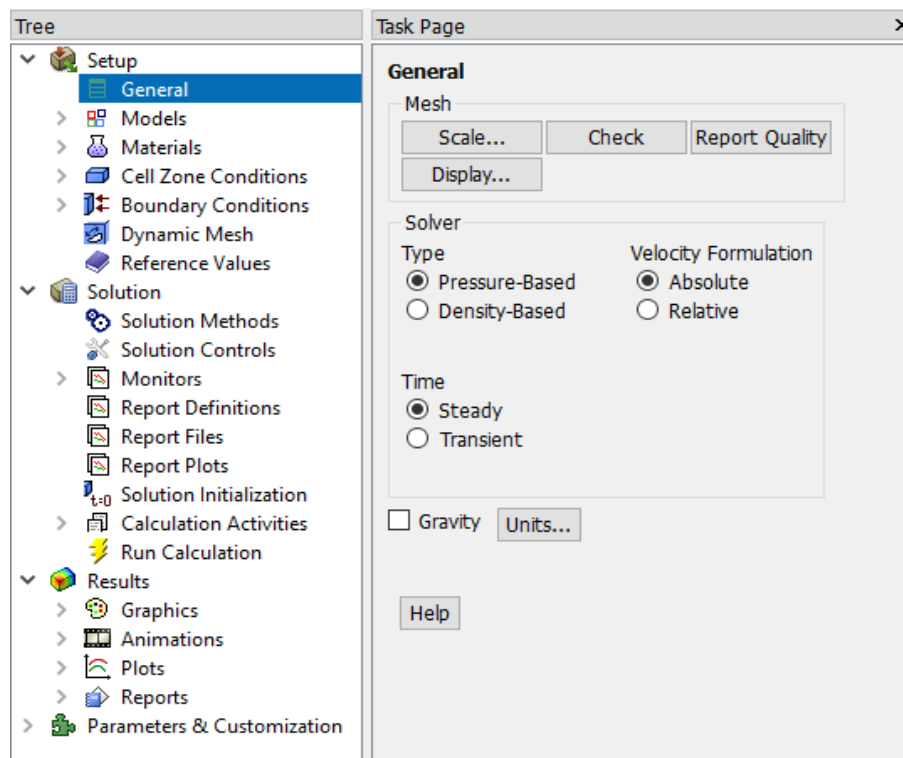
```

Εικόνα 2.3.1.4: Στατιστικά στοιχεία.

2.3.2 Επιλογή λύτη.

Στην καρτέλα General στο παράθυρο του setup, ορίζουμε τον τύπο του λύτη (solver) κάνοντας κλικ στην επιλογή pressure based (εικόνα 2.35). Προτιμούμε εκείνον έναντι του density based λόγω αφενός της ευελιξίας του στη λύση ρευστοδυναμικών μοντέλων και αφετέρου λόγω του ότι η ροή είναι ασυμπίεστη, καθώς όπως υπολογίστηκε ο αριθμός Mach ($Ma = u/c$, όπου c είναι η ταχύτητα του ήχου σε Κ.Σ.) είναι μικρότερος από 0.02. Φαινόμενα συμπίεστικότητας θα είχαμε για αριθμό Mach μεγαλύτερο του 0.2, οπότε τότε θα ήταν επιβεβλημένη η χρήση του συμπιεστού ροϊκού μοντέλου (“density based”). Επίσης επειδή η ροή του αερίου στο πρόβλημα που μελετούμε είναι

μόνιμη, πρέπει να καθορίσουμε το χρόνο ως σταθερό. Έτσι στον όρο Time, κάνουμε κλικ στην επιλογή Steady (εικόνα 2.3.2.1).



Εικόνα 2.3.2.1: Επιλογή τύπου λύτη και ροής.

2.3.3 Επιλογή ροϊκού μοντέλου.

Καθοριστικό στάδιο στην επίλυση του προβλήματος αποτελεί η σωστή επιλογή ροϊκού μοντέλου. Η επιλογή αυτή πρέπει να γίνει σύμφωνα με τις συνθήκες ροής που επικρατούν στο δικό μας πρόβλημα. Μια λανθασμένη επιλογή μοντέλου, θα οδηγήσει σε μη αξιόπιστα αποτελέσματα και πιθανόν σε αδυναμία σύγκλισης της λύσης.

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με δύο διαφορετικά προβλήματα, ένα με απλή μόνιμη ροή και ένα με παροχή μάζας. Η μόνη διαφορά τους όσον αφορά το προγραμματιστικό κομμάτι είναι στην επιλογή των μοντέλων και των συνοριακών συνθηκών.

Με βάση τις πτυχιακές εργασίες που είχε αναθέσει ο κύριος Καλαράκης Αλέξανδρος στους συναδέλφους, Βούλτσου Διονυσία- Μαρία [5] και Μπορονικολό Γεώργιο [6], γνωρίζουμε πως τα ιδανικά μοντέλα για την ροή που έχουμε στο δικό μας πρόβλημα είναι το k-ε και το k-ω SST.

Το μοντέλο standard k-ε

Το κανονικό μοντέλο k-ε, είναι το πιο διαδομένο μοντέλο για την προσομοίωση μιας τυρβώδους ροής. Αποτελεί ένα μοντέλο δύο μερικών διαφορικών εξισώσεων με δύο μεταβλητές, το k όπου είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια και το ε που είναι ο ρυθμός απόσβεσης της κινητικής ενέργειας. Ένα μειονέκτημα των μοντέλων k-ε είναι η έλλειψη ακρίβειας και η μειωμένη απόδοση σε ροές με μεγάλη κλίση ροϊκών γραμμών, σε ροές με μεγάλη μεταβολή πίεσης, σε περιστροφικές ροές και σε ροές με αποκόλληση του οριακού στρώματος. [8]

Οι εξισώσεις μεταφοράς για το μοντέλο k-ε standard είναι οι παρακάτω :

$$i. \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$ii. \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

- G_k : αφορά την παραγωγή κινητικής ενέργειας λόγω των παραγώγων των μέσων ταχυτήτων.
- G_b : σχετίζεται με την παραγωγή ενέργειας λόγω άνωσης.
- Y_M : σχετίζεται με την συμπίεστικότητα της ροής.

Πίνακας 2.3.3.1: Σταθερές.

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$
1.44	1.92	0.09

- $\sigma_k = 1$: τυρβώδης αριθμός Prandtl για το k.
- $\sigma_\varepsilon = 1.3$: τυρβώδης αριθμός Prandtl για το ε.
- S_ε : όροι πηγών.

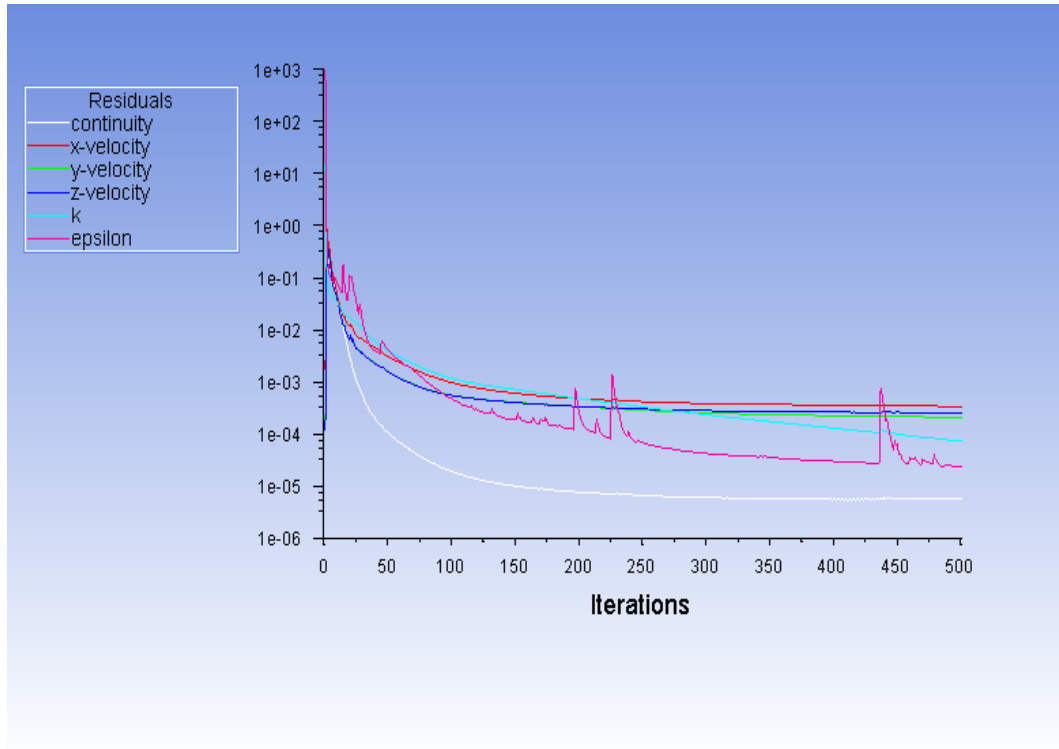
Το τυρβώδες ιξώδες ισούται με :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

όπου C_μ μια σταθερά

Οι εξισώσεις του μοντέλου και οι σταθερές που έχουν αναφερθεί, λήφθηκαν από το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος Fluent. [7]

Αρχικά επιλέξαμε το k-ε του οποίου η λύση δεν είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα ως προς τη σύγκλιση (εικόνα 2.3.3.1).



Εικόνα 2.3.3.1: Διάγραμμα standard k-ε.

Το μοντέλο k- ω SST

Τα μοντέλα k- ω αποτελούν μοντέλα δυο εξισώσεων με δύο μεταβλητές, το k όπου είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια και το ω που είναι η ειδική διάχυση. Το k- ω SST είναι ιδανικό για ροές που έχουν χαμηλό αριθμό Re και παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια, σε περιοχές κοντά στο τοίχωμα όπου μπορεί να υπάρχει αποκόλληση της ροής αλλά και στην ανάλυση οριακών στρωμάτων. Αρνητικό σημείο του μοντέλου, είναι η ανακρίβεια των αποτελεσμάτων σε περιοχές κοντά στην ελεύθερη ροή λόγω μεγάλης ευαισθησίας της μεταβλητής ω . [10]

Οι εξισώσεις του μοντέλου k- ω SST είναι οι παρακάτω :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \beta' \rho k \omega \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha_1 \frac{\omega}{k} G_k - \beta_1 \rho k \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\omega \sigma_{\omega iz}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned}$$

Το τυρβώδες ιξώδες ισούται με :

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[\frac{15 F_2}{a^* a_1 \omega} \right]}$$

Το υβριδικό αυτό μοντέλο έχει αναπτυχθεί από τον Menter χρησιμοποιεί το κ- ω στον υπολογισμό της τύρβης του εσωτερικού πεδίου έως και όρια των τοιχωμάτων αλλά και έναν μετασχηματισμό του κ- ϵ για την συμπεριφορά της τύρβης σε περιοχές ελεύθερης ροής. Ποιο από τα δύο επιμέρους μοντέλα θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τον συντελεστή F_1 που βρίσκεται μέσα στις εξισώσεις του μοντέλου κ- ω SST.

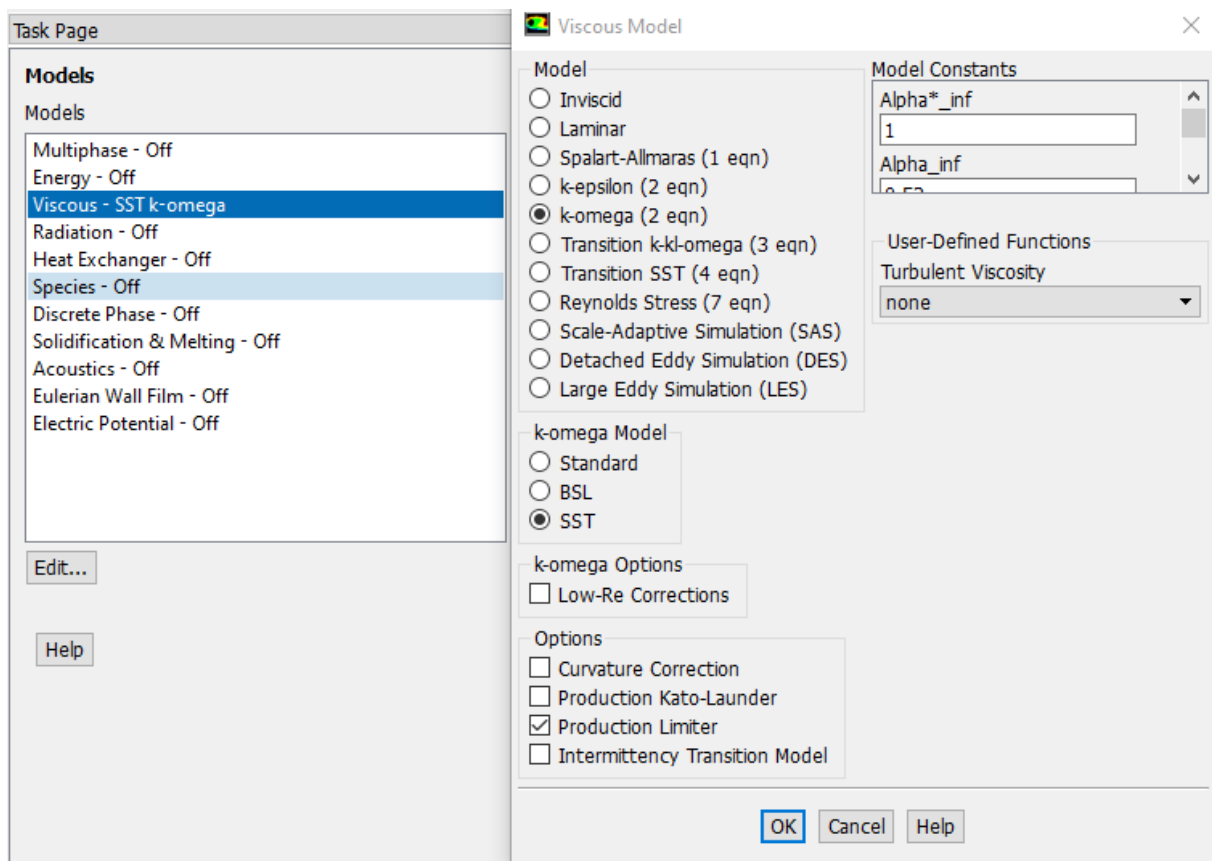
- $F_1 = 0$ πάνω σε στερεά σώματα , έχουμε ενεργοποίηση του μοντέλου κ- ω .
- $F_1 = 0$ στην ελεύθερη ροή , αποτελεσματική χρήση του κ- ϵ .
- $0 < F_1 < 1$ η τιμή της συνάρτησης εξαρτάται από τις τοπικές μεταβλητές.

Πίνακας 2.3.3.2: Μεταβλητές.

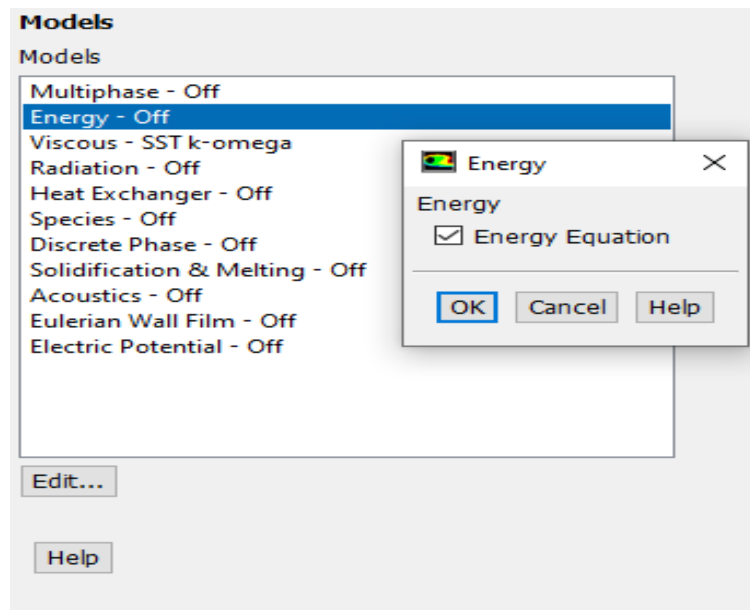
$\beta' = 0,09$	$\alpha_1 = \frac{5}{9}$
$\sigma_k = 0,85$	$\sigma_\omega = 1,168$

Οι εξισώσεις του μοντέλου και οι σταθερές που έχουν αναφερθεί, λήφθηκαν από το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος Fluent. [7]

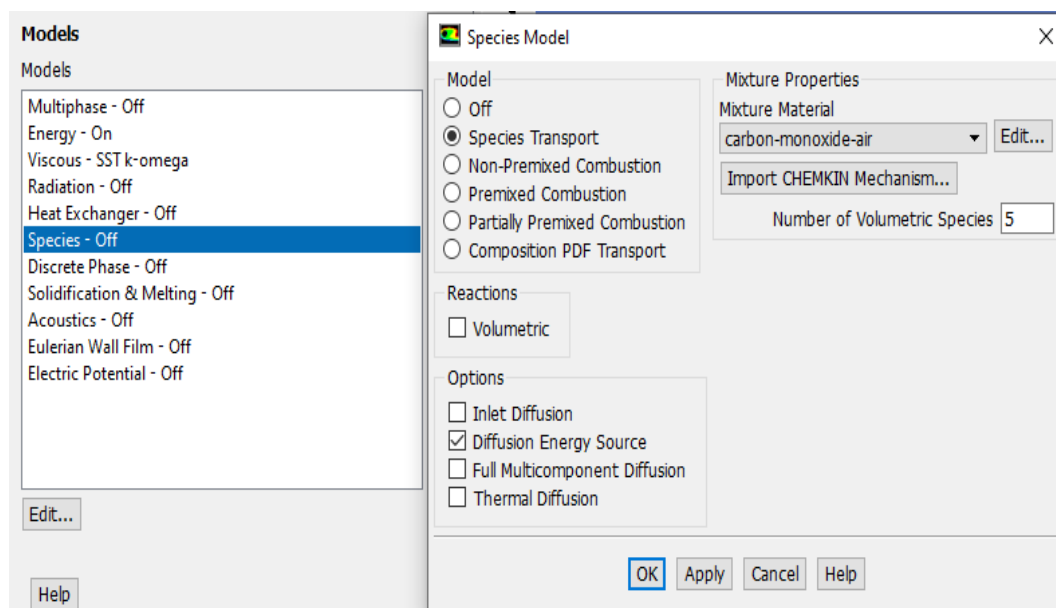
Έτσι λοιπόν και για τα δύο προβλήματα καταλήξαμε στο μοντέλο k- ω SST (εικόνα 2.3.3.2). Στο πρόβλημα της απλής ροής, αφού επιλέξουμε ροϊκό μοντέλο, μπορούμε να συνεχίσουμε στον ορισμό των συνοριακών συνθηκών. Αντιθέτως στο πρόβλημα ροής με παροχή μάζας, πέρα από το ροϊκό μοντέλο, πρέπει να ενεργοποιήσουμε το μοντέλο της ενέργειας (εικόνα 2.3.3.3) και το species transport επιλέγοντας και το μονοξείδιο του άνθρακα σαν μείγμα (εικόνα 2.3.3.4)



Εικόνα 2.3.3.2: Επιλογή μοντέλου k- ω SST.



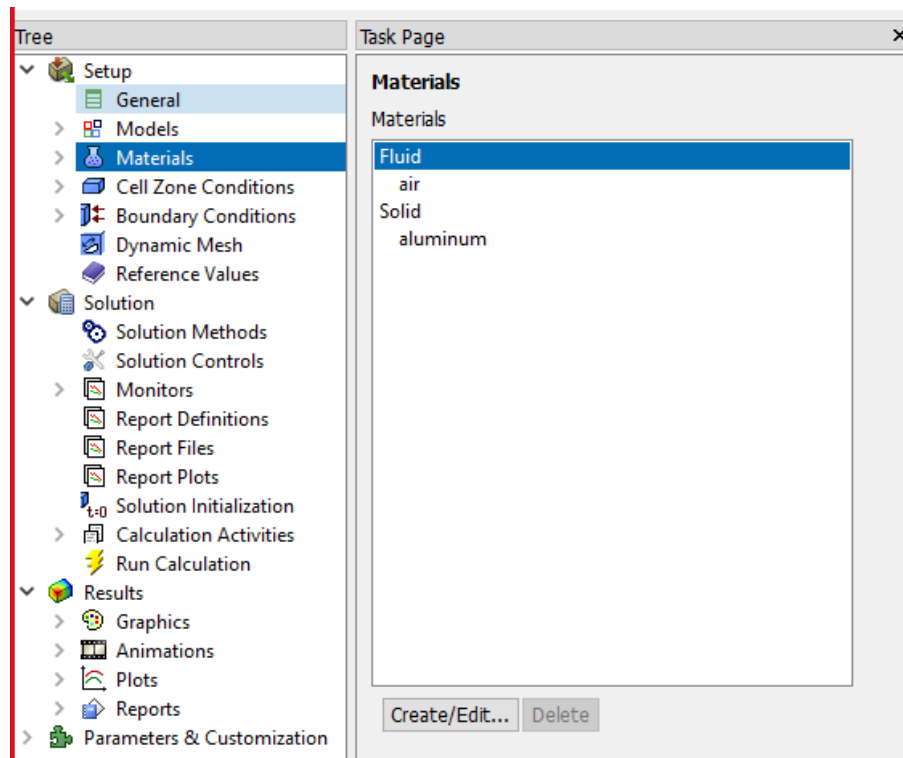
Εικόνα 2.3.3.3: Ενεργοποίηση μοντέλου ενέργειας.



Εικόνα 2.3.3.4: Επιλογή species transport.

2.3.4 Καθορισμός υλικών και ιδιοτήτων τους.

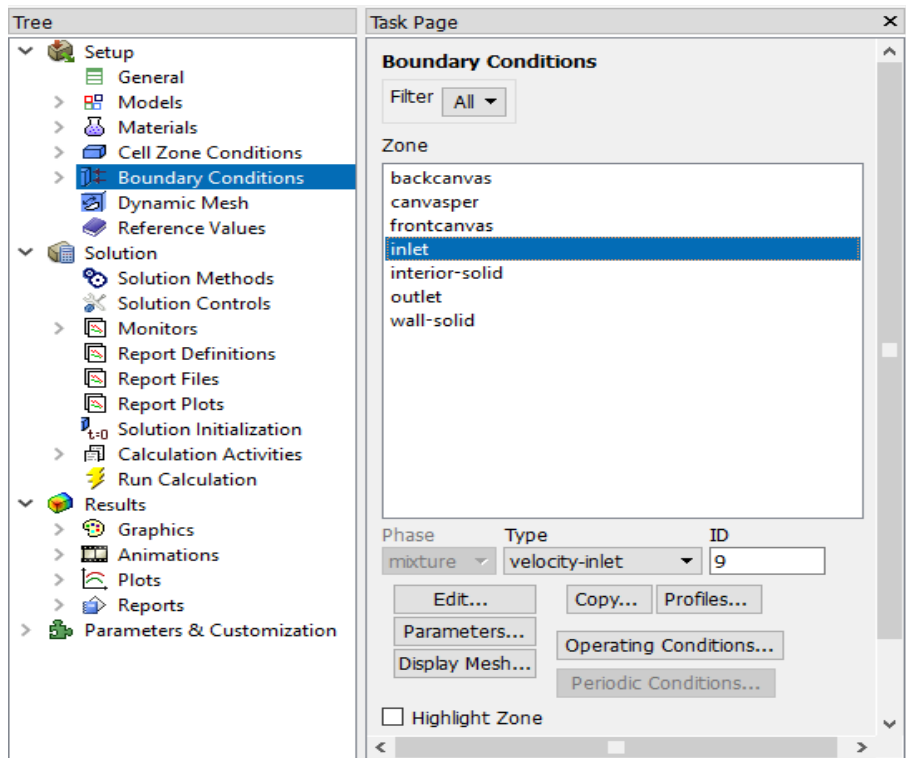
Έπειτα πρέπει να καθορίσουμε τα υλικά που αποτελούν το πρόβλημα μας, τα οποία είναι ίδια και στα δύο προβλήματα. Τα υλικά τα οποία επιλέγουμε είναι για το θάλαμο προσομοίωσης είναι το προκαθορισμένο στερεό (solid)→ aluminum και ως ρευστό (fluid)→air (εικόνα 2.3.4.1).



Εικόνα 2.3.4.1: Καθορισμός υλικών.

2.3.5 Συνοριακές συνθήκες.

Σε αυτό το κομμάτι προσδιορίζουμε τα δεσμευτικά στοιχεία για τις ονοματισμένες επιφάνειες που επιθυμούμε. Με αυτό τον τρόπο, θέτοντας δηλαδή τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες πίεσης και ταχύτητας, ορίζουμε την ροή του αέρα μέσα στο θάλαμο προσομοίωσης. Έτσι λοιπόν στο παράθυρο του Setup κάνουμε κλικ στην καρτέλα Boundary Conditions και μετά επιλέγουμε την κάθε επιφάνεια ξεχωριστά και ορίζουμε την συνθήκη που επιθυμούμε. Ξεκινάμε με την είσοδο του ρευστού στον θάλαμο προσομοίωσης, την οποία αποτελούν οι πέντε οπές και την έχουμε ονομάσει ως inlet (εικόνα 2.3.5.1).



Εικόνα 2.3.5.1: Επιλογή εισόδου ως περιοχή για συνοριακή συνθήκη.

Σε αυτήν λοιπόν την περιοχή σαν συνθήκη θα ορίσουμε μια ταχύτητα εισόδου του ρευστού. Ως δεδομένο έχουμε την πυκνότητα και τη παροχή μάζας του ρευστού, οπότε πρώτο βήμα είναι να την μετατρέψουμε σε ταχύτητα.

Αρχικά δεδομένα:

$$\dot{m} = 12 \left[\frac{lt}{min} \right]$$

$$\rho_{atm} = 1.2 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$d = \frac{1}{4} [inches] = 0.00635 [m]$$

- \dot{m} : Στιγμιαία παροχή μάζας ρευστού $\left[\frac{lt}{min} \right]$
- ρ_{atm} : Πυκνότητα ατμοσφαιρικού αέρα $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

- Q : Ογκομετρική παροχή $\left[\frac{m^3}{sec}\right]$
- u : Μέση ταχύτητα εισόδου $\left[\frac{m}{sec}\right]$
- d : διατομή οπών στην είσοδο και στην έξοδο $[m]$
- A : Επιφάνεια διατομής $[m^2]$

$$\dot{m} = \rho_{atm} \cdot Q \quad (1)$$

$$Q = A \cdot u \quad (2)$$

Αντικαθιστώντας την ογκομετρική παροχή από τη σχέση (2) στην (1), προκύπτει :

$$\dot{m} = \rho_{atm} \cdot A \cdot u \rightarrow \dot{m} = \rho_{atm} \cdot 5 \cdot A \cdot u \rightarrow u = \frac{1}{5} \cdot \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho_{atm}} \quad (3)$$

Το συντελεστή 5 τον βάζουμε εμείς επειδή προσδιορίζει τον αριθμό των οπών στην είσοδο.

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.00635^2}{4} [m^2] \quad (4)$$

$$\dot{m} = 12 \frac{lt}{min} = 12 * \frac{10^{-3}}{60} * \frac{m^3}{sec} = 0.2 * 10^{-3} \frac{kg}{sec} = 2 * 10^{-4} \frac{kg}{sec} \quad (5)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (4) και (5) στην (3) προκύπτει :

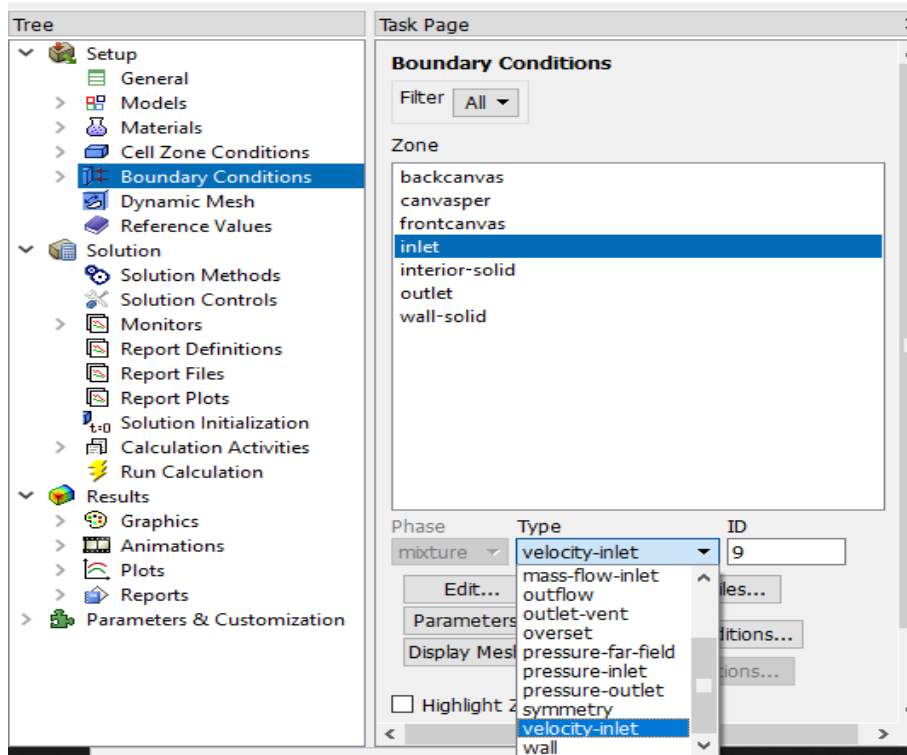
$$u = \frac{1}{5} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-4}}{\frac{\pi \cdot 0.00635^2}{4} \cdot 1.2} \left[\frac{\frac{kg}{sec}}{m^2 \cdot \frac{kg}{m^3}} \right] = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot \pi \cdot 0.00635^2} \left[\frac{\frac{kg}{sec}}{\frac{kg}{m}} \right] \approx 1.052 \left[\frac{m}{sec} \right]$$

Η παραπάνω ταχύτητα στην είσοδο αντιστοιχεί σε αριθμό Reynolds:

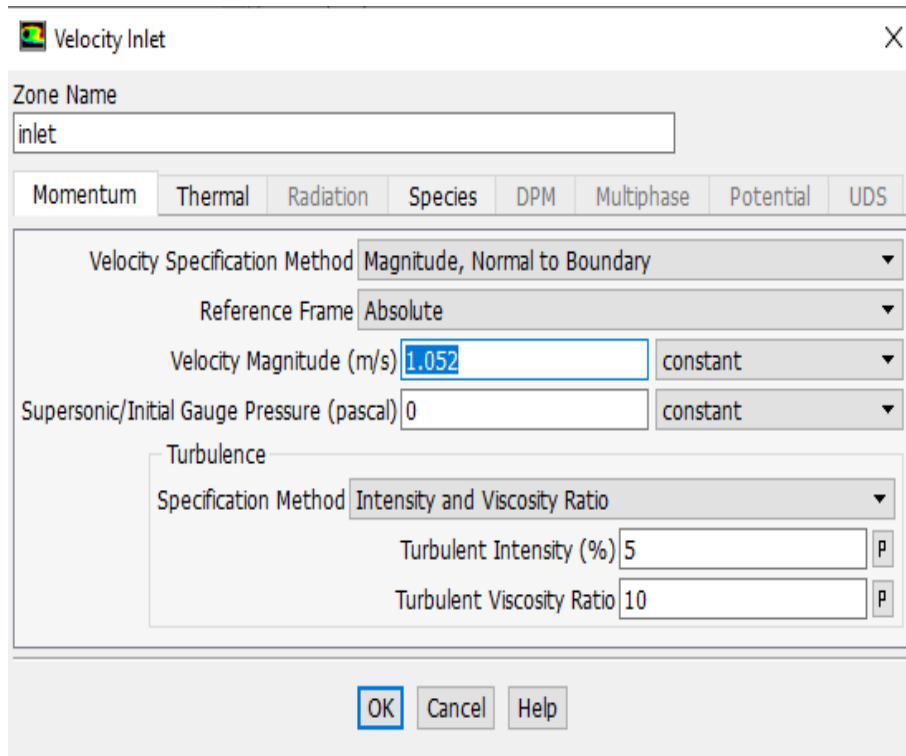
$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} = \frac{1.2 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 1.052 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 0.00635 [m]}{1.7894 \cdot 10^{-5} [Pa \cdot s]} \approx 5 \cdot 10^2$$

Έτσι, εφόσον υπολογίσαμε την ταχύτητα εισόδου του ρευστού, μπορούμε να την ορίσουμε και στο πρόγραμμα. Αφού επιλέξουμε την περιοχή inlet, κάνουμε κλικ στο Type που υπάρχει στο κάτω μέρος του παραθύρου (εικόνα

2.3.5.2). Ως συνθήκη εισόδου επιλέγουμε το velocity inlet και εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο πλέον εισάγουμε τα δεδομένα της συνθήκης που είναι η ταχύτητα και πατάμε OK (εικόνα 2.3.5.3).

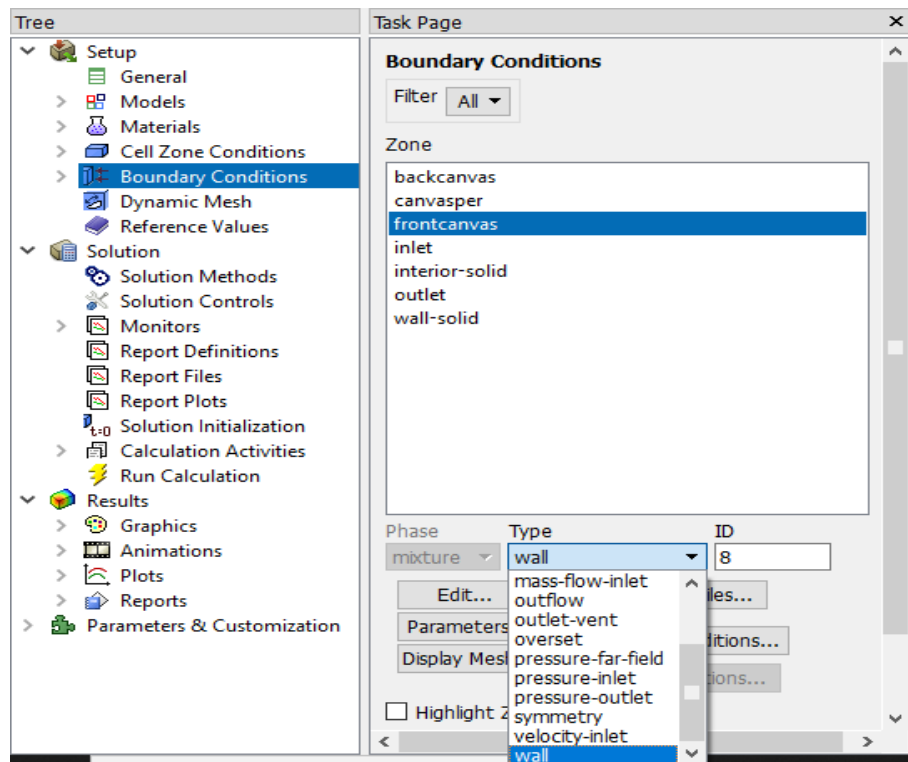


Εικόνα 2.3.5.2: Επιλογή συνοριακής συνθήκης εισόδου.

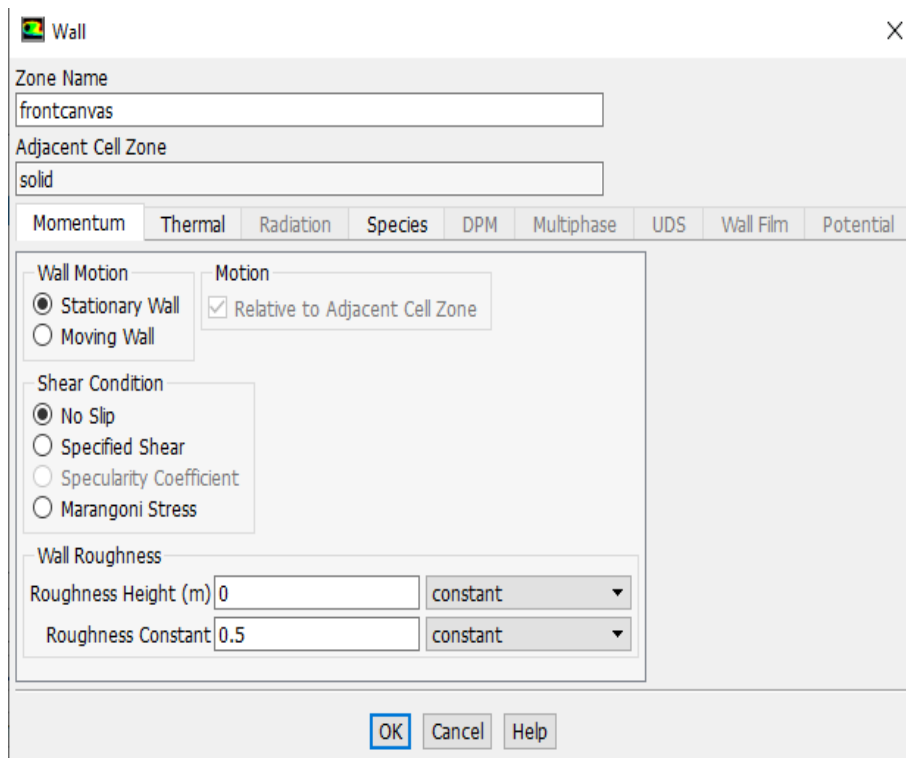


Εικόνα 2.3.5.3: Ορισμός ταχύτητας εισόδου.

Η επόμενη συνθήκη θα οριστεί στην επιφάνεια του καμβά. Αφού επιλέξουμε την εμπρόσθια όψη την ορίζουμε σαν Wall (εικόνα 2.3.5.4). Στο παράθυρο που εμφανίζεται κάνουμε κλικ στην επιλογή Stationary wall, εφόσον ο καμβάς είναι στερεωμένος στα 40 cm από την είσοδο. Επειδή εφαρμόζουμε συνοριακή συνθήκη μη ολίσθησης αποδεχόμαστε και την επιλογή No slip (εικόνα 2.3.5.5) και κλείνουμε το παράθυρο αποθηκεύοντας τις επιλογές μας.

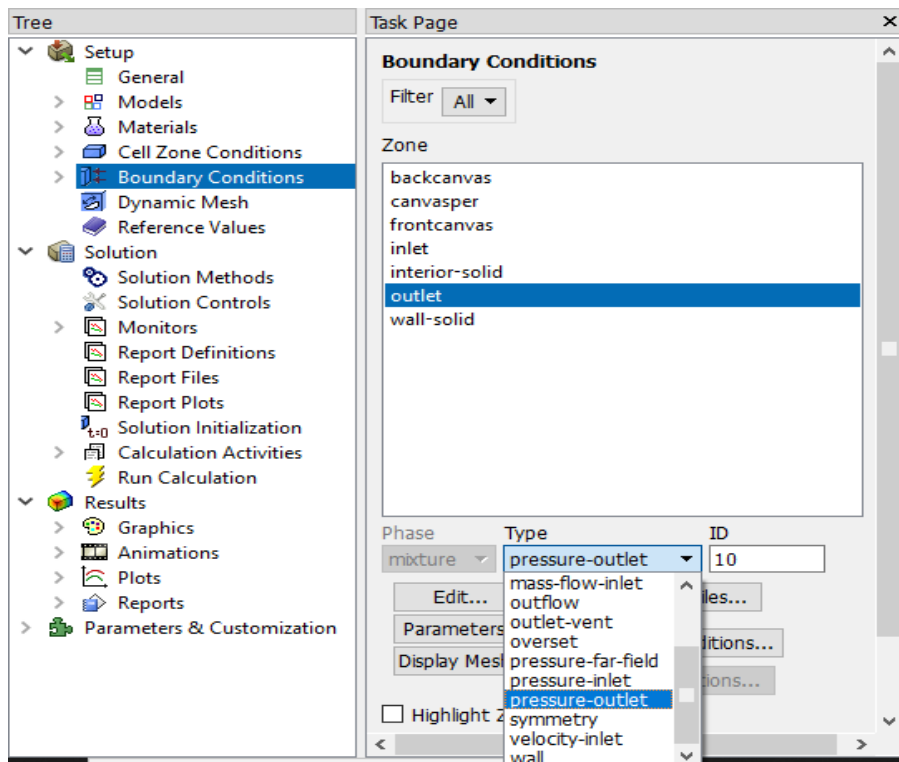


Εικόνα 2.3.5.4: Επιλογή συνοριακής συνθήκης στον καμβά.

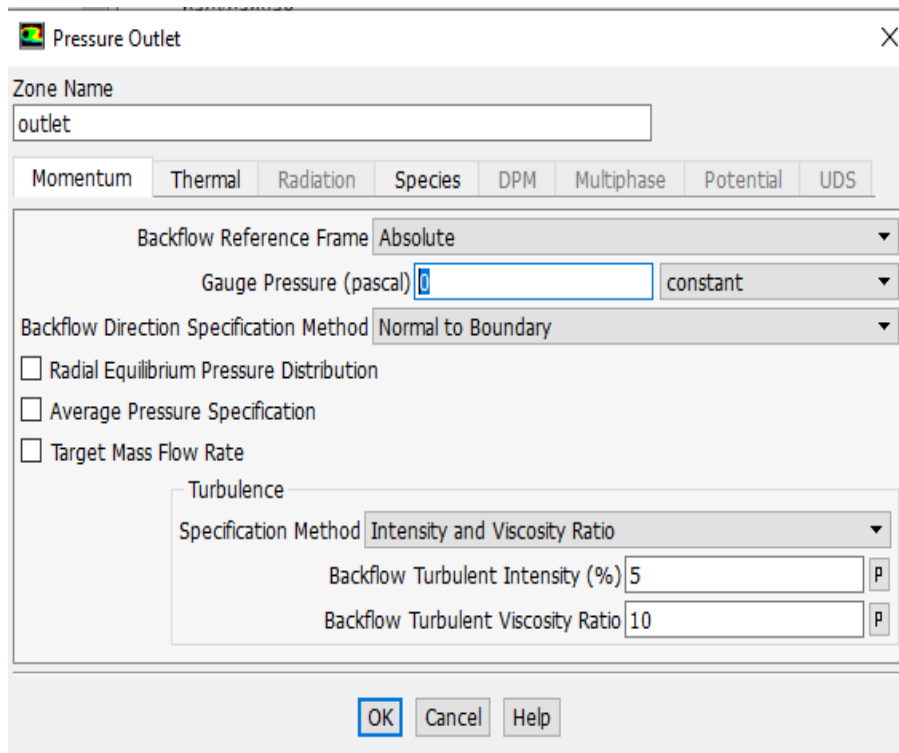


Εικόνα 2.3.5.5: Ορισμός συνθήκης μη ολίσθησης στον καμβά.

Τέλος εφόσον έχουμε ορίσει τη συνοριακή συνθήκη εισόδου, πρέπει να οριστεί και η συνθήκη στην έξοδο του θαλάμου. Αφού το αέριο εξέρχεται στην ατμόσφαιρα, η πίεση στο σημείο της εξόδου είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Επιλέγουμε την περιοχή outlet, κάνουμε κλικ στο Type που υπάρχει στο κάτω μέρος του παραθύρου (εικόνα 2.3.5.6) και ως συνθήκη εξόδου επιλέγουμε το pressure outlet. Στο αναδυόμενο παράθυρο εισάγουμε τα δεδομένα της συνθήκης που είναι η πίεση ($=0$) και πατάμε OK (εικόνα 2.3.5.7).

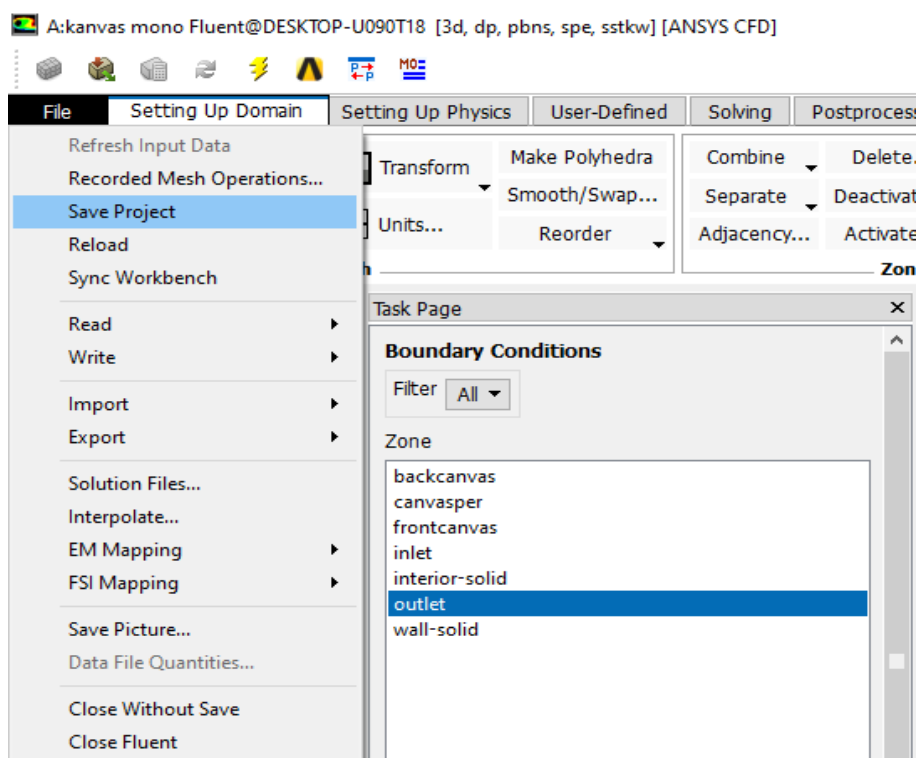


Εικόνα 2.3.5.6: Επιλογή συνοριακής συνθήκης στην έξοδο.



Εικόνα 2.3.5.7: Ορισμός πίεσης εξόδου.

Πριν προχωρήσουμε στην επίλυση του προβλήματος μας, αποθηκεύουμε την ως εδώ πορεία του project (εικόνα 2.3.5.8).



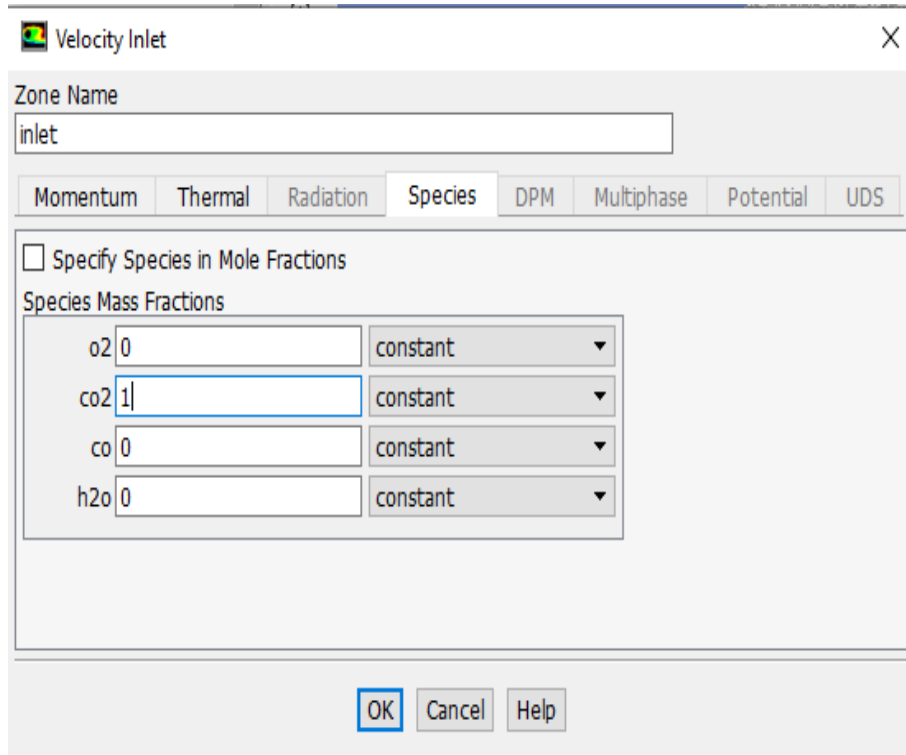
Εικόνα 2.3.5.8: Αποθήκευση project.

Για την επίλυση του δεύτερου προβλήματος με την παροχή μάζας πρέπει εκτός από τις συνθήκες που έχουμε ορίσει παραπάνω για την απλή ροή, να βάλουμε συνθήκη που αφορά τα species. Για αυτή την εκδοχή θα τρέξουμε τρία διαφορετικά προγράμματα με διαφορά στις συνοριακές συνθήκες.

Πίνακας 2.3.5.1: Συνοριακές συνθήκες πρώτου προγράμματος.

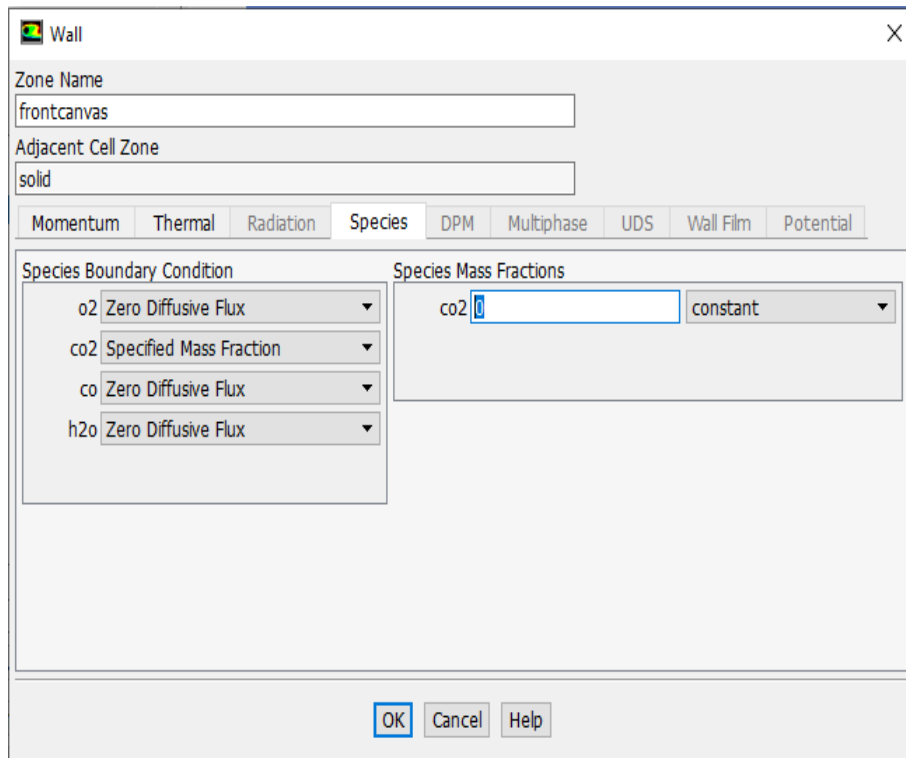
1 ^ο πρόγραμμα	inlet	front canvas	outlet
momentum	velocity inlet =1.052 m/s	no slip, stationary wall	pressure outlet =0
species (CO ₂)	c=1	c=0	c=0

Έτσι λοιπόν επιλέγουμε το inlet και εφόσον έχουμε την κανονική συνθήκη ταχύτητας, μεταβαίνουμε στην καρτέλα species και στο κελί CO₂ ορίζουμε την τιμή του mass fraction σε 1 (εικόνα 2.3.5.9).



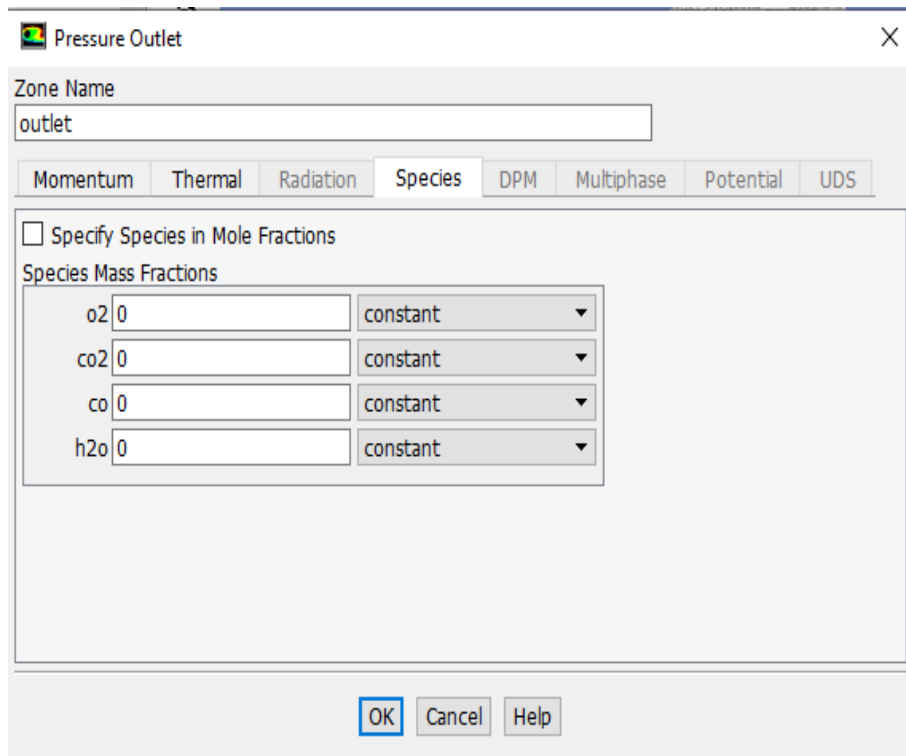
Εικόνα 2.3.5.9: Ορισμός mass fraction.

Την επόμενη συνθήκη θα την ορίσουμε στην εμπρόσθια όψη του καμβά. Έτσι αφού επιλέξουμε την επιφάνεια μεταβαίνουμε στην καρτέλα species και στο αέριο CO₂ επιλέγουμε specified mass fraction με τιμή 0 (εικόνα 2.3.5.10).



Εικόνα 2.3.5.10: Ορισμός mass fraction.

Τέλος και στην έξοδο θα ορίσουμε το mass fraction του CO₂ σε 0 (εικόνα 2.3.5.11).

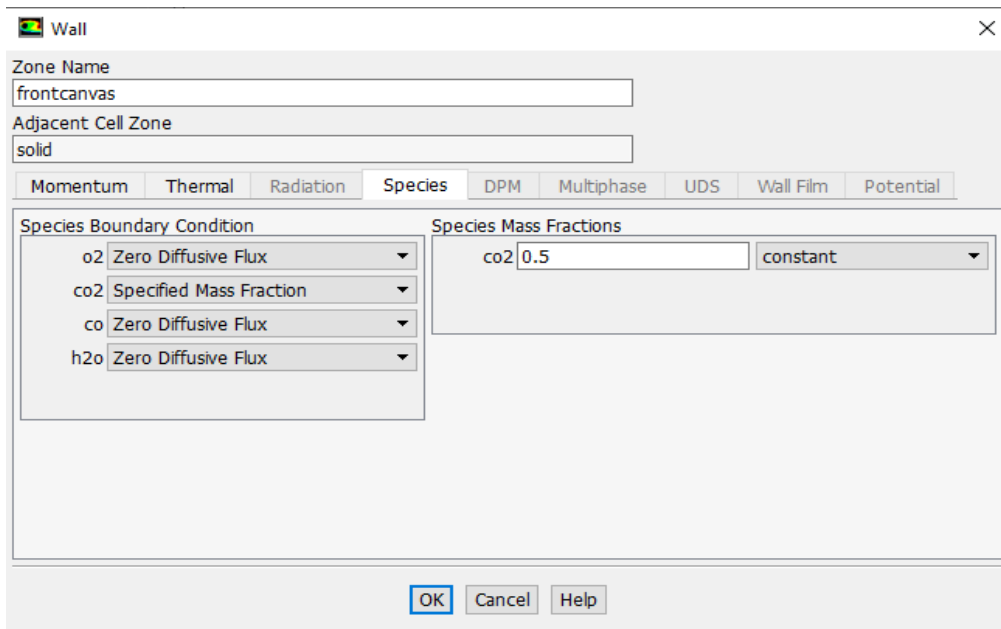


Εικόνα 2.3.5.11: Ορισμός mass fraction.

Όσον αφορά το δεύτερο πρόγραμμα, η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η ίδια, με τη μόνη διαφορά ότι η συγκέντρωση του CO₂ στην εμπρόσθια όψη του καμβά είναι 0.5 (εικόνα 2.3.5.12).

Πίνακας 2.3.5.2: Συνοριακές συνθήκες δεύτερου προγράμματος.

2 ^ο πρόγραμμα	inlet	front canvas	outlet
momentum	velocity inlet =1.052 m/s	no slip, stationary wall	pressure outlet =0
species (CO ₂)	c=1	c=0.5	c=0



Εικόνα 2.3.5.12: Ορισμός mass fraction.

Τέλος το τρίτο πρόγραμμα θα έχει τις ίδιες συνοριακές συνθήκες με το προηγούμενο, με τη διαφορά ότι η ταχύτητα εισόδου θα είναι διπλάσια. Οι συνθήκες αυτές αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα :

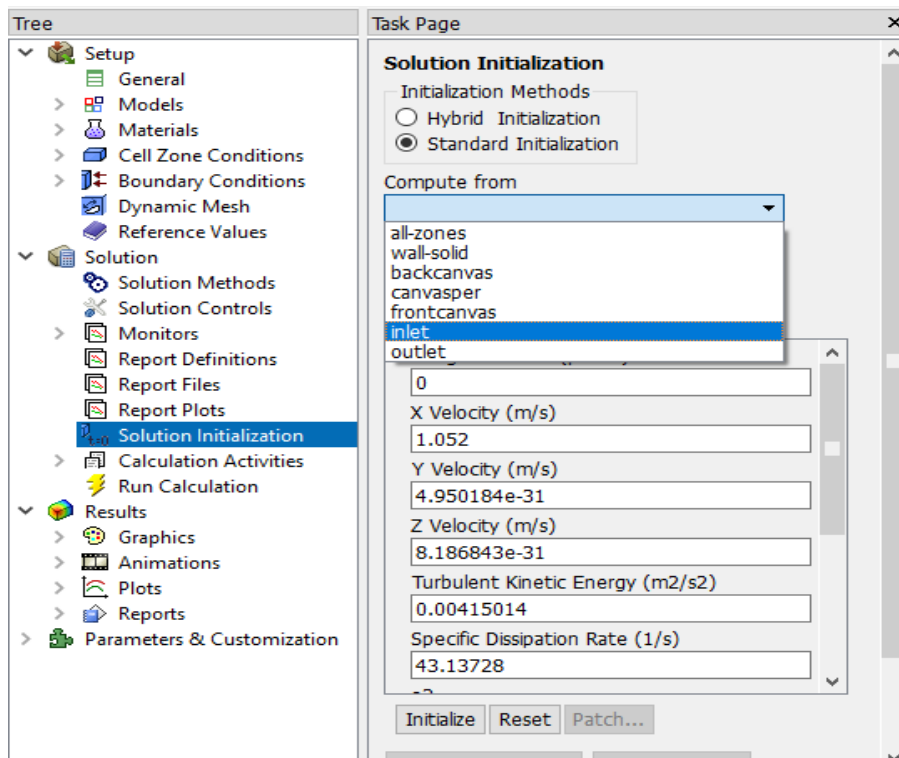
Πίνακας 2.3.5.3: Συνοριακές συνθήκες τρίτου προγράμματος.

3^ο πρόγραμμα	inlet	front canvas	outlet
momentum	velocity inlet =2.104 m/s	no slip, stationary wall	pressure outlet =0
species (CO ₂)	c=1	c=0.5	c=0

Με τον ίδιο τρόπο που ορίσαμε την ταχύτητα σε προηγούμενα προγράμματα, έτσι και σε αυτό το πρόγραμμα απλά θα αλλάξουμε την τιμή της και θα προχωρήσουμε στον υπολογισμό του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ - SOLUTION

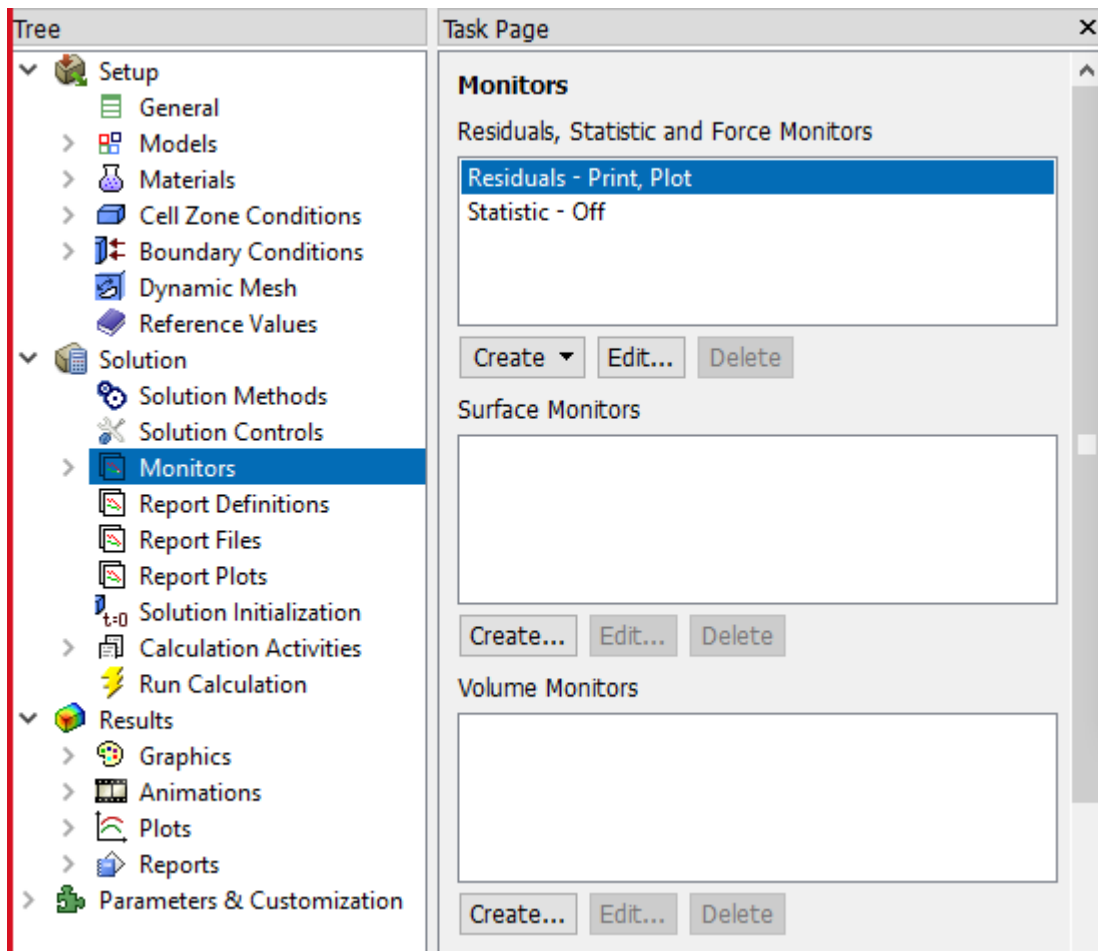
Ένα βήμα πριν την επίλυση, είναι η αρχικοποίηση του πεδίου ροής στην είσοδο του θαλάμου, δηλαδή ορίζουμε στο πρόγραμμα από ποιο σημείο θα ξεκινήσει τους υπολογισμούς. Κάνοντας κλικ στην καρτέλα Solution initialization, επιλέγουμε σαν μέθοδο Standard Initialization και στη συνέχεια Compute from → Inlet. Για να ολοκληρωθεί η αρχικοποίηση κάνουμε κλικ στο κάτω μέρος του παραθύρου, στην επιλογή Initialize (εικόνα 3.1).



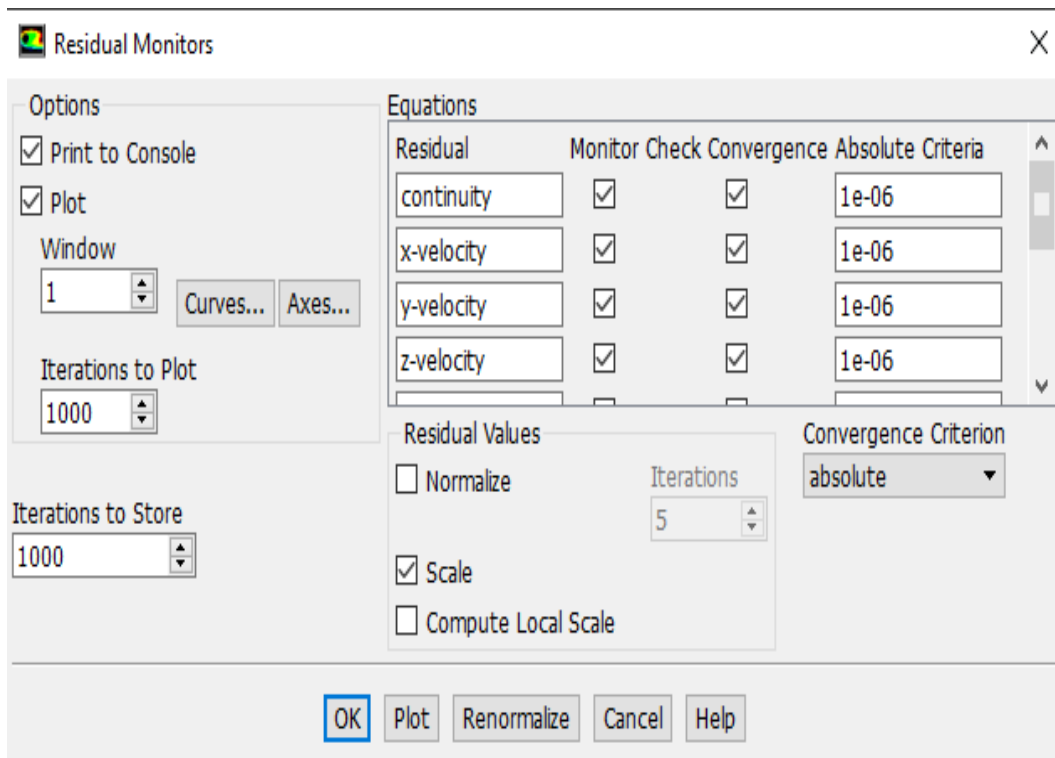
Εικόνα 3.1: Αρχικοποίηση πεδίου ροής.

3.1 Ορισμός κριτηρίων σύγκλισης.

Στο βήμα αυτό θα πρέπει να ορίσουμε τα κριτήρια σύγκλισης δηλαδή τον αριθμό των επαναλήψεων της διαδικασίας επίλυσης έως ότου οι παράμετροι που έχουμε δηλώσει να ικανοποιούν κάποιο όριο ανοχής που έχουμε θέσει. Στην περίπτωσή μας έχουμε θέσει ως όριο σύγκλισης το 10^{-6} . Για να ορίσουμε λοιπόν το κριτήριο που επιθυμούμε, κάνουμε κλικ στην καρτέλα Monitors (εικόνα 3.1.1) και στο αναδυόμενο παράθυρο κάνουμε κλικ στην επιλογή Residuals (εικόνα 3.1.2).



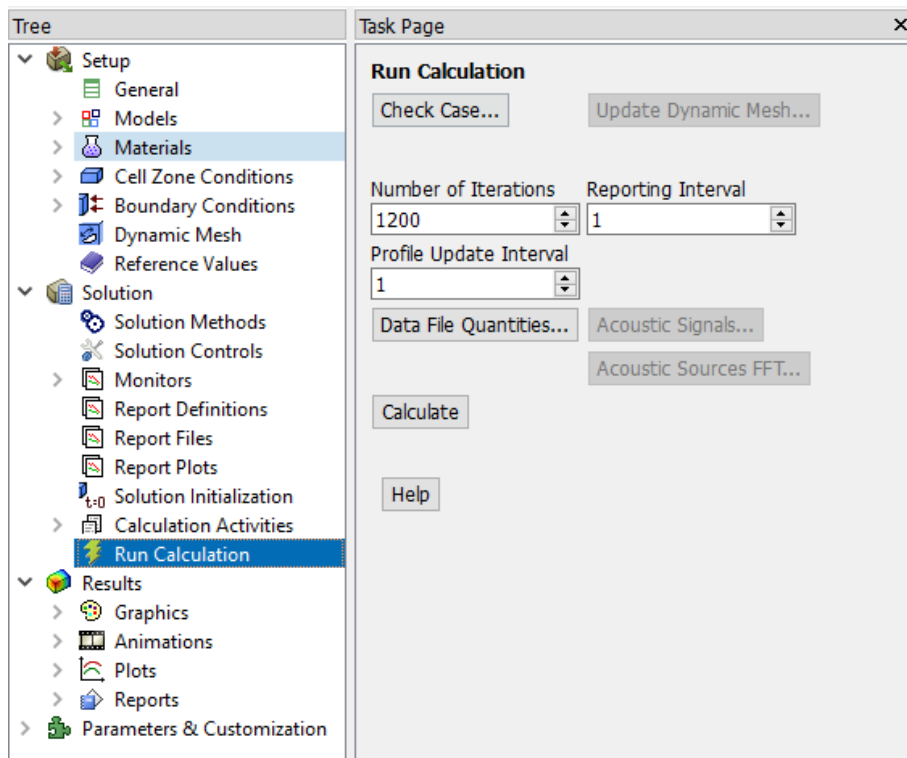
Εικόνα 3.1.1: Task page – monitors.



Εικόνα 3.1.2: Residual monitors.

3.2 Έναρξη υπολογισμού.

Εφόσον πραγματοποιηθεί η αρχικοποίηση του πεδίου ροής και ο ορισμός των κριτηρίων σύγκλισης και για τα δύο προβλήματα (απλή μόνιμη ροή, παροχή μάζας με συγκεντρώσεις $c=0$ και $c=0.5$ στην επιφάνεια του καμβά) , μπορούμε να ξεκινήσουμε τον υπολογισμό τους. Μεταβαίνουμε στην καρτέλα Run Calculation και ορίζουμε τον αριθμό των στοιχείων που επιθυμούμε (εικόνα 3.2.1) . Στην δική μας περίπτωση και για τις δυο εκδοχές, η τιμή αυτή είναι τα 1200 iterations.

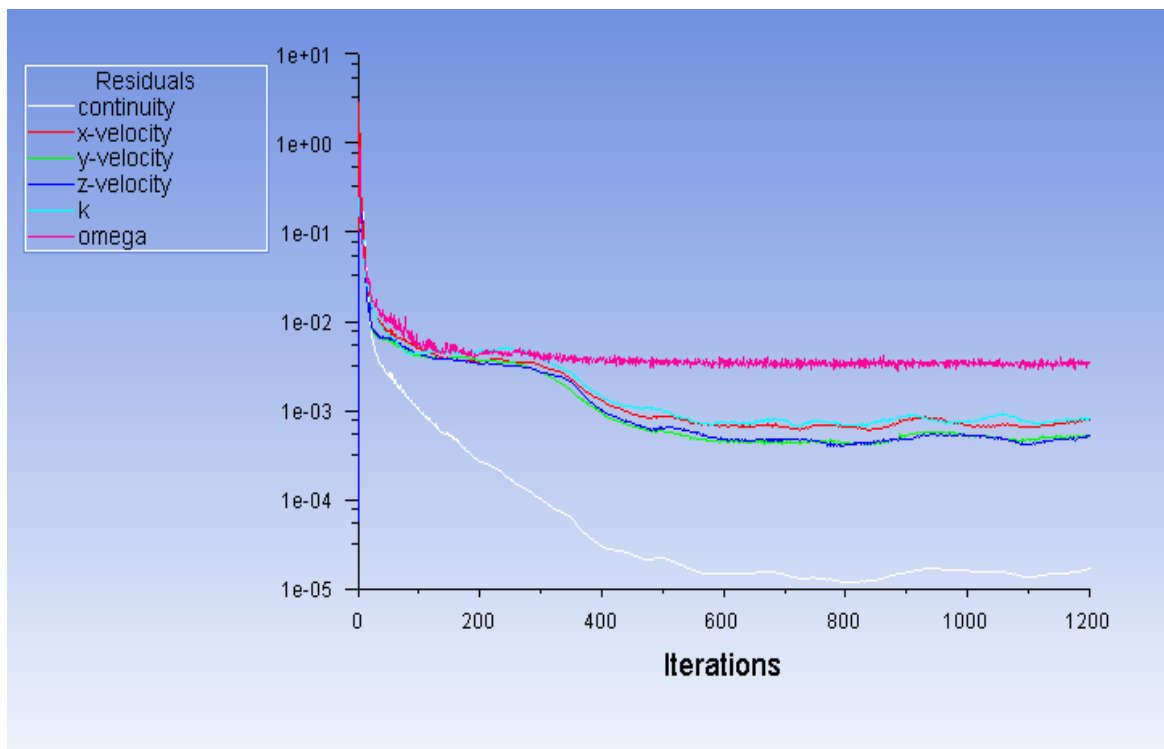


Εικόνα 3.2.1: Έναρξη επίλυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Και στις δύο περιπτώσεις μετά το πέρας των υπολογισμών, θα λάβουμε μια γραφική παράσταση και τις ακριβείς τιμές των παραμέτρων των επιμέρους προβλημάτων.

4.1 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ.



Εικόνα 4.1.1: Διάγραμμα επίλυσης του προβλήματος.

```

reversed flow in 40 faces on pressure-outlet 10.
1195 1.6664e-05 7.7569e-04 5.1008e-04 5.0483e-04 8.1423e-04 3.4944e-03 0:00:47 5

reversed flow in 37 faces on pressure-outlet 10.
1196 1.6761e-05 7.6686e-04 5.2223e-04 5.1517e-04 7.9501e-04 2.9872e-03 0:00:38 4

reversed flow in 42 faces on pressure-outlet 10.
1197 1.6879e-05 7.6754e-04 5.0667e-04 5.1213e-04 7.8824e-04 3.4276e-03 0:00:28 3

reversed flow in 40 faces on pressure-outlet 10.
1198 1.7025e-05 7.7997e-04 5.0932e-04 5.1522e-04 8.1183e-04 3.5160e-03 0:00:19 2

reversed flow in 37 faces on pressure-outlet 10.
1199 1.7147e-05 7.8945e-04 5.3207e-04 5.3526e-04 8.1550e-04 3.3324e-03 0:00:10 1

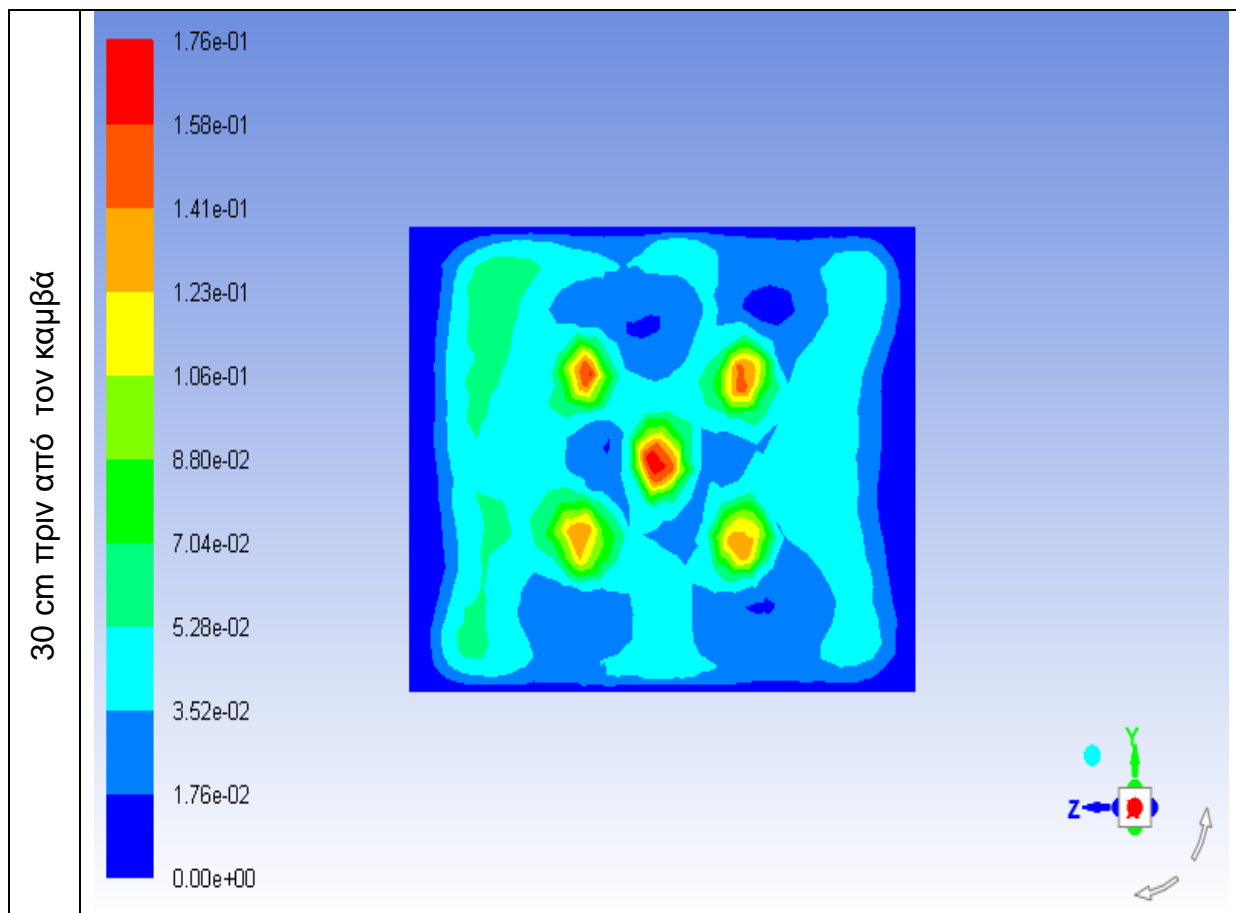
reversed flow in 41 faces on pressure-outlet 10.
iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity k omega time/iter
1200 1.7203e-05 7.8317e-04 5.2335e-04 5.2626e-04 8.0984e-04 3.4185e-03 0:00:00 0
Writing data to C:\Users\Manolis\Desktop\aplh roh nea ekdosh_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.ip ...
x-coord
y-coord
z-coord
pressure
x-velocity
y-velocity
z-velocity
k
omega
Done.

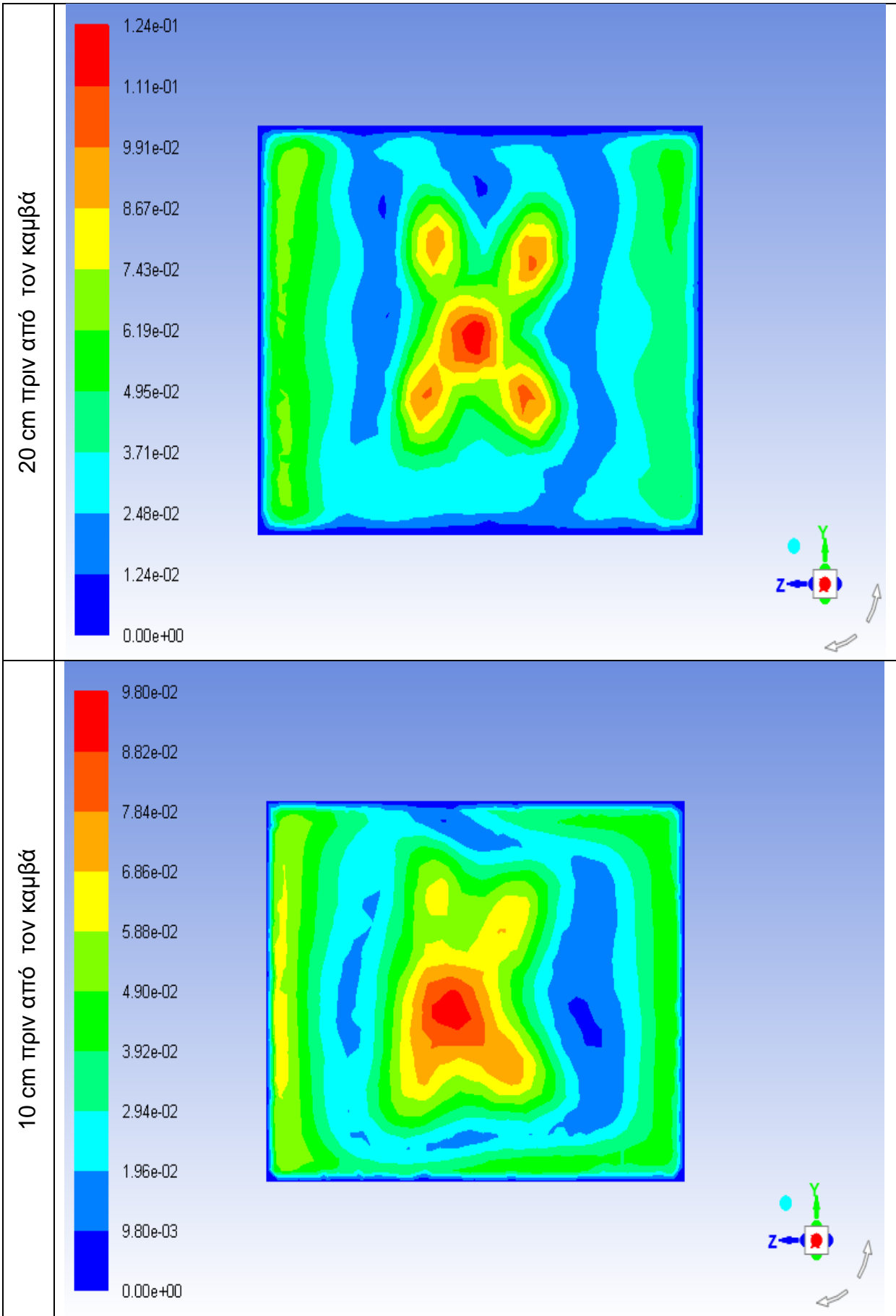
Calculation complete.

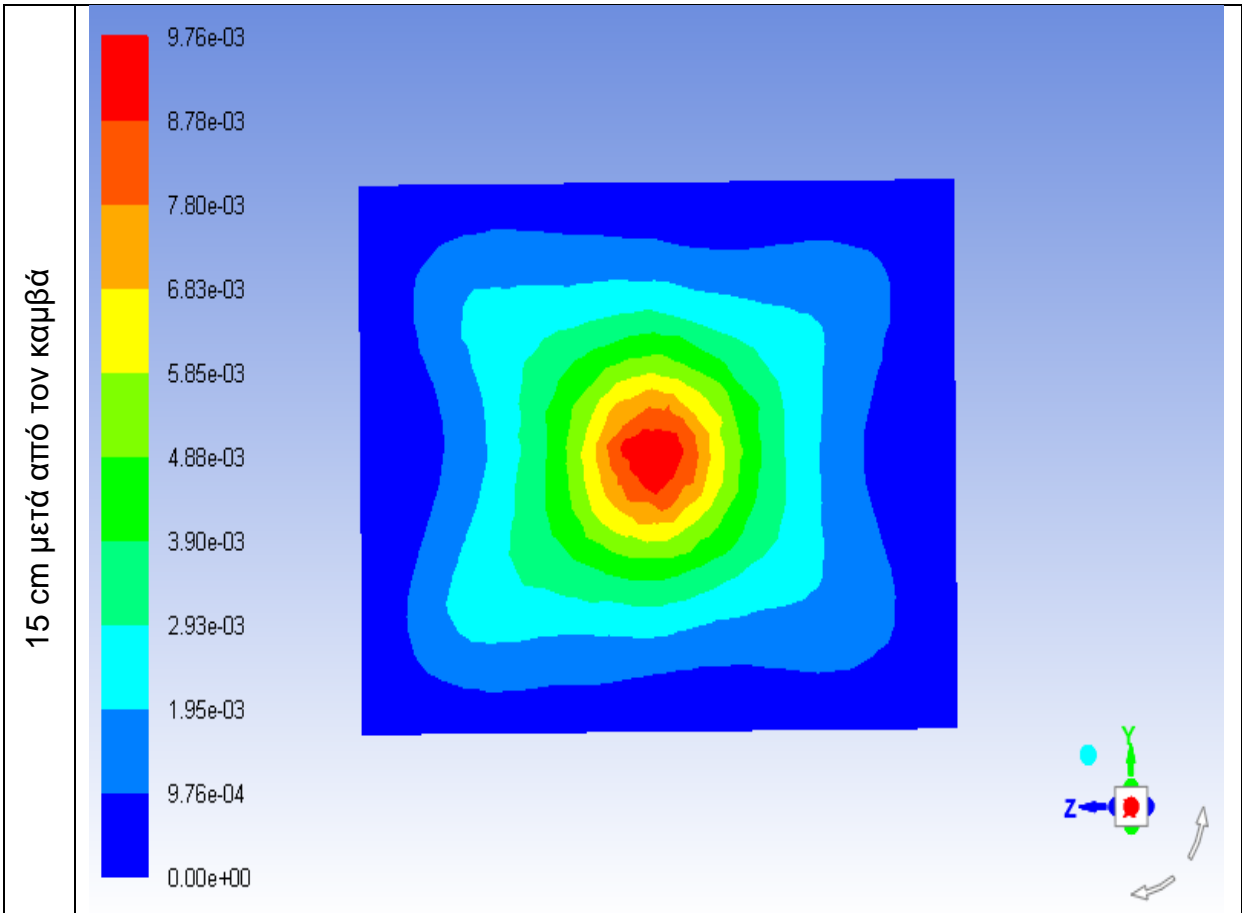
```

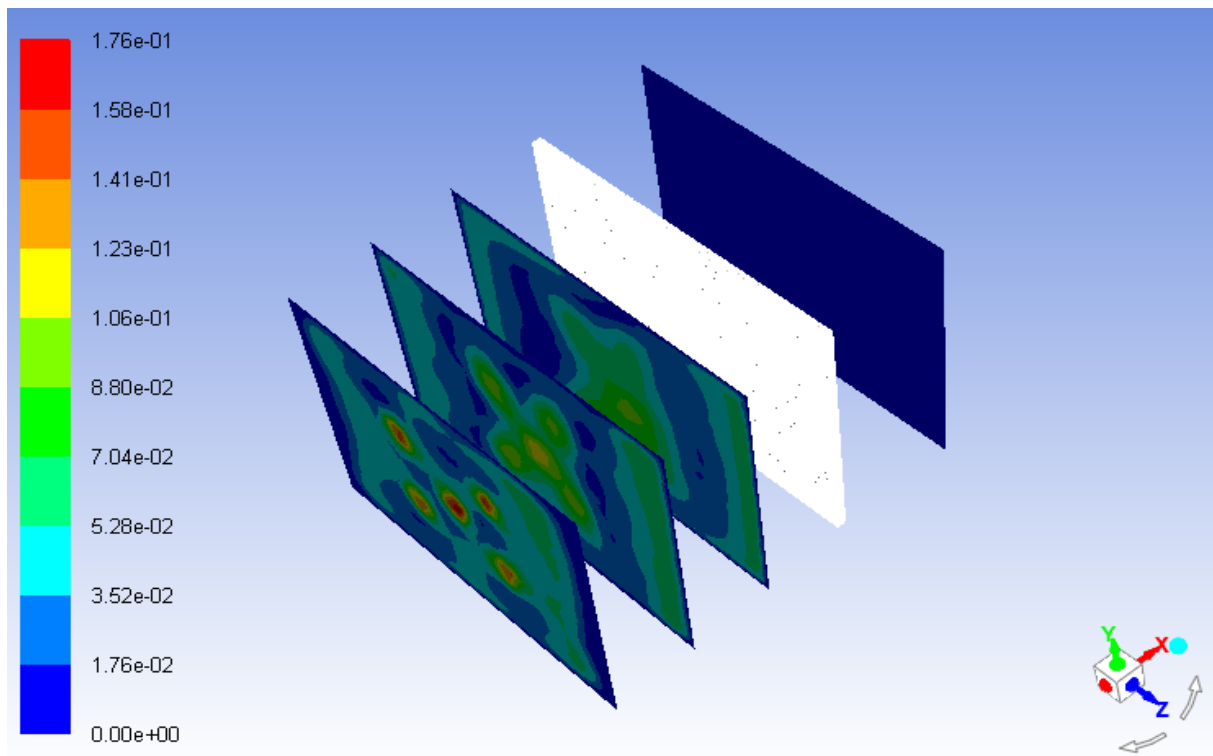
Εικόνα 4.1.2: Τιμές των residuals στα 1200 iterations.

Πίνακας 4.1.1: Χαρακτηριστικά contours του velocity magnitude σε planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά.



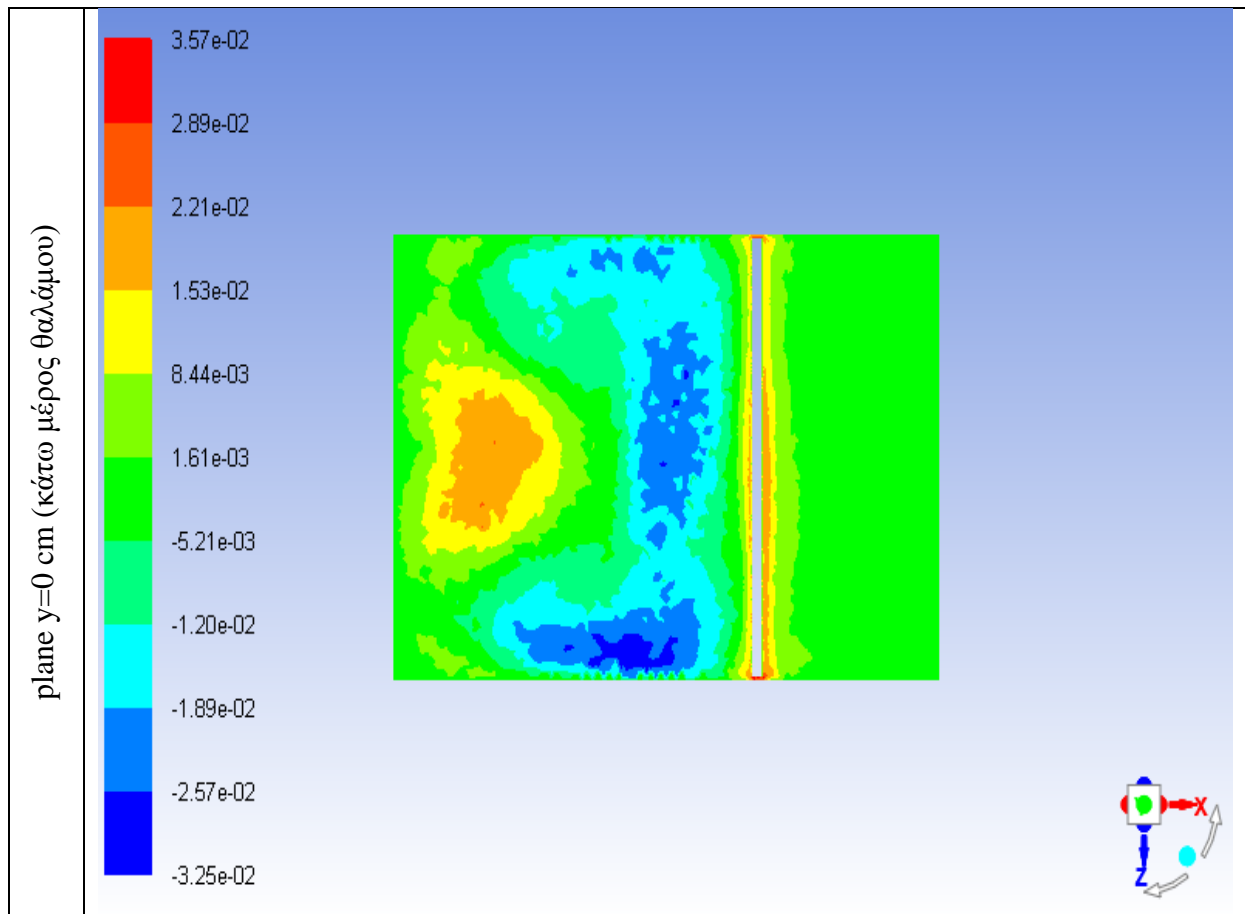


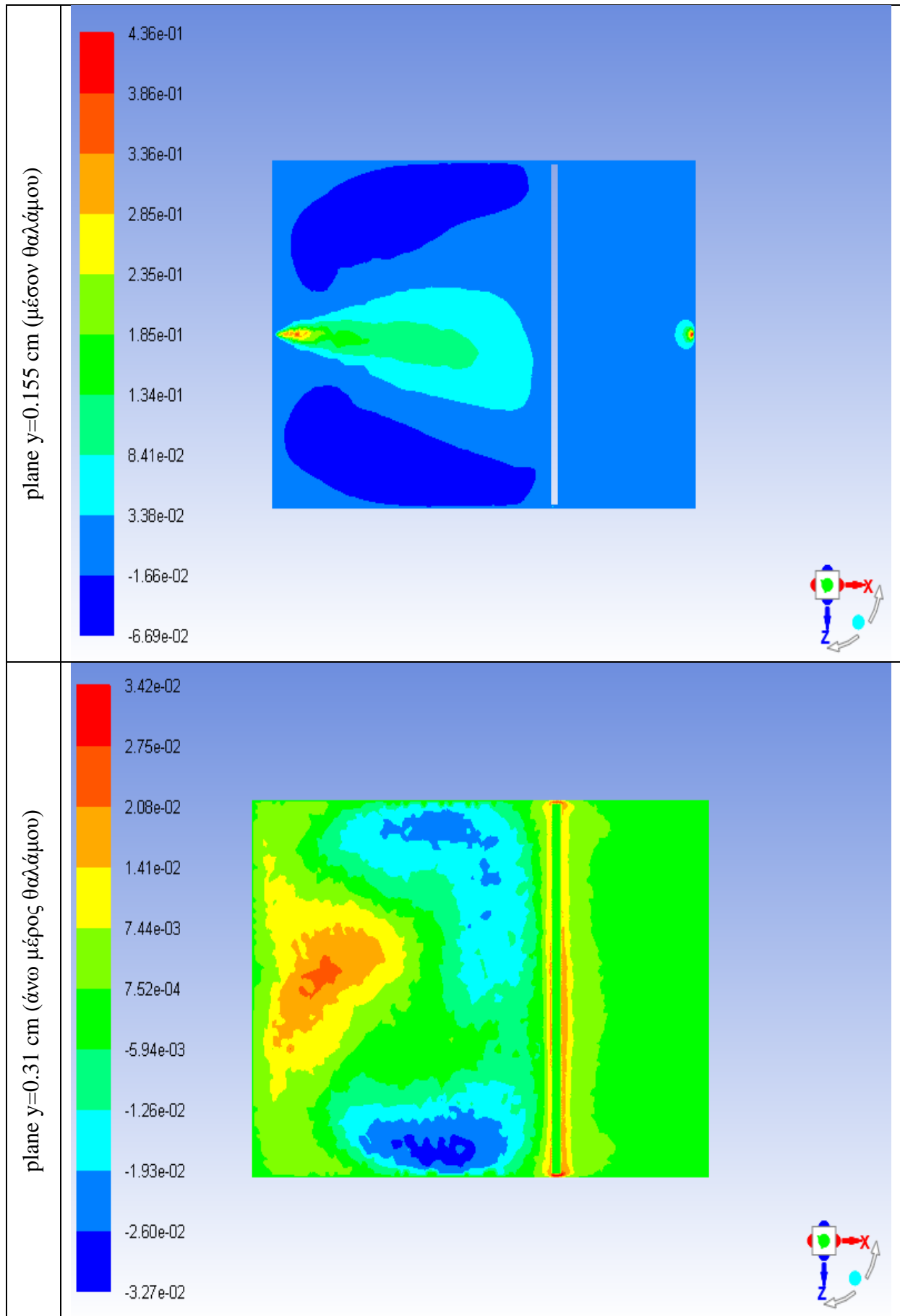




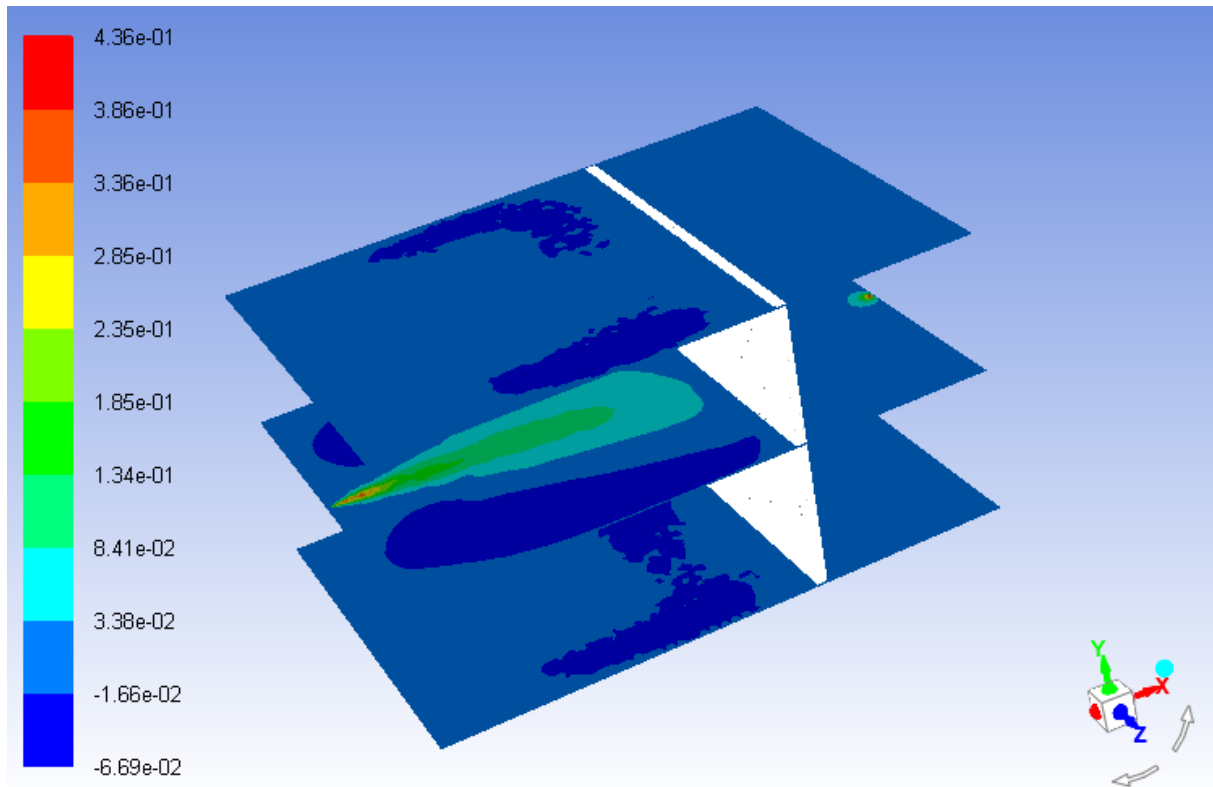
Εικόνα 4.1.3: Διάταξη των παραπάνω planes στον θάλαμο προσομοίωσης.

Πίνακας 4.1.2: Contours του x velocity σε planes κάθετα στον άξονα y.



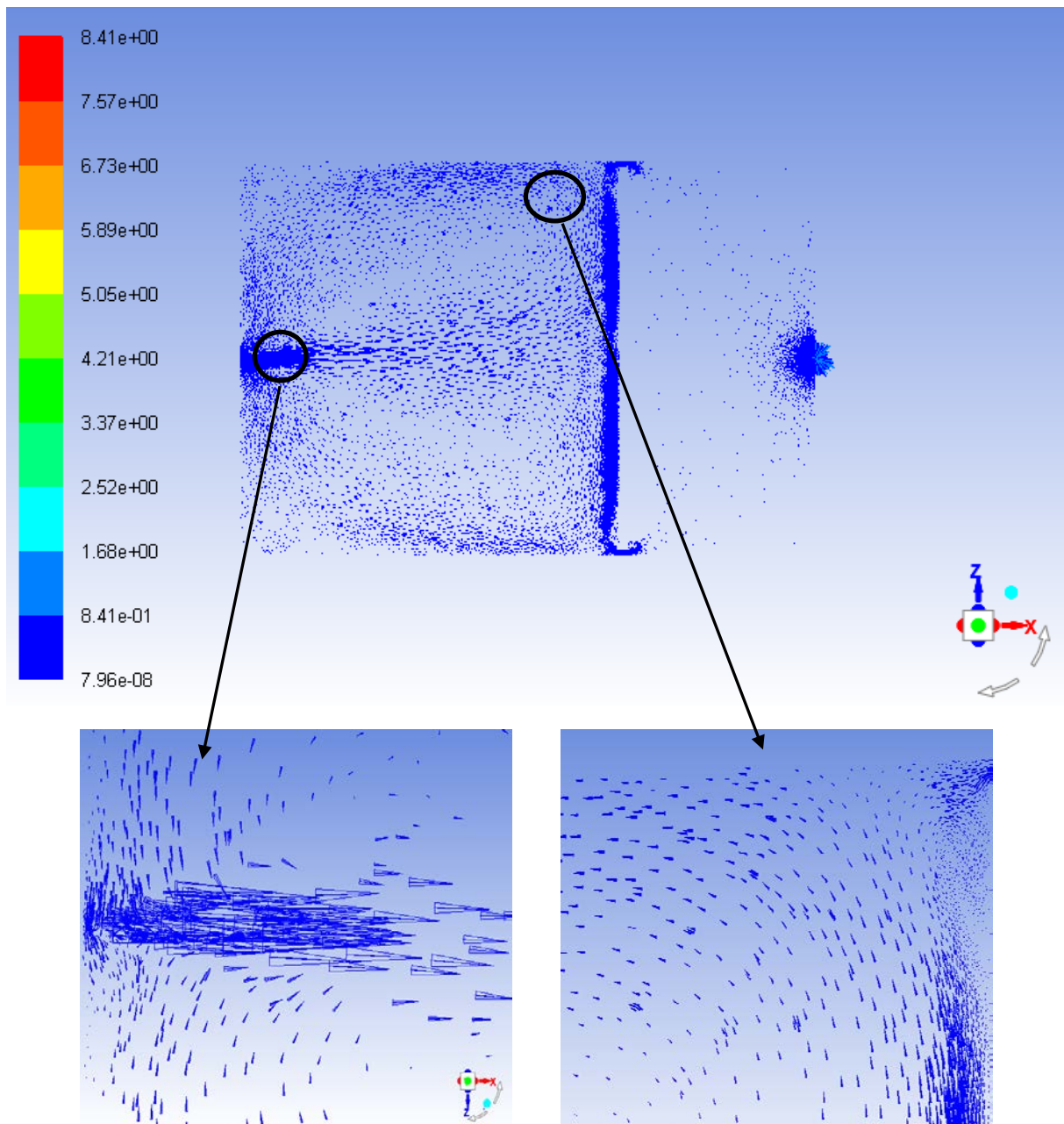


Στον παραπάνω πίνακα, έχουν δημιουργηθεί planes κάθετα στον άξονα y με διαφορετικές αποστάσεις κάθε φορά την αρχή των αξόνων. Παρουσιάζονται όλα, μαζί με το καμβά για να γίνει κατανοητή η διάταξη τους στο χώρο (εικόνα 4.1.4).

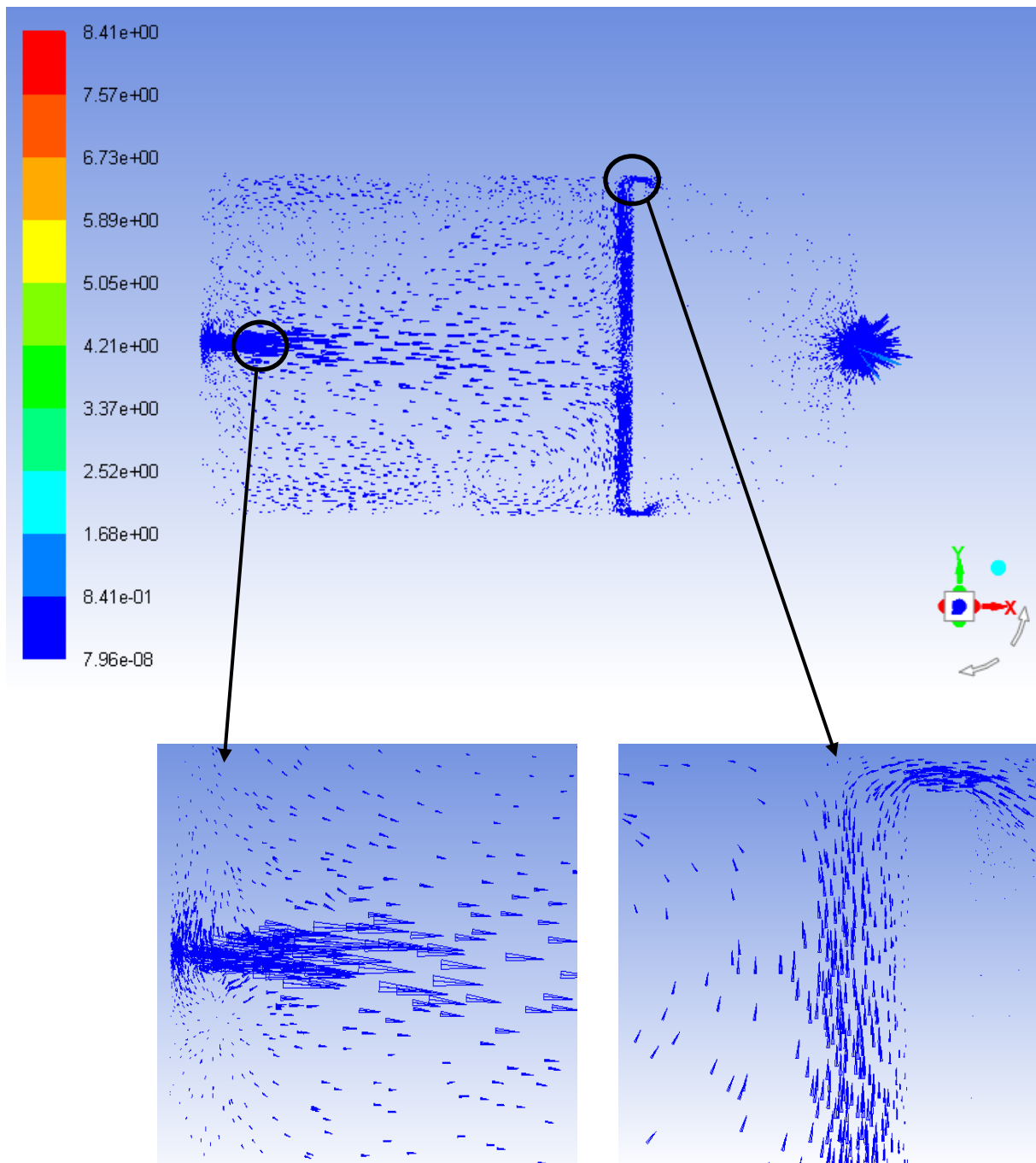


Εικόνα 4.1.4 : Διάταξη των παραπάνω planes στο θάλαμο προσομοίωσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα vectors plots της ταχύτητας, σε ένα plane κάθετο στο άξονα y (εικόνα 4.1.5 και σε ένα άλλο που είναι κάθετο στον άξονα z (εικόνα 4.1.6).



Εικόνα 4.1.5 : Vectors plot της ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο στον άξονα y ($y=0.155$ cm).



Εικόνα 4.1.6: Vectors plot της ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο στον άξονα z ($z=0.205$ cm).

Στα παραπάνω διαγράμματα οι μέγιστες ταχύτητες εμφανίζονται στην είσοδο, στην έξοδο και στο διάκενο του καμβά με το τοίχωμα, όπως αναμενόταν λόγω συνέχειας και έχουν αντίστοιχα τιμές τάξης 1, 0.8, 5 m/s. Οι αντίστοιχοι αριθμοί Reynolds με χαρακτηριστικά μεγέθη τις διαμέτρους στις οπές (d) και το διάκενο παραπλεύρως του πίνακα (h) κυμαίνονται από $3 \cdot 10^2$ έως $5 \cdot 10^2$.

- Είσοδος :

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} = \frac{1.2 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 1.052 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 0.00635 [m]}{1.7894 \cdot 10^{-5} [Pa \cdot s]} \approx 5 \cdot 10^2$$

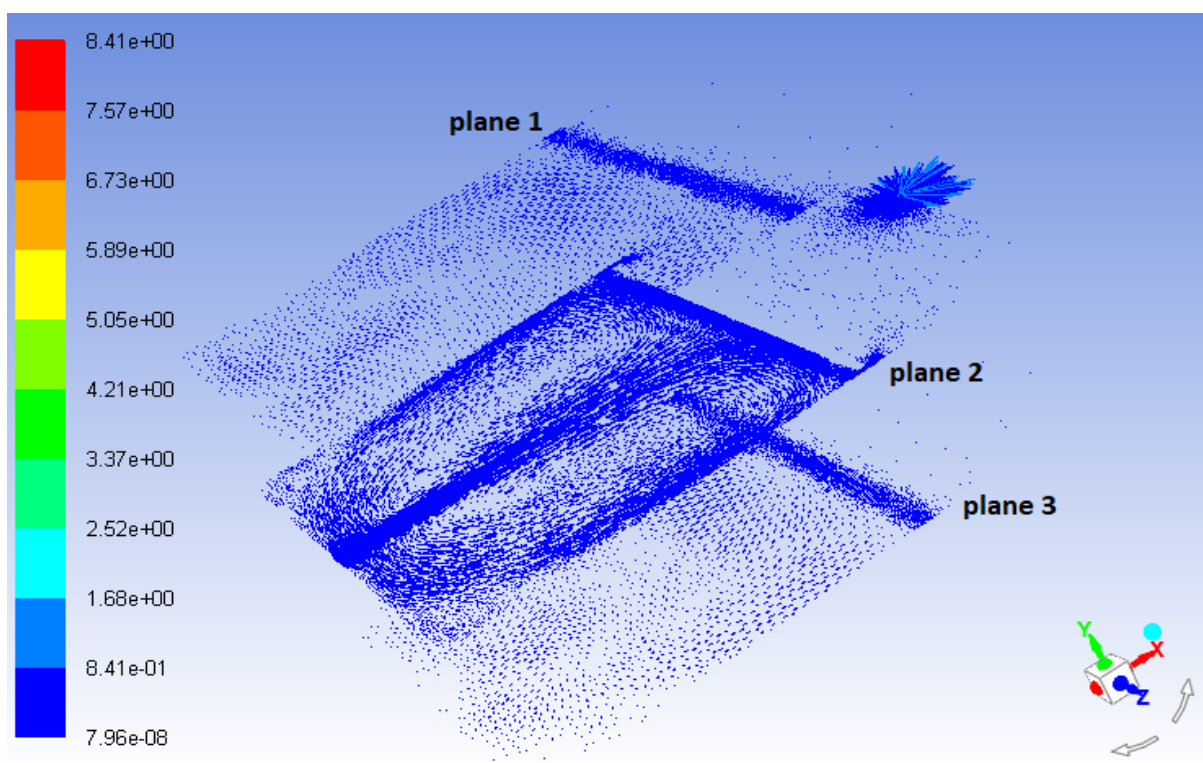
- Διάκενο παραπλεύρως του πίνακα

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} = \frac{1.2 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 8.41 \cdot 10^{-1} \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 0.005 [m]}{1.7894 \cdot 10^{-5} [Pa \cdot s]} \approx 3 \cdot 10^2$$

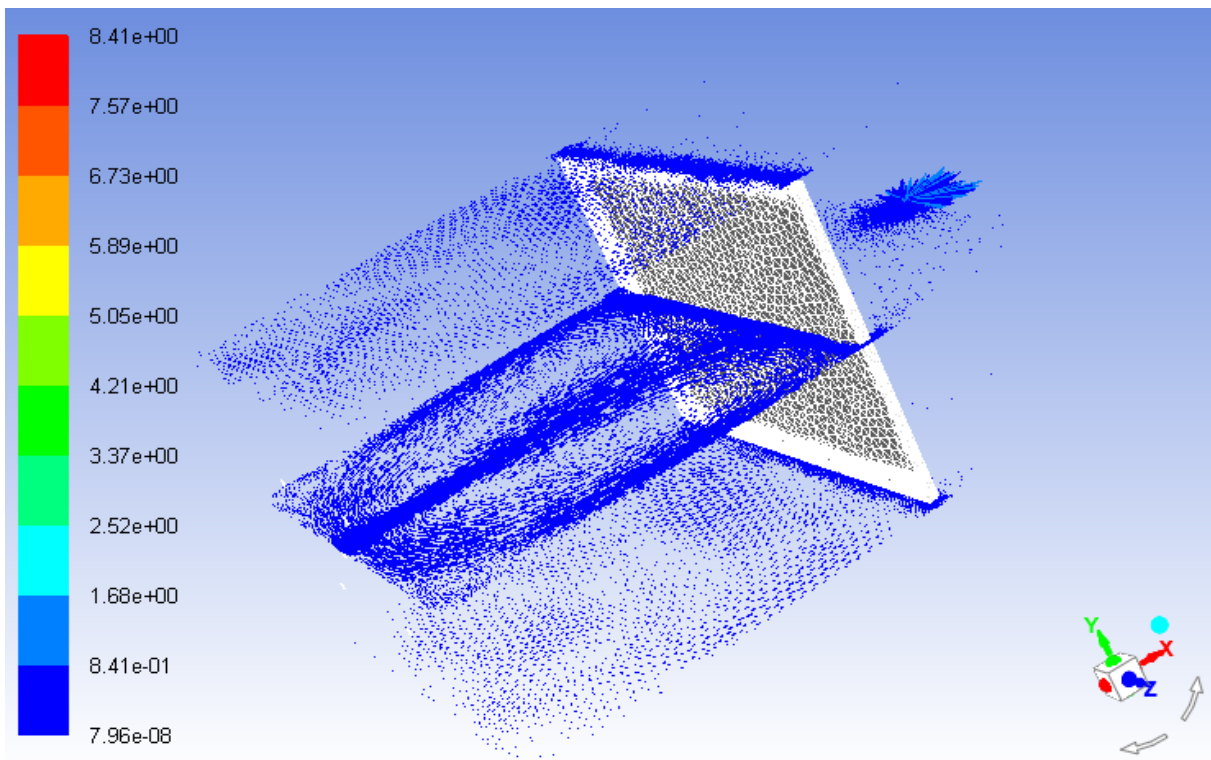
Τα planes που απεικονίζονται στις παρακάτω εικόνες (εικόνα 4.1.7, εικόνα 4.1.8) έχουν δημιουργηθεί κατά μήκος του άξονα x και z και είναι τα εξής (πίνακας 4.1.3).

Πίνακας 4.1.3: Συντεταγμένες των planes.

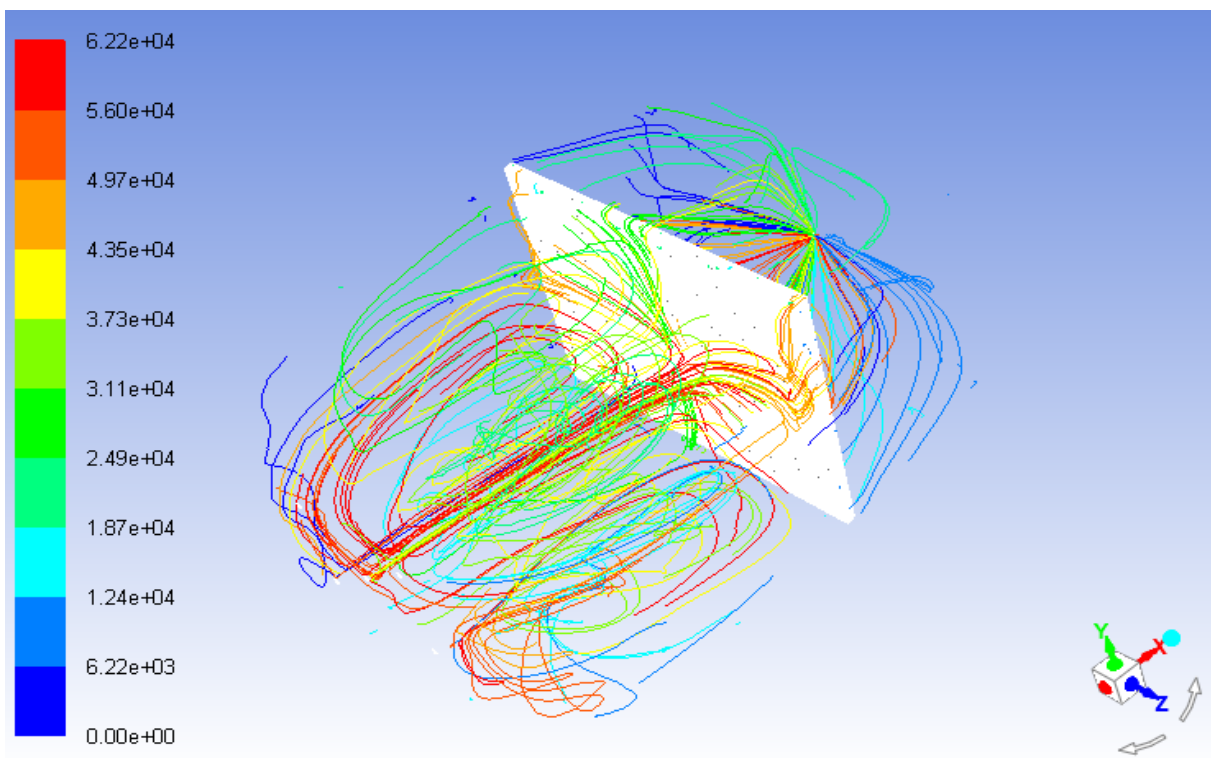
	y	ix	iy	iz
plane 1	0.305	0	1	0
plane 2	0.155	0	1	0
plane 3	-0.005	0	1	0



Εικόνα 4.1.7 : Vector plot του velocity σε τρία διαφορετικά planes.

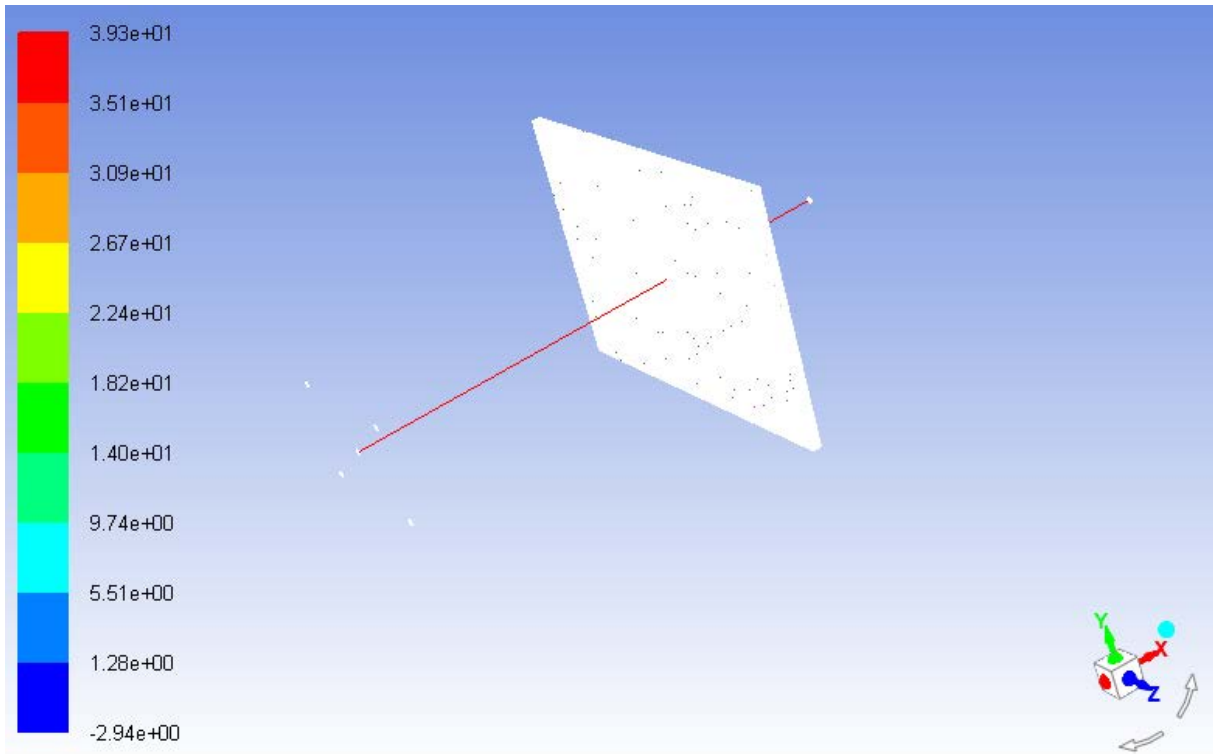


Εικόνα 4.1.8 : Vector plot του velocity σε τρία διαφορετικά planes μαζί με το mesh των οπών εισόδου, εξόδου και του καμβιά.

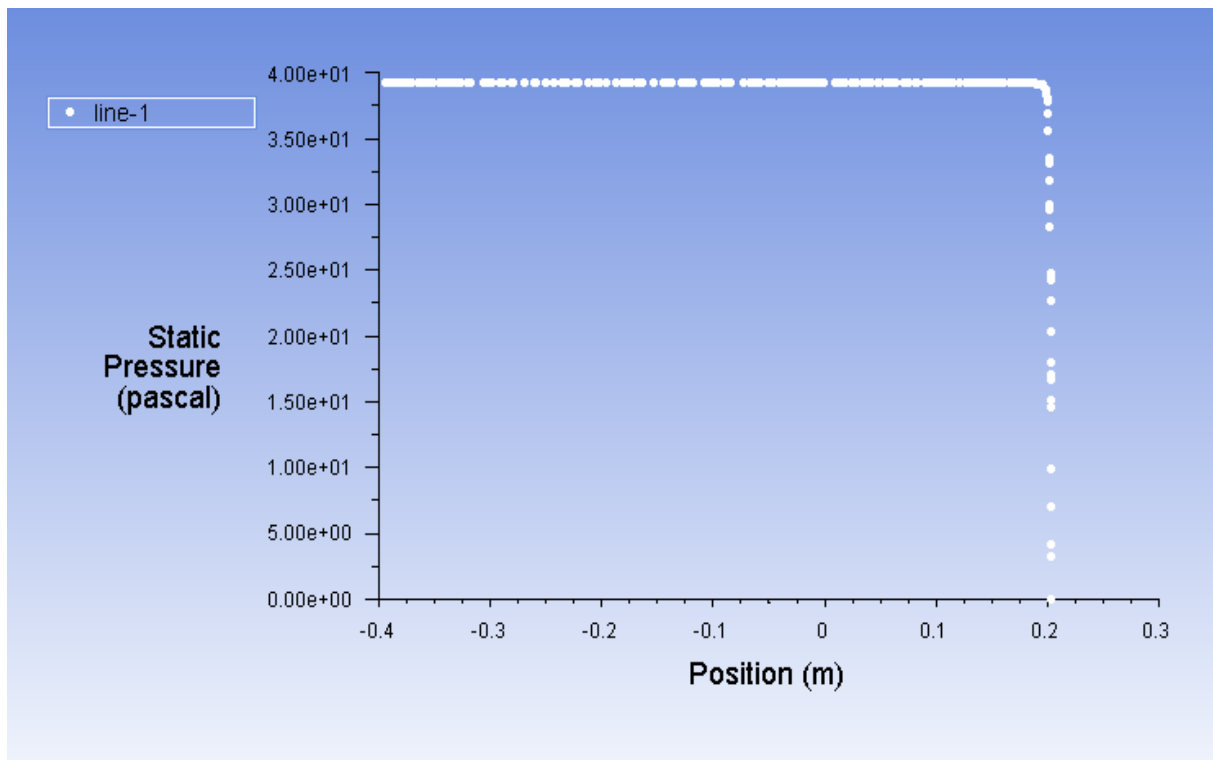


Εικόνα 4.1.9 : Pathlines

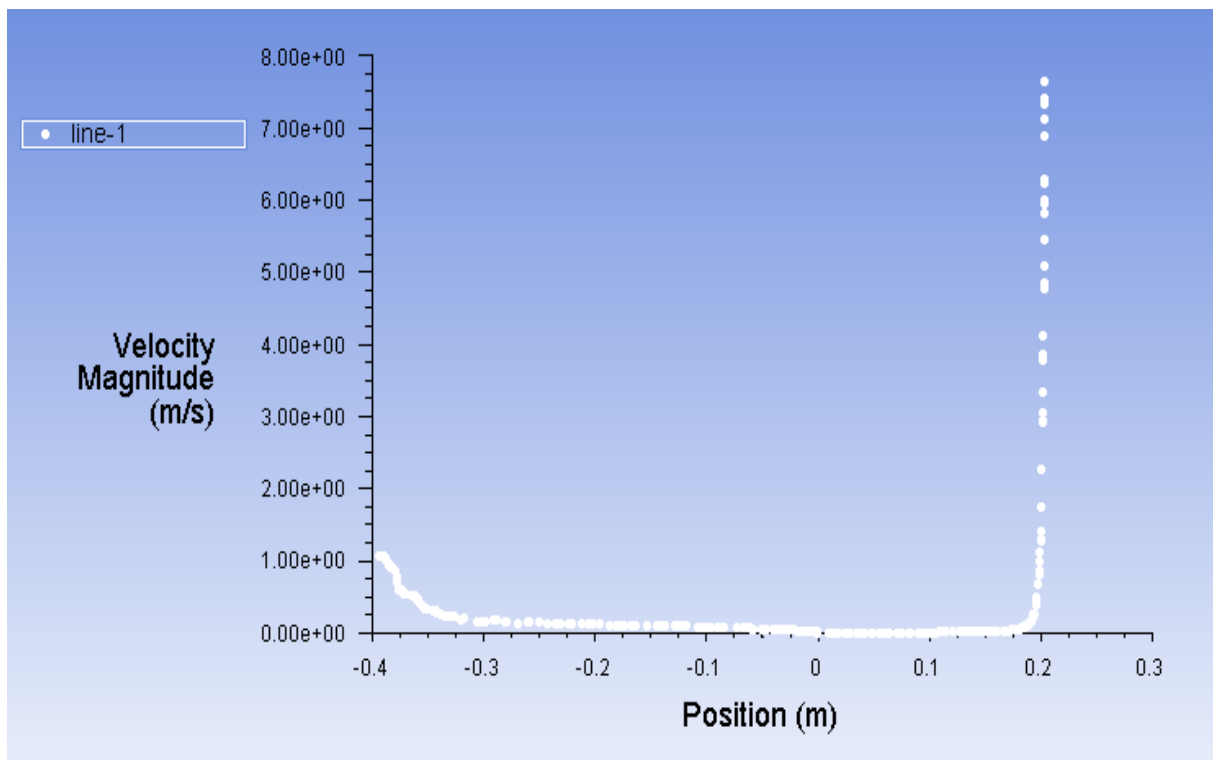
Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια x-y plots (εικόνα 4.1.11, εικόνα 4.1.12, εικόνα 4.1.13), τα οποία έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με την κεντρική γραμμή που ξεκινάει από την κεντρική οπή εισόδου και καταλήγει στην οπή εξόδου (εικόνα 4.1.10).



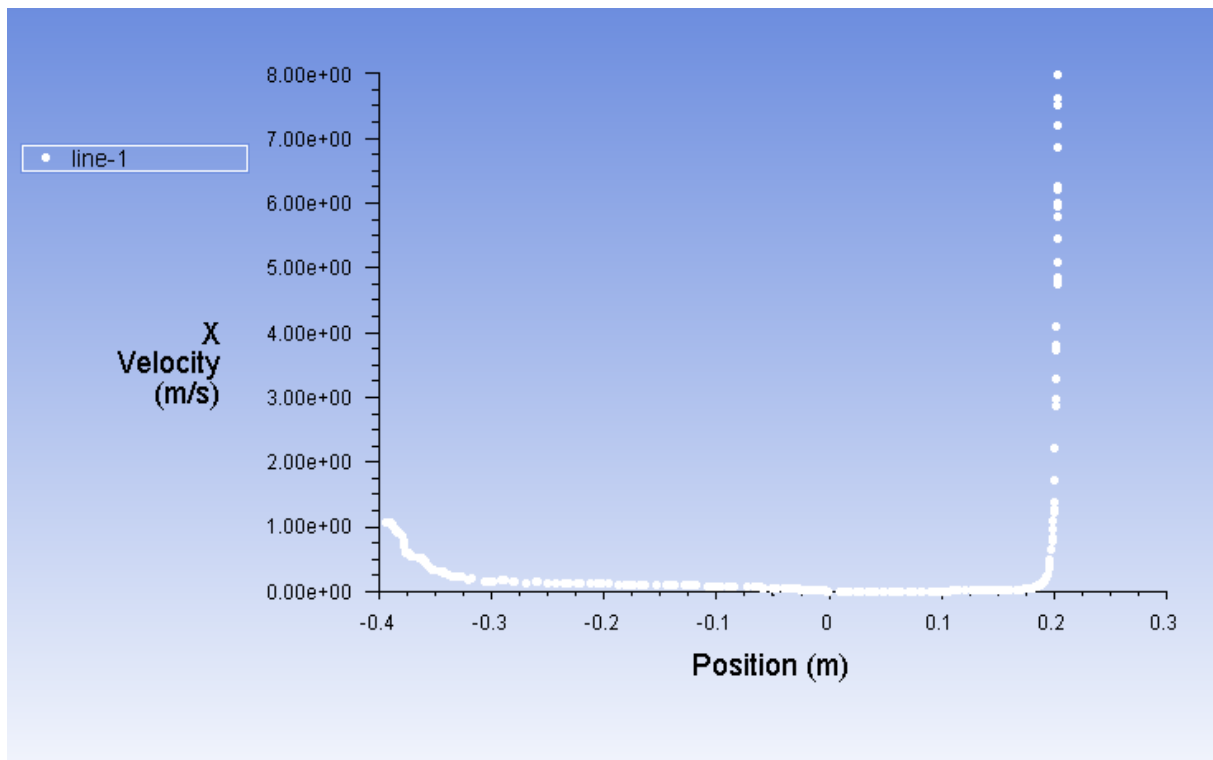
Εικόνα 4.1.10: Κεντρική γραμμή από είσοδο έως την έξοδο.



Εικόνα 4.1.11: Διάγραμμα κατανομής πίεσης.

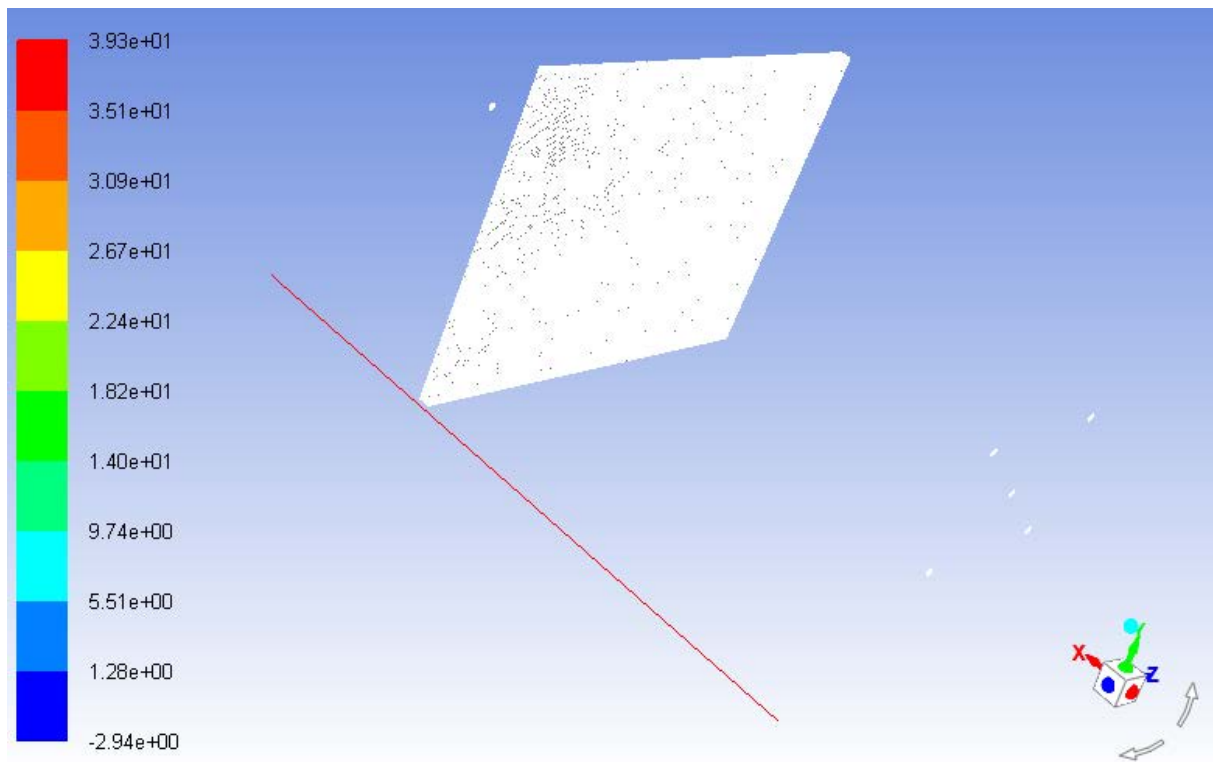


Εικόνα 4.1.12: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας.

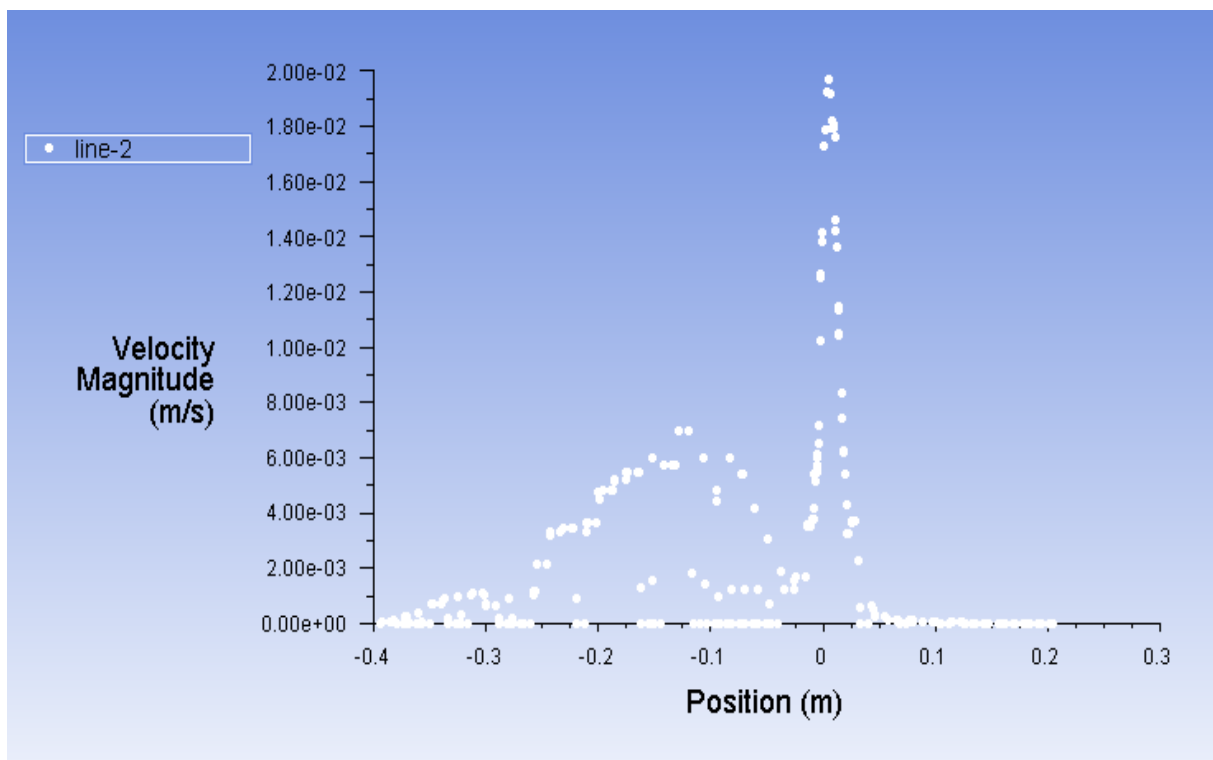


Εικόνα 4.1.13: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας στον άξονα x.

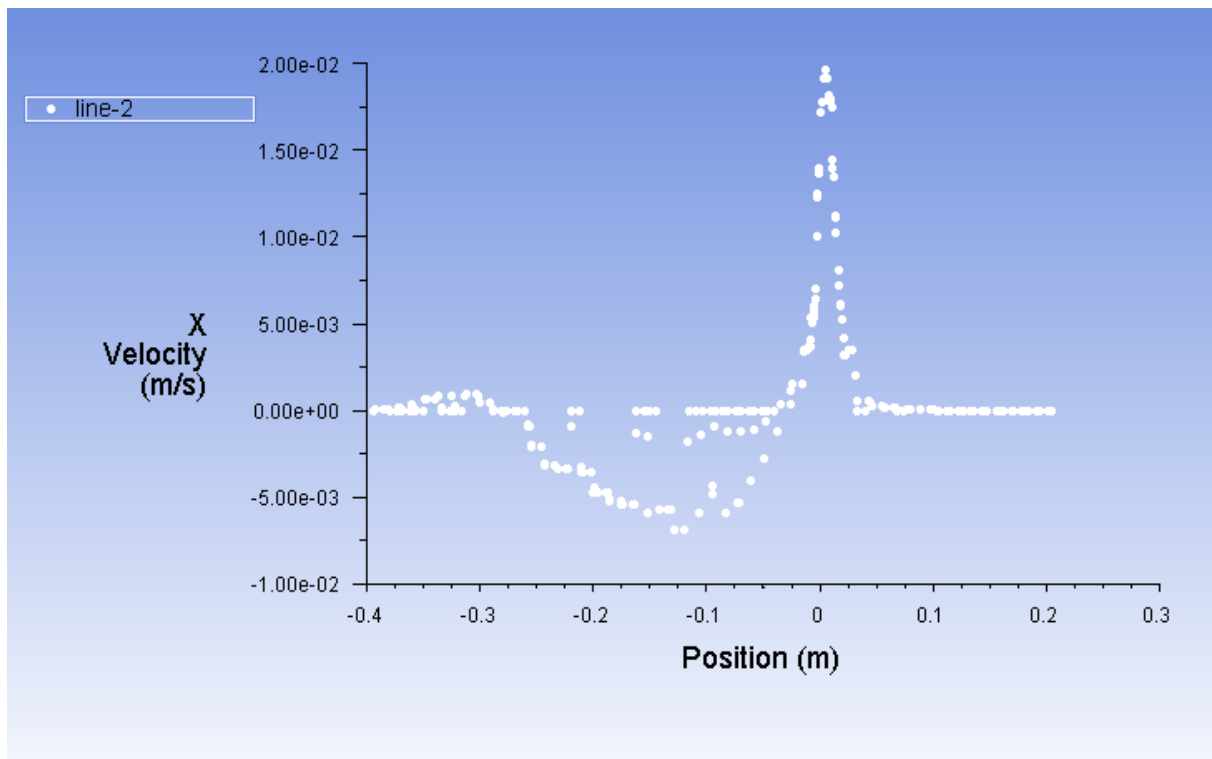
Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια x-y plots (εικόνα 4.1.15, εικόνα 4.1.16), τα οποία έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με μια ευθεία γραμμή που ξεκινάει από μία εμπρόσθια γωνία του θαλάμου και καταλήγει στην απέναντι, περνώντας μέσα από το κενό περιμετρικά του καμβά χωρίς να ακουμπάει στο τοίχωμα (εικόνα 4.1.14).



Εικόνα 4.1.14: Ευθεία γραμμή που διέρχεται από το κενό μεταξύ καμπύ-
τοιχώματος.



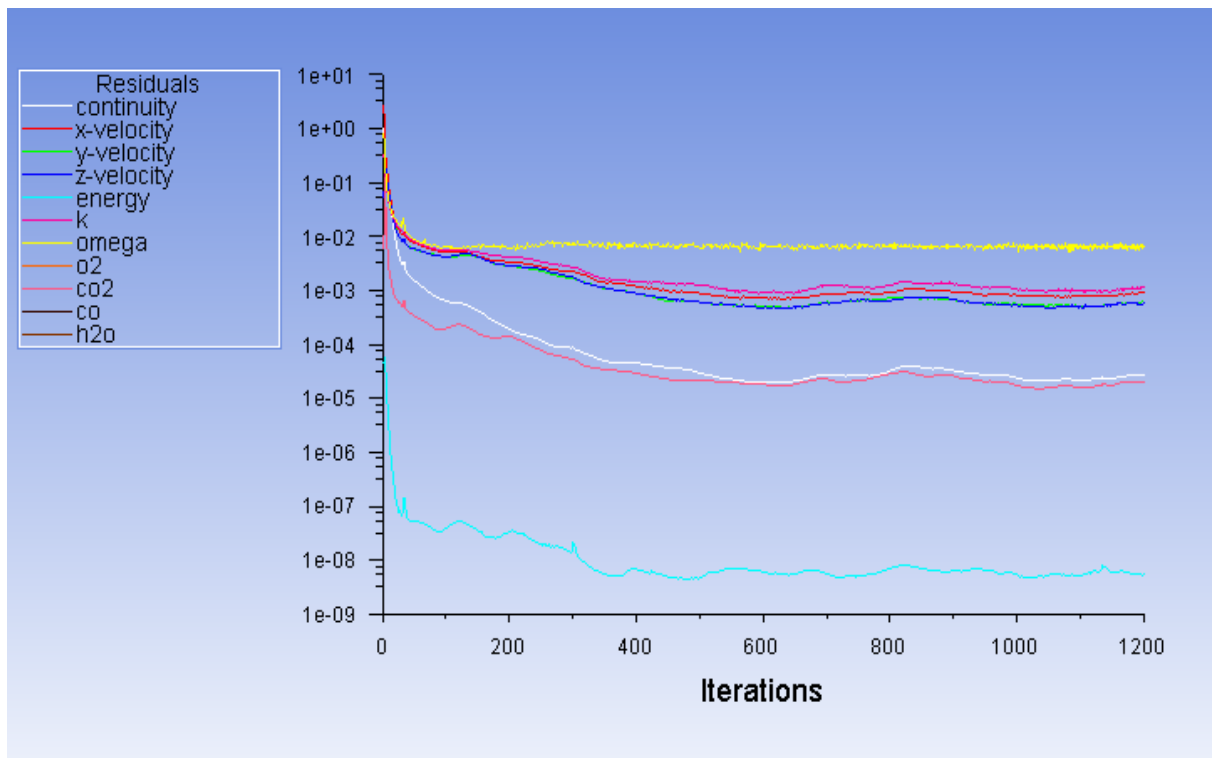
Εικόνα 4.1.15: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας.



Εικόνα 4.1.16: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας στον άξονα x.

4.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΡΟΗΣ ΜΕ ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ.

4.2.1 Πρόβλημα με $c = 0$ στην εμπρόσθια όψη του καμβά.



Εικόνα 4.2.1.1: Διάγραμμα επίλυσης του προβλήματος.

```

iter  continuity  x-velocity  y-velocity  z-velocity  energy      k          omega      o2          co2          co          h2o
1200  2.7653e-05   8.9703e-04  6.0611e-04  5.6730e-04  5.4049e-09  1.1147e-03  6.6559e-03  0.0000e+00  1.9747e-05  0.0000e+00  0.0000e+00

reversed flow in 42 faces on pressure-outlet 10.
1201  2.7710e-05   8.9787e-04  6.1117e-04  5.7185e-04  5.4047e-09  1.0951e-03  6.0113e-03  0.0000e+00  1.9796e-05  0.0000e+00  0.0000e+00

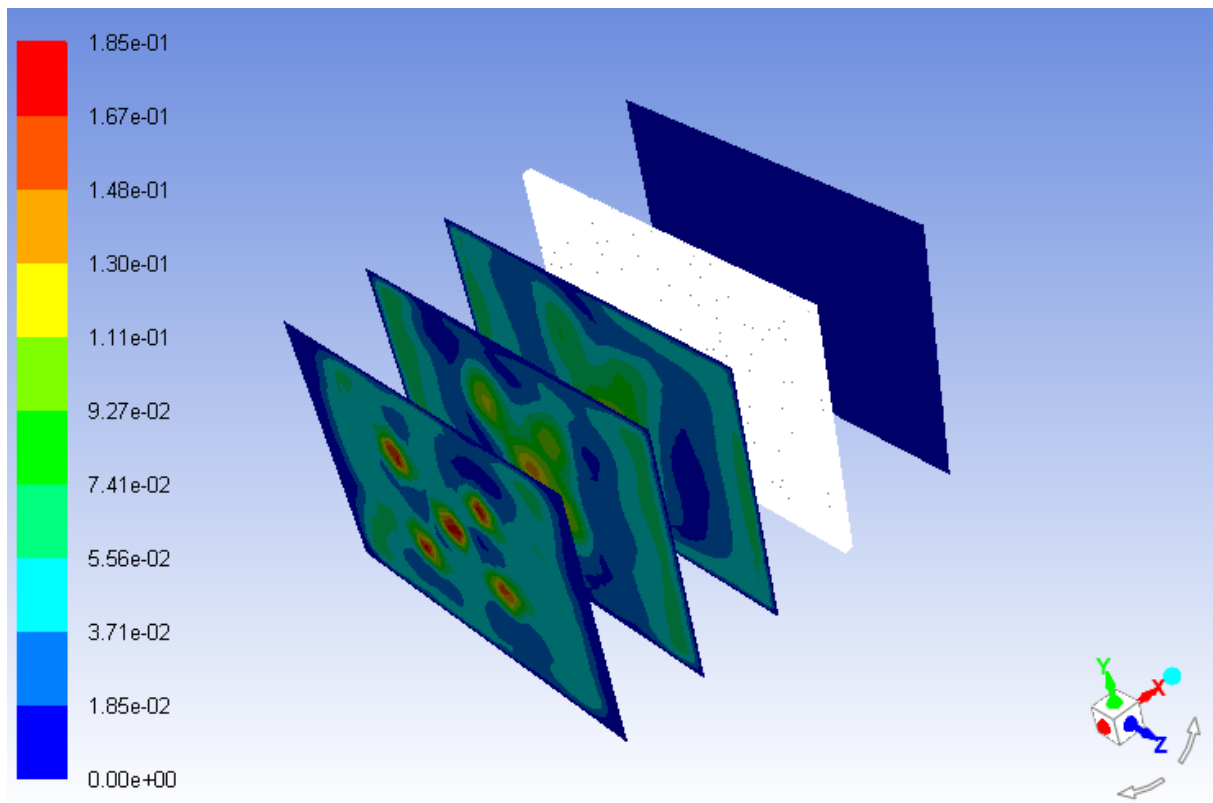
reversed flow in 41 faces on pressure-outlet 10.
1202  2.7790e-05   9.0178e-04  5.9905e-04  5.5815e-04  5.3416e-09  1.1220e-03  7.1297e-03  0.0000e+00  1.9797e-05  0.0000e+00  0.0000e+00
Done.

Calculation complete.

```

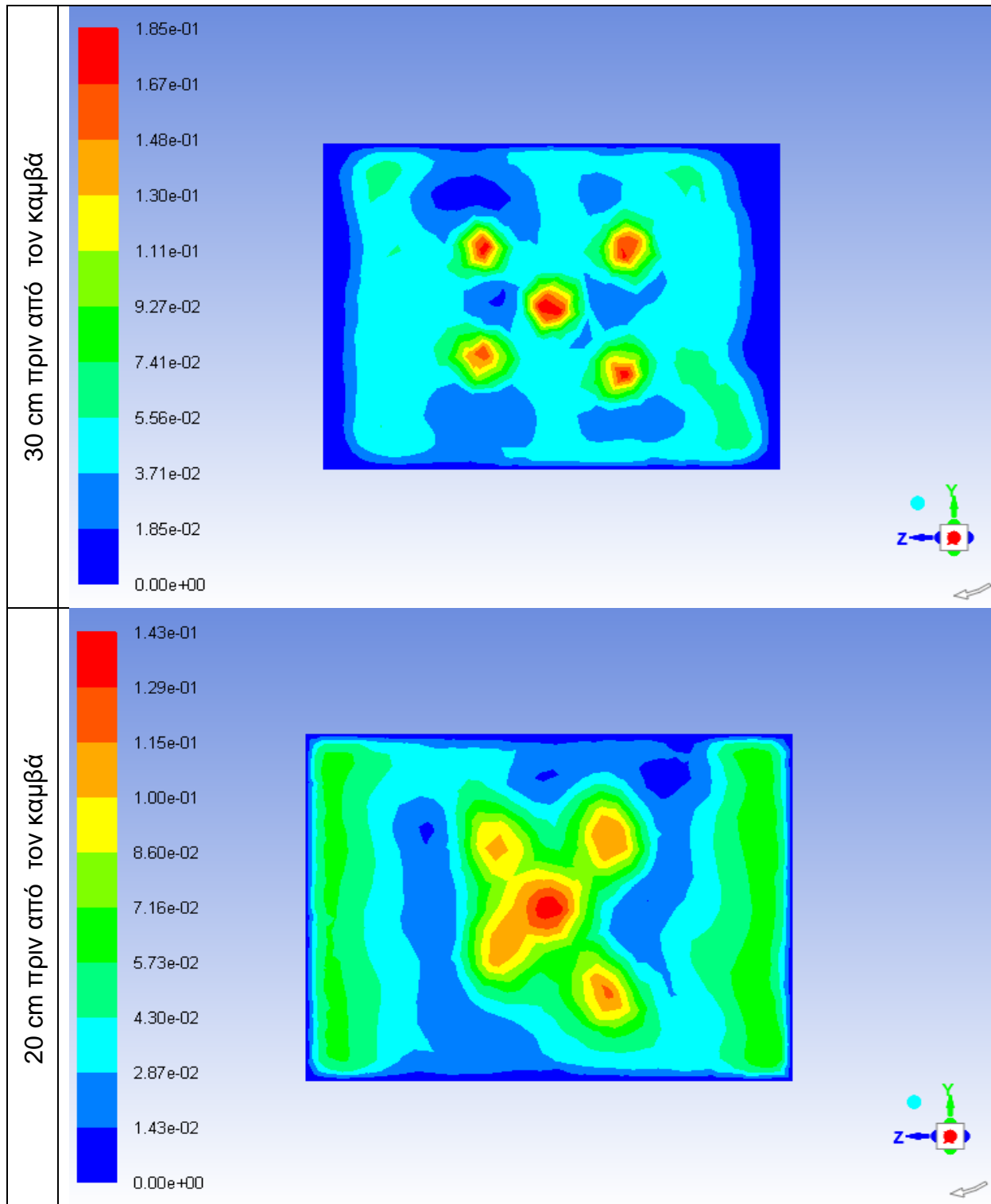
Εικόνα 4.2.1.2: Τιμές των residuals στα 1200 iterations.

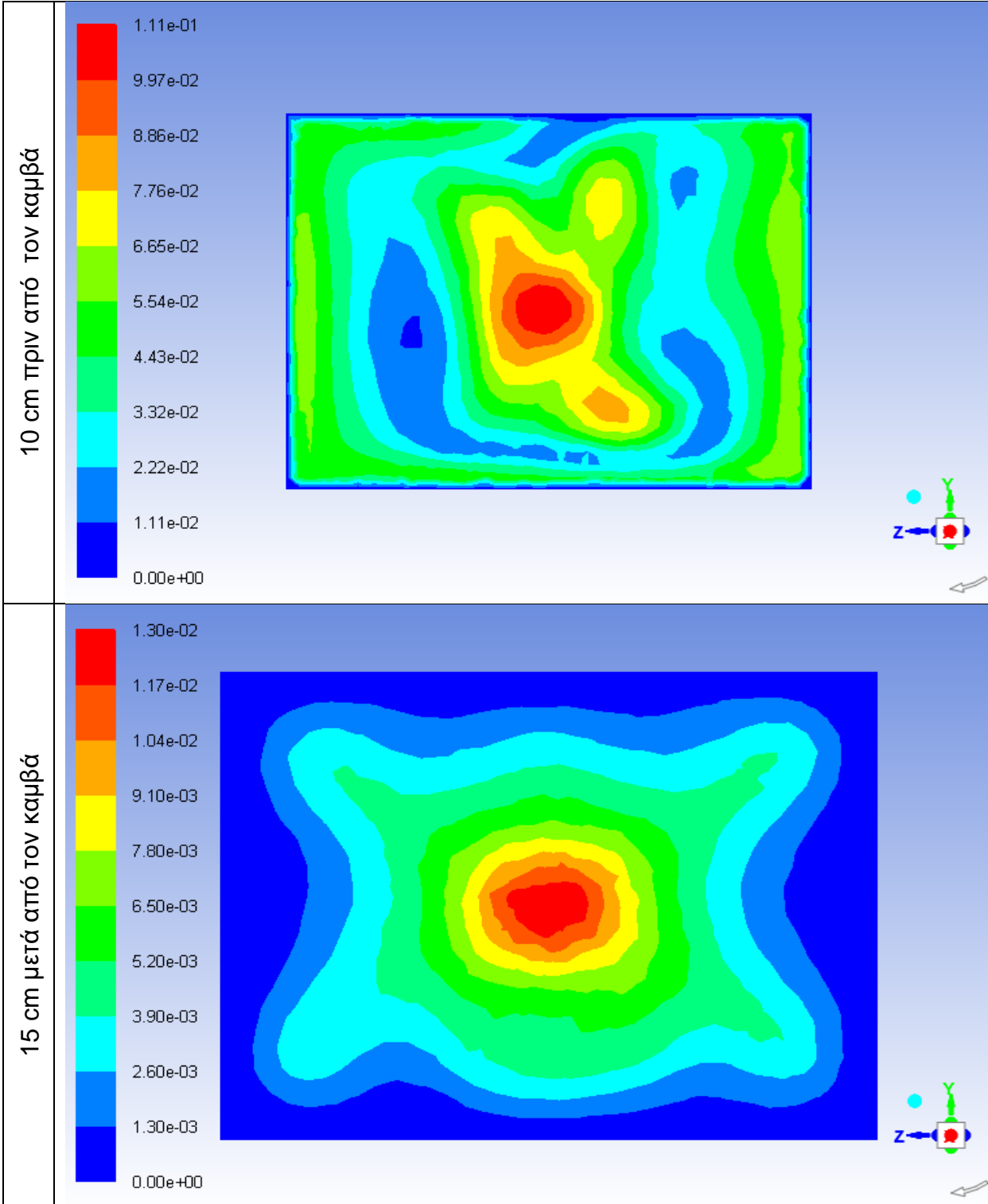
Στους παρακάτω πίνακες, παρουσιάζονται contours των planes που έχουν δημιουργηθεί κάθετα στον άξονα x με διαφορετικές αποστάσεις κάθε φορά από τον καμβά. Παρουσιάζονται όλα, μαζί με το καμβά για να γίνει κατανοητή η διάταξη τους στο χώρο (εικόνα 4.2.1.3).



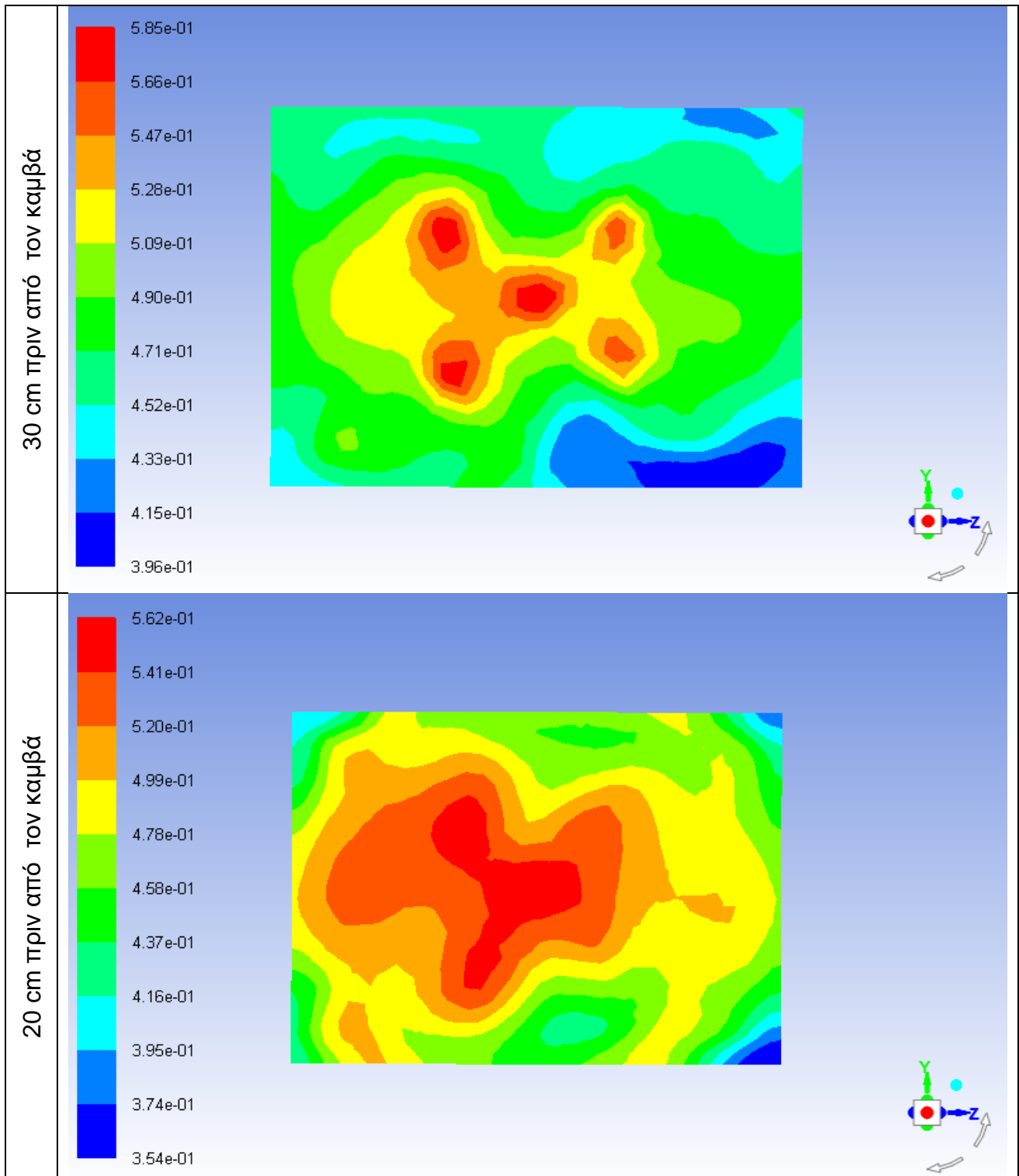
Εικόνα 4.2.1.3: Contour διαφορετικών plane στον θάλαμο προσομοίωσης.

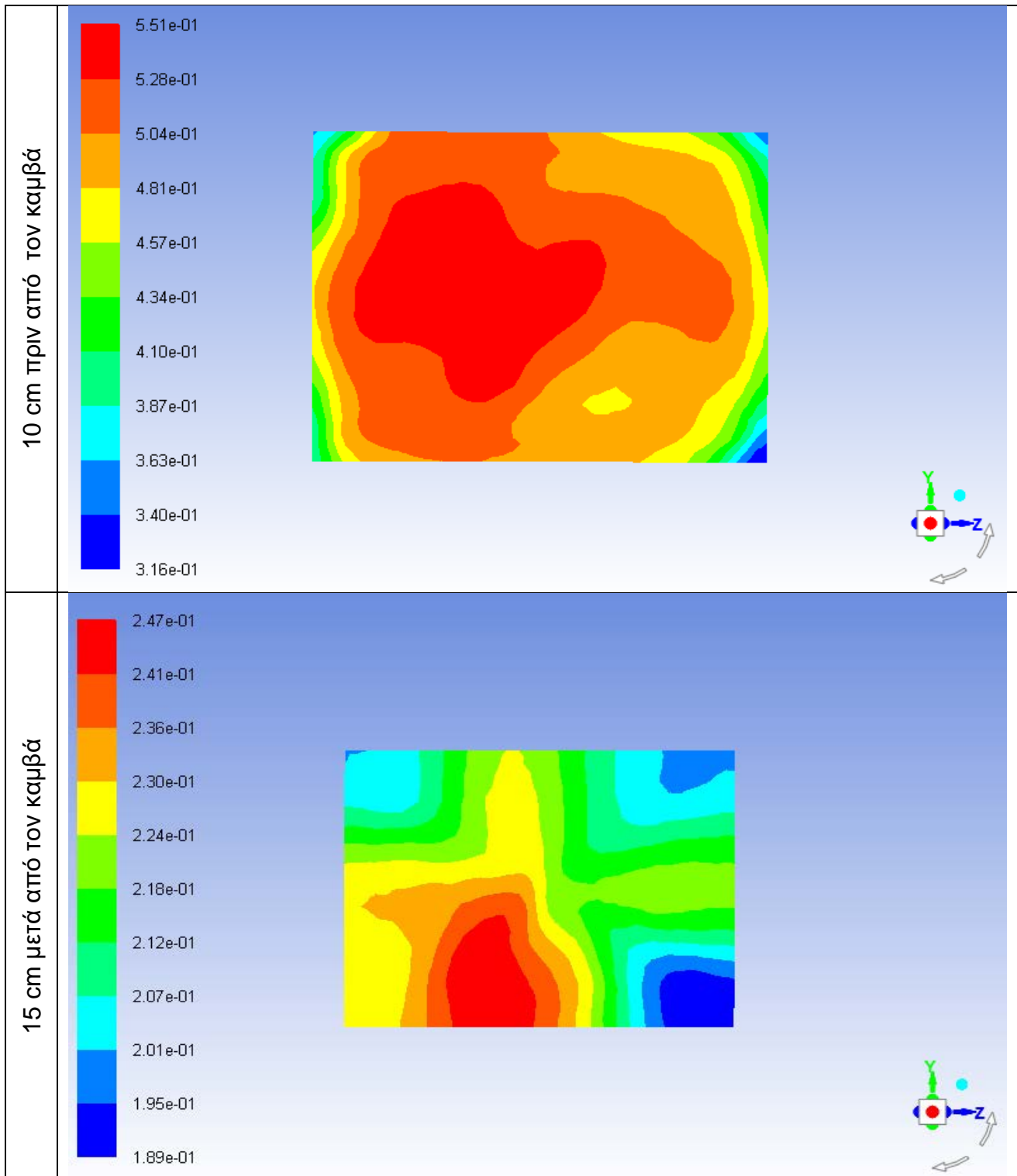
Πίνακας 4.2.1.1: Χαρακτηριστικά contours κατανομής της ταχύτητας σε παράλληλα planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά.



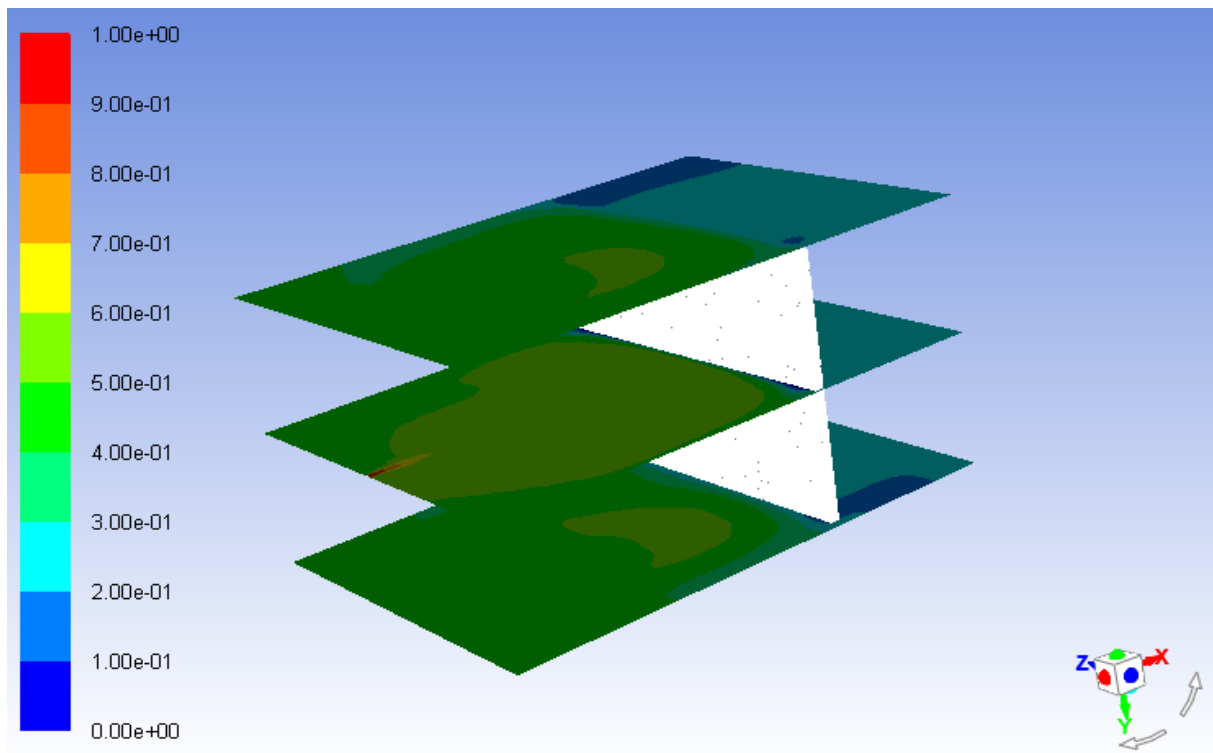


Πίνακας 4.2.1.2: Χαρακτηριστικά contours του mass fraction CO_2 σε παράλληλα planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά.



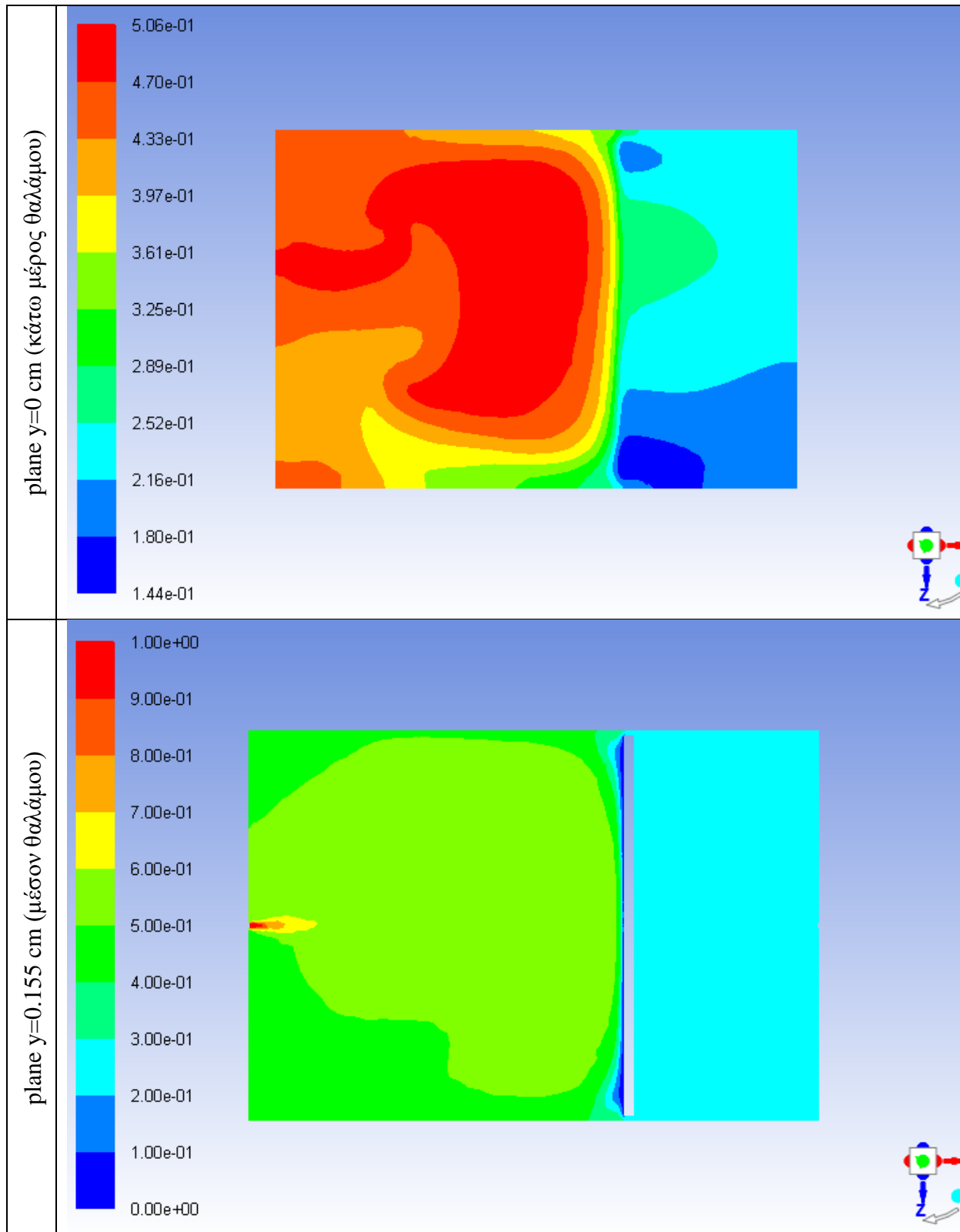


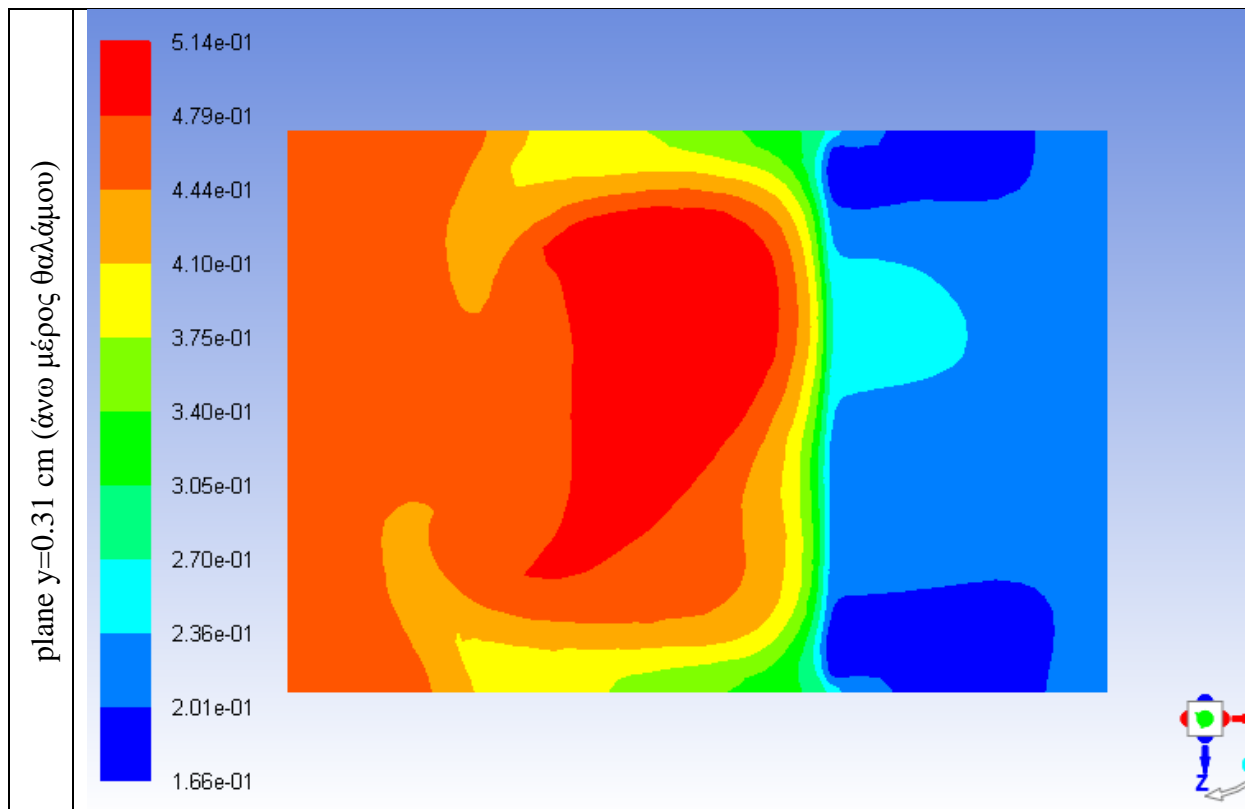
Παρακάτω εμφανίζονται contours σε διαφορετικά planes, παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα στον άξονα y.



Εικόνα 4.1.2.4: Διάταξη των παραπάνω planes στο θάλαμο προσομοίωσης.

Πίνακας 4.2.1.3: Χαρακτηριστικά contours του mass fraction CO_2 σε planes κάθετα στον άξονα y .

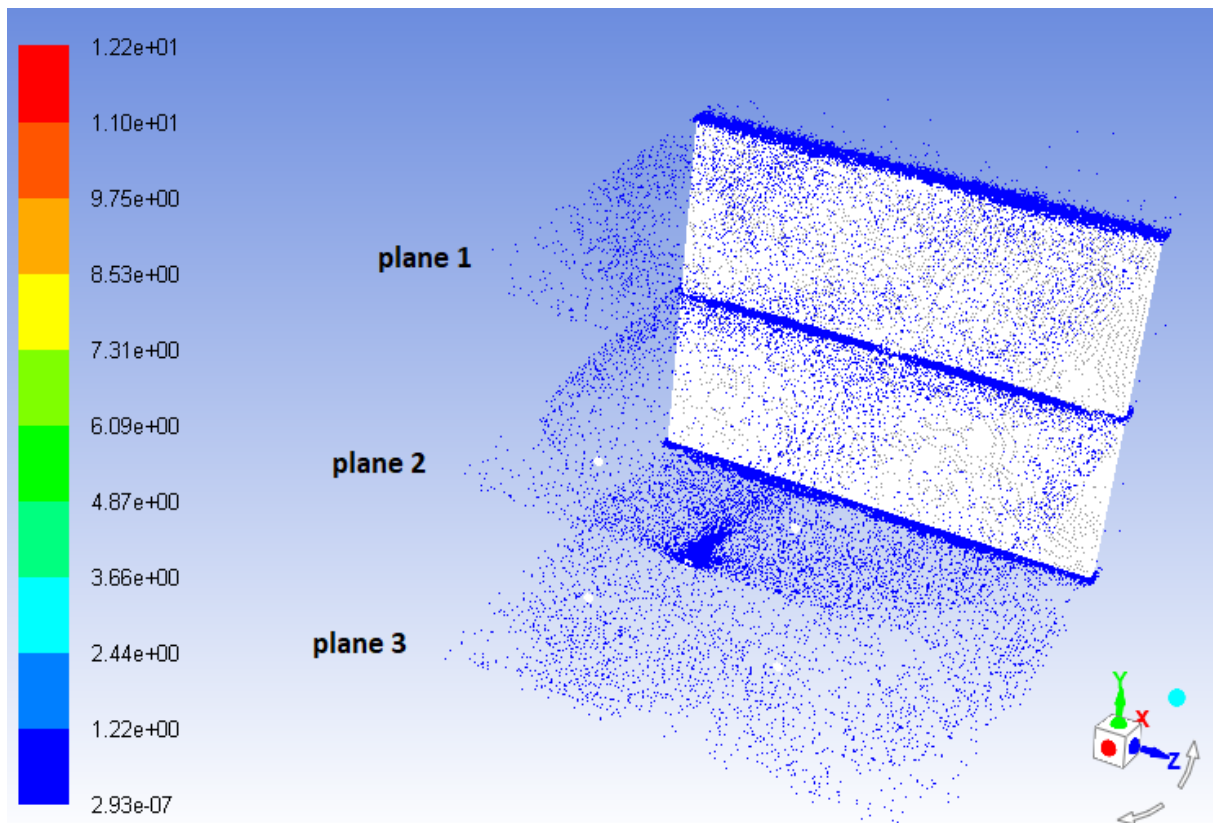




Τα planes που απεικονίζονται στις παρακάτω φωτογραφίες έχουν δημιουργηθεί κατά μήκος του άξονα x και z και είναι τα εξής.

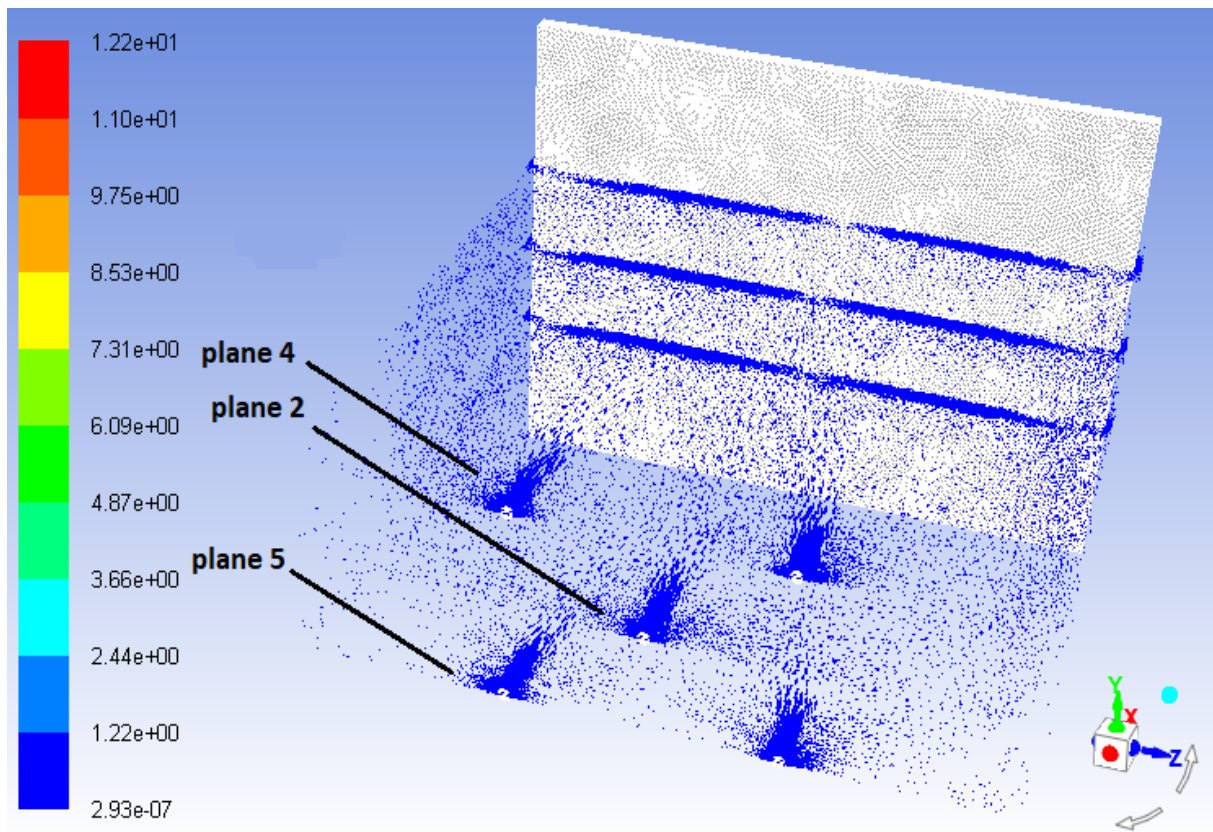
Πίνακας 4.2.1.4: Συντεταγμένες των planes.

	y	ix	iy	iz
plane 1	0.305	0	1	0
plane 2	0.155	0	1	0
plane 3	-0.005	0	1	0
plane 4	0.205	0	1	0
plane 5	0.095	0	1	0



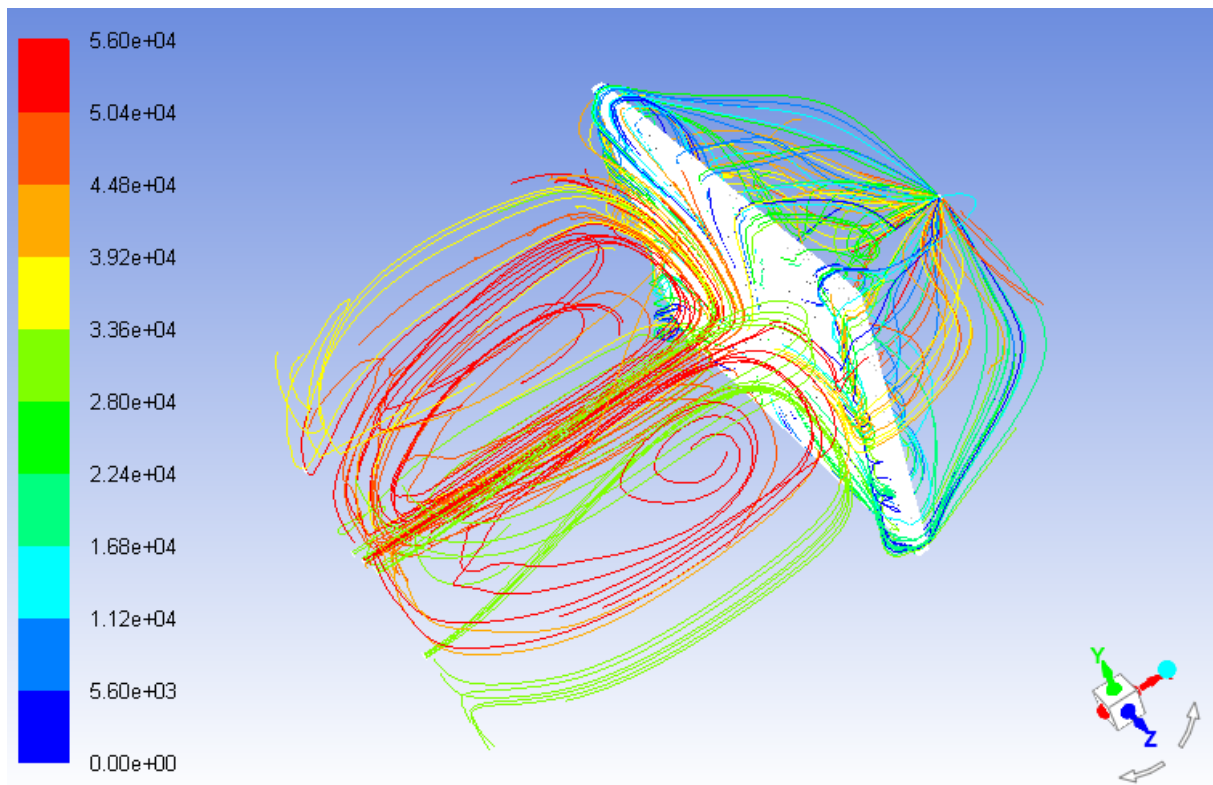
Εικόνα 4.2.1.5: Vectors plots του velocity σε τρία διαφορετικά planes.

Στην παραπάνω εικόνα, τα plane 2,3 απεικονίζουν τα διανύσματα της ταχύτητας της ροής που περνάει από το κενό που σχηματίζεται μεταξύ θαλάμου και καμβά αντίστοιχα. Ενώ στο plane 2 απεικονίζεται η ταχύτητα της ροής που ξεκινάει ακριβώς από την κεντρική οπή.



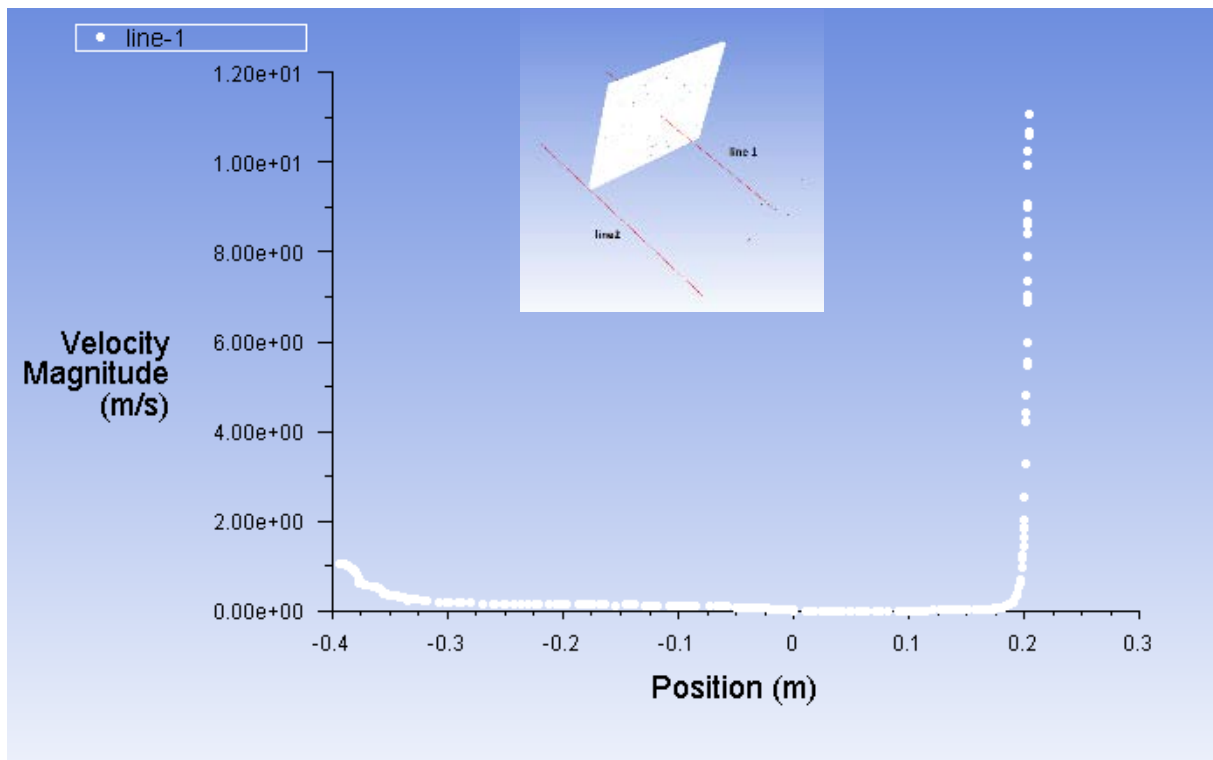
Εικόνα 4.2.1.6: Vectors plots του velocity σε τρία διαφορετικά planes.

Στην παραπάνω εικόνα, τα plane 4,5 απεικονίζουν τα διανύσματα της ταχύτητας της ροής που ξεκινά από τις υπόλοιπες οπές εισόδου. Αυτό άλλωστε φαίνεται και στην εικόνα εφόσον στην αρχή του θαλάμου παρατηρούμε 5 σημεία όπου τα διανύσματα είναι πυκνότερα.

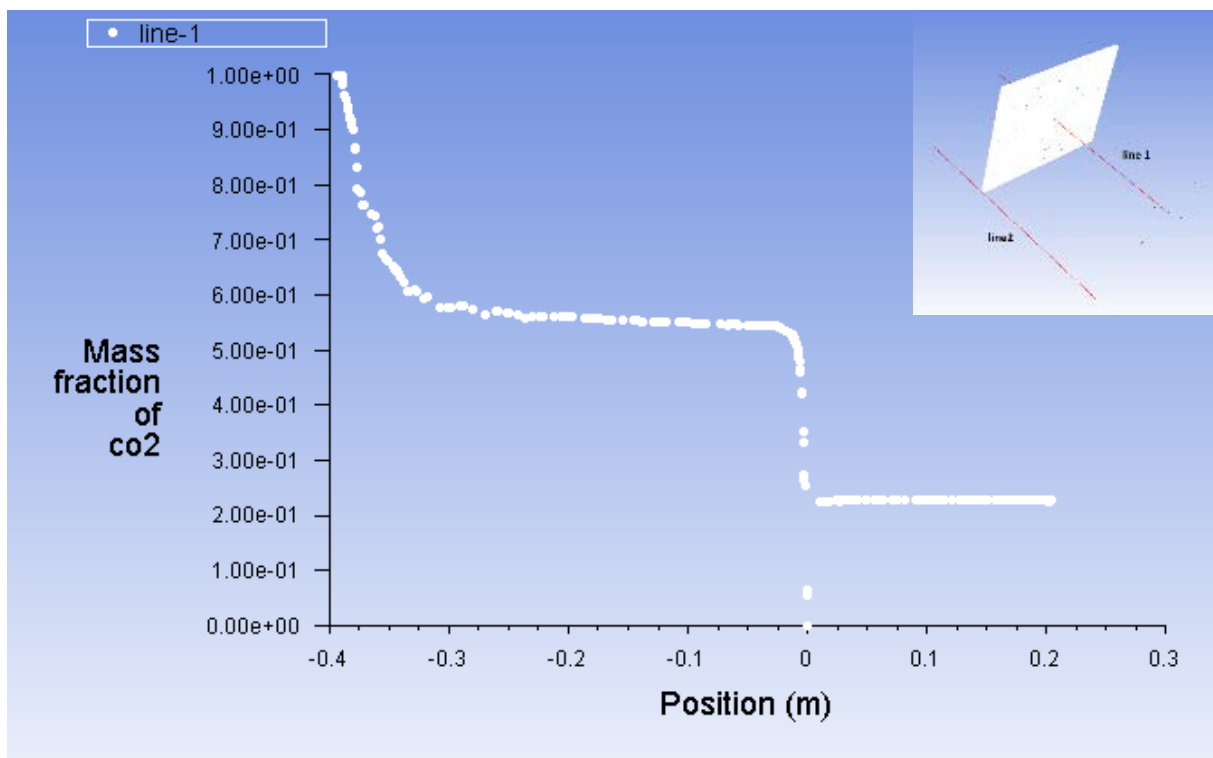


Εικόνα 4.2.1.7: Pathlines για $c=0$ στον καμβά.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια $x-y$ plots, τα οποία έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με την κεντρική γραμμή που ξεκινάει από την κεντρική οπή εισόδου και καταλήγει στην οπή εξόδου.



Εικόνα 4.2.1.8: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας.



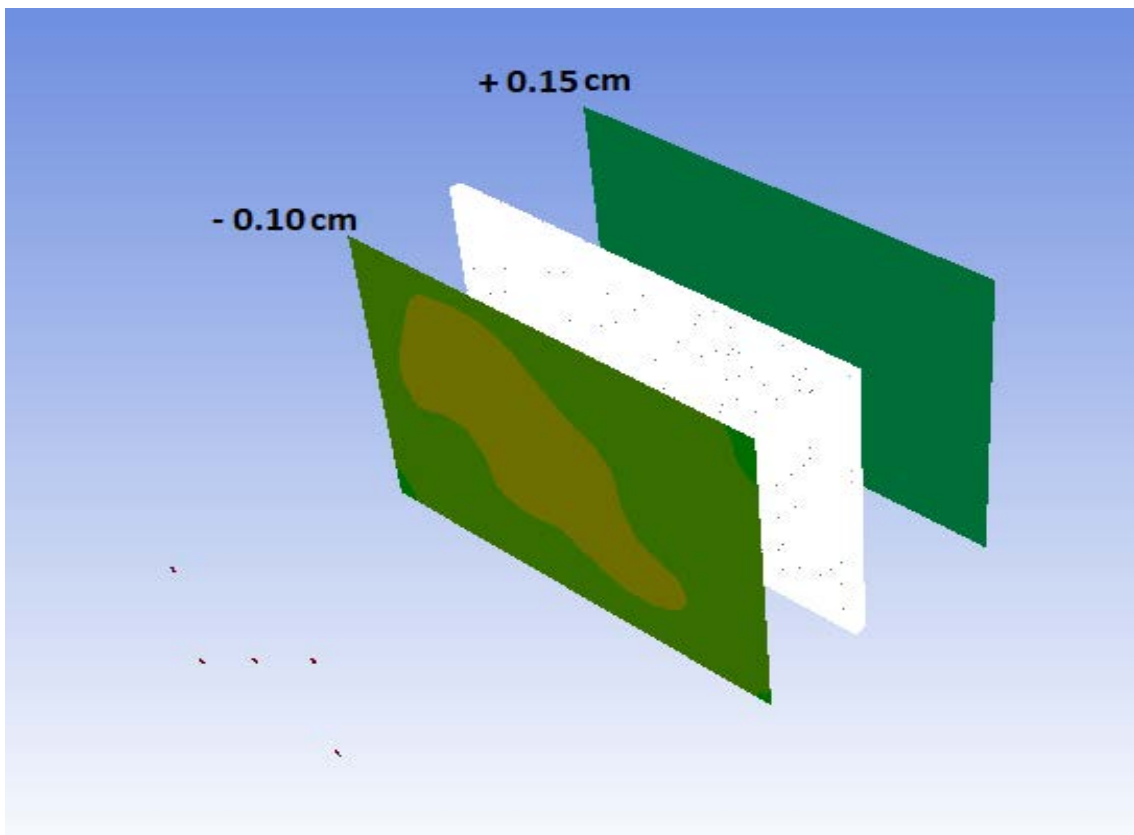
Εικόνα 4.2.1.9: Διάγραμμα κατακράτησης CO₂ επάνω στο καμβά.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το ποσοστό της συγκέντρωσης CO₂ πριν τον καμβά είναι περίπου 0.55, γιατί τη λαμβάνουμε υπόψιν από τη στιγμή που σταθεροποιείται η ροή και της συγκέντρωσης μετά από αυτόν είναι περίπου 0.23. Έτσι έχουμε:

$$c_{\text{απορ.}} = \frac{0.55 - 0.23}{0.55} = 0.58$$

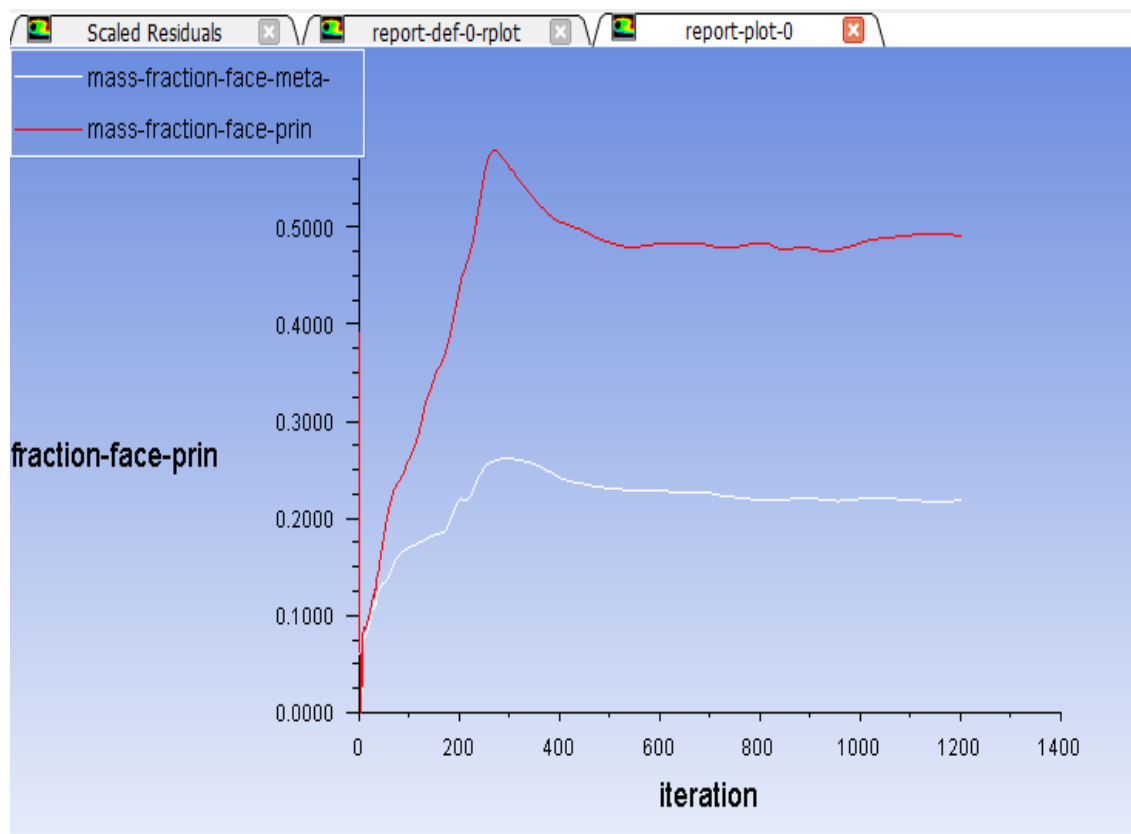
Οπότε το ποσοστό του CO₂ που επικάθεται επάνω στον καμβά είναι περίπου 58 %. Αυτό προκύπτει από την διαφορά της συγκέντρωσης πριν και μετά τον καμβά που βρίσκεται στη θέση 0m.

Όμως, τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι αντιπροσωπευτικά αφού οι τιμές αφορούν μόνο την γραμμή που σχεδιάσαμε. Έτσι για να είμαστε περισσότερο ακριβείς δημιουργούμε δύο planes (εικόνα 4.2.1.10), ένα 10 cm πριν τον καμβά και ένα 15 cm μετά , έτσι ώστε να μπορέσουμε να πάρουμε τις μέσες τιμές του mass fraction CO₂ πριν και μετά το πένακι και να υπολογίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια το ποσοστό απορρόφησης του ρύπου από τον καμβά.



Εικόνα 4.2.1.10: Διάταξη των planes σε σχέση με τον καμβά.

Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 4.2.1.11), φαίνονται οι δύο καμπύλες των μέσων τιμών CO₂ mass fraction. Η άσπρη αφορά το plane μετά τον καμβά και η κόκκινη το plane πριν από αυτόν.



Εικόνα 4.2.1.11: CO₂ mass fraction plot.

Με το τέλος του υπολογισμού στα 1200 iterations , στο κομμάτι της κονσόλας του προγράμματος, παίρνουμε τις ακριβείς τιμές των συγκεντρώσεων πριν και μετά τον καμβά (εικόνα 4.2.2.12)

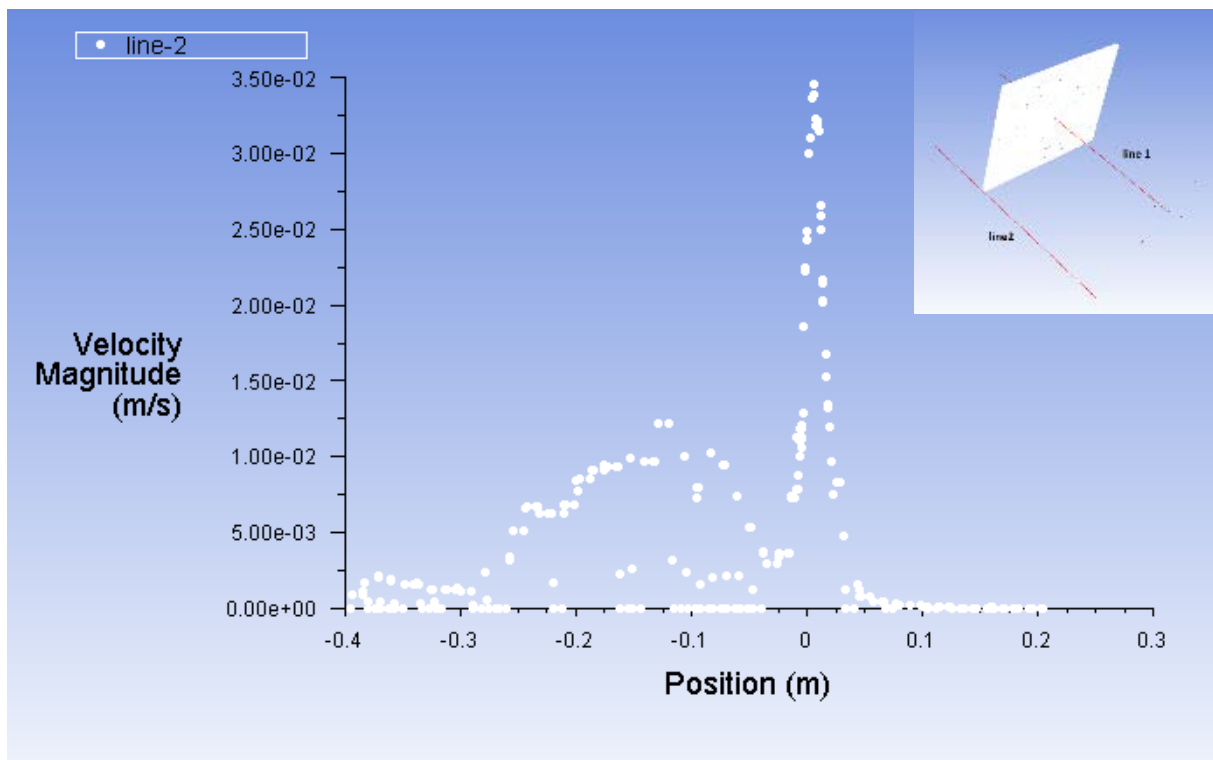
co2	co	h2o	mass-fract	mass-fract	time/iter	
1.9747e-05	0.0000e+00	0.0000e+00	2.1848e-01	4.9140e-01	0:00:20	1
1.9796e-05	0.0000e+00	0.0000e+00	2.1850e-01	4.9133e-01	0:00:00	0

Εικόνα 4.2.1.12: Results, 1200 iterations.

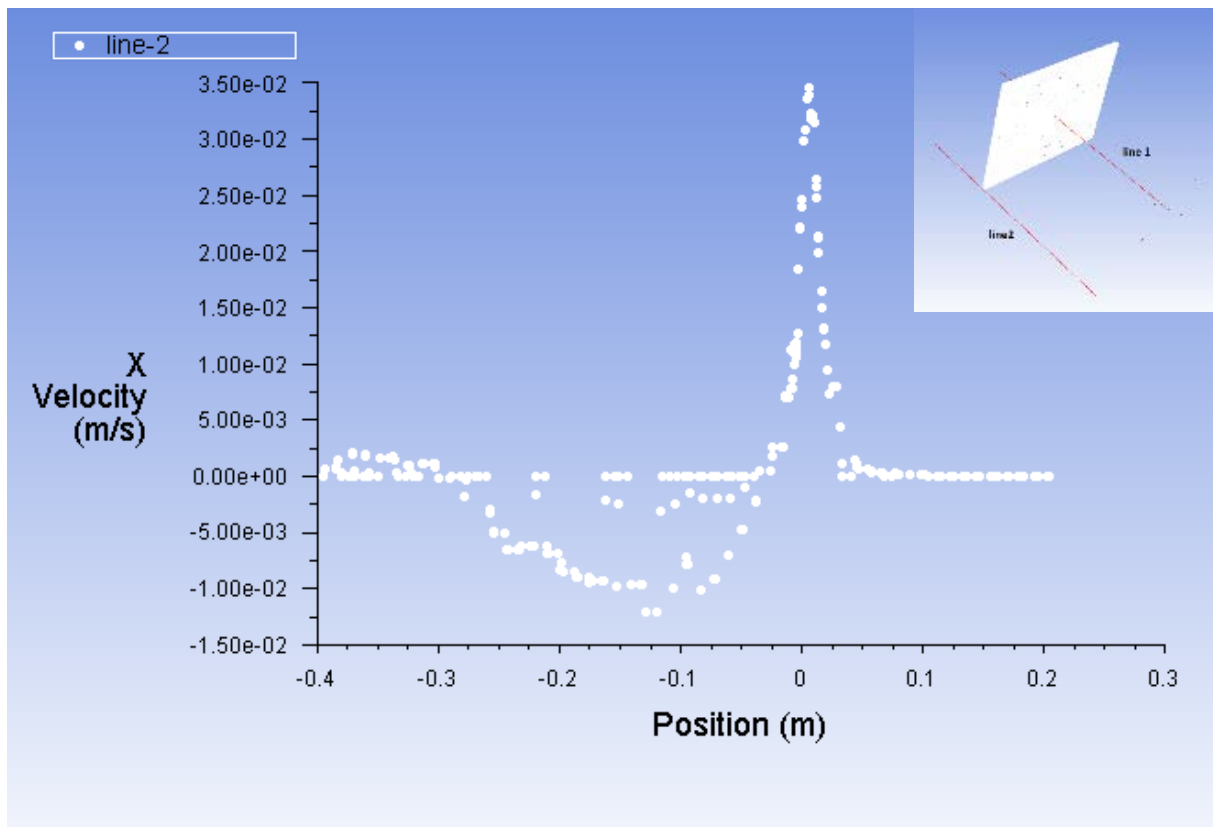
Έτσι, προχωρούμε στον ακριβή υπολογισμό του ποσοστού απορρόφησης του ρύπου από τον καμβά, το οποίο είναι 55.53 % και προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$c_{\text{απορ.}} = \frac{0.49133 - 0.2185}{0.49133} = 0.5253$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια x-y plots, τα οποία έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με μια ευθεία γραμμή που ξεκινάει από μία εμπρόσθια γωνία του θαλάμου και καταλήγει στην απέναντι, περνώντας μέσα από το κενό περιμετρικά του καμβά χωρίς να ακουμπάει στο τοίχωμα.

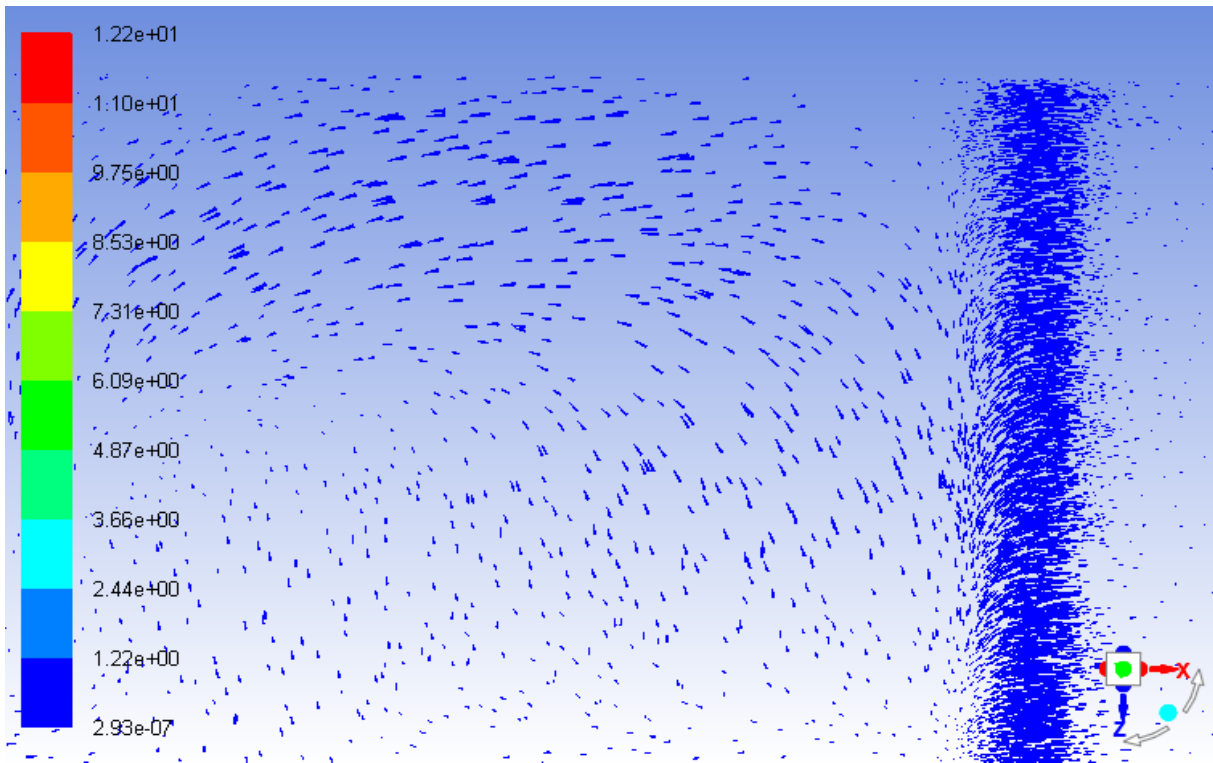


Εικόνα 4.2.1.13: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας.

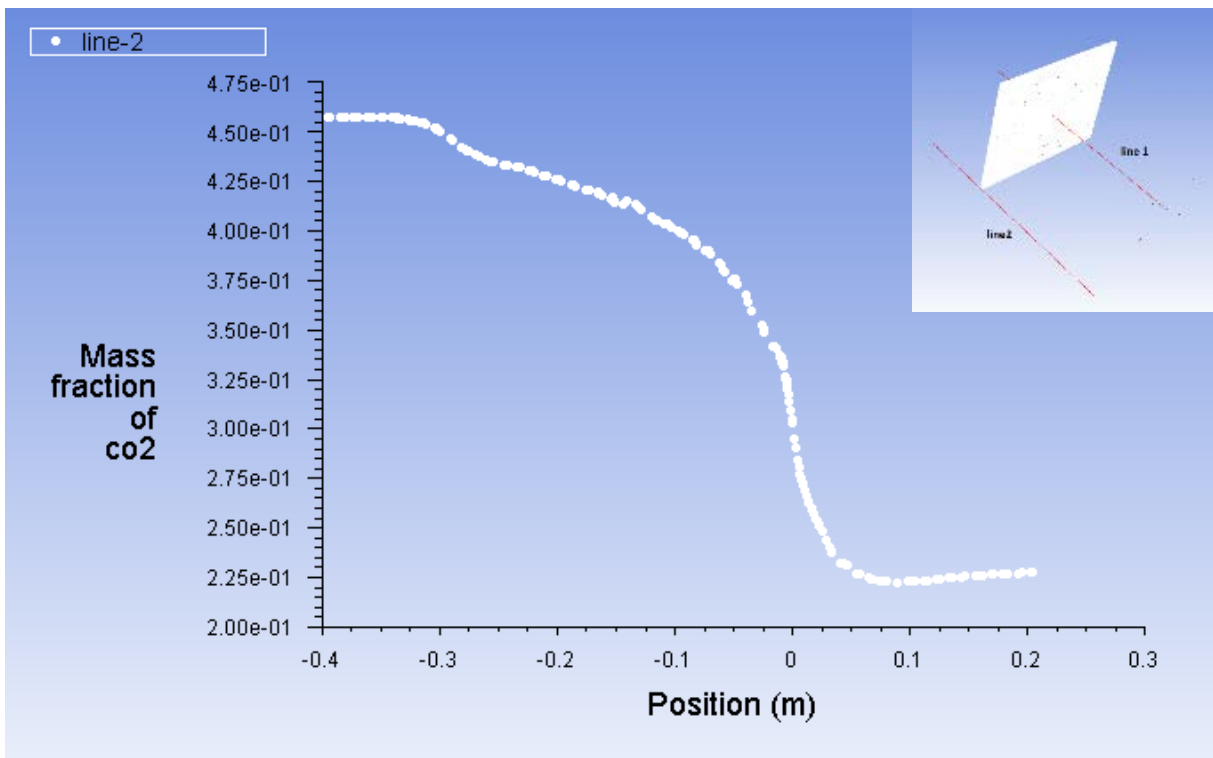


Εικόνα 4.2.1.14: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας στον άξονα x.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι πριν τη θέση του καμβά, η ταχύτητα αποκτά και αρνητικές τιμές και αυτό οφείλεται στην ανακυκλοφορία (τύρβη) που σχηματίζεται στο εμπρόσθιο τμήμα του θαλάμου (εικόνα 4.2.1.12).

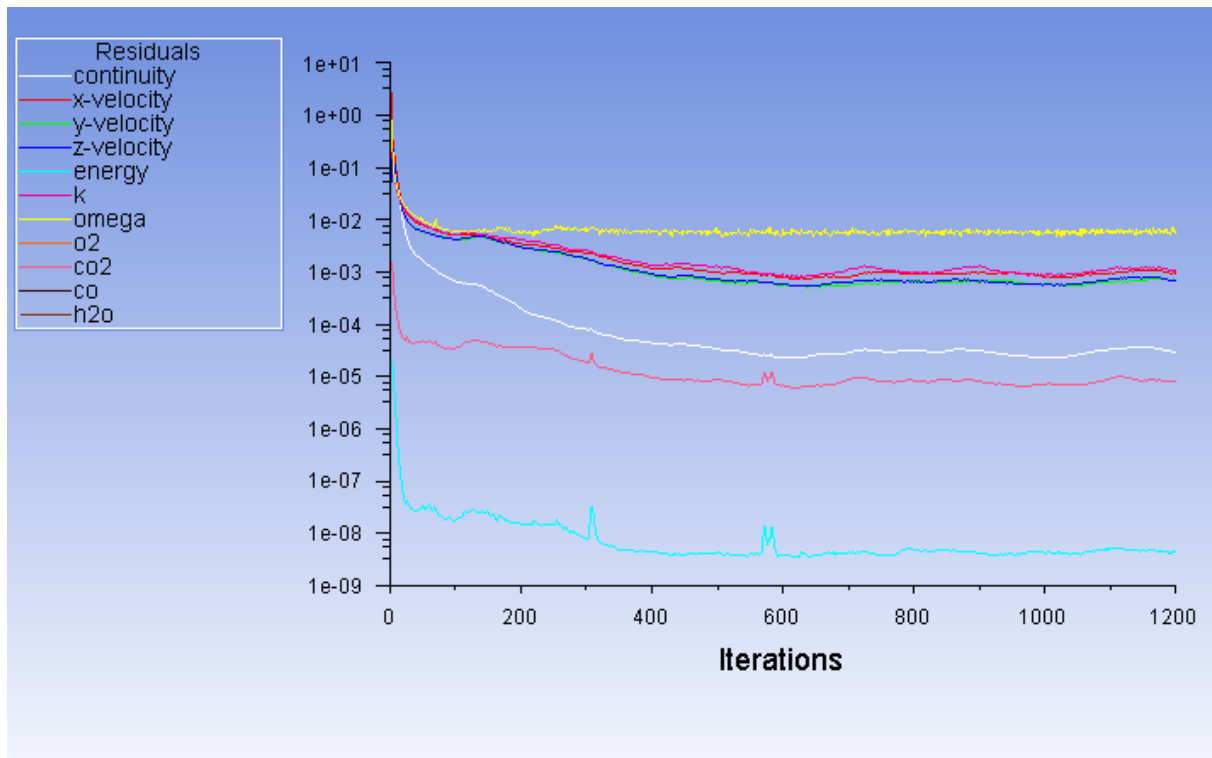


Εικόνα 4.2.1.15: Vectors plot της ταχύτητας στο εμπρόσθιο τμήμα του θαλάμου.



Εικόνα 4.2.1.16: Διάγραμμα κατακράτησης CO₂ επάνω στο καμβά.

4.2.2 Πρόβλημα με $c = 0.5$ στην εμπρόσθια όψη του καμβά.



Εικόνα 4.2.2.1: Διάγραμμα επίλυσης του προβλήματος.

```
Setting Post Processing and Surfaces information ... Done.
Reading "\| gunzip -c \"C:\Users\Manolis\Desktop\dokimh 0.5 front canvas_files\dp0\FFF\Fluent\FFF-13-01200.dat.gz\""...
Done.

iter  continuity  x-velocity  y-velocity  z-velocity  energy  k  omega  o2  co2  co  h2o
1200  2.9256e-05  9.3236e-04  6.8887e-04  6.8438e-04  4.2957e-09  1.0120e-03  6.0286e-03  0.0000e+00  8.0688e-06  0.0000e+00  0.0000e+00

reversed flow in 42 faces on pressure-outlet 10.
1201  2.9232e-05  9.1452e-04  6.7072e-04  6.6693e-04  4.2816e-09  1.0119e-03  5.8037e-03  0.0000e+00  7.9852e-06  0.0000e+00  0.0000e+00

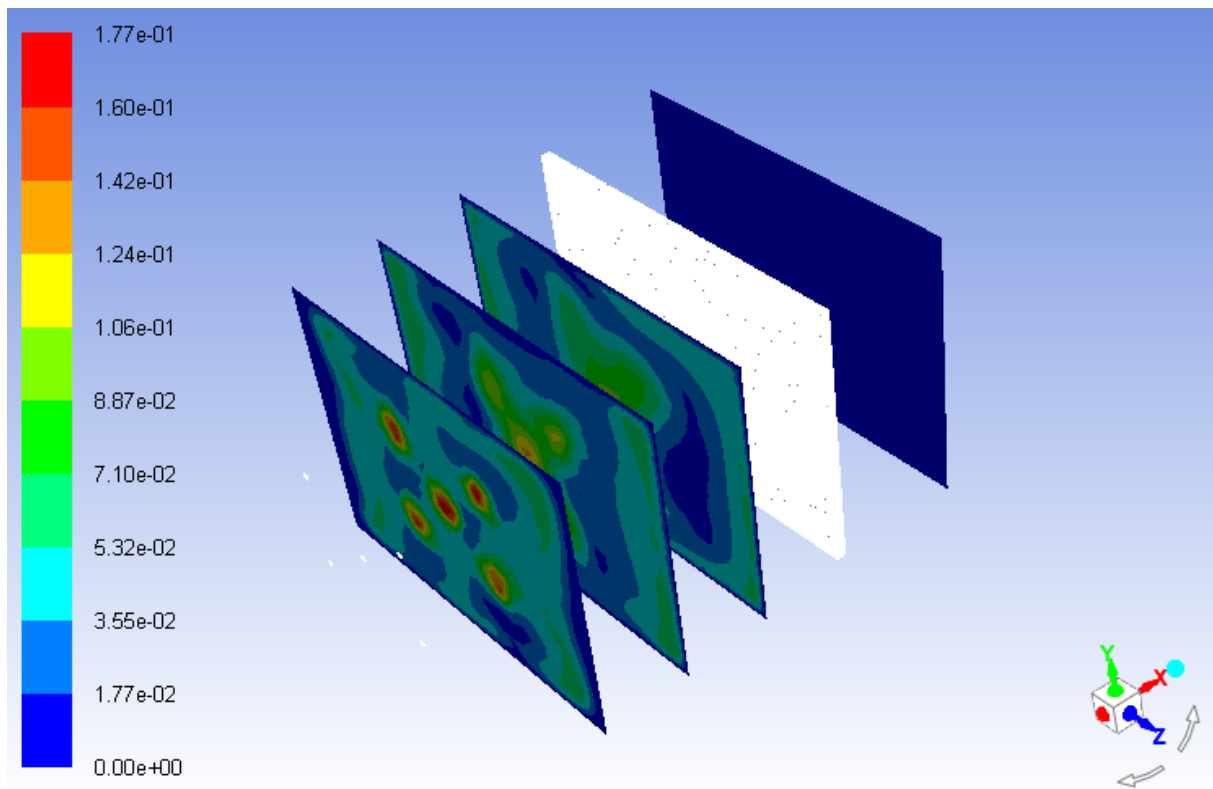
reversed flow in 43 faces on pressure-outlet 10.
1202  2.9111e-05  9.2609e-04  6.7775e-04  6.5686e-04  4.2815e-09  1.0342e-03  6.6856e-03  0.0000e+00  8.0425e-06  0.0000e+00  0.0000e+00

reversed flow in 39 faces on pressure-outlet 10.
1203  2.9025e-05  8.9924e-04  6.6161e-04  6.6865e-04  4.3100e-09  1.0067e-03  5.6350e-03  0.0000e+00  7.9602e-06  0.0000e+00  0.0000e+00
Done.

Calculation complete.
```

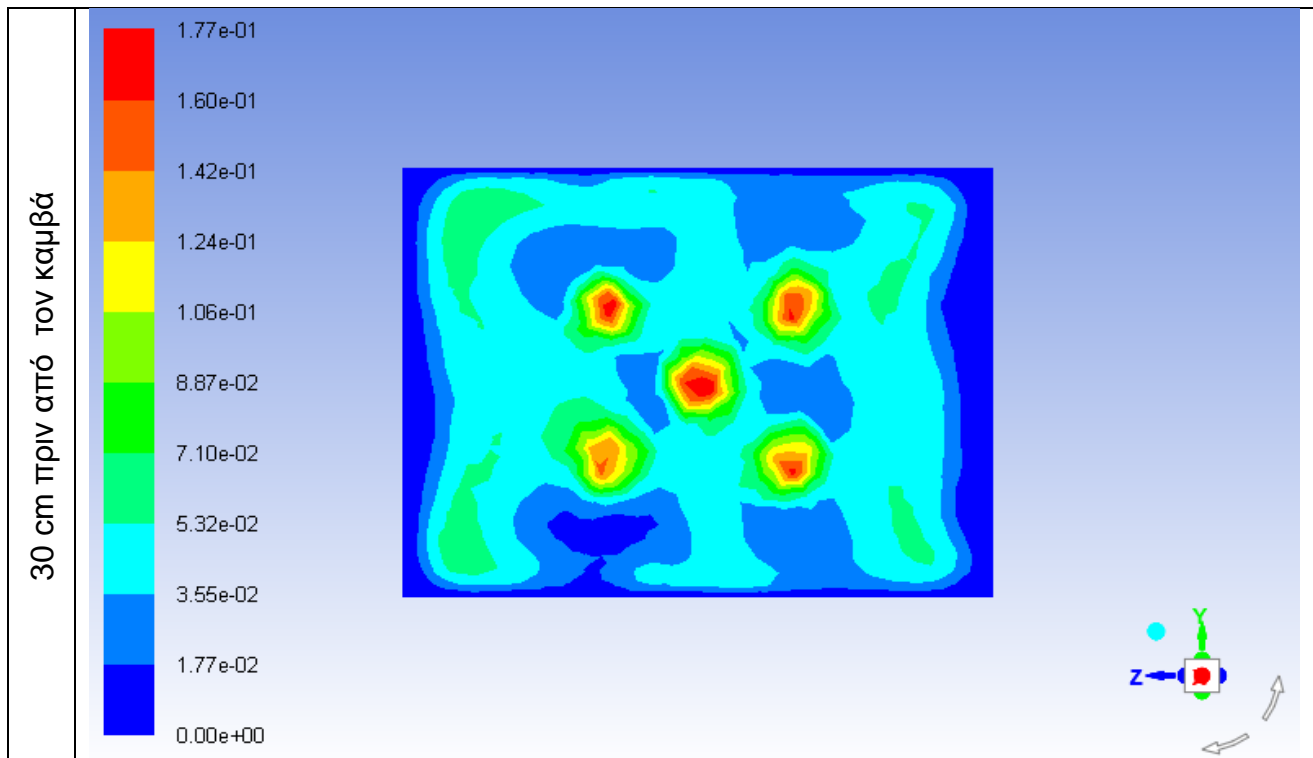
Εικόνα 4.2.2.2: Τιμές των residuals στα 1200 iterations.

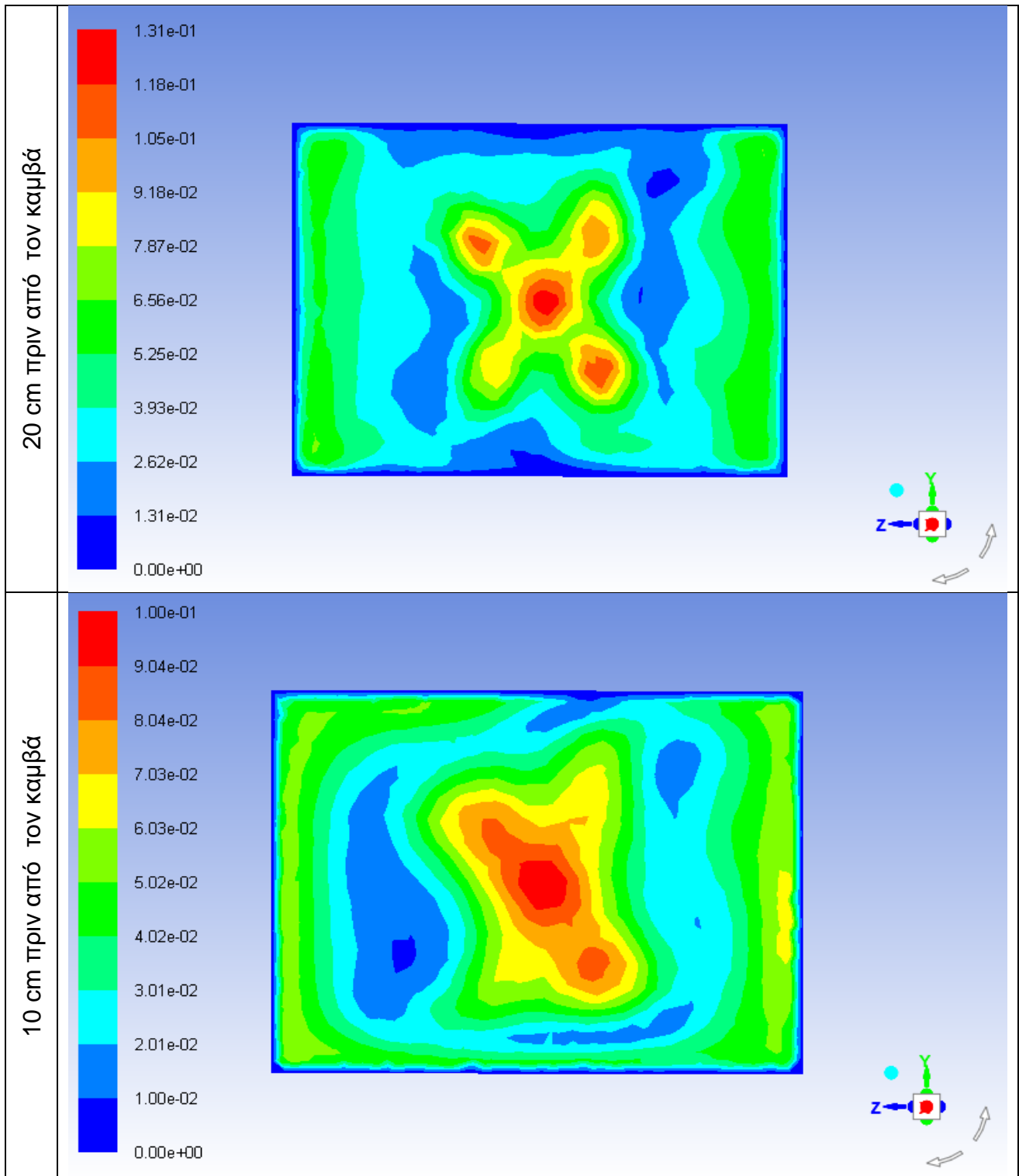
Δημιουργούμε planes (εικόνα 4.2.2.3), τα οποία είναι κάθετα στον άξονα x με σκοπό να παρουσιάσουμε τα contours και τα vectors plots που επιθυμούμε.

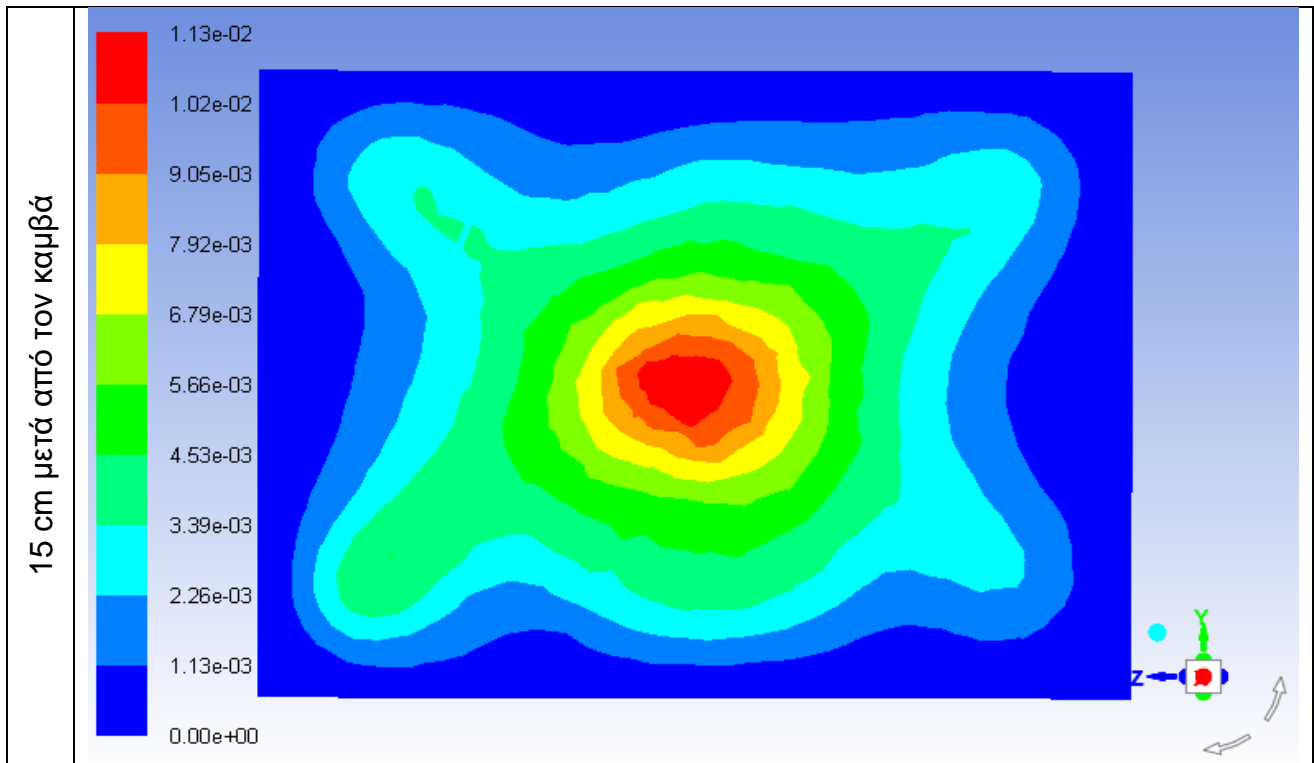


Εικόνα 4.2.2.3: Διάταξη των planes που είναι κάθετα στον άξονα x.

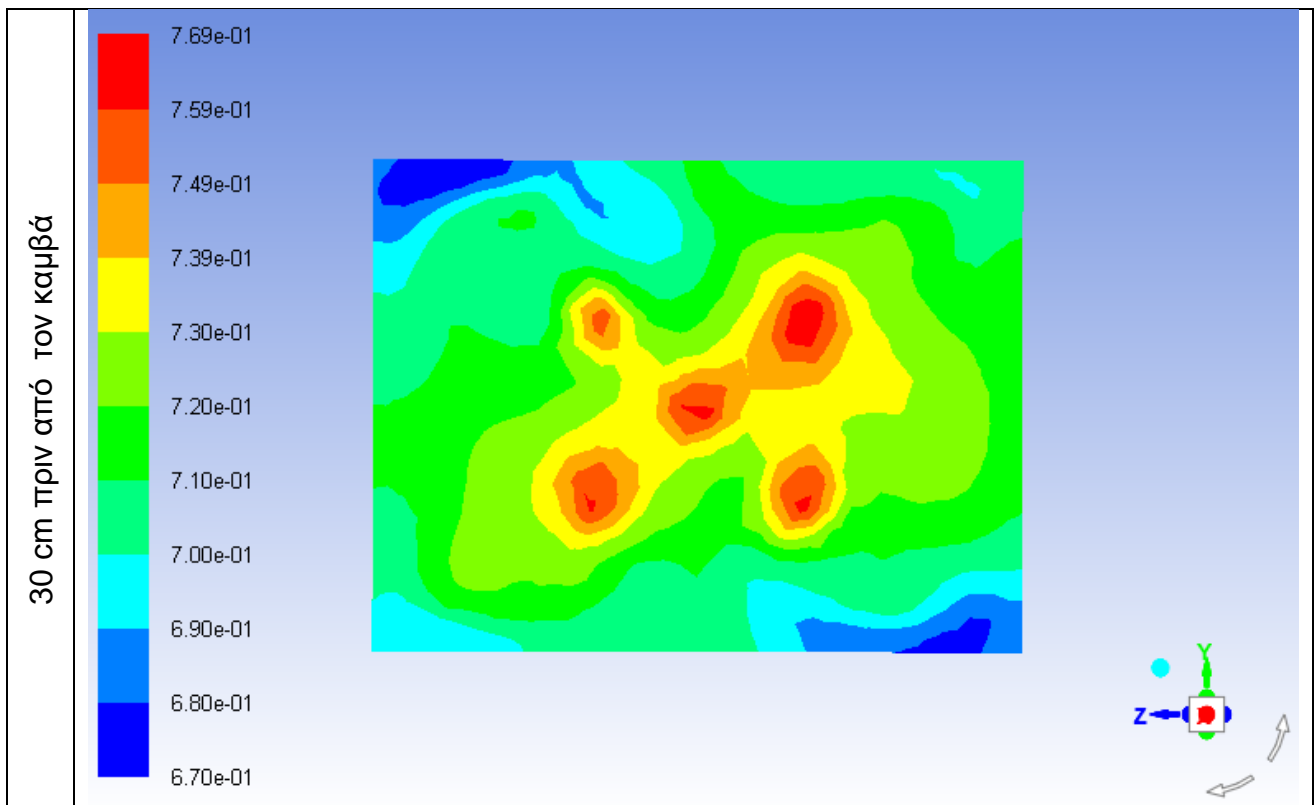
Πίνακας 4.2.2.1: Χαρακτηριστικά contours κατανομής της ταχύτητας σε παράλληλα planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά.

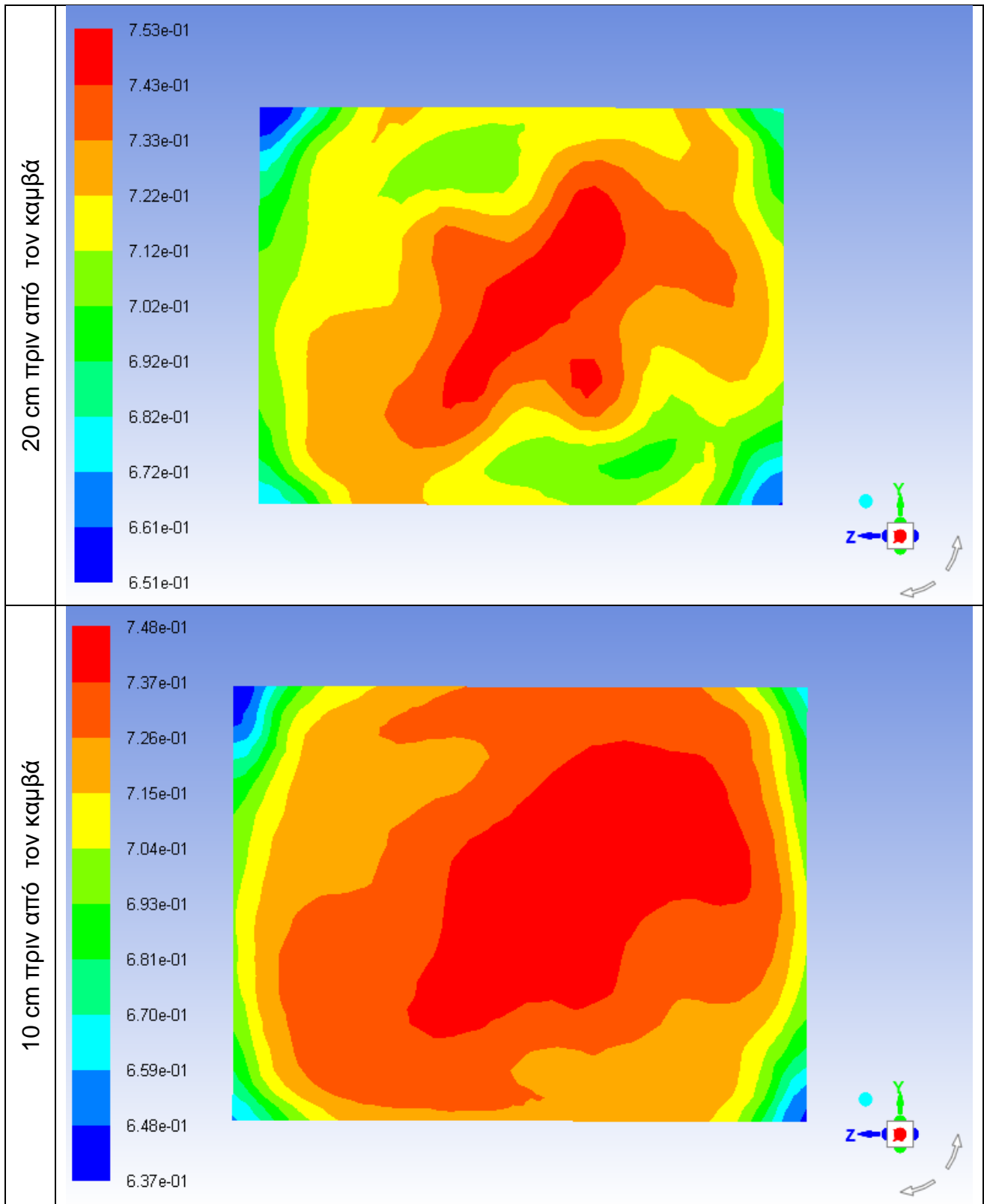


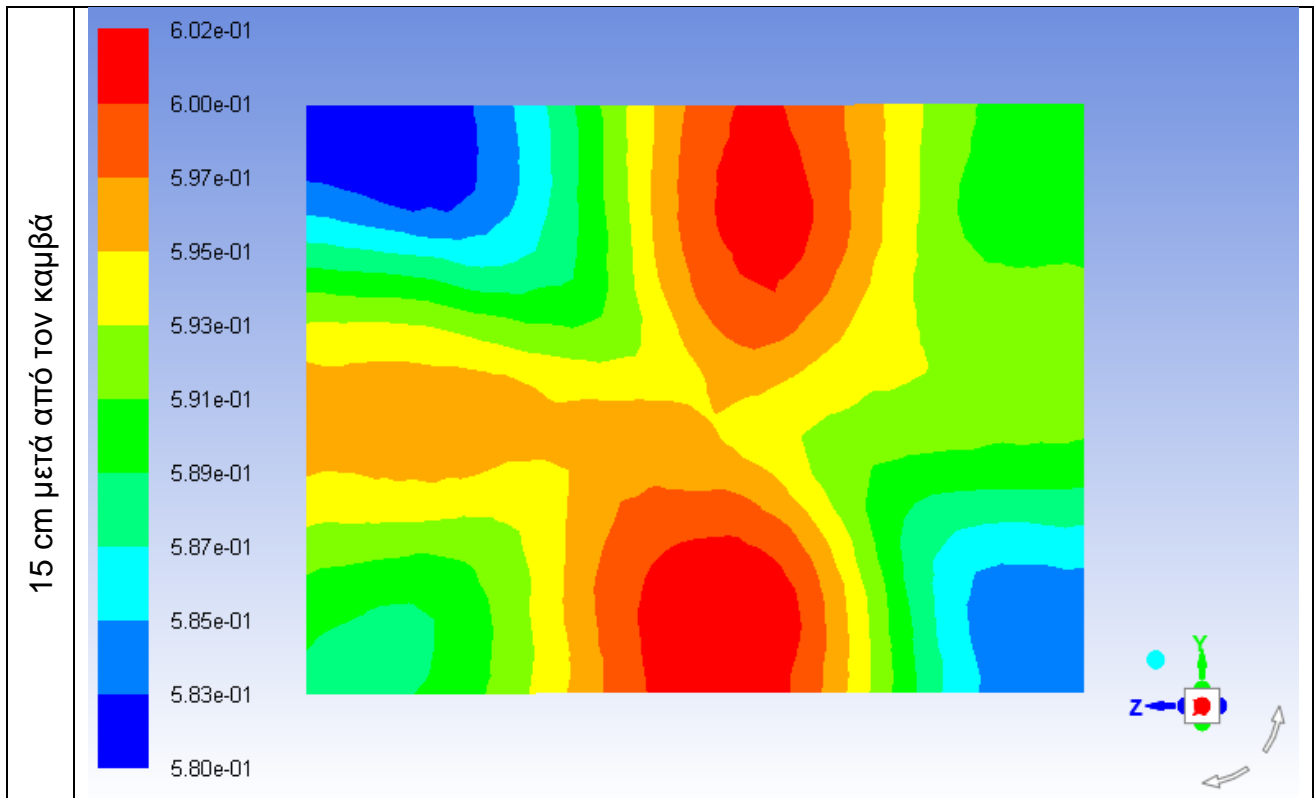




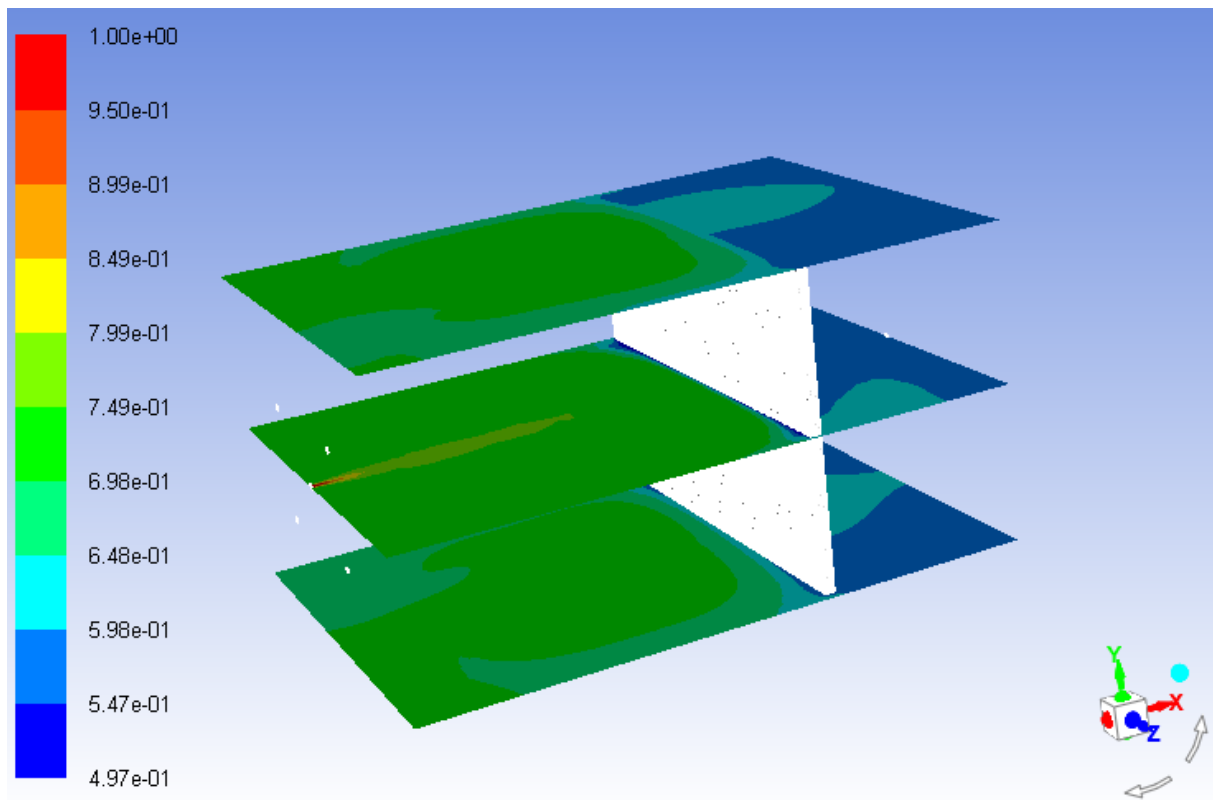
Πίνακας 4.2.2.2: Χαρακτηριστικά contours του mass fraction CO₂ σε παράλληλα planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά.





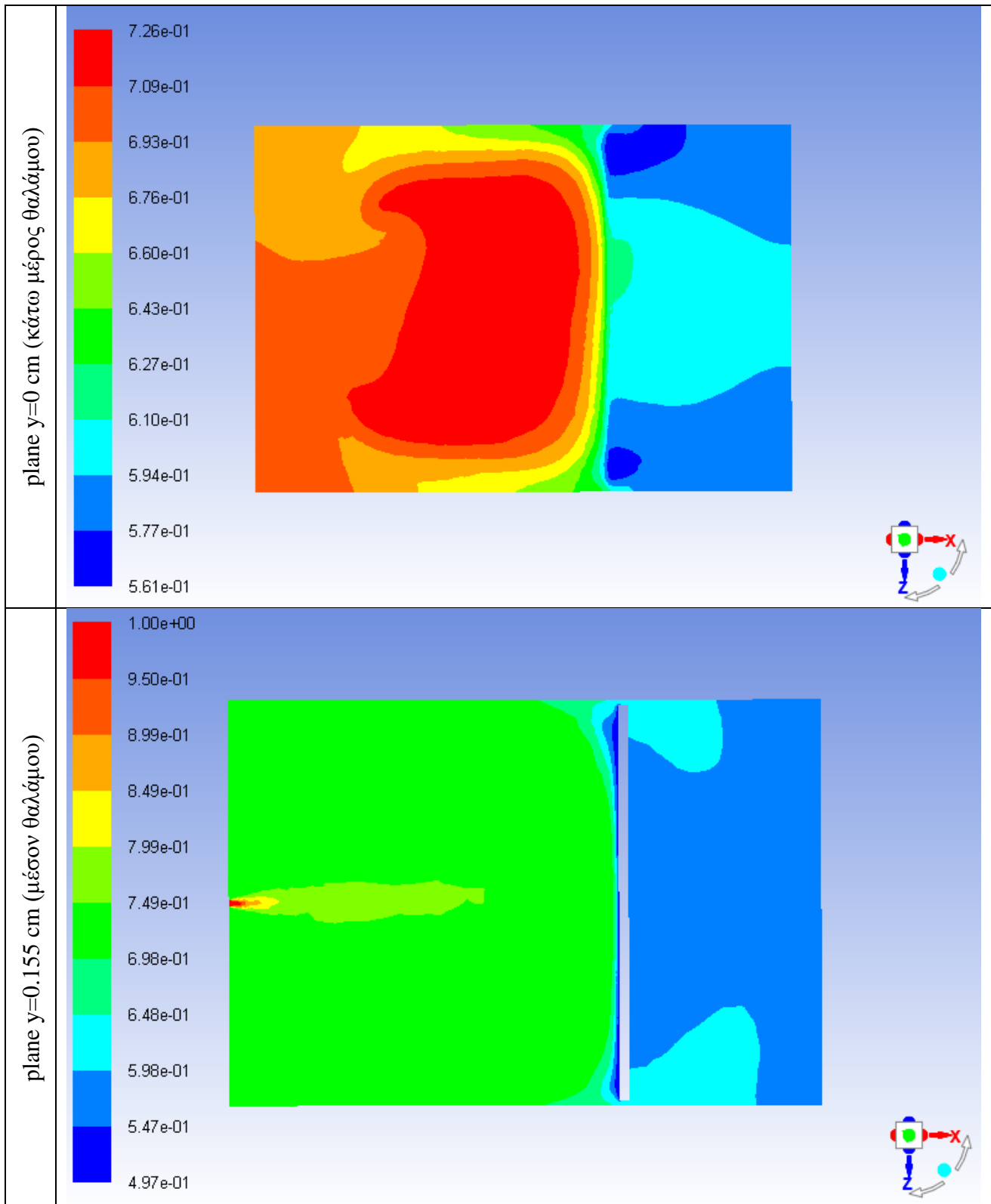


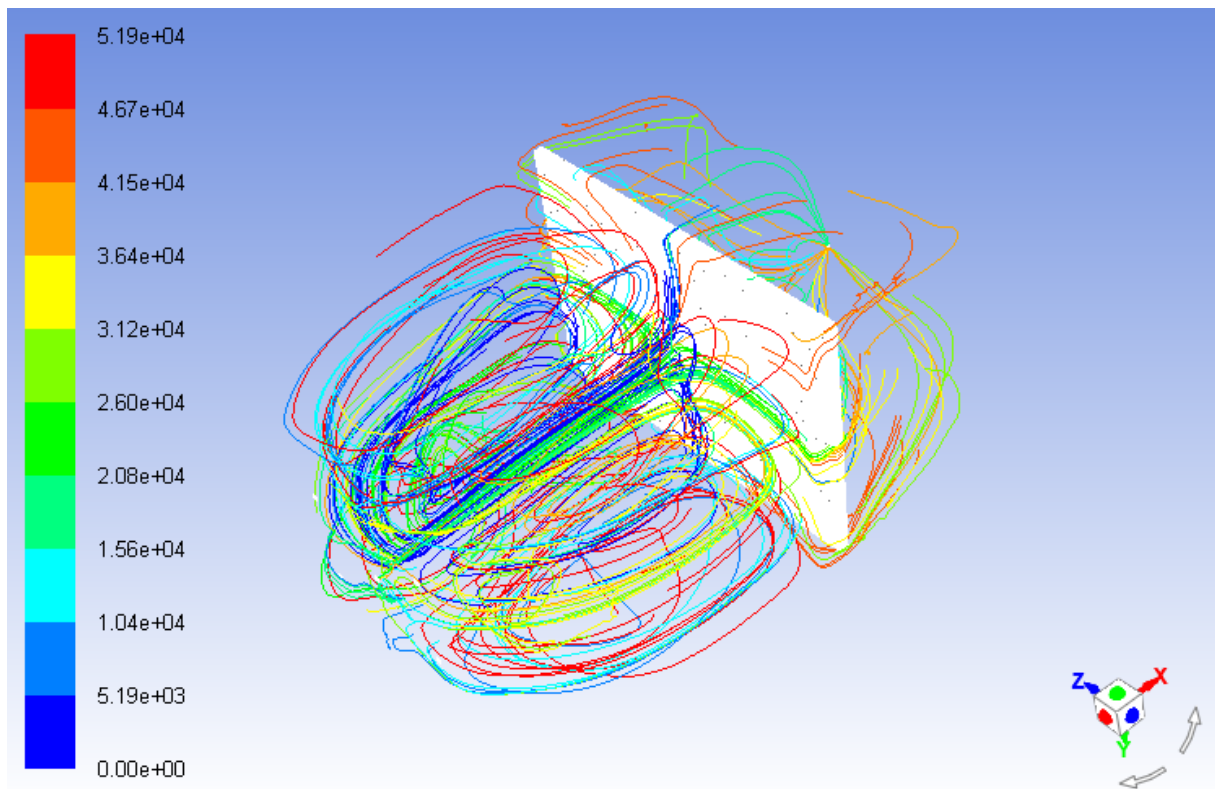
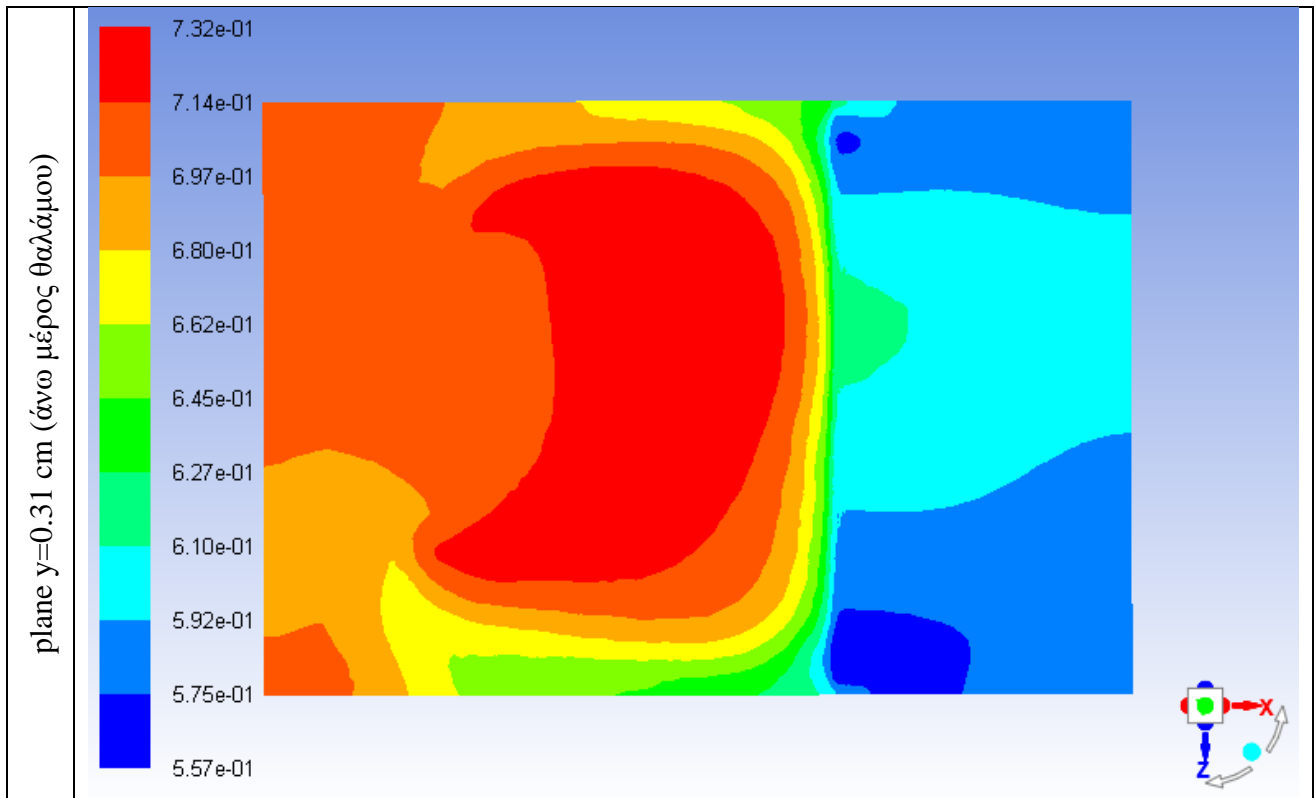
Δημιουργούμε τρία planes στο κέντρο και στα άκρα, τα οποία είναι κάθετα στον άξονα y (εικόνα 4.2.2.4), έτσι ώστε να παρουσιάσουμε contours του mass fraction του CO_2 .



Εικόνα 4.2.2.4: Διάταξη των planes στο θάλαμο προσομοίωσης.

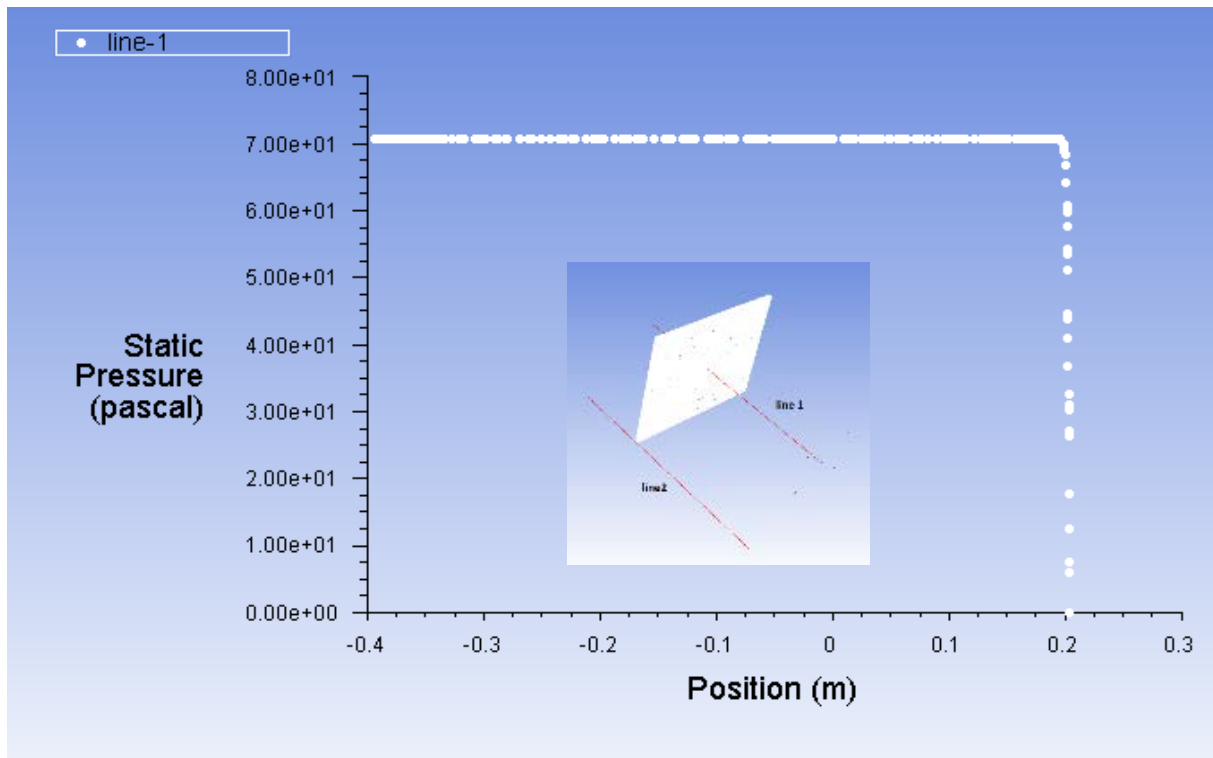
Πίνακας 4.2.2.3: Χαρακτηριστικά contours του mass fraction CO_2 σε planes κάθετα στον άξονα y .



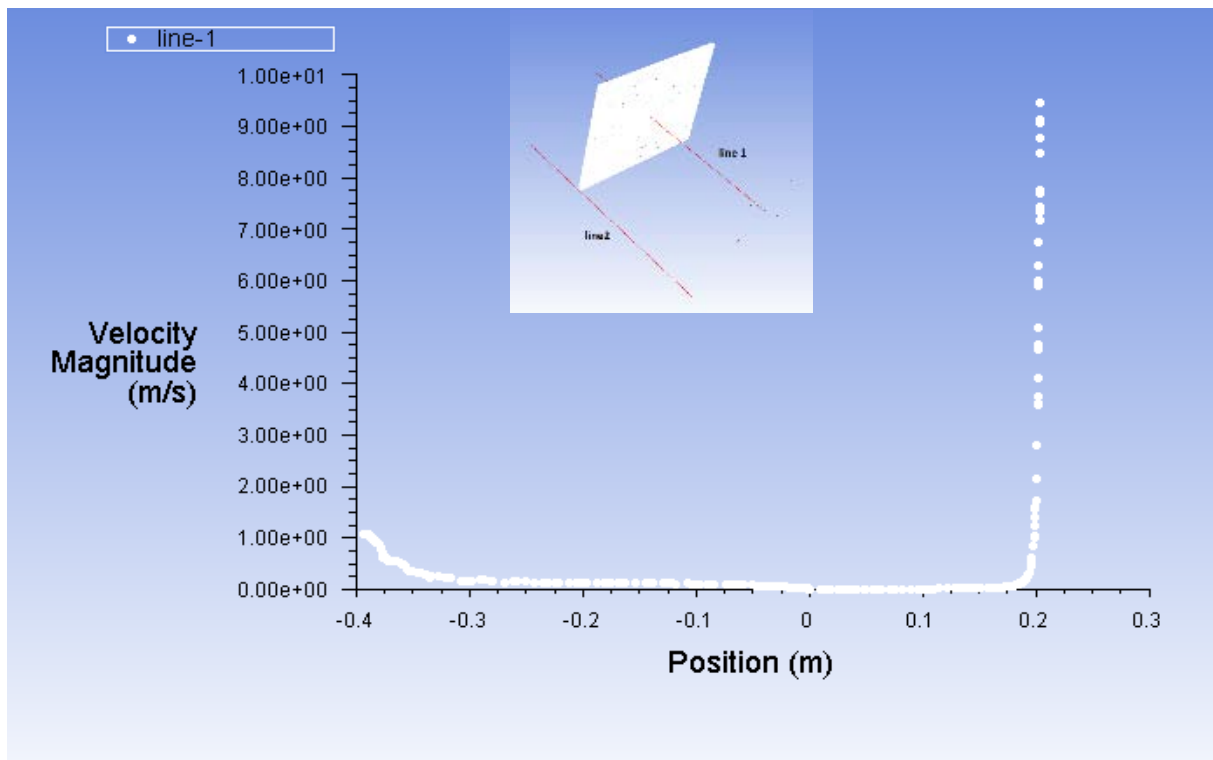


Εικόνα 4.2.2.5: Pathlines

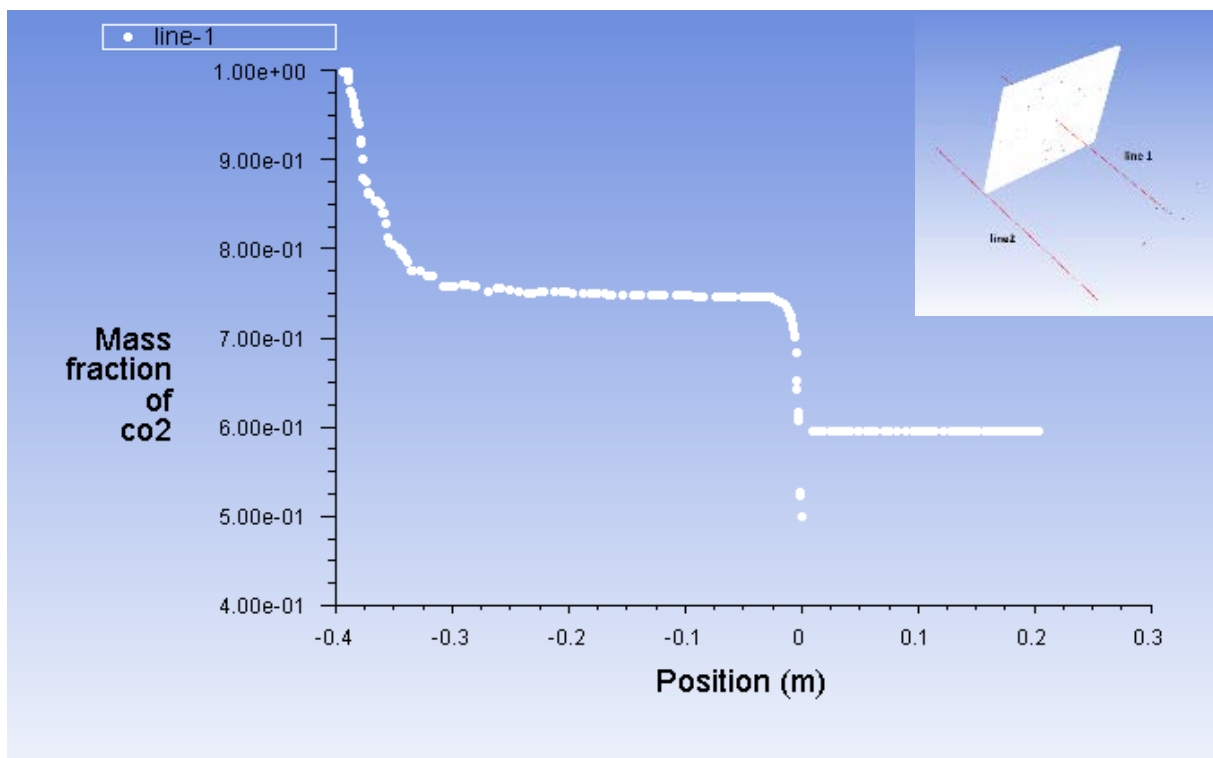
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποια x-y plots, τα οποία έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με την κεντρική γραμμή που ξεκινάει από την κεντρική οπή εισόδου και καταλήγει στην οπή εξόδου.



Εικόνα 4.2.2.6: Διάγραμμα κατανομής πίεσης.



Εικόνα 4.2.2.7: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας.



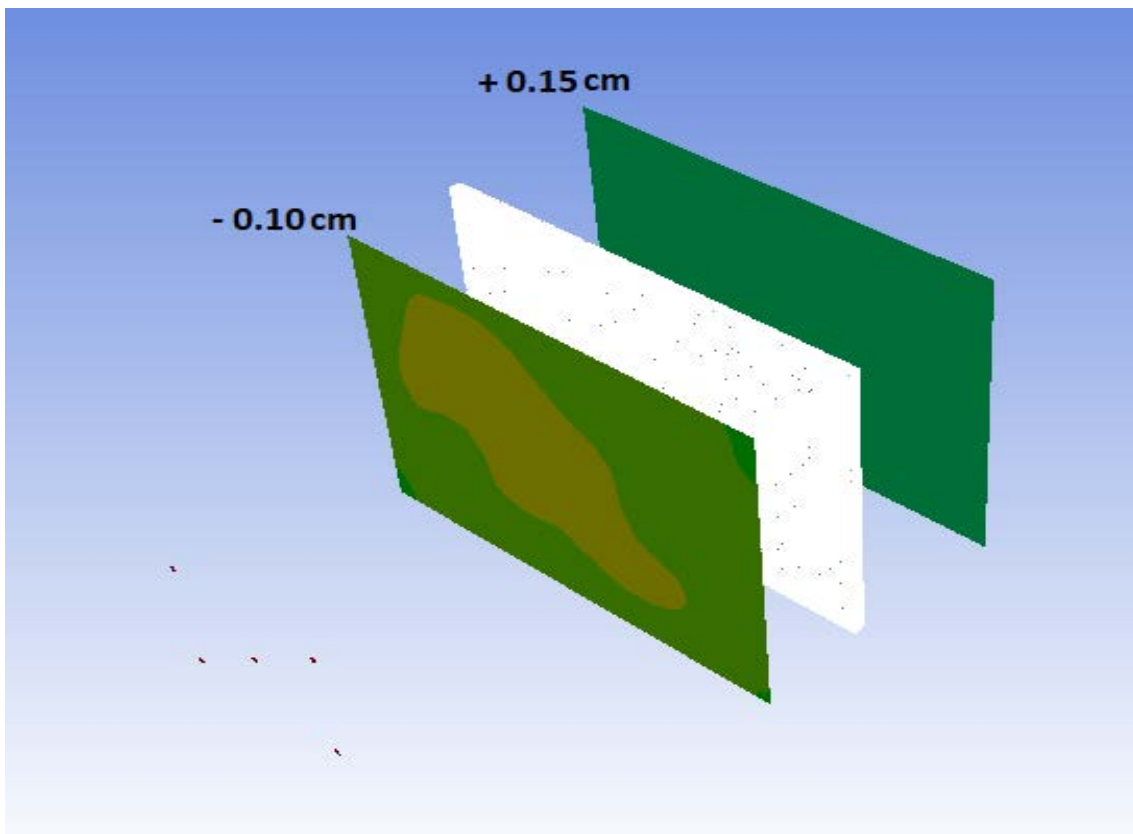
Εικόνα 4.2.2.8: Διάγραμμα κατακράτησης CO₂ επάνω στον καμβά.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το ποσοστό της συγκέντρωσης CO₂ πριν τον καμβά είναι περίπου 0.72, γιατί τη λαμβάνουμε υπόψιν από τη στιγμή που σταθεροποιείται η ροή και της συγκέντρωσης μετά από αυτόν είναι περίπου 0.58. Έτσι έχουμε :

$$c_{απορ.} = \frac{0.72 - 0.58}{0.72} = 0.195$$

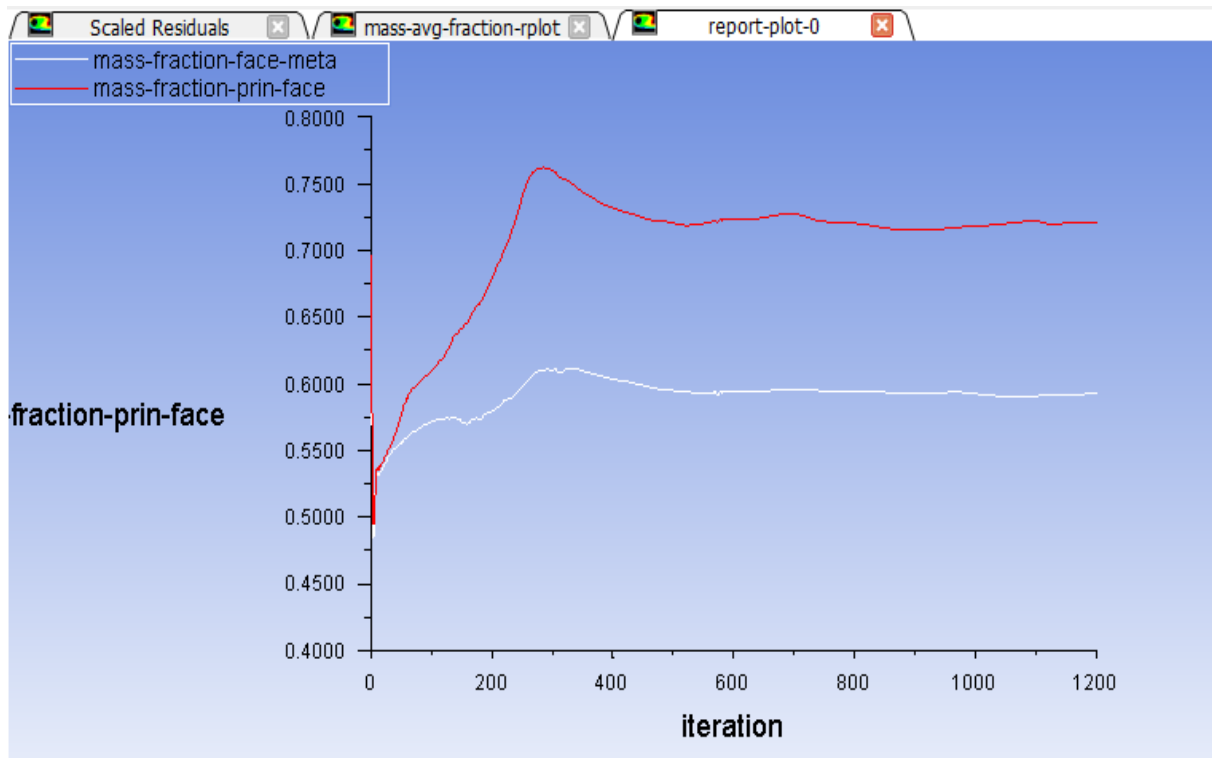
Οπότε προκύπτει ότι το ποσοστό του CO₂ που επικάθεται επάνω στον καμβά είναι περίπου 19.5 %. Αυτό προκύπτει από την διαφορά της συγκέντρωσης πριν και μετά τον καμβά που βρίσκεται στη θέση 0m.

Όμως, τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι αντιπροσωπευτικά αφού οι τιμές αφορούν μόνο την γραμμή που σχεδιάσαμε. Έτσι για να είμαστε περισσότερο ακριβείς δημιουργούμε δύο planes (εικόνα 4.2.2.9), ένα 10 cm πριν τον καμβά και ένα 15 cm μετά , έτσι ώστε να μπορέσουμε να πάρουμε τις μέσες τιμές του mass fraction CO₂ πριν και μετά το πένακι και να υπολογίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια το ποσοστό απορρόφησης του ρύπου από τον καμβά.



Εικόνα 4.2.2.9: Διάταξη των planes σε σχέση με τον καμβά.

Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 4.2.2.10), φαίνονται οι δύο καμπύλες των μέσων τιμών CO₂ mass fraction. Η άσπρη αφορά το plane μετά τον καμβά και η κόκκινη το plane πριν από αυτόν.



Εικόνα 4.2.2.10: CO₂ mass fraction plot.

Με το τέλος του υπολογισμού στα 1200 iterations , στο κομμάτι της κονσόλας του προγράμματος, παίρνουμε τις ακριβείς τιμές των συγκεντρώσεων πριν και μετά τον καμβά (εικόνα 4.2.2.11)

```

co2      co      h2o  mass-avg-f  mass-fract  mass-fract  time/iter
1e-06  0.0000e+00  0.0000e+00  6.7716e-01  5.9234e-01  7.2091e-01  0:00:00  0

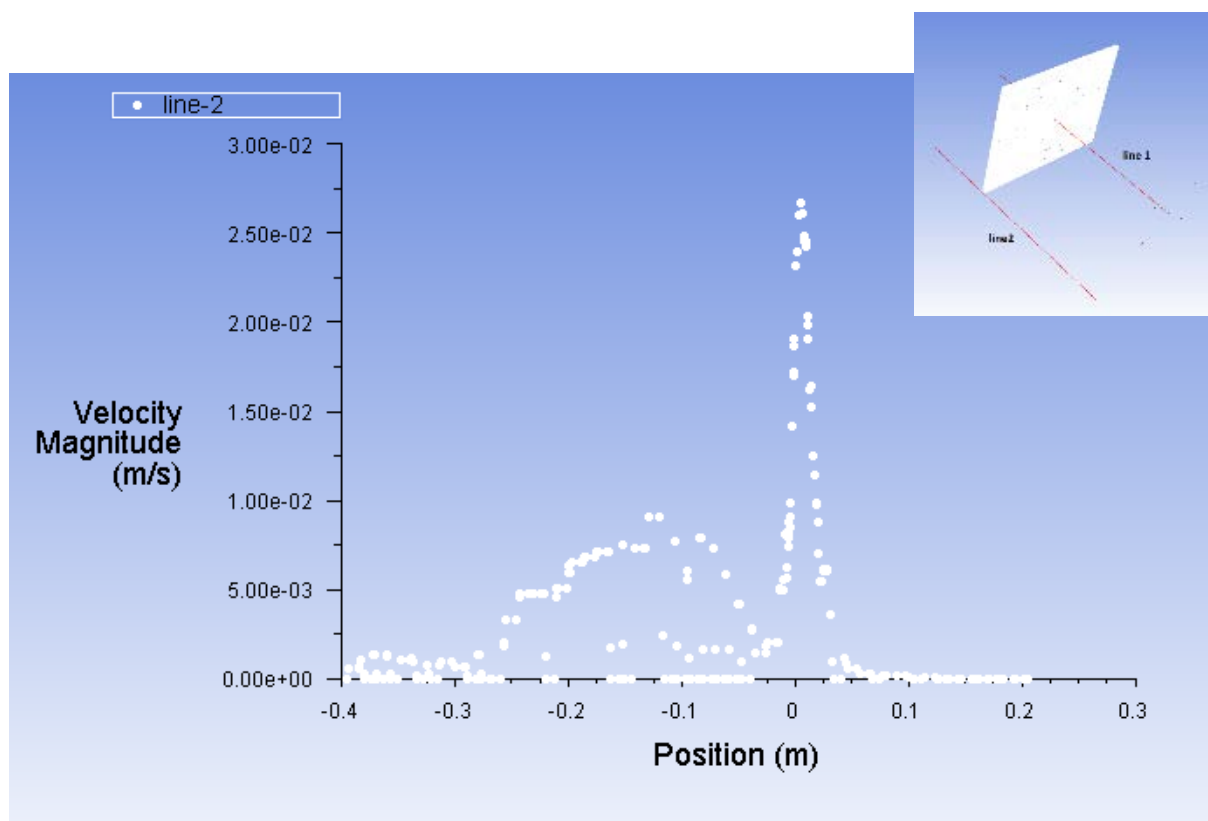
```

Εικόνα 4.2.2.11: Results, 1200 iterations.

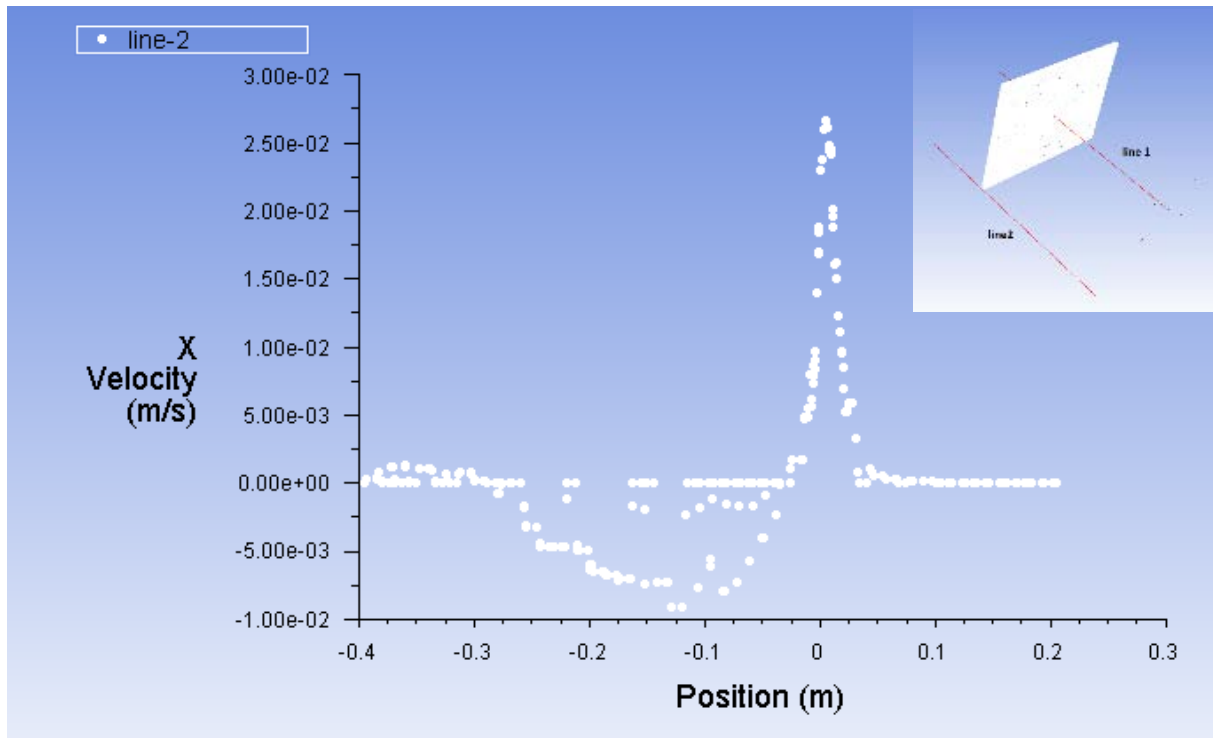
Έτσι, προχωρούμε στον ακριβή υπολογισμό του ποσοστού απορρόφησης του ρύπου από τον καμβά, το οποίο είναι 17.83 % και προκύπτει από τον παρακάτω τύπο.

$$C_{απορ.} = \frac{0.72091 - 0.59234}{0.72091} = 0.1783$$

Τέλος, παρουσιάζονται κάποια x-y plots, τα οποία έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με μια ευθεία γραμμή που ξεκινάει από μία εμπρόσθια γωνία του θαλάμου και καταλήγει στην απέναντι, περνώντας μέσα από το κενό περιμετρικά του καμβά χωρίς να ακουμπάει στο τοίχωμα.

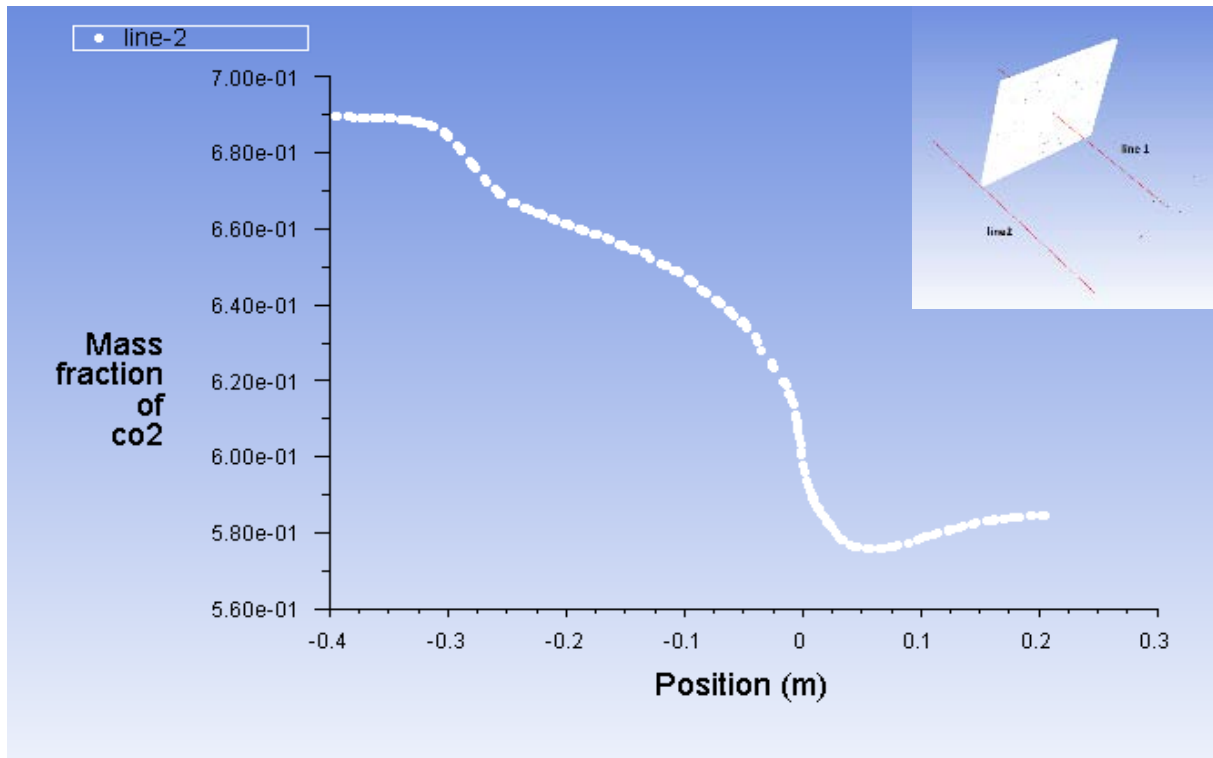


Εικόνα 4.2.2.12: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας.



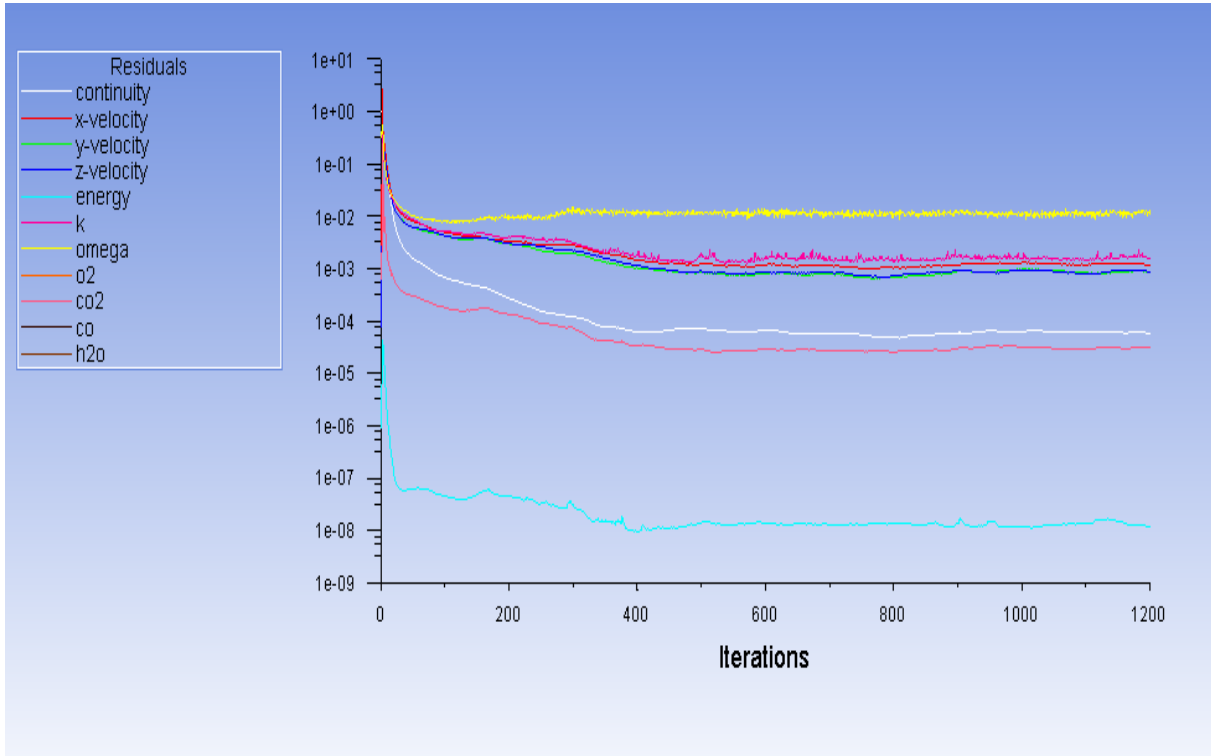
Εικόνα 4.2.2.13: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας στον άξονα x.

Και στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε το αρνητικό πρόσημο της ταχύτητας λίγο πριν τον καμβά λόγω της ανακυκλοφορίας (τύρβης) που σχηματίζεται.



Εικόνα 4.2.2.14: Διάγραμμα κατακράτησης CO₂ επάνω στον καμβά.

4.2.3 Πρόβλημα με $c = 0.5$ στην εμπρόσθια όψη του καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s



Εικόνα 4.2.3.1: Διάγραμμα επίλυσης του προβλήματος.

```

reversed flow in 43 faces on pressure-outlet 10.
1194 5.9350e-05 1.1940e-03 8.8164e-04 8.9288e-04 1.2234e-08 1.6777e-03 1.2530e-02 0.0000e+00 3.0675e-05 0.0000e+00 0.0000e+00 0:02:37

reversed flow in 43 faces on pressure-outlet 10.
1195 5.9221e-05 1.1831e-03 8.7967e-04 8.9286e-04 1.2180e-08 1.5787e-03 1.1984e-02 0.0000e+00 3.0604e-05 0.0000e+00 0.0000e+00 0:02:10

reversed flow in 44 faces on pressure-outlet 10.
1196 5.9095e-05 1.1803e-03 8.8567e-04 8.8609e-04 1.2158e-08 1.5815e-03 1.0379e-02 0.0000e+00 3.0614e-05 0.0000e+00 0.0000e+00 0:01:44

reversed flow in 44 faces on pressure-outlet 10.
1197 5.9050e-05 1.1887e-03 8.9395e-04 8.9082e-04 1.2247e-08 1.5600e-03 1.2243e-02 0.0000e+00 3.0673e-05 0.0000e+00 0.0000e+00 0:01:18

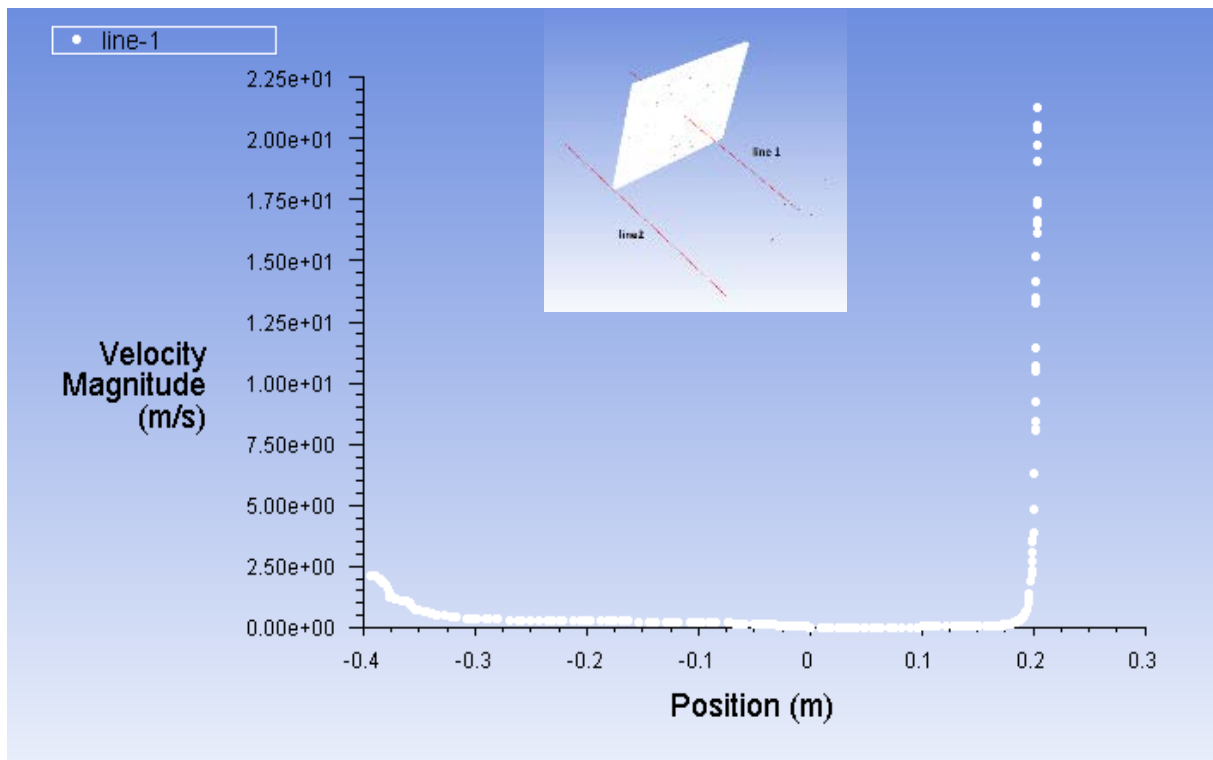
reversed flow in 44 faces on pressure-outlet 10.
1198 5.8834e-05 1.1693e-03 8.8266e-04 8.8205e-04 1.2279e-08 1.5719e-03 1.2071e-02 0.0000e+00 3.0705e-05 0.0000e+00 0.0000e+00 0:00:52

reversed flow in 44 faces on pressure-outlet 10.
1199 5.8507e-05 1.1578e-03 8.8034e-04 8.8708e-04 1.2206e-08 1.5173e-03 1.1053e-02 0.0000e+00 3.0635e-05 0.0000e+00 0.0000e+00 0:00:25

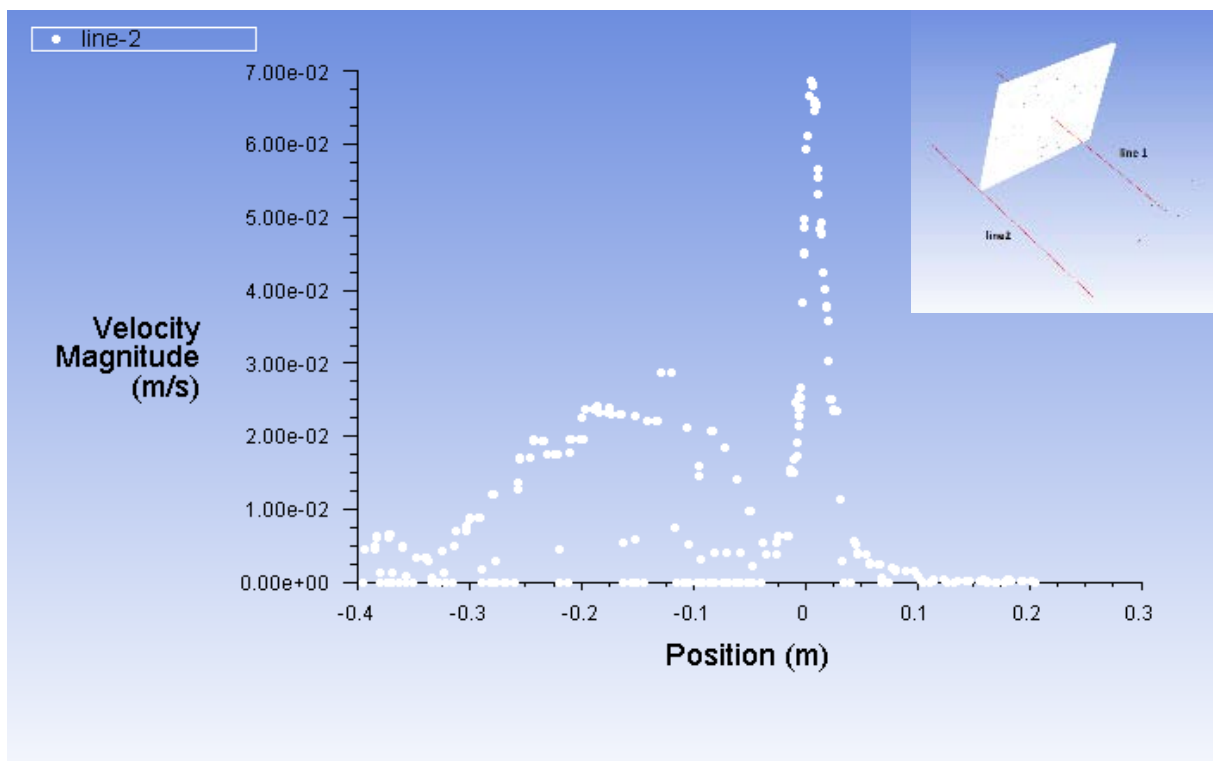
reversed flow in 45 faces on pressure-outlet 10.
iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k omega o2 co2 co h2o time/i
1200 5.8296e-05 1.1622e-03 8.8712e-04 8.8608e-04 1.2076e-08 1.5682e-03 1.2377e-02 0.0000e+00 3.0754e-05 0.0000e+00 0.0000e+00 0:00:00
Writing data to C:\Users\Manolis\Desktop\mass flow diph paroxh , c=0.5_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.ip ...
x-coord
y-coord
z-coord
pressure
x-velocity
y-velocity
z-velocity

```

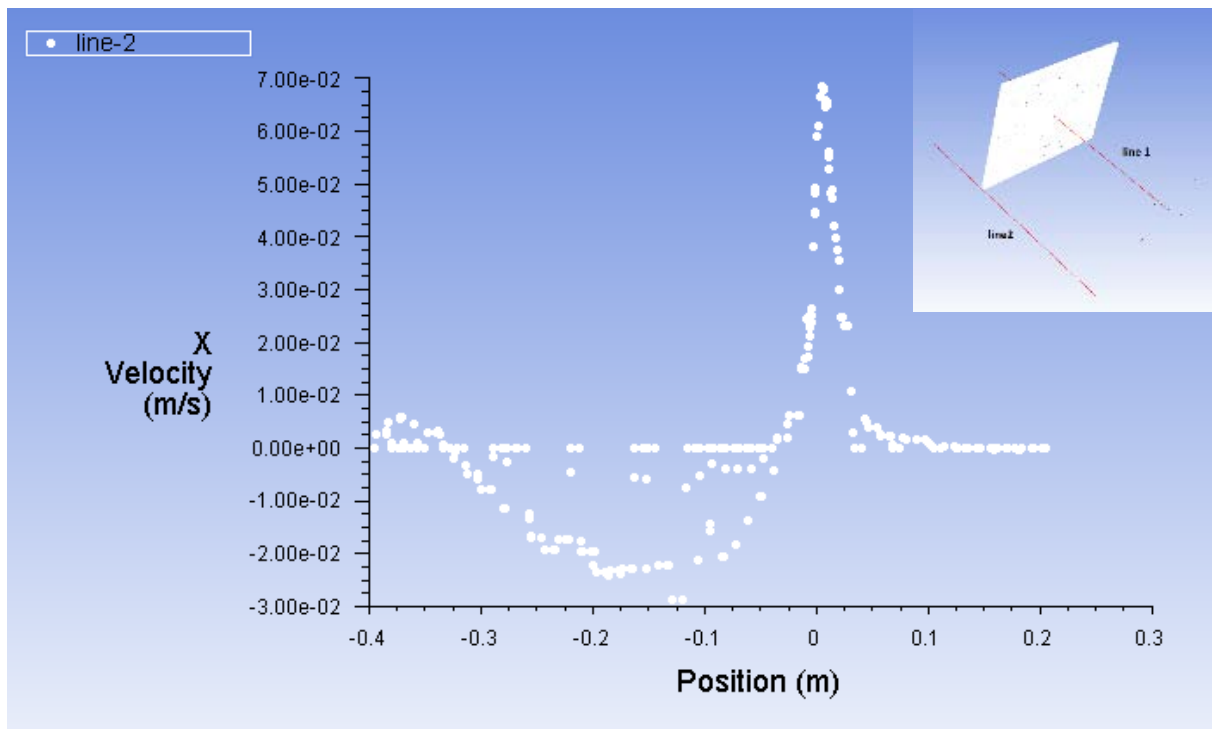
Εικόνα 4.2.3.2: Τιμές των residuals στα 1200 iterations.



Εικόνα 4.2.3.3: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας.



Εικόνα 4.2.3.4: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας.



Εικόνα 4.2.3.5: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας στον άξονα x.

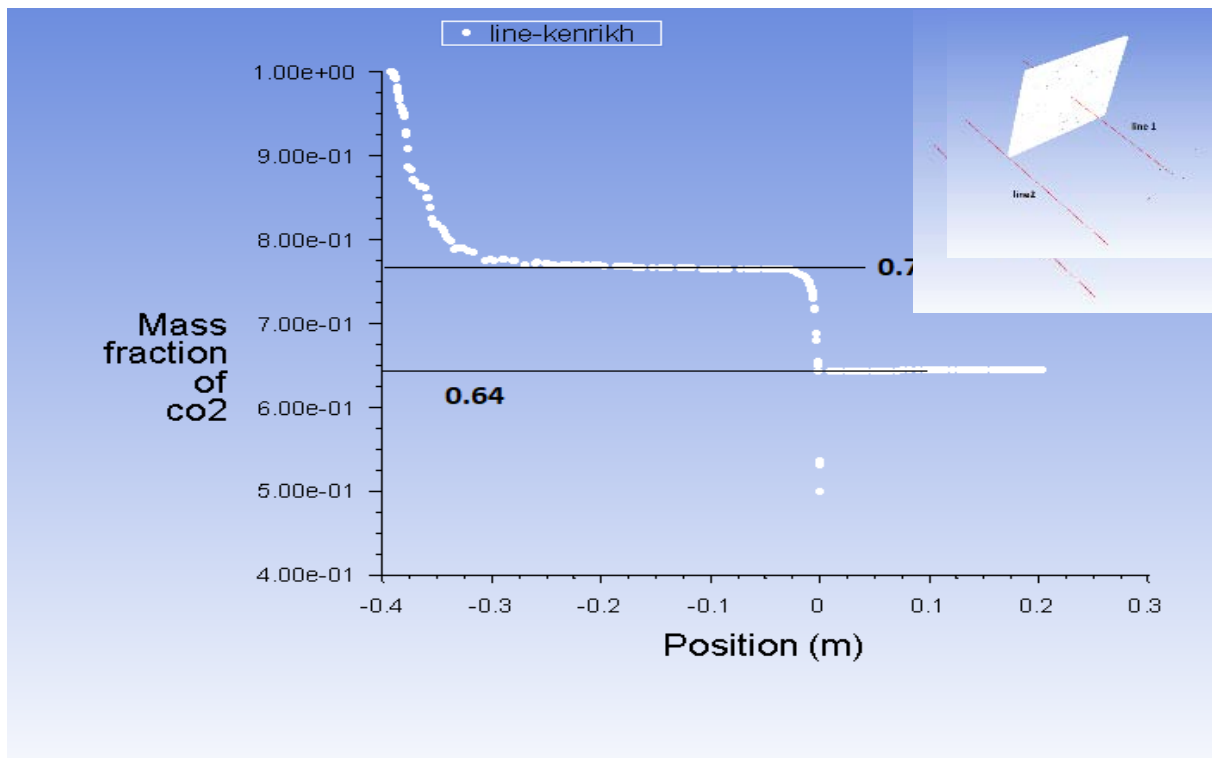
Και στα παραπάνω διαγράμματα οι μέγιστες ταχύτητες εμφανίζονται στην είσοδο, στην έξοδο και στο διάκενο του καμβά με το τοίχωμα, όπως αναμενόταν λόγω συνέχειας και έχουν αντίστοιχα τιμές τάξης 2, 1.8, 10 m/sec. Οι αντίστοιχοι αριθμοί Reynolds με χαρακτηριστικά μεγέθη τις διαμέτρους στις οπές (d) και το διάκενο παραπλεύρως του πίνακα (h) κυμαίνονται από $7.5 \cdot 10^2$ έως $9 \cdot 10^2$.

- Είσοδος :

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} = \frac{1.2 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 2.104 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 0.00635 [m]}{1.7894 \cdot 10^{-5} [Pa \cdot s]} \approx 9 \cdot 10^2$$

- Διάκενο παραπλεύρως του πίνακα

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} = \frac{1.2 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 1.8 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 0.005 [m]}{1.7894 \cdot 10^{-5} [Pa \cdot s]} \approx 7.5 \cdot 10^2$$



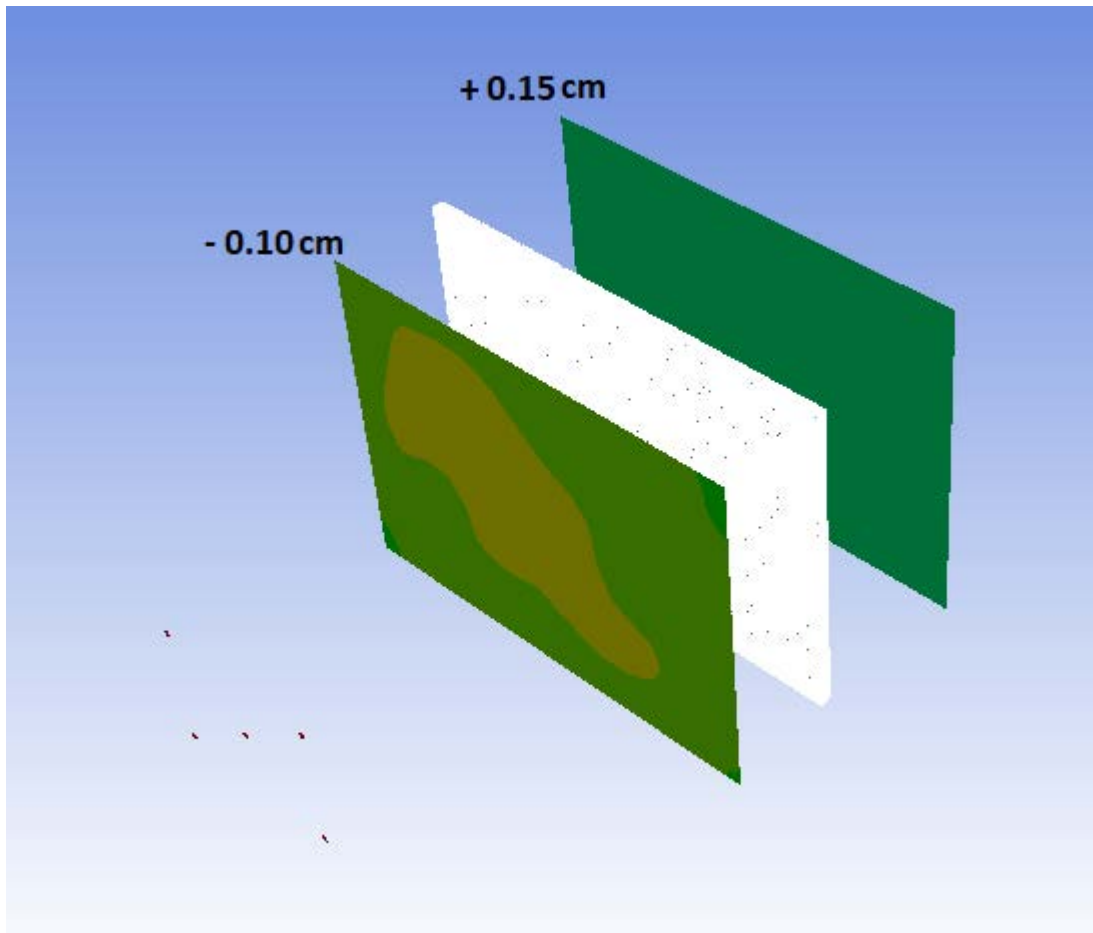
Εικόνα 4.2.3.6: Διάγραμμα κατακράτησης CO₂ επάνω στο καμβά.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το ποσοστό της συγκέντρωσης CO₂ πριν τον καμβά είναι περίπου 0.76, γιατί τη λαμβάνουμε υπόψιν από τη στιγμή που σταθεροποιείται η ροή και της συγκέντρωσης μετά από αυτόν είναι περίπου 0.64. Έτσι έχουμε :

$$c_{\text{απορ.}} = \frac{0.76 - 0.64}{0.76} = 0.1579$$

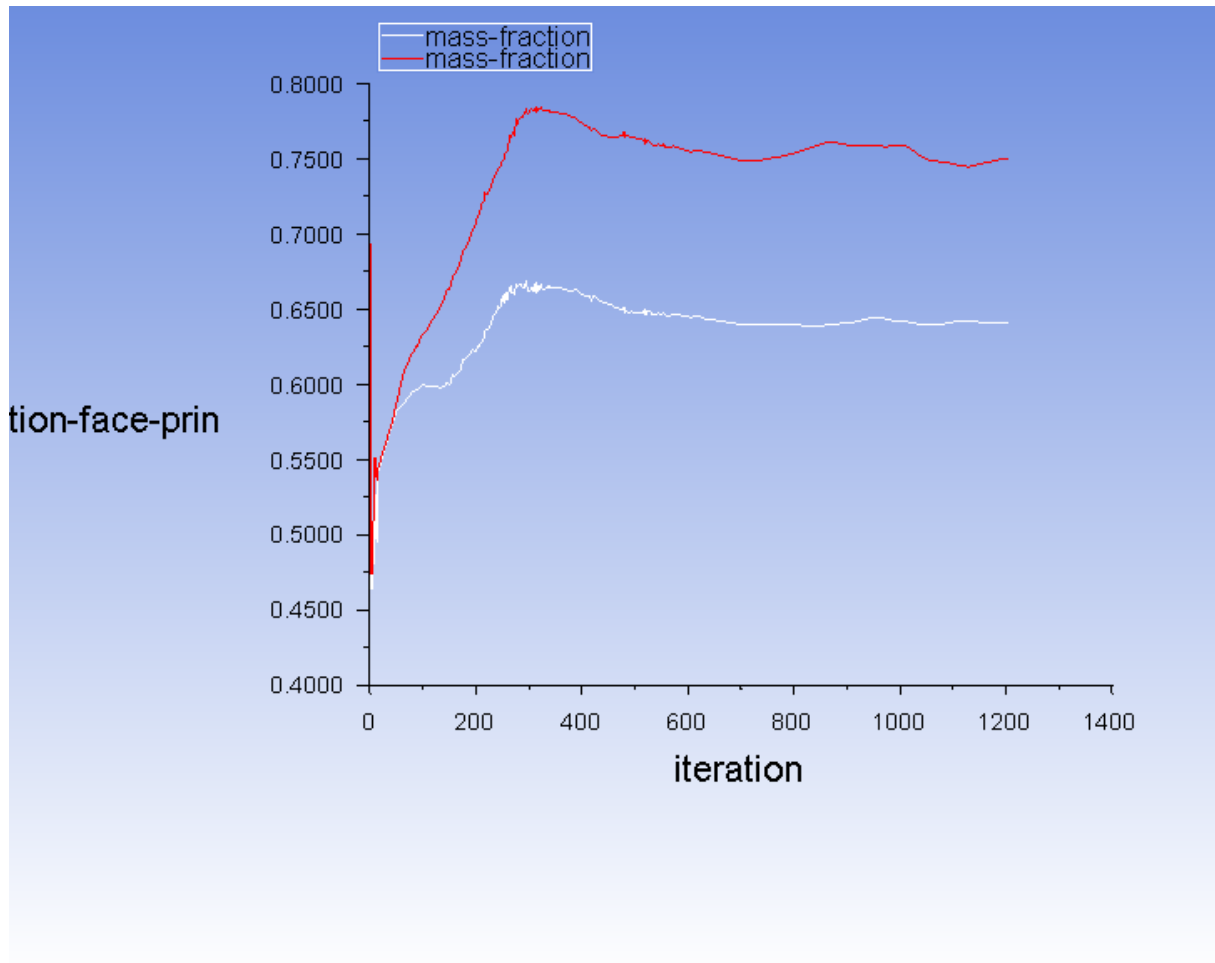
Οπότε προκύπτει ότι το ποσοστό του CO₂ που επικάθεται επάνω στον καμβά είναι περίπου 15.79 %. Αυτό προκύπτει από την διαφορά της συγκέντρωσης πριν και μετά τον καμβά που βρίσκεται στη θέση 0m. Παρατηρούμε πως για τη διπλάσια ταχύτητα εισόδου που έχουμε ορίσει στην είσοδο, το ποσοστό απορρόφησης του CO₂ είναι μειωμένο.

Τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι αντιπροσωπευτικά αφού οι τιμές αφορούν μόνο την γραμμή που σχεδιάσαμε. Έτσι για να είμαστε περισσότερο ακριβείς δημιουργούμε δύο planes (εικόνα 4.2.3.7), ένα 10 cm πριν τον καμβά και ένα 15 cm μετά , έτσι ώστε να μπορέσουμε να πάρουμε τις μέσες τιμές του mass fraction CO₂ πριν και μετά το πένακι και να υπολογίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια το ποσοστό απορρόφησης του ρύπου από τον καμβά.



Εικόνα 4.3.2.7: Διάταξη των planes σε σχέση με τον καμβά.

Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 4.3.2.8), φαίνονται οι δύο καμπύλες των μέσων τιμών CO₂ mass fraction. Η άσπρη αφορά το plane μετά τον καμβά και η κόκκινη το plane πριν από αυτόν.



Εικόνα 4.3.2.8: CO₂ mass fraction plot. (α) Πριν τον καμβά (κόκκινη γραμμή)
(β) Μετά τον καμβά (λευκή γραμμή).

```

omega      o2      co2      co      h2o  mass-fract  mass-fract  mass-fract  time/ite
1.1365e-02 0.0000e+00 1.0270e-05 0.0000e+00 0.0000e+00 7.1235e-01 6.4122e-01 7.5012e-01 0:00:58

3.9804e-03 0.0000e+00 1.0220e-05 0.0000e+00 0.0000e+00 7.1235e-01 6.4120e-01 7.5014e-01 0:00:00
lea ekdosh_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.ip ...

```

Εικόνα 4.3.2.9: Results, 1200 iterations.

Έτσι, προχωρούμε στον ακριβή υπολογισμό του ποσοστού απορρόφησης του ρύπου από τον καμβά, το οποίο είναι 14.53 % και προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$c_{\text{απορ.}} = \frac{0.75014 - 0.6412}{0.75014} \approx 0.1453$$

Άρα επιβεβαιώνεται πως για διπλάσια ταχύτητα εισόδου το ποσοστό απορρόφησης ρύπου (CO₂) στον πίνακα είναι μειωμένο.

4.3 Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία, κάναμε μια μοντελοποίηση για να μπορέσουμε να κάνουμε μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος που μας απασχολεί. Σκοπός ήταν να κατανοήσουμε την επίδραση της ταχύτητας ενός αερίου στη χρωματική αλλοίωση και στην καταστροφή ενός πίνακα.

Αρχικά, η προσομοίωση έγινε με ατμοσφαιρικό αέρα ταχύτητας εισόδου 1.052 m/s και μπορέσαμε να κατανοήσουμε την συμπεριφορά του αερίου μέσα στο θάλαμο αλλά και την ταχύτητα του διανυσματικά επάνω στον καμβά.

Έπειτα, αντί για ατμοσφαιρικό αέρα, εισάγαμε ένα ρύπο (CO₂) μέσα στο θάλαμο με συγκέντρωση επάνω στον καμβά $c = 0$. Εκεί παρατηρήσαμε ότι το ποσοστό απορρόφησης του ρύπου στον καμβά ήταν 55.53%.

Στη συνέχεια θέσαμε την συγκέντρωση του ίδιου ρύπου ίση με 0.5 και λάβαμε ως αποτέλεσμα ότι το ποσοστό του ρύπου που κατακρατεί ο καμβάς ισούται με 17.83 %.

Τέλος, δοκιμάσαμε να προσομοιάσουμε το ίδιο πρόβλημα αλλά με διπλάσια παροχή μάζας στην είσοδο. Αυτό το πετύχαμε ορίζοντας διπλάσια ταχύτητα ρευστού, στην συνθήκη εισόδου. Στο σημείο αυτό παρατηρήσαμε ότι έχουμε ότι το ποσοστό ρύπου που επικάθεται επάνω στην εμπρόσθια όψη του καμβά είναι 14.53 %. Παρατηρούμε πως για διπλάσια ταχύτητα εισόδου, έχουμε μικρότερο ποσοστό απορρόφησης ρύπου. Γεγονός που με βάση τους πειραματικούς υπολογισμούς ήταν αναμενόμενο γιατί ένα σωματίδιο που πάει προς την επιφάνεια του καμβά με μεγαλύτερη ταχύτητα, έχει μικρότερο χρόνο παραμονής κοντά στην επιφάνεια άρα και μικρότερη πιθανότητα εγκλωβισμού (ρόφησης) σε αυτήν. Συνεπώς οι πιθανότητες απορρόφησης ρύπου με μεγαλύτερη ταχύτητα είναι λιγότερες.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία έχει διερευνηθεί μία από τις αιτίες που ευθύνονται για την αλλοίωση των έργων τέχνης.

Δυνητικά, προτείνουμε βελτιστοποίηση της πειραματικής διαδικασίας είτε με τη δημιουργία ακριβέστερου υπολογιστικού πλέγματος, το οποίο μπορεί να υποστηρίξει η υπολογιστή ισχύς που διατίθεται.

Επίσης, μια άλλη πρόταση αποτελεί η χρήση διαφορετικών ρύπων, διαφορετικών συγκεντρώσεων ρύπου ακόμη και διαφορετικών ταχυτήτων εισόδου του ρευστού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <https://www.laprairie.com/el-gr/editorials-article?cid=art-conservation>
- [2] <https://www.nationalgallery.gr/el/>
- [3] iefimerida.gr
- [4] <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- [5] Βούλτσου Διονυσία-Μαρία, Υπολογιστική προσομοίωση αποκόλλησης ροής σε απότομη διεύρυνση, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστημίου Πελοποννήσου Σχολή Μηχανικών Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2019.
- [6] Μπορονικολός Γεώργιος, Μελέτη παλμικής ροής Αίματος σε πρότυπη αρτηρία με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Fluent, Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ, 2015
- [7] https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm
- [8] https://www.researchgate.net/publication/328208666_A_comparison_of_standard_k-e_and_realizable_k-e_turbulence_models_in_curved_and_confluent_channels
- [9] Ιωάννης Χ. Θεοδώρου, Ρήγας Αθανάσιος, Υπολογιστική προσομοίωση στρωτής ροής σε απότομη εκτόνωση αγωγού, Πτυχιακή Εργασία, Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ, Πειραιάς 2017.
- [10] Πανόπουλος Διονύσιος, Υπολογιστική μελέτη με το SST κ-ω μοντέλο τύρβης για 2D πολυφασική ροή αέρα-νερού-χαλαζιού γύρω από αεροτομή NACA 0012 με εφαρμογή σε πτερύγιο ανεμοκινητήρα, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Τομέας Ενέργειας Αεροναυτικής και Περιβάλλοντος εργ. Μηχανικής των Ρευστών και Εφαρμογών αυτής, Πάτρα Ιούλιος 2019.