



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ  
ΘΑΛΑΜΟ ΈΚΘΕΣΗΣ ΈΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΣ**

**ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΑΡΜΕΝΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ (Α.Μ. 7302)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΛΑΡΑΚΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ  
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2022**



## Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιείται στα πλαίσια ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και πραγματεύεται την προσομοίωση ροής ρευστού σε καμβά έργων τέχνης που περιέχεται σε εργαστηριακό θάλαμο με την χρήση του υπολογιστικού προγράμματος ρευστοδυναμικής (ansys fluent).

Η επιλογή του παρόντος θέματος έγινε με γνώμονα την σπουδαιότητα των έργων τέχνης που αποτελούν ένα μεγάλο κομμάτι της πολιτιστικής κληρονομιάς κάθε λαού και για αυτό το λόγο αποτελεί επιτακτική ανάγκη η συντήρηση και η αποκατάσταση τους. Ωστόσο, η επίτευξη αυτού στηρίζεται σε μία νέα επιστήμη, η οποία απαιτεί την συνεργασία πλήθους επιστημόνων με στόχο την άρτια καταγραφή, ανάλυση και πρόβλεψη επίδρασης του χρόνου πάνω σε ένα έργο, χωρίς όμως να παρέμβει σε αυτό.

Σε αυτό το σημείο οφείλω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέπων καθηγητή Δρ. Καλαράκη Αλέξανδρο για την εμπιστοσύνη και την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ θερμά 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 ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη και συμπαράσταση όλα τα χρόνια των σπουδών μου σε κάθε μου βήμα και απόφαση.

Ιούλιος 2022, Πάτρα  
Αρμενάκης Εμμανουήλ

**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής  
Αρμενάκης Εμμανουήλ

(Υπογραφή)



## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η μελέτη ροής διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) στο εσωτερικό ενός πρότυπου θαλάμου που είναι τοποθετημένο ένα έργο τέχνης από καμβά. Στόχος είναι η διεξαγωγή προσομοίωσης της επίδρασης που έχει ο ατμοσφαιρικός αέρας στο ύφασμα-καμβά ενός έργου τέχνης με τη πάροδο του χρόνου.

Αρχικά πραγματοποιείται μια εισαγωγή όπου δίνονται βασικές πληροφορίες για τα έργα τέχνης και την σπουδαιότητα αυτών ως προς την πολιτιστική κληρονομία των λαών. Επίσης, αναφέρεται η δυσκολία της συντήρησης και της αποκατάστασης των έργων τέχνης.

Στο Πρώτο Κεφάλαιο αναφέρονται βασικά στοιχεία της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Αρχικά δίνεται ο ορισμός της και ακολουθεί η ανάλυση του μετά-επεξεργαστή, της γεωμετρίας, του υπολογιστικού πλέγματος καθώς και η αξιολόγηση της ποιότητας του. Στη συνέχεια καθορίζονται οι παράμετροι ενός προβλήματος και δίνονται τα μοντέλα τύρβης που συναντώνται σε παρόμοια προβλήματα.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο περιγράφεται η περίπτωση μελέτης με το υπολογιστικό πρόγραμμα Fluent. Πρώτα απ' όλα περιγράφεται ο πρότυπος θάλαμος προσομοίωσης και στην συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής καθώς και η αρχή λειτουργίας του. Ακολουθεί η μοντελοποίηση, όπου πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του στο υπολογιστικό πρόγραμμα Solidworks, εισάγεται η γεωμετρία του στο Fluent και ο σχεδιασμός της γεωμετρίας. Στη συνέχεια δημιουργείται το υπολογιστικό πλέγμα όπου γίνεται ονοματοδοσία περιοχών και η διακριτοποίηση και ακολουθεί η έναρξη του υπολογιστικού προγράμματος που αποτελείται από τον έλεγχο mesh και τα στατιστικά στοιχεία, την επιλογή λύτη, την επιλογή ροϊκού μοντέλου, τον καθορισμό υλικών και ιδιοτήτων και τις συνοριακές συνθήκες.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο υλοποιείται η επίλυση του προβλήματος (solution), όπου γίνεται αρχικοποίηση πεδίου ροής, ορισμός κριτηρίων σύγκλισης και η έναρξη υπολογισμού.

Στο Τέταρτο Κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανάλυση των αποτελεσμάτων για τις διάφορες εκδοχές των προβλημάτων όπως στο πρόβλημα μόνιμης ροής, στα προβλήματα ροής με παροχή μάζα, όπου εξετάζεται το πρόβλημα  $c = 0$  στην εμπρόσθια όψη του καμβά και πρόβλημα  $c = 0.5$  στην εμπρόσθια όψη του καμβά (inlet velocity = 2.104 m/s). Επιπλέον, για κάθε περίπτωση δίνονται διαγράμματα vector plots και contours με στόχο την αξιολόγηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Τέλος, δίνονται τα συμπεράσματα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας δίνοντας έμφαση στη παραμονή των ατμοσφαιρικών ρύπων στον καμβά σε σχέση με την ταχύτητα που προσπίπτουν σε αυτόν. Επιπλέον, δίνονται προτάσεις βελτίωσης της πειραματικής και υπολογιστικής διαδικασίας.



## Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	i
Περίληψη.....	ii
Περιεχόμενα Εικόνων.....	v
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων.....	ix
Περιεχόμενα Πινάκων.....	x
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ.....	3
1.1. Ορισμός υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.....	3
1.2. Μετά-επεξεργαστής.....	4
1.3. Γεωμετρία.....	4
1.4. Υπολογιστικό Πλέγμα.....	4
1.4.1. Αξιολόγηση ποιότητας πλέγματος.....	6
1.5. Καθορισμός παραμέτρων προβλήματος.....	7
1.6. Μοντελοποίηση τη τύρβης.....	7
1.6.1. Μοντέλο standard k-ε.....	8
1.6.2. Μοντέλο k-ω SST.....	9
2. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FLUENT.....	10
2.1. Πρότυπος θάλαμος προσομοίωσης.....	10
2.1.1. Κατασκευή Θαλάμου.....	10
2.1.2. Λειτουργία Θαλάμου.....	11
2.2. Μοντελοποίηση.....	11
2.2.1. Σχεδιασμός Θαλάμου με Solidworks.....	12
2.2.2. Εισαγωγή Γεωμετρίας στο Fluent.....	13
2.2.3. Σχεδιασμός Γεωμετρίας Θαλάμου.....	13
2.3. Δημιουργία Υπολογιστικού Πλέγματος.....	15
2.3.1. Ονομασία Περιοχών.....	15
2.3.2. Διακριτοποίηση.....	16
2.4. Έναρξη Υπολογιστικού Προγράμματος Fluent.....	22
2.4.1. Έλεγχος Mesh και Στατιστικά Στοιχεία.....	23
2.4.2. Επιλογή Λύτη.....	24
2.4.3. Επιλογή Ροϊκού Μοντέλου.....	25
2.4.4. Καθορισμός υλικών και ιδιοτήτων.....	27
2.4.5. Συνοριακές συνθήκες.....	28
3. ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ - SOLUTION.....	37
3.1. Αρχικοποίηση πεδίου ροής.....	37
3.2. Ορισμός κριτηρίων σύγκλισης.....	37
3.3. Έναρξη υπολογισμού.....	38
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	40
4.1. Πρόβλημα Μόνιμης Ροής.....	40
4.2. Πρόβλημα Ροής με Παροχή Μάζας.....	53
4.2.1. Πρόβλημα $c = 0$ εμπρόσθια όψη καμβά.....	53
4.2.2. Πρόβλημα $c = 0.5$ εμπρόσθια όψη καμβά.....	69



4.2.3. Πρόβλημα $c = 0.5$ εμπρόσθια όψη καμβά (inlet velocity = 2.104 m/s) .....	82
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	88
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ .....	88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	89



## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Παραδείγματα προσομοιώσεων υπολογιστικής ρευστομηχανικής [8]. [9].....	3
Εικόνα 2: α) Εμπρός όψη θαλάμου, οπές εισαγωγής ρευστού, β) πίσω όψη θαλάμου, βάση καμβά, γ) σωλήνες παροχής ρευστού και δ) εσωτερικό θαλάμου .....	10
Εικόνα 3: Σχεδιασμός α) πίσω όψη πρότυπου θαλάμου και β) εμπρός όψη πρότυπου θαλάμου με το υπολογιστικό πρόγραμμα Solidworks .....	12
Εικόνα 4: Εισαγωγή γεωμετρίας στο Fluent.....	13
Εικόνα 5:Πρόγραμμα Fluent - Geometry .....	13
Εικόνα 6: Συντεταγμένες για τη δημιουργία του enclosure .....	14
Εικόνα 7: Εντολή Boolean (subtract). .....	14
Εικόνα 8: Ολοκληρωμένη δημιουργία γεωμετρίας στο fluent. ....	14
Εικόνα 9: Πρόγραμμα fluent-mesh. ....	15
Εικόνα 10: Ονοματισμένες περιοχές του προβλήματος. ....	15
Εικόνα 11: Ρυθμίσεις βελτιστοποίησης της διακριτοποίησης σε σχέση με τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του εξομοιωτή (α) Relevance center, (β) Smoothing και (γ) Span angle center. ...	16
Εικόνα 12: α) Τρόπος επιλογής περιοχής και β) επιλογή της εμπρόσθιας όψης του καμβά ..	17
Εικόνα 13: Προβολή εμπρόσθιας όψης του καμβά. ....	17
Εικόνα 14: Βαθμός πύκνωσης πλέγματος. ....	18
Εικόνα 15: α) Τρόπος επιλογής δεύτερης περιοχής και β) επιλογή περιμετρικής όψης καμβά. ....	18
Εικόνα 16: Προβολή περιμετρικής όψης καμβά. ....	19
Εικόνα 17: Βαθμός πύκνωσης πλέγματος. ....	19
Εικόνα 18: α) Τρόπος επιλογής τρίτης περιοχής και β) επιλογή οπών εισόδου – εξόδου.....	20
Εικόνα 19: Προβολή οπών α) εισόδου και β) εξόδου .....	20
Εικόνα 20: Δημιουργία mesh .....	21
Εικόνα 21: α) Διακριτοποίηση θαλάμου προσομοίωσης β) εστίαση στη διακριτοποίηση της περιοχής β) του καμβά και γ) των οπών .....	21
Εικόνα 22: Αποθήκευση επιλογών .....	22
Εικόνα 23: Πρόγραμμα Fluent- setup .....	22
Εικόνα 24: Αποδοχή επιλογής double precision .....	22
Εικόνα 25: Επιλογή ελέγχου πλέγματος. ....	23
Εικόνα 26: Αποτελέσματα ελέγχου πλέγματος.....	23
Εικόνα 27: Επιλογή για προβολή στατιστικών σημείων. ....	24
Εικόνα 28: Στατιστικά στοιχεία.....	24
Εικόνα 29: Επιλογή τύπου λύτη και ροής.....	24
Εικόνα 30: Επιλογή μοντέλου k-ω SST. ....	26
Εικόνα 31: Ενεργοποίηση μοντέλου ενέργειας.....	26
Εικόνα 32: Επιλογή species transport.....	27
Εικόνα 33: Καθορισμός υλικών.....	27
Εικόνα 34: Επιλογή εισόδου ως περιοχή για συνοριακή συνθήκη.....	28
Εικόνα 35: Επιλογή συνοριακής συνθήκης εισόδου. ....	30
Εικόνα 36: Ορισμός ταχύτητας εισόδου.....	30
Εικόνα 37: Επιλογή συνοριακής συνθήκης στον καμβά. ....	31
Εικόνα 38: Ορισμός συνθήκης μη ολίσθησης στον καμβά. ....	31
Εικόνα 39: Επιλογή συνοριακής συνθήκης στην έξοδο. ....	32
Εικόνα 40: Ορισμός πίεσης εξόδου. ....	32
Εικόνα 41: Αποθήκευση project.....	33



Εικόνα 42: 1 <sup>ο</sup> Πρόγραμμα: Ορισμός mass fraction .....	34
Εικόνα 43: 1 <sup>ο</sup> Πρόγραμμα: Εμπρόσθια όψη του καμβά, ορισμός mass fraction .....	34
Εικόνα 44: 1 <sup>ο</sup> Πρόγραμμα: Ορισμός mass fraction στην έξοδο .....	35
Εικόνα 45: 2 <sup>ο</sup> Πρόγραμμα: ορισμός mass fraction εμπρόσθια όψη του καμβά.....	35
Εικόνα 46: Αρχικοποίηση πεδίου ροής .....	37
Εικόνα 47: Task page – monitors .....	38
Εικόνα 48: Residual monitors .....	38
Εικόνα 49: Έναρξη επίλυσης.....	39
Εικόνα 50: Τιμές των residuals στα 1200 iterations (μόνιμη ροή).....	40
Εικόνα 51: Διάταξη των παραπάνω planes στον θάλαμο (μόνιμη ροή).....	43
Εικόνα 52: Διάταξη των παραπάνω planes στο θάλαμο προσομοίωσης (μόνιμη ροή).....	45
Εικόνα 53: Vectors plot της ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο στον άξονα y ( $y=0.155$ cm) (μόνιμη ροή).....	46
Εικόνα 54: Vectors plot της ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο στον άξονα z ( $z=0.205$ cm) (μόνιμη ροή).....	47
Εικόνα 55: Vector plot του velocity σε τρία διαφορετικά planes (μόνιμη ροή).....	48
Εικόνα 56: Vector plot του velocity σε τρία διαφορετικά planes μαζί με το mesh των οπών εισόδου, εξόδου και του καμβά (μόνιμη ροή) .....	49
Εικόνα 57: Pathlines (μόνιμη ροή).....	49
Εικόνα 58: Κεντρική γραμμή από είσοδο έως την έξοδο (μόνιμη ροή) .....	50
Εικόνα 59: Ευθεία γραμμή που διέρχεται από το κενό μεταξύ καμβά-τοιχώματος (μόνιμη ροή) .....	52
Εικόνα 60: Τιμές των residuals στα 1200 iterations ( $c = 0$ εμπρόσθια όψη καμβά).....	54
Εικόνα 61: Contour διαφορετικών plane στον θάλαμο προσομοίωσης ( $c=0$ εμπρόσθια όψη καμβά).....	54
Εικόνα 62: Διάταξη παραπάνω planes στο θάλαμο προσομοίωσης ( $c=0$ εμπρόσθια όψη καμβά).....	59
Εικόνα 63: Vectors plots του velocity σε τρία διαφορετικά planes ( $c=0$ εμπρόσθια όψη καμβά) .....	61
Εικόνα 64: Vectors plots του velocity σε τρία διαφορετικά planes ( $c=0$ εμπρόσθια όψη καμβά) .....	62
Εικόνα 65: Pathlines για $c=0$ εμπρόσθια όψη καμβά .....	62
Εικόνα 66: Διάταξη των planes σε σχέση με τον καμβά ( $c=0$ εμπρόσθια όψη καμβά).....	64
Εικόνα 67: Results, 1200 iterations ( $c = 0$ εμπρόσθια όψη καμβά) .....	65
Εικόνα 68: Vectors plot της ταχύτητας στο εμπρόσθιο τμήμα του θαλάμου ( $c=0$ εμπρόσθια όψη καμβά).....	67
Εικόνα 69: Vectors plot της ταχύτητας κατά μήκος του θαλάμου ( $c=0$ εμπρόσθια όψη καμβά) .....	67
Εικόνα 70: Vectors plot της ταχύτητας κατά μήκος του θαλάμου ( $c=0$ εμπρόσθια όψη καμβά) (όψη β).....	68
Εικόνα 71: Τιμές των residuals στα 1200 iterations ( $c = 0.5$ εμπρόσθια όψη καμβά) .....	69
Εικόνα 72: Διάταξη planes που είναι κάθετα στον άξονα x ( $c = 0.5$ εμπρόσθια όψη καμβά) .	70
Εικόνα 73: Διάταξη των planes στο θάλαμο προσομοίωσης ( $c = 0.5$ εμπρόσθια όψη καμβά) .....	74
Εικόνα 74: Pathlines ( $c = 0.5$ εμπρόσθια όψη καμβά).....	76
Εικόνα 75: Διάταξη των planes σε σχέση με τον καμβά ( $c = 0.5$ εμπρόσθια όψη καμβά).....	79
Εικόνα 76: Results, 1200 iterations ( $c = 0.5$ εμπρόσθια όψη καμβά) .....	80
Εικόνα 77: Τιμές των residuals στα 1200 iterations. ....	82
Εικόνα 78: Διάταξη των planes σε σχέση με τον καμβά ( $c = 0.5$ στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = $2.104$ m/s) .....	86



Εικόνα 79: Results, 1200 iterations ( $c = 0.5$  στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s) .....87





## Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1: (α) Γεωμετρία στοιχείων υπολογιστικού πλέγματος και (β) στοιχείων υπολογιστικού πλέγματος [12] .....	5
Σχήμα 2: Γεωμετρική απεικόνιση δομημένου πλέγματος [11] .....	5
Σχήμα 3: Γεωμετρική απεικόνιση μη δομημένου πλέγματος [11] .....	6
Σχήμα 4: Γεωμετρική απεικόνιση υβριδικού πλέγματος [11] .....	6



## Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Μοντέλο standard k-ε. ....	25
Διάγραμμα 2: Επίλυση προβλήματος μόνιμης ροής .....	40
Διάγραμμα 3: Κατανομή πίεσης (line -1) (μόνιμη ροή) .....	50
Διάγραμμα 4: Κατανομής ταχύτητας (line -1) (μόνιμη ροή) .....	51
Διάγραμμα 5: Κατανομής ταχύτητας στον άξονα x (line -1) (μόνιμη ροή).....	51
Διάγραμμα 6: Κατανομής ταχύτητας (μόνιμη ροή) .....	52
Διάγραμμα 7: Κατανομή ταχύτητας στον άξονα x (μόνιμη ροή).....	53
Διάγραμμα 8: Επίλυση του προβλήματος (c=0 εμπρόσθια όψη καμβά).....	53
Διάγραμμα 9: Κατανομή ταχύτητας (line- 1) (c=0 εμπρόσθια όψη καμβά) .....	63
Διάγραμμα 10: Κατακράτηση CO <sub>2</sub> επάνω στο καμβά (line- 1) (c=0 εμπρόσθια όψη καμβά) .	63
Διάγραμμα 11: CO <sub>2</sub> mass fraction plot (c=0 εμπρόσθια όψη καμβά) .....	65
Διάγραμμα 12: Κατανομή ταχύτητας (line - 2) (c=0 εμπρόσθια όψη καμβά) .....	66
Διάγραμμα 13: Κατανομής ταχύτητας στον άξονα x (line - 2) (c=0 εμπρόσθια όψη καμβά) ..	66
Διάγραμμα 14: Κατακράτηση CO <sub>2</sub> επάνω στο καμβά (line -2) (c=0 εμπρόσθια όψη καμβά) .	68
Διάγραμμα 15: Διάγραμμα επίλυσης του προβλήματος c = 0.5 εμπρόσθια όψη καμβά .....	69
Διάγραμμα 16: Κατανομή πίεσης (line-1) (c = 0.5 εμπρόσθια όψη καμβά).....	77
Διάγραμμα 17: Κατανομή ταχύτητας (line-1) (c = 0.5 εμπρόσθια όψη καμβά).....	77
Διάγραμμα 18: Διάγραμμα κατακράτησης CO <sub>2</sub> επάνω στον καμβά (line -1) (c = 0.5 εμπρόσθια όψη καμβά) .....	78
Διάγραμμα 19: CO <sub>2</sub> mass fraction plot (c = 0.5 εμπρόσθια όψη καμβά).....	79
Διάγραμμα 20: Κατανομής ταχύτητας (c = 0.5 εμπρόσθια όψη καμβά).....	80
Διάγραμμα 21: Κατανομής ταχύτητας στον άξονα x (c = 0.5 εμπρόσθια όψη καμβά) .....	81
Διάγραμμα 22: Κατακράτηση CO <sub>2</sub> επάνω στον καμβά (c = 0.5 εμπρόσθια όψη καμβά) .....	81
Διάγραμμα 23: Επίλυση του προβλήματος για c = 0.5 στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s.....	82
Διάγραμμα 24: Κατανομή ταχύτητας (c = 0.5 στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s) .....	83
Διάγραμμα 25: Κατανομής ταχύτητας (c = 0.5 στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s) .....	83
Διάγραμμα 26: Κατανομής ταχύτητας στον άξονα x (c = 0.5 στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s).....	84
Διάγραμμα 27: Κατακράτησης CO <sub>2</sub> επάνω στο καμβά (c = 0.5 στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s).....	85
Διάγραμμα 28: CO <sub>2</sub> mass fraction plot. (α) Πριν τον καμβά (κόκκινη γραμμή) (β) Μετά τον καμβά (λευκή γραμμή) (c = 0.5 στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s) ..	86



## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Συνοριακές συνθήκες πρώτου προγράμματος.....	33
Πίνακας 2: Συνοριακές συνθήκες δεύτερου προγράμματος.....	35
Πίνακας 3: Συνοριακές συνθήκες τρίτου προγράμματος.....	36
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά contours του velocity magnitude σε planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά (μόνιμη ροή).....	41
Πίνακας 5: Contours του x velocity σε planes κάθετα στον άξονα y (μόνιμη ροή).....	43
Πίνακας 6: Συντεταγμένες των planes (μόνιμη ροή).....	48
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά contours κατανομής της ταχύτητας σε παράλληλα planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά (c=0 εμπρόσθια όψη καμβά).....	55
Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά contours του mass fraction CO <sub>2</sub> σε παράλληλα planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά (c=0 εμπρόσθια όψη καμβά).....	57
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά contours του mass fraction CO <sub>2</sub> σε planes κάθετα στον άξονα y (c=0 εμπρόσθια όψη καμβά).....	59
Πίνακας 10: Συντεταγμένες των planes (c=0 εμπρόσθια όψη καμβά).....	61
Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά contours κατανομής της ταχύτητας σε παράλληλα planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά (c = 0.5 εμπρόσθια όψη καμβά).....	70
Πίνακας 12: Χαρακτηριστικά contours του mass fraction CO <sub>2</sub> σε παράλληλα planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά (c = 0.5 εμπρόσθια όψη καμβά).....	72
Πίνακας 13: Χαρακτηριστικά contours του mass fraction CO <sub>2</sub> σε planes κάθετα στον άξονα y (c = 0.5 εμπρόσθια όψη καμβά).....	75



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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 [1]. Ωστόσο, μέχρι και σήμερα η συντήρηση και η αποκατάσταση τους είναι βασικό καθήκον των μουσείων παγκοσμίως. Η δραστηριότητα αυτή τα τελευταία χρόνια εκμεταλλεύεται όλο και περισσότερο την τεχνολογική εξέλιξη και ιδιαίτερα την εξέλιξη της πληροφορικής τεχνολογίας. Για την απόκτηση περισσότερων εφοδίων και γνώσεων στο συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής χρησιμοποιούνται μέθοδοι εξέτασης και ανάλυσης βασισμένες σε τεχνικές ψηφιοποίησης, επεξεργασίας εικόνας, διαχείρισης και προστασίας δεδομένων [2].

Με στόχο την ανταπόκριση στα ανωτέρω 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]. Όμως τονίζεται ότι ακόμα και σήμερα διακρίνεται μεγάλη έλλειψη στα πληροφορικά συστήματα και τεχνολογικά εργαλεία για την διαχείριση, οργάνωση και παρουσίαση πληροφοριών σχετικά με την διαδικασία συντήρησης και αποκατάστασης των έργων τέχνης [2].

Αναζητώντας τις αιτίες που οδηγούν στην αλλοίωση των χαρακτηριστικών αλλά και την καταστροφή ενός τέτοιου έργου είναι διάφορων 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.

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάλυση της επίδρασης του ατμοσφαιρικού αέρα κυρίως επάνω σε έργα ζωγραφικής με υφασμάτινο φορέα (καμβά). Ένα έργο τέχνης σε καμβά αποτελείται κυρίως από τα ακόλουθα:

- i) Καμβά, ο οποίος μπορεί να είναι κάποιο λινό ή βαμβακερό ύφασμα.
- ii) Κόλλα, η οποία συνήθως είναι οργανικής φύσης.
- iii) Χρώμα, το οποίο είναι χρωστικές ουσίες μαζί με λινέλαιο ή κάποιοι άλλοι είδους έλαιο.
- iv) Βερνίκι το οποίο είναι κάποιοι είδους ρητίνη, είτε φυσική είτε οργανική.

Θα πρέπει ότι η παλαιότητα του έργου αυξάνει το βαθμός δυσκολίας για την συντήρηση και την αποκατάσταση του. Επίσης, το οικονομικό κόστος στην υλοποίηση τέτοιων εργασιών αυξάνεται ανάλογα με τον βαθμό δυσκολίας τους [3].

Δημοσιεύσεις και αναφορές του τύπου για πολύτιμα και περίφημα έργα τέχνης είναι οι δηλώσεις του Βαν Λανγκ, Διευθυντής στο μουσείο Rijksmuseum του Άμστερνταμ, όπου προειδοποιεί για τα εξής: «Τα διάσημα “ηλιοτρόπια” του Βίνσεντ βαν Γκογκ χάνουν το εντυπωσιακό τους κίτρινο και ο πορτοκαλί ορίζοντας στην “Κραυγή” του Εντβαρντ Μουνχ ξεθωριάζει. 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» [4].*

Η συμβολή της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι στον εντοπισμό του διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο επικάθεται στον εκάστοτε καμβά που έχει τοποθετηθεί εντός του θαλάμου δοκιμών. Η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί με την επιστήμη της υπολογιστικής ρευστομηχανικής και την χρήση του προγράμματος Fluent. Για την επίτευξη του εντοπισμού του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που επικάθεται στον καμβά απαιτείται η δημιουργία κατάλληλης γεωμετρίας και ο ορισμός άρτιων συνθηκών, ώστε η προσομοίωση να μπορεί να περιγράψει όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά την πραγματικότητα.

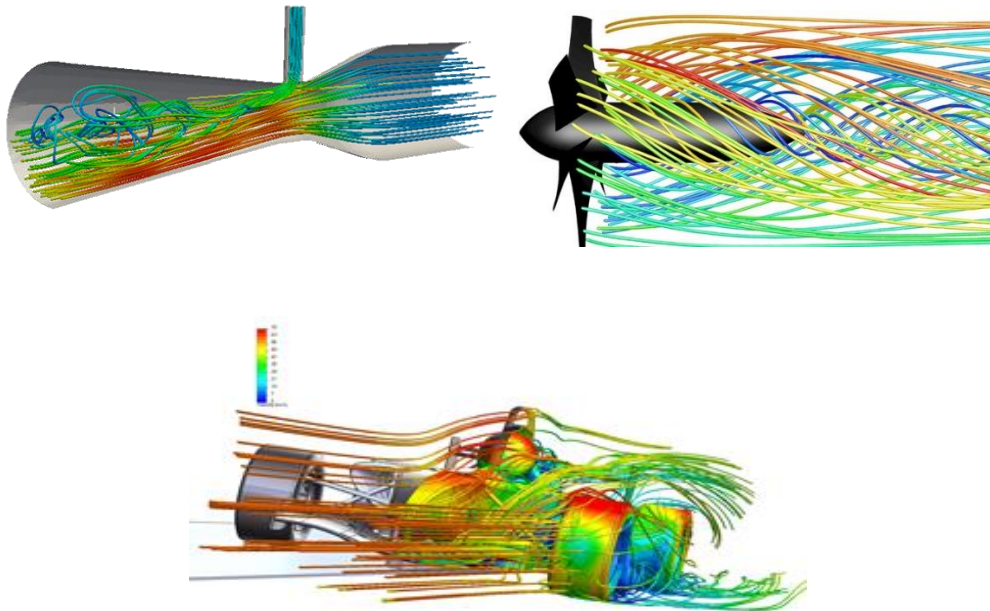
Η επιλογή του προγράμματος Fluent έγινε με γνώμονα ότι είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται από εταιρίες έρευνας, κατασκευής και ανάπτυξης ναυπηγικής, αεροναυπηγικής, παραγωγής ενέργειας, παραγωγής χημικών προϊόντων και γενικά όπου χρήζει εφαρμογή προσομοίωσης φαινομένων ροής. Για επίλυση προβλημάτων τα οποία περιέχουν ροή ρευστών το πρόγραμμα αυτό αποτελεί μονόδρομο αφού 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, η οποία ορίζεται από τους χρήστες [5].



# 1. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

## 1.1. Ορισμός υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics CFD) καλείται η μέθοδος πρόβλεψης της συμπεριφοράς των ρευστών, βασιζόμενη στη αριθμητική επίλυση των εξισώσεων συνεχείας και ορμής (εξισώσεις Navier- Stokes) σε συνδυασμό με τις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας σε γεωμετρία που δίνεται από τον χρήστη. Το CFD θεωρείται ένα εύκολο σχετικά εργαλείο προσομοίωσης της συμπεριφοράς των ρευστών και σε συνδυασμό με την ταχύτητα των υπολογιστικών συστημάτων βελτιστοποιεί την επίλυση των προβλημάτων. Τα αποτελέσματα του εργαλείου προσομοίωσης χαρακτηρίζονται για την αρτιότητα και ακρίβεια τους [6].



Εικόνα 1: Παραδείγματα προσομοιώσεων υπολογιστικής ρευστομηχανικής [8]. [9]

Το βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η ταχύτητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, πραγματοποιείται προσέγγιση των φυσικών προβλημάτων σε πραγματική κλίμακα χωρίς όρια και περιορισμούς. Η ανάλυση που δίνεται παρέχει πληροφορίες για όλο το χώρο του πεδίου και όχι σημειακά, παράλληλα επιτρέπει και την εύκολη ανάλυση σεναρίων καθώς και παραμετρική ανάλυση. Η ανάπτυξη της μεθόδου οφείλεται στην αδυναμία της αναλυτικής επίλυσης των εξισώσεων Navier- Stokes σε συνδυασμό με τις εξισώσεις διατήρησης της μάζας και ενέργειας ακόμα και για απλά πεδία ροής [7].



## 1.2. Μετά-επεξεργαστής

Ο μετά – επεξεργαστής (Post-processor) δίνει την δυνατότητα απεικόνισης και οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων, τα οποία υπολογίστηκαν κατά την προσομοίωση με στόχο την ανάλυση και την αξιολόγηση τους [7].

## 1.3. Γεωμετρία

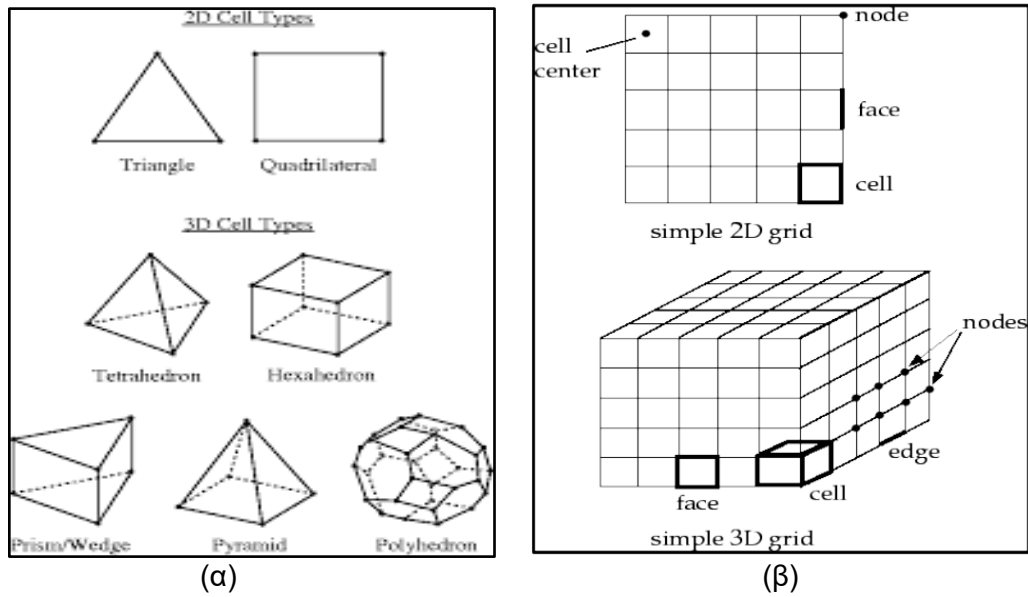
Η γεωμετρία είναι ένα παραμετρικό περιβάλλον, με δυνατότητες συνδέσεις με σχεδιαστικά προγράμματα (CAD, Solidworks). Το προαναφερόμενο περιβάλλον λειτουργεί ως πύλη για τη εισαγωγή της γεωμετρίας της υπό επίλυσης περιοχής. Σημειώνεται ότι η επιλογή δημιουργίας της γεωμετρίας σε άλλο περιβάλλον είναι ελκυστική, λόγω των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα εξελιγμένα σχεδιαστικά προγράμματα, ωστόσο, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή της παραμέτρου της ανοχής (tolerance), όταν πρόκειται για αρχείο της μορφής \*.igs. Επιπλέον απαιτείται ο έλεγχος άρτιας εισαγωγής των στοιχείων με στόχο να αποφευχθεί η επιδιόρθωση της γεωμετρίας, η οποία συνήθως περιλαμβάνει εμφάνιση διπλών γραμμών και σημείων [10].

## 1.4. Υπολογιστικό Πλέγμα

Βασική προϋπόθεση στην αριθμητική επίλυση ενός προβλήματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι η περιγραφή της γεωμετρίας του προβλήματος και έπειτα την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος, το οποίο συντίθεται από πεπερασμένα στοιχεία ή όγκους στους οποίους στηρίζεται η επίλυση [11]. Το υπολογιστικό πλέγμα θεωρείται ως η βασικότερη εργασία για την επίλυση του προβλήματος, αυτό διαπιστώνεται και από το μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον που έχει αναπτυχθεί στην τεχνική κατασκευή υπολογιστικών δικτύων. Αναλύοντας τι ακριβώς είναι ένα υπολογιστικό πλέγμα αναφέρεται σαν το στάδιο της υποδιαίρεσης του πεδίου ροής σε έναν αριθμό μικρότερων, μη αλληλεπικαλυπτόμενων πεδίων τα οποία αποκαλούνται κελία/στοιχεία (cells/elements), δηλαδή ένα πλέγμα (grid) αποτελείται από αυτά τα κελία/στοιχεία (cells/elements), τα οποία συνδέονται μεταξύ του με κόμβους (node). Τα κελία μπορεί να είναι διάφορα σχήματα όπως εξάεδρα (hexahedra), τετράπλευρα (quadrilateral), τρίγωνα (triangle). Ωστόσο, βασική προϋπόθεση της επιλογής του τύπου κελίου είναι η φυσική του προβλήματος που επιλύεται κάθε φορά [7].

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση τρισδιάστατου πλέγματος (3D) επιλέγονται τα εξάεδρα, συνδυασμός εξάεδρων και σφηνοειδών στοιχείων, συνδυασμός τετράεδρων και πολυεδρικών στοιχείων, πυραμοειδή και τέλος πολυεδρικά. Ενώ στην περίπτωση δισδιάστατου πλέγματος (2D) τα στοιχεία που επιλέγονται είναι τετράπλευρα ή τρίγωνα (Σχήμα 1 (α) και (β)) [7].





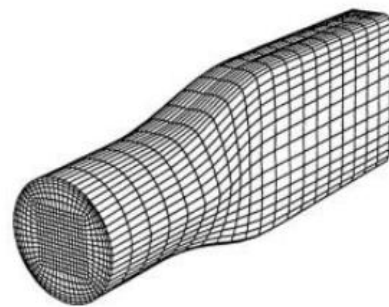
Σχήμα 1: (α) Γεωμετρία στοιχείων υπολογιστικού πλέγματος και (β) στοιχείων υπολογιστικού πλέγματος [12]

Όπως προαναφέρθηκε, ένα υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από κελία/στοιχεία (cells/elements), ωστόσο ο αριθμός αυτών των στοιχείων ορίζει την πυκνότητα του πλέγματος όπου όσο πυκνότερο πλέγμα τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια. Η αύξηση του αριθμού των κελίων μεν οδηγεί σε πιο άρτια και ακριβή αποτελέσματα αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται το υπολογιστικό κόστος και ο απαιτούμενος χρόνος διεξαγωγής των αποτελεσμάτων. Τα προαναφερόμενα οδηγούν στην επιτακτική ανάγκη επιλογής περιοχών που πρέπει να διεξαχθούν σαφέστερα αποτελέσματα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι περιοχές με μεγάλες μεταβολές ταχύτητας, πίεσης, θερμοκρασίας η γενικότερα μεταβλητών που μεταβάλλονται στο εκάστοτε πρόβλημα. Η «σωστή» κατασκευή πλέγματος εξαρτάται άμεσα από την εμπειρία του χρήστη καθώς και την κατανόηση του προβλήματος που ζητείται να επιλυθεί.

Τα βασικότερα πλέγματα που συναντώνται είναι τα εξής [9]:

- *Δομημένα (structured) [7]:*

- Απλή συνδεσιμότητα υπολογιστικών στοιχείων
- Επίπεδα στοιχεία με τέσσερις πλευρές ή στοιχεία με έξι επιφάνειες
- Υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων για τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο και την μνήμη

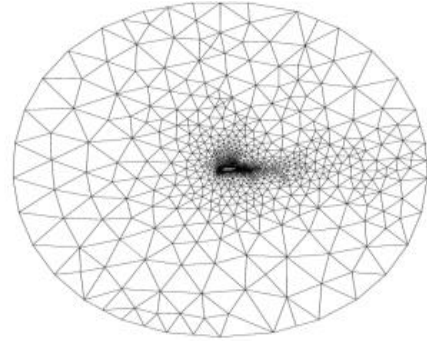


Σχήμα 2: Γεωμετρική απεικόνιση δομημένου πλέγματος [11]

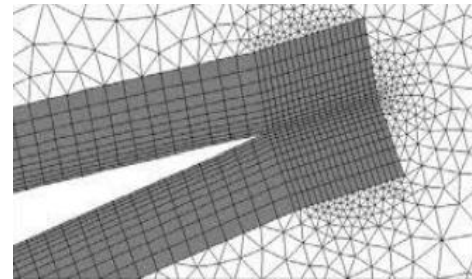




- **Μη δομημένα (unstructured) [7]:**
  - Χαμηλή ακρίβεια και ποιότητα του πλέγματος
  - Δυσκολία σύγκλισης και αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις
  - Αποτελούνται από στοιχειά διαφόρων μορφών
  - Συνίσταται μόνο σε περίπλοκες γεωμετρίες όπου δεν είναι δυνατή η χρήση δομημένων πλεγμάτων
- **Υβριδικά (Hybrid): [7]:**
  - Πλέγματα που προκύπτουν από τον συνδυασμό δομημένων και μη δομημένων πλεγμάτων



Σχήμα 3: Γεωμετρική απεικόνιση μη δομημένου πλέγματος [11]



Σχήμα 4: Γεωμετρική απεικόνιση υβριδικού πλέγματος [11]

#### 1.4.1. Αξιολόγηση ποιότητας πλέγματος

Η διακριτοποίηση της γεωμετρίας ενός προβλήματος είναι βασικό στάδιο για την άρτια επίλυση με προσομοίωση. Το πλέγμα που κατασκευάζεται θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από την υψηλή ποιότητα με στόχο να παρέχεται ταχύς ρυθμός σύγκλισης, μεγάλη ακρίβεια λύσης και μικρό υπολογιστικό κόστος. Σύμφωνα με την Βούλτσου (2019) για την αξιολόγηση ποιότητας πλέγματος (grid quality) χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα κριτήρια [7]:

- **Ποιότητα στοιχείου (element quality):** είναι η αναλογία του όγκου προς το άθροισμα του τετραγώνου των μηκών ακμής για τα στοιχεία 2D γεωμετρίας ή την τετραγωνική ρίζα του κύβου του αθροίσματος του τετραγώνου των μηκών ακμής για τα στοιχεία 3D γεωμετρίας, κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1, η τιμή 1 δείχνει έναν τέλειο κύβο ή τετράγωνο ενώ μια τιμή 0 υποδηλώνει ότι το στοιχείο έχει μηδενικό ή αρνητικό όγκο.
- **Αναλογία διαστάσεων (aspect ration):** είναι η μέγιστη απόσταση μια όψης του από το κέντρο του, προς την ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε δυο κόμβους του. Στην περίπτωση τετραγώνων και ισόπλευρων τριγώνων (για 2D πρόβλημα). Η ιδεατή αναλογία διαστάσεων πρέπει να διατηρείται στην τιμή 1.
- **Λοξότητα όγκου (skewness):** είναι η σύγκριση του όγκου που περικλείεται από κάθε κελί του πλέγματος, σε σχέση με τον όγκο βέλτιστου κελίου που δύναται να αντικαταστήσει το πραγματικό. Ως βέλτιστο κελί ορίζεται το κελί του οποίου οι πλευρές αποτελούνται από ισογώνια στοιχεία, ισόπλευρα τρίγωνα στην περίπτωση χρήσης



τετραέδρων ή ορθογώνια παραλληλόγραμμα στην περίπτωση χρήσης εξάεδρων. Πρέπει να διατηρείται κάτω από 0.95, με μια μέση τιμή που είναι σημαντικά χαμηλότερη, μία μέγιστη τιμή άνω του 0.95 μπορεί να οδηγήσει σε δυσκολίες.

- Ορθογωνική ποιότητα (orthogonal quality): είναι ο λόγος του μήκους των πλευρών κάθε στοιχείου που συγκροτεί το υπολογιστικό πλέγμα, με επιθυμητή τιμή κοντά στη μονάδα. Κελιά με ορθογωνική ποιότητα πλησίον του μηδενός αποτελούν κελιά κακής ποιότητας. Η ορθογωνική ποιότητα του κελιού πρέπει να διατηρείται μεταξύ των τιμών 0 και 1, η βέλτιστη δυνατή τιμή θεωρείται το 1.

Η ποιότητα του πλέγματος είναι αναπόφευκτα συνδεδεμένη με την αρτιότητα της σαφήνειας των αποτελεσμάτων με συνέπεια η αξιολόγηση των κελίων να είναι αναγκαία με τα προαναφερόμενα κριτήρια.

## 1.5. Καθορισμός παραμέτρων προβλήματος

Ο χρήστης θα πρέπει να καθορίσει τη φυσική διατύπωση του προβλήματος πραγματοποιώντας την επιλογή των ακολούθων [8]:

- Ιδιότητες ρευστού
- Φυσικά μοντέλα για τα διαφορετικά φαινόμενα που εξετάζει το εκάστοτε πρόβλημα
- Εφαρμογή οριακών συνθηκών
- Εφαρμογή αρχικών συνθηκών
- Καθορισμός ρυθμίσεων του επιλύτη
- Καθορισμός απαιτούμενης ακρίβειας

Σημειώνεται ότι το στάδιο του καθορισμού των παραμέτρων θεωρείται από τα σημαντικότερα διότι η ακρίβεια της προσομοίωσης συνδέεται άμεσα με την επιλογή του διαθέσιμου φυσικού μοντέλου. Ως επί των πλείστων στα μοντέλα που επιλύονται με την μέθοδο της υπολογιστικής ρευστομηχανικής CFD ορίζονται μέσω των συνοριακών και αρχικών συνθηκών που τα διέπουν. Αυτές οι συνθήκες είναι υπεύθυνες για την διαφορετικότητα των προβλημάτων της ρευστομηχανικής καθώς και για την μοναδικότητα της λύσης αφού οι εξισώσεις Navier-Stokes ισχύουν για όλα τα προβλήματα ροής [7].

## 1.6. Μοντελοποίηση τη τύρβης

Με στόχο την μοντελοποίηση των τυρβώδων ροών υπάρχει πλήθος μοντέλων, όπως:

- Μοντέλο Standard k-ε
- Μοντέλο k-ε RNG
- Μοντέλο k-ε Realizable
- Μοντέλο k-ω standard
- Μοντέλο k-ω SST



Σύμφωνα με την βιβλιογραφική [7], [13] ανασκόπηση προβλημάτων παρόμοιων με την περίπτωση μελέτη της παρούσας Διπλωματικής εργασίας προτείνουν την χρήση των μοντέλων standard k-ε και k-ω SST. Στην συνέχεια του εδαφίου θα δοθούν βασικές πληροφορίες αποκλειστικά των μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση και την επίλυση του παρόντος προβλήματος.

### 1.6.1. 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. [14]

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

$$i \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad [1.1]$$

$$ii. \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad [1.2]$$

Όπου:

$G_k$ : 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

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ : σταθερές τιμές 1.44, 1,92 και 0.09 αντίστοιχα

$\sigma_k = 1$ : τυρβώδης αριθμός Prandtl για το k

$\sigma_\varepsilon = 1.3$ : τυρβώδης αριθμός Prandtl για το ε

$S_\varepsilon$ : όροι πηγών

Σημειώνεται ότι οι προαναφερόμενες προκαθορισμένες τιμές έχουν προσδιοριστεί από πειράματα με αέρα και νερό και έχει αποδειχθεί ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα ευρύ φάσμα ροών, δίνοντας καλά αποτελέσματα.

Επίσης, το τυρβώδες ιξώδες ισούται με :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad [1.3]$$

Όπου:

$C_\mu$ : μια σταθερά



### 1.6.2. Μοντέλο k- $\omega$ SST

Τα μοντέλα k- $\omega$  αποτελούν μοντέλα δυο εξισώσεων με δύο μεταβλητές, όπου το k είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια και το  $\omega$  η ειδική διάχυση. Το μοντέλο k- $\omega$  SST είναι ιδανικό για ροές που έχουν χαμηλό αριθμό Reynolds (Re) και παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια, σε περιοχές κοντά στο τοίχωμα όπου μπορεί να υπάρχει αποκόλληση της ροής αλλά και στην ανάλυση οριακών στρωμάτων. Ωστόσο το μοντέλο έχει ένα βασικό αρνητικό που είναι η ανακρίβεια των αποτελεσμάτων σε περιοχές κοντά στην ελεύθερη ροή λόγω μεγάλης ευαισθησίας της μεταβλητής  $\omega$  [13], [16].

Οι εξισώσεις του μοντέλου k- $\omega$  SST είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \beta' \rho k \omega \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha_1 \frac{\omega}{k} G_k - \beta_1 \rho k \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\omega \sigma_{\omega iz}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \nu}{\partial x_j} \end{aligned} \quad [1.4]$$

Όπου:

$\mu_t$  το τυρβώδες ιξώδες και ισούται με:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1sF_2}{a^* a_1 \omega} \right]} \quad [1.5]$$

Το υβριδικό αυτό μοντέλο έχει αναπτυχθεί από τον Menter χρησιμοποιεί το k- $\omega$  στον υπολογισμό της τύρβης του εσωτερικού πεδίου έως και όρια των τοιχωμάτων αλλά και έναν μετασχηματισμό του k- $\epsilon$  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 k- $\omega$  SST [16].

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

Οι τοπικές μεταβλητές είναι:

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

Οι εξισώσεις των μοντέλων και των σταθερών που έχουν αναφερθεί, λήφθηκαν από το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος Fluent [11].



## 2. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FLUENT

### 2.1. Πρότυπος θάλαμος προσομοίωσης

#### 2.1.1. Κατασκευή Θαλάμου

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 60x41x31 cm (μήκος x πλάτος x ύψος) και εσωτερικά έχει τοποθετηθεί η βάση που θα τοποθετείται ο καμβάς (Εικόνα 2).



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 2: α) Εμπρός όψη θαλάμου, οπές εισαγωγής ρευστού, β) πίσω όψη θαλάμου, βάση καμβά, γ) σωλήνες παροχής ρευστού και δ) εσωτερικό θαλάμου



Η βάση είναι στην ουσία μια διάτρητη λαμαρίνα στο εσωτερικό του θαλάμου (Εικόνα 1.(δ)), η οποία έχει στερεωθεί στα 40 cm του μήκους από την είσοδο (Εικόνα 1.(β)). Στην είσοδο υπάρχουν πέντε οπές διαμέτρου 1/4' από τις οποίες θα διοχετεύεται το ρευστό (Εικόνα 1 (α), Εικόνα 1 (γ)) και στο πίσω τοίχωμα – έξοδο, μία οπή αντίστοιχου διαμετρήματος. Επίσης, στην πίσω όψη παρατηρείται πως υπάρχει μια πόρτα η οποία κλείνει αεροστεγώς, από την οποία δίνεται δυνατότητα επέμβασης στο εσωτερικό του θαλάμου και να στερεωθεί ο καμβά.

### 2.1.2. Λειτουργία Θαλάμου

Σε αυτό το σημείο αναλύεται η αρχή λειτουργίας του θαλάμου δοκιμών. Αρχικά στερεώνεται το έργο τέχνης πάνω στην διάτρητη βάση του καμβά (Εικόνα 1.(β)). Σε περιπτώσεις που ο καμβάς δεν έχει ακριβώς το ίδιο πλάτος και ύψος με τον θάλαμο, δηλαδή είναι μικρότερος σε σχέση με το εσωτερικό του θαλάμου, η ομαλή ροή του ρευστού σε όλο το μήκος του θαλάμου επιτυγχάνεται με την χρήση διάτρητη λαμαρίνας. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο παίζει η τοποθέτηση του καμβά που θα πρέπει να είναι τοποθετημένος ακριβώς στο κέντρο της βάσης και μείνει περιμετρικά ίσο κενό σε όλες τις διαστάσεις, από το οποίο το εισερχόμενο ρευστό θα περάσει στο πίσω μέρος του καμβά και του θαλάμου και θα οδηγηθεί στην έξοδο. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας ο καμβάς που χρησιμοποιείται είναι διαστάσεων 40x30 cm και το κενό που αφήνεται περιμετρικά είναι 0.5 cm.

Μετά την προσεκτική τοποθέτηση του καμβά στο κέντρο της βάσης με φορά προς την είσοδο του αερίου, ασφαρίζεται αεροστεγώς η πίσω πόρτα και μόνο τότε μπορεί να εισαχθεί το ρευστό. Στις σωλήνες εισόδου του ρευστού (Εικόνα 2.(γ)), 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 μετρείται η συγκέντρωση του αερίου και μπορούν να εξαχθούν τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων.

## 2.2. Μοντελοποίηση

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 επιτευχθούν όσο δυνατόν πιο ακριβή αποτελέσματα. Στο υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την παρούσα εργασία η γεωμετρία μπορεί είτε να εισαχθεί έτοιμη από διαφορετικό σχεδιαστικό πρόγραμμα, είτε να δημιουργηθεί από τον χρήστη εντός του προγράμματος. Στην παρούσα περίπτωση απαιτείται ο σχεδιασμός ενός πιστού αντίγραφου του θαλάμου δοκιμών αλλά και του καμβά που θα τοποθετηθεί εντός του θαλάμου. Ο σχεδιασμός πραγματοποιείται με το σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks και στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή της γεωμετρίας του στο Fluent.



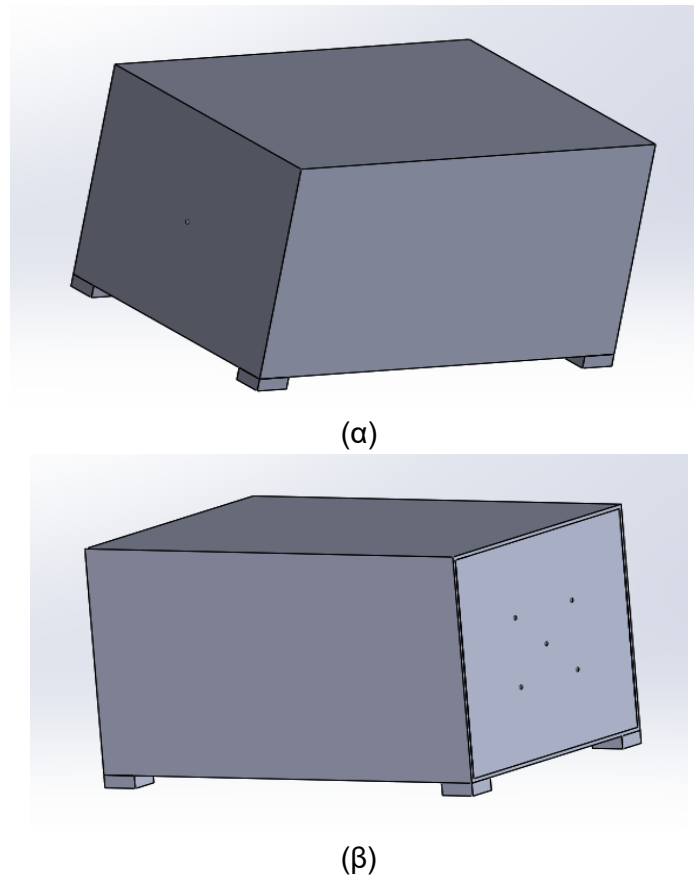


### 2.2.1. Σχεδιασμός Θαλάμου με Solidworks

Το Solidworks είναι ένα 3D μηχανολογικό Computer Aided Design (CAD) και λειτουργεί σε Microsoft Windows. Το Solidworks είναι προϊόν της Dassault Systèmes SolidWorks Corp., θυγατρική της Dassault Systèmes S. A.. Ιστορικά, η SolidWorks Corporation ιδρύθηκε το 1993 από τον Jon Hirschtick με έδρα το Waltham, Μασαχουσέτη, ΗΠΑ, ο οποίος δημιούργησε μια ομάδα από μηχανικούς για την οικοδόμηση μιας εταιρείας που ανέπτυξε 3D CAD λογισμικό, βατό στη χρήση, σχετικά οικονομικό και διαθέσιμο στην επιφάνεια εργασίας των Windows. Το πρώτο της προϊόν, SolidWorks 95 κυκλοφόρησε το 1995. Η SolidWorks σήμερα κυκλοφορεί διάφορες εκδόσεις του CAD λογισμικού SolidWorks, καθώς και τα eDrawings (εργαλείο συνεργασίας) και DraftSight (2D CAD). Το 1997 η Dassault Systèmes S.A., γνωστή για το CATIA CAD λογισμικό της, απέκτησε την εταιρεία και αυτή τη στιγμή κατέχει το 100% των μετοχών της [17].

Η εφαρμογή SolidWorks είναι ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης και παρέχει την δυνατότητα αποθήκευσης πληροφοριών σχετικά με το μοντέλο, με στόχο να εισάγει και να αποθηκεύει άλλες μορφές αρχείων (π.χ. PDF) με στόχο την άμεση προβολή στο εσωτερικό του προγράμματος. Τα σύγχρονα συστήματα σχεδιασμού με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή στηρίζονται στη τρισδιάστατη μοντελοποίηση. Η τρισδιάστατη απαιτείται για την παρουσίαση, την ανάλυση της συμπεριφοράς του αντικειμένου και για την παραγωγή του [17].

Ο θάλαμος δοκιμών (Εικόνα 3) σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Solidworks.



Εικόνα 3: Σχεδιασμός α) πίσω όψη πρότυπου θαλάμου και β) εμπρός όψη πρότυπου θαλάμου με το υπολογιστικό πρόγραμμα Solidworks



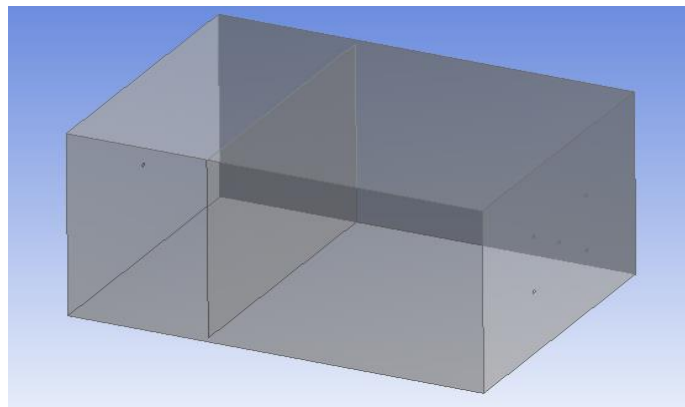
Αρχικά ο σχεδιασμός έγινε σε μεμονωμένα parts σύμφωνα με τις διαστάσεις που είχε ο πρότυπος στο εργαστήριο και στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα αρχείο assembly. Το συγκεκριμένο αρχείο έχει αποθηκευτεί με τη μορφή .iges έτσι ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή του στο Fluent.

### 2.2.2. Εισαγωγή Γεωμετρίας στο Fluent

Η εισαγωγή του αρχείου έγινε στο Fluent ως εξής:

File → Import External Geometry File → Επιλογή αρχείου γεωμετρίας

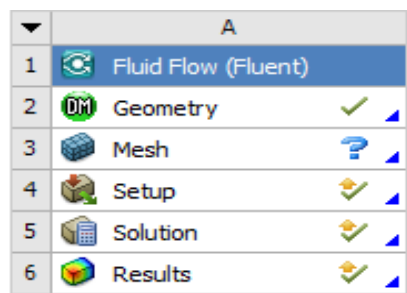
Διακρίνεται ότι έχει τροποποιηθεί το κουτί και έχει αφαιρεθεί τα στηρίγματα από το κάτω μέρος του θαλάμου διότι ενώ δεν υπήρξαν αλλοιώσεις στους υπολογισμούς, παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση του χρόνου των υπολογισμών (Εικόνα 4). Η αδυναμία επιλογής των επιφανειών ξεχωριστά, για τον ορισμό συνοριακών συνθηκών αργότερα, σε συνδυασμό με την μη δυνατότητα επιλογής μηδενικού πάχους στα τοιχώματα του θαλάμου οδηγούν στην απόρριψη του συγκεκριμένου σχεδίου και στην επιλογή του σχεδιασμού εκ νέου μέσα από το Fluent.



Εικόνα 4: Εισαγωγή γεωμετρίας στο Fluent.

### 2.2.3. Σχεδιασμός Γεωμετρίας Θαλάμου

Αρχικά γίνεται έναρξη του προγράμματος (Workbench project page) και επιλέγεται η καρτέλα geometry (Εικόνα 5) όπου στη συνέχεια επιλέγεται το κατάλληλο plane με στόχο τον σχεδιασμό του καμβά.



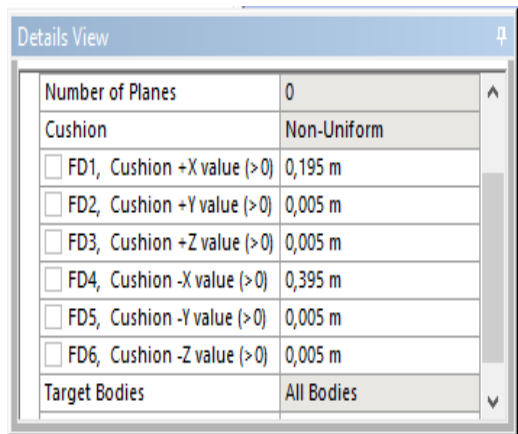
Εικόνα 5: Πρόγραμμα Fluent - Geometry



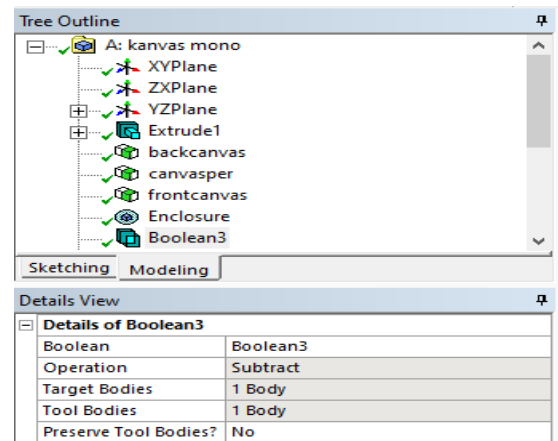


Μετά την επιλογή του κατάλληλο plane, στην παρούσα περίπτωση το y,z, δίνεται το πλάτος και το ύψος του θαλάμου και γίνεται extrude στον άξονα x. Στην συνέχεια ορίζεται το πάχος του καμβά 1cm. Η δημιουργία του πρότυπου θαλάμου θα γίνει με τον ορισμό του ως μορφή enclosure. Έτσι για να εισάγουμε τον καμβά στο θάλαμο ακολουθούμε τα εξής βήματα:

Tools→ Enclosure



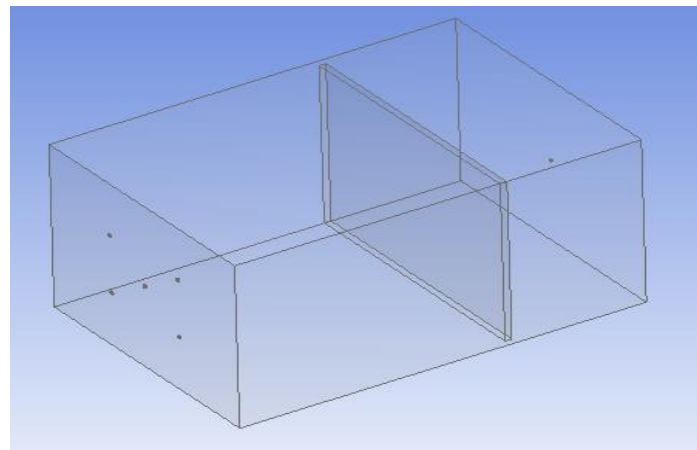
Εικόνα 6: Συντεταγμένες για τη δημιουργία του enclosure



Εικόνα 7: Εντολή Boolean (subtract).

Στην Εικόνα 6 απεικονίζεται ο πίνακας όπου επιλέγονται οι κατάλληλες συντεταγμένες σύμφωνα με την αρχή των αξόνων που έχουν οριστεί στο σημείο που βρίσκεται ο καμβάς. Στη συνέχεια αφαιρείται ο καμβάς μέσα από την «περίφραξη» (enclosure) που δημιουργήθηκε με την εντολή Boolean. Επιλέγεται δηλαδή, ως target body το enclosure και ως tool body τον καμβά και πραγματοποιείται η αφαίρεση (subtract) (Εικόνα 7). Ο λόγος που πραγματοποιούνται τα ανωτέρω είναι διότι η ροή πρέπει να περνάει μέσα από το θάλαμο και από τα κενά περιμετρικά του καμβά αλλά όχι μέσα από τον ίδιο.

Στην συνέχεια δημιουργούνται οι οπές εισόδου και εξόδου του ρευστού. Η διαδικασία σχεδιασμού της γεωμετρίας του κομματιού έχει ολοκληρωθεί (Εικόνα 8).



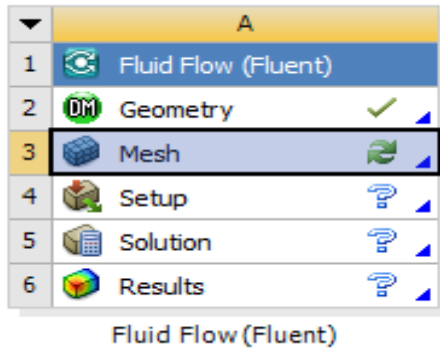
Εικόνα 8: Ολοκληρωμένη δημιουργία γεωμετρίας στο fluent.



Σε αυτό το σημείο δίνεται η δυνατότητα κλεισίματος του παραθύρου σχεδίασης (design modeler) και γίνεται επιστροφή στην επιφάνεια εργασίας (Workbench project page).

### 2.3. Δημιουργία Υπολογιστικού Πλέγματος

Η έναρξη της διαδικασίας κατασκευής πλέγματος (meshing) πραγματοποιείται από την καρτέλα της επιφάνειας εργασίας (Workbench project) όπου και επιλέγεται με διπλό κλικ το πεδίο mesh (Εικόνα 9).



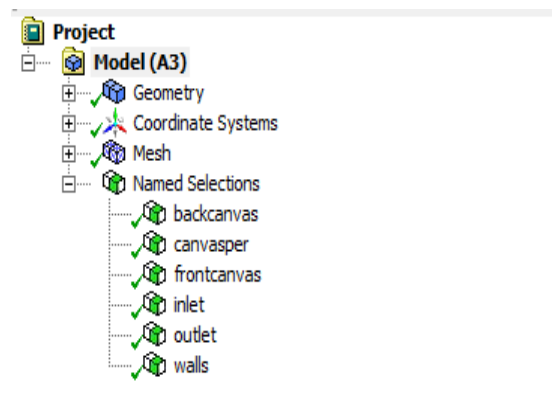
Εικόνα 9: Πρόγραμμα fluent-mesh.

#### 2.3.1. Ονομασία Περιοχών

Αρχικά πριν την διαδικασία δημιουργίας πλέγματος (mesh) απαιτείται η ονοματοδοσία των περιοχών του προβλήματος, με στόχο να δοθεί η δυνατότητα να ορισθεί η διακριτοποίηση του πλέγματος καθώς επίσης και η συνοριακές συνθήκες των επόμενων βημάτων. Η επιλογή κάθε περιοχής γίνεται με δεξί κλικ, δημιουργία ονομασία επιλογής (create named selection) και καταγράφεται το κατάλληλο όνομα.

Στην περίπτωση του παρόντος προβλήματος (Εικόνα 10) επιλέχθηκαν τα ακόλουθα:

- Inlet: Πέντε οπές εισόδου του ρευστού
- Outlet: Όπη εξόδου του ρευστού
- Front canvas: Εμπρός όψη του καμβά
- Back canvas: Πίσω όψη του καμβά
- Canvasper: Περίμετρο του καμβά
- Walls: Τοιχώματα του θαλάμου (4)

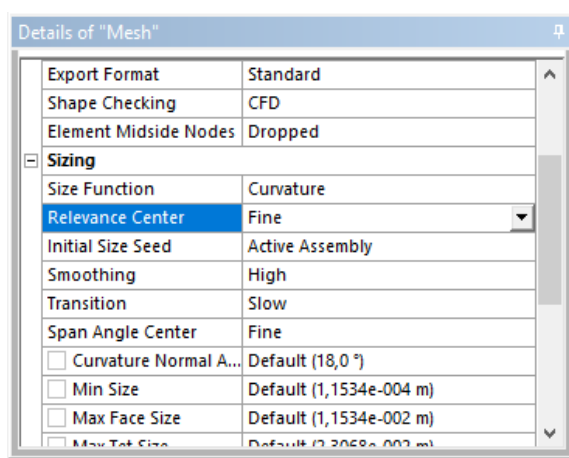


Εικόνα 10: Ονοματισμένες περιοχές του προβλήματος.

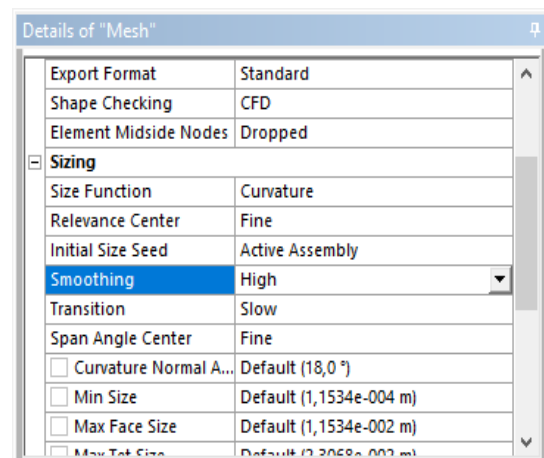


### 2.3.2. Διακριτοποίηση

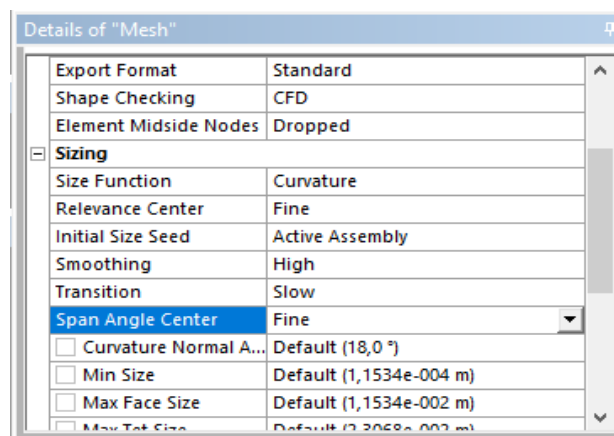
Αφού ορίστηκε η γεωμετρία του προβλήματος, δημιουργείται ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο στη συνέχεια πυκνώνεται στα σημεία όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην ουσία το πλέγμα είναι το σύνολο των πεπερασμένων όγκων της γεωμετρίας που έχει διακριτοποιηθεί. Στο πρόβλημα που μελετάται τα σημεία που έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι τα σημεία εισόδου και εξόδου του ρευστού όπως και η εμπρόσθια και οι περιμετρικές πλευρές του καμβά. Σύμφωνα με τα ανωτέρω θα πρέπει στα προαναφερόμενα σημεία να υπάρχει πιο πυκνό πλέγμα με σκοπό την διεξαγωγή σαφέστερων αποτελεσμάτων. Σημειώνεται ότι στα σημεία αυτά διακρίνονται μεταβολές στην πίεση και στη ταχύτητα του ρευστού. Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικές ρυθμίσεις βελτιστοποίησης της διακριτοποίησης σε σχέση με τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του εξομοιωτή (Εικόνα 11).



(α)



(β)

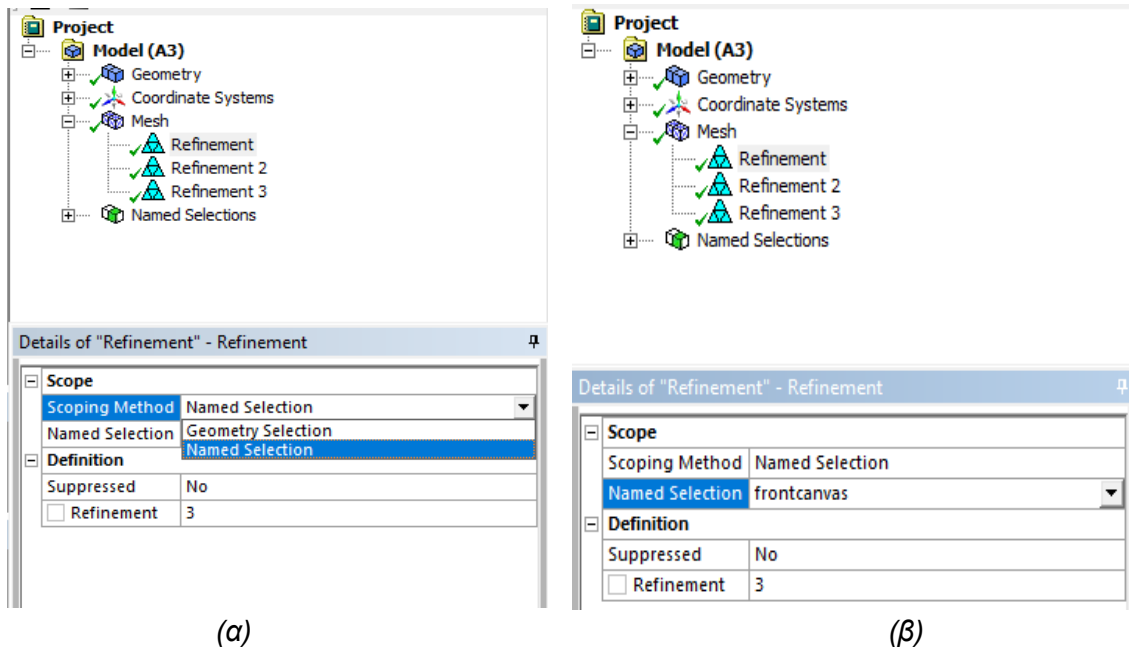


(γ)

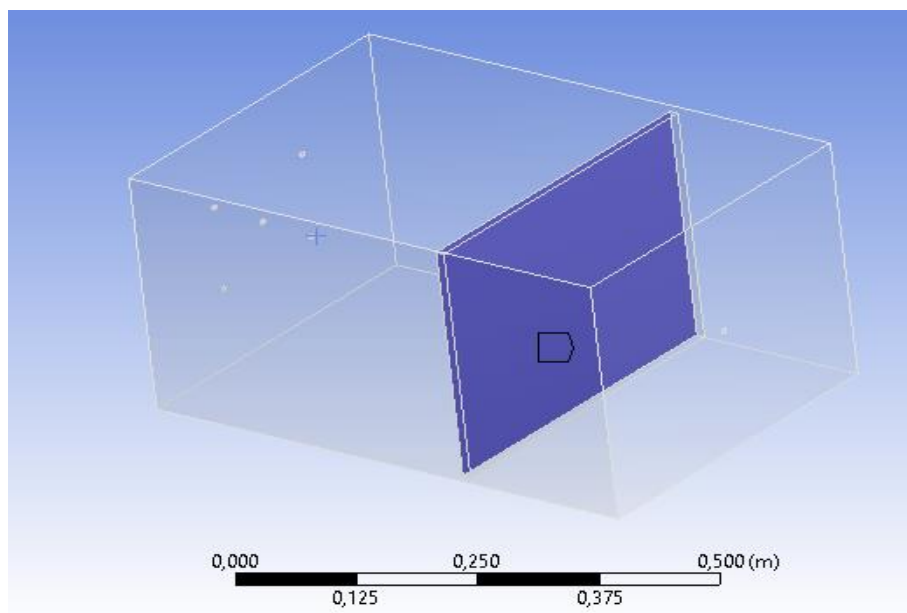
Εικόνα 11: Ρυθμίσεις βελτιστοποίησης της διακριτοποίησης σε σχέση με τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του εξομοιωτή (α) Relevance center, (β) Smoothing και (γ) Span angle center.



Η πύκνωση του πλέγματος στ σημεία ενδιαφέροντος πραγματοποιείται με την εντολή είτε inflation είτε refinement. Όπου πρώτα χρησιμοποιήθηκε η εντολή inflation αλλά δεν λήφθηκαν ικανοποιητικά αποτελέσματα με συνέπεια να χρησιμοποιηθεί η refinement. Η διαδικασία ολοκληρώνεται ως εξής αρχικά επιλέγεται η μέθοδος οριοθέτησης (scoring method) και στη συνέχεια ονομαστική επιλογή (named selection) (Εικόνα 12.α). Έπειτα επιλέγεται η πρώτη περιοχή ενδιαφέροντος (Εικόνα 12.β), η οποία είναι η εμπρόσθια πλευρά του καμβά (Εικόνα 13).



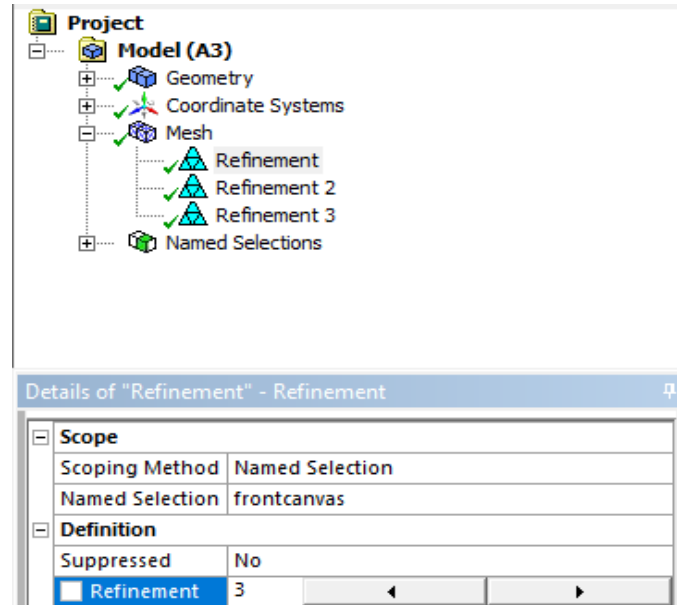
Εικόνα 12: α) Τρόπος επιλογής περιοχής και β) επιλογή της εμπρόσθιας όψης του καμβά



Εικόνα 13: Προβολή εμπρόσθιας όψης του καμβά.

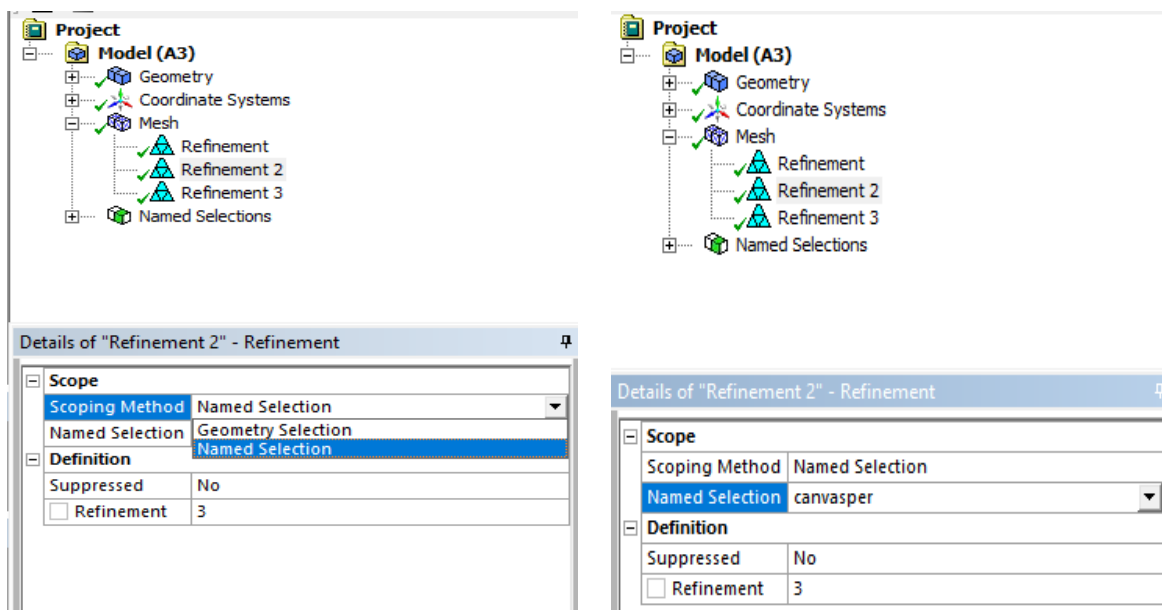


Ωστόσο, επειδή το κύριο αντικείμενο μελέτης του προβλήματος είναι ο καμβάς, στη συνέχεια επιλέγεται η όψη ενδιαφέροντος και ορίζεται ο μέγιστος βαθμός πύκνωσης σε αυτή την περιοχή. Στην περίπτωση του refinement ο αριθμός αυτός είναι το τρία (3) (Εικόνα 14).

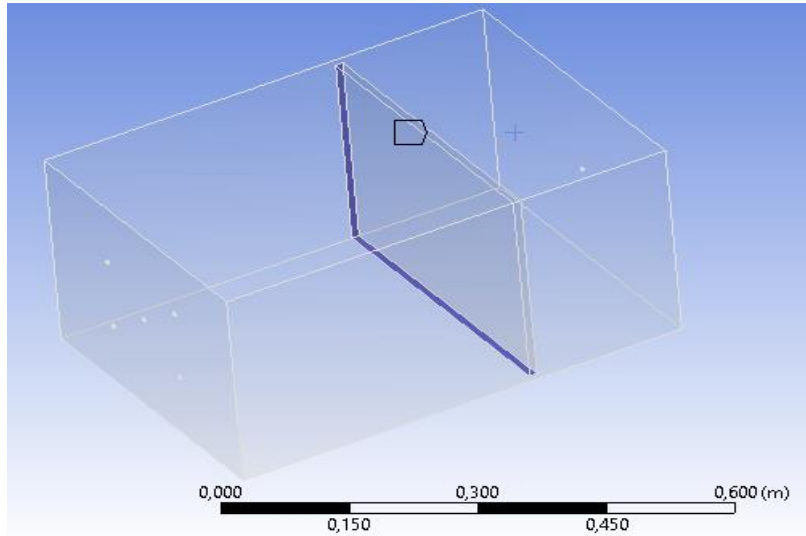


Εικόνα 14: Βαθμός πύκνωσης πλέγματος.

Η διαδικασία ολοκληρώνεται ως εξής, αρχικά επιλέγεται η μέθοδος οριοθέτησης (scoping method) και στη συνέχεια ονομαστική επιλογή (named selection) (Εικόνα 15.α). Έπειτα επιλέγεται η πρώτη περιοχή ενδιαφέροντος (Εικόνα 15.β), την οποία αποτελεί ο χώρος περιμετρικά του καμβά (Εικόνα 16).

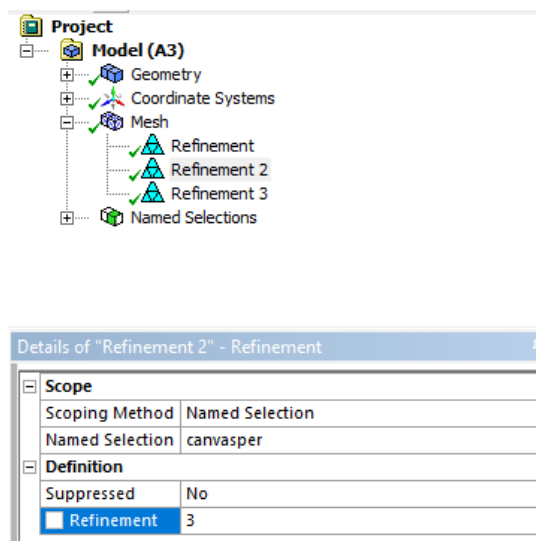


Εικόνα 15: α) Τρόπος επιλογής δεύτερης περιοχής και β) επιλογή περιμετρικής όψης καμβά.



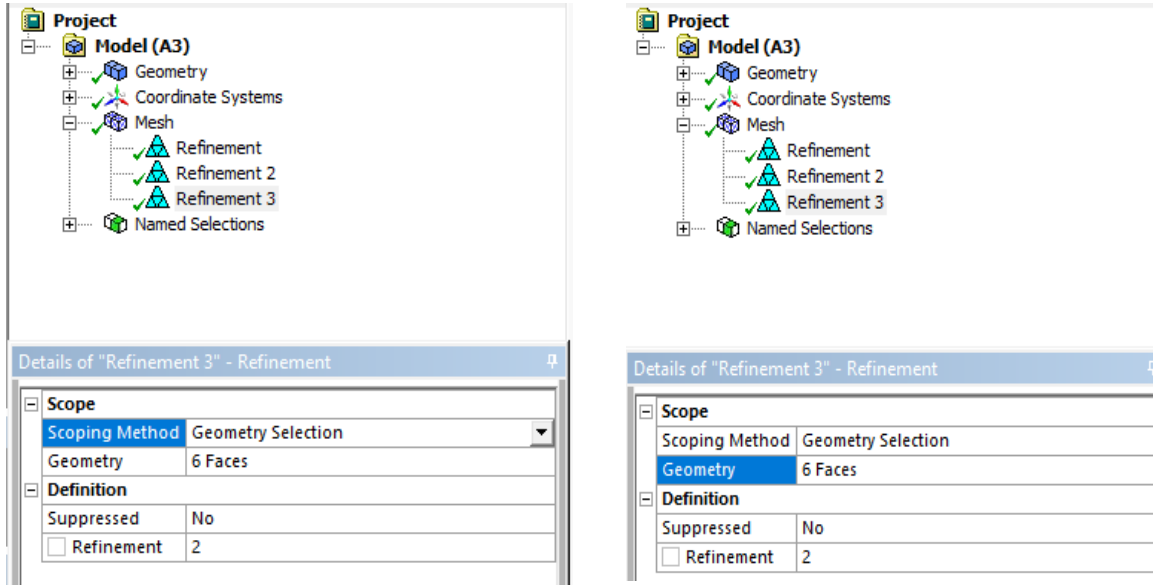
Εικόνα 16: Προβολή περιμετρικής όψης καμβά.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στην επόμενη περιοχή ενδιαφέροντος, όπου και εδώ ορίζεται ο μέγιστος βαθμός πύκνωσης. Στην περίπτωση του refinement ο αριθμός αυτός είναι το 3 (Εικόνα 17).

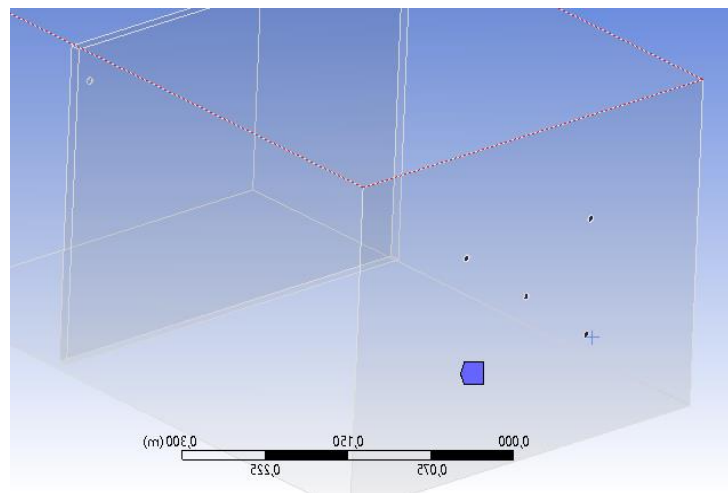


Εικόνα 17: Βαθμός πύκνωσης πλέγματος.

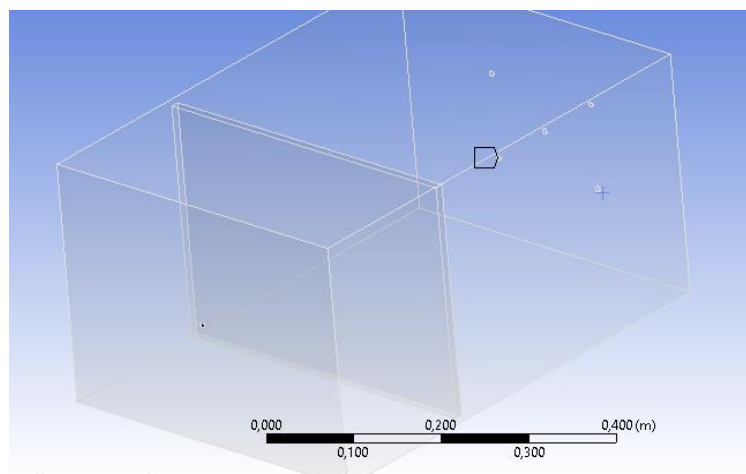
Η διαδικασία ολοκληρώνεται ως εξής, αρχικά επιλέγεται η μέθοδος οριοθέτησης (scoping method) και στη συνέχεια γεωμετρία επιλογής (geometry selection) (Εικόνα 18.α). Έπειτα επιλέγεται η περιοχή ενδιαφέροντος (Εικόνα 18.β), η οποία είναι οι οπές εισόδου και εξόδου του ρευστού (Εικόνα 19).



Εικόνα 18: α) Τρόπος επιλογής τρίτης περιοχής και β) επιλογή οπών εισόδου – εξόδου.



(α)



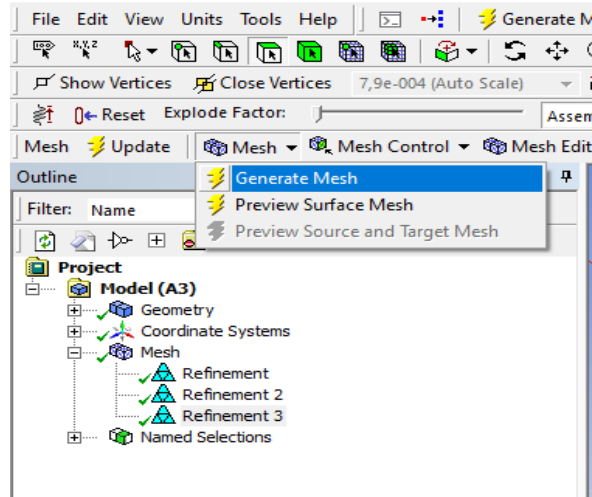
(β)

Εικόνα 19: Προβολή οπών α) εισόδου και β) εξόδου

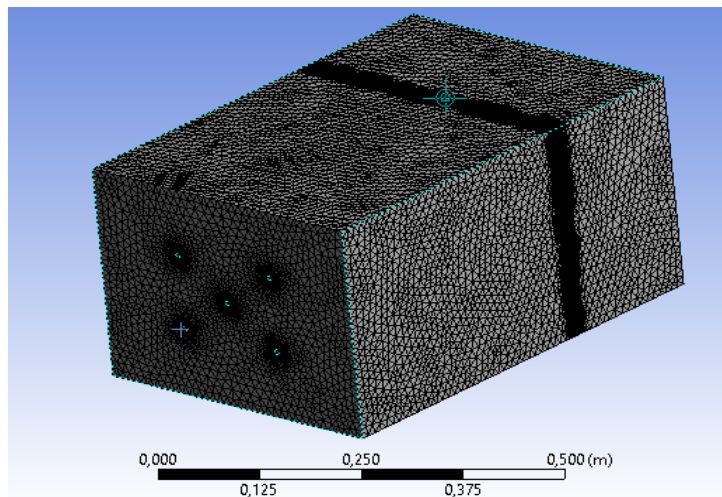




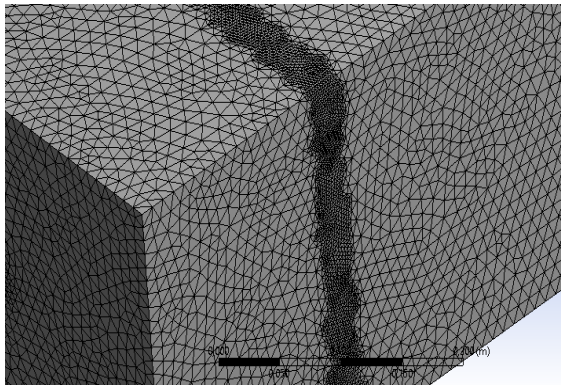
Αφού ολοκληρωθεί η διαστασιολόγηση του προβλήματος, θα πρέπει να δημιουργηθεί το πλέγμα. Αυτό θα επιτευχθεί ως εξής: κλικ στο mesh → generate mesh (Εικόνα 20) και λαμβάνονται τα εξής αποτελέσματα (Εικόνα 21).



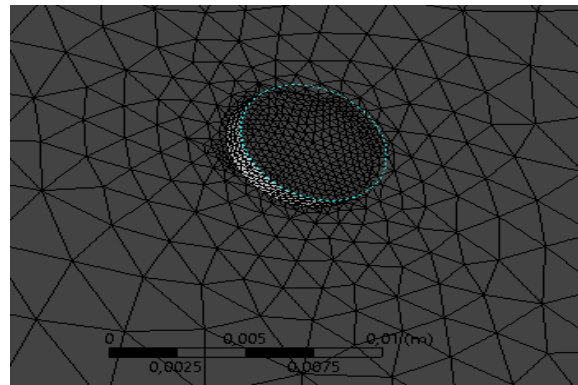
Εικόνα 20: Δημιουργία mesh



(α)



(β)



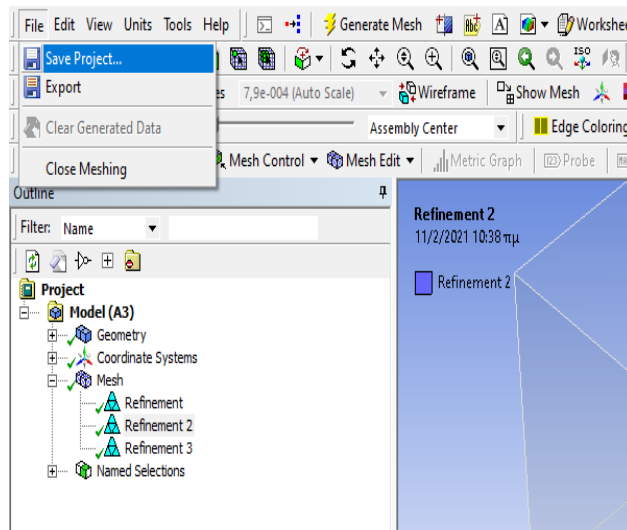
(γ)

Εικόνα 21: α) Διακριτοποίηση θαλάμου προσομοίωσης β) εστίαση στη διακριτοποίηση της περιοχής β) του καμβά και γ) των οπών





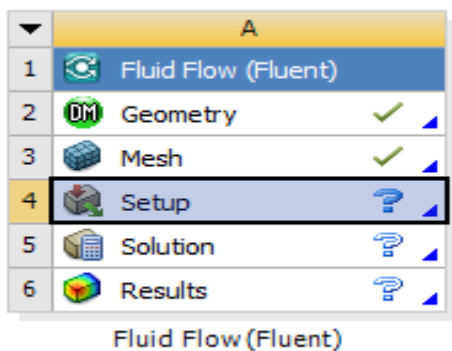
Τέλος, από στη καρτέλα file → save project (Εικόνα 22) και αφού έχει πραγματοποιηθεί αποθήκευση του προγράμματος, δίνεται η δυνατότητα κλεισίματος του παραθύρου του mesh.



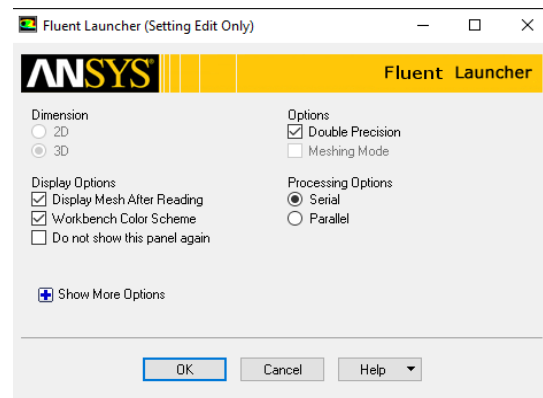
Εικόνα 22: Αποθήκευση επιλογών

## 2.4. Έναρξη Υπολογιστικού Προγράμματος Fluent

Ακολουθεί το κομμάτι του setup. Στην επιφάνεια εργασίας (Workbench Project Page) γίνεται διπλό κλικ στην επιλογή setup (Εικόνα 23) και εμφανίζεται ένα παράθυρο Fluent Launcher (Εικόνα 24) στο οποίο επιλέγεται double precision και στη συνέχεια “OK” (κάτω μέρος παραθύρου).



Εικόνα 23: Πρόγραμμα Fluent- setup



Εικόνα 24: Αποδοχή επιλογής double precision

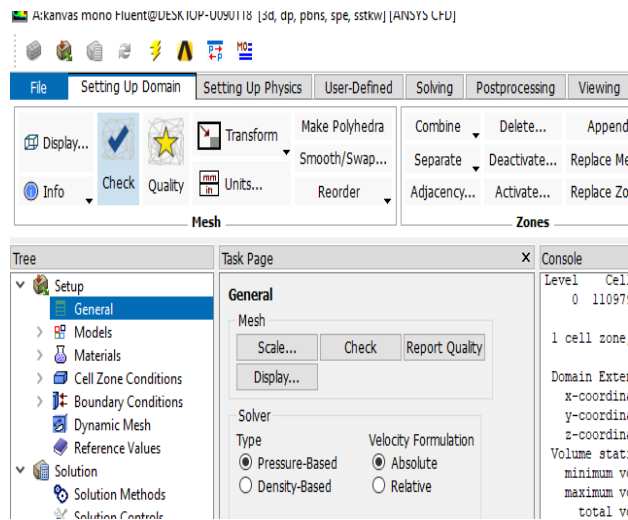
Σημειώνεται ότι με την επιλογή της διπλής ακρίβειας στην επίλυση του προβλήματος μας, κάθε αριθμός αντιπροσωπεύεται από 64 bits, ενώ στις μονής ακρίβειας επίλυση, αντιπροσωπεύεται από 32 bits. Ο μεγαλύτερος αριθμός bits προϋποθέτει μεν μεγαλύτερη



μνήμη στον υπολογιστή αλλά αυξάνει την ακρίβεια και το εύρος των μεγεθών τα οποία αντιπροσωπεύονται στο πρόβλημα [16].

#### 2.4.1. Έλεγχος Mesh και Στατιστικά Στοιχεία

Αρχικά αφού ανοίξει το παράθυρο του setup, ελέγχεται το mesh για επιβεβαίωση ότι έχει γίνει άρτια εισαγωγή από το Workbench. Ελέγχονται πιθανά λάθη στο πλέγμα, επιλέγοντας την καρτέλα Setting Up Domain → Check (Εικόνα 25). Στο κομμάτι του command του προγράμματος (Εικόνα 26) παρατηρείται πως έχει ολοκληρωθεί ο έλεγχος και δεν έχει εμφανιστεί κάποιο μήνυμα σφάλματος.

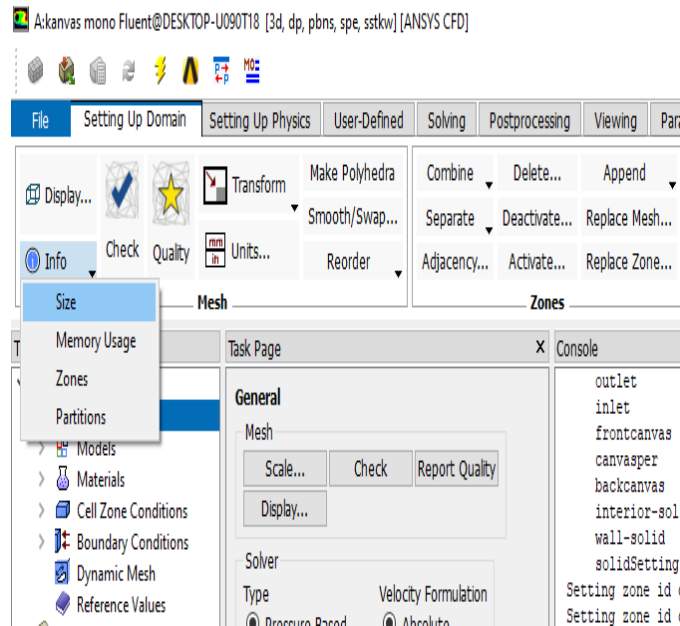


Εικόνα 25: Επιλογή ελέγχου πλέγματος.

```
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 26: Αποτελέσματα ελέγχου πλέγματος.

Στη συνέχεια επιλέγοντας την καρτέλα Setting Up Domain → Info → Size (Εικόνα 27) διακρίνονται τα στατιστικά στοιχεία της διακριτοποίησης (Εικόνα 27).



Εικόνα 27: Επιλογή για προβολή στατιστικών σημείων.

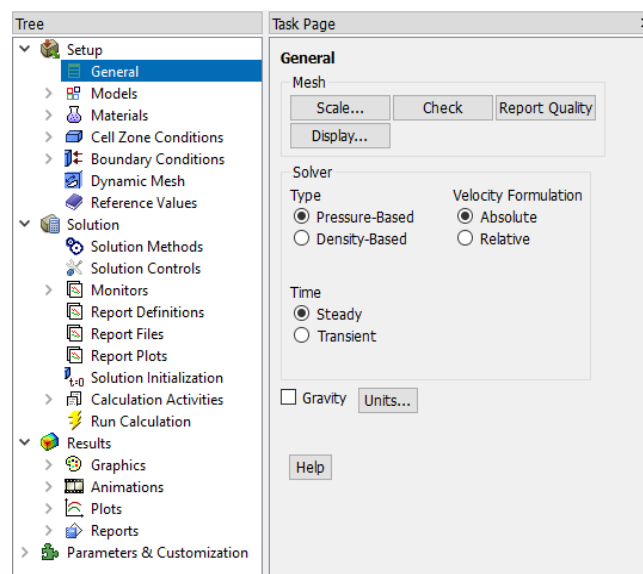
Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	1109791	2260337	207172	1

1 cell zone, 7 face zones.

Εικόνα 28: Στατιστικά στοιχεία.

## 2.4.2. Επιλογή Λύτη

Στην καρτέλα General στο παράθυρο του setup, ορίζεται ο τύπος του λύτη (solver) κάνοντας κλικ στην επιλογή pressure based (Εικόνα 29).



Εικόνα 29: Επιλογή τύπου λύτη και ροής



Παρατείνεται ότι έναντι του density based λόγω αφενός της ευελιξίας του στη λύση ρευστοδυναμικών μοντέλων και αφετέρου λόγω του ότι η ροή είναι ασυμπιεστή. Ο αριθμός Mach υπολογίστηκε από την σχέση:

$$Ma = \frac{u}{c} \quad [2.1]$$

Όπου:

$c$  = η ταχύτητα του ήχου σε Κ.Σ.

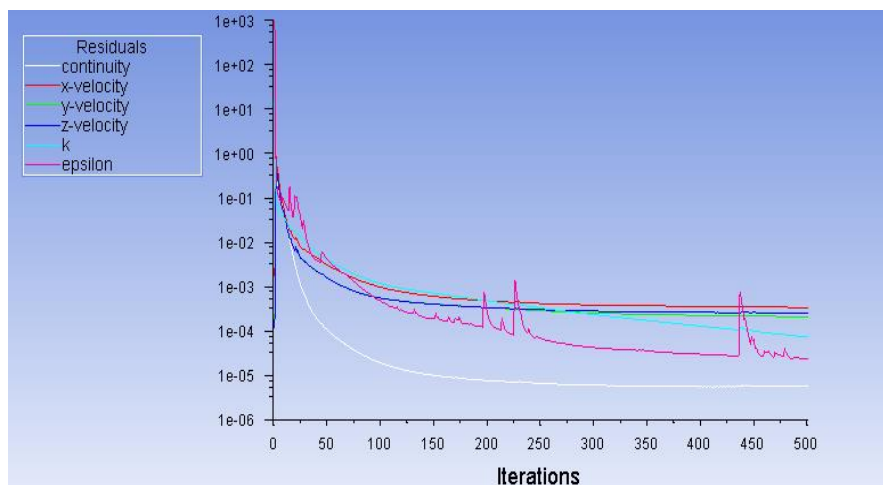
Τα αποτελέσματα οδήγησαν σε αριθμό Mach μικρότερο από 0.02. Φαινόμενο συμπίεστης θα υπήρχε για αριθμό Mach μεγαλύτερο του 0.2, οπότε τότε θα ήταν επιβεβλημένη η χρήση του συμπιεστού ροϊκού μοντέλου (density based). Επίσης, επειδή η ροή του αερίου στο πρόβλημα που μελετάται είναι μόνιμη, πρέπει να καθοριστεί ο χρόνος ως σταθερός. Έτσι στον όρο Time επιλέγεται η εντολή Steady (Εικόνα 28).

### 2.4.3. Επιλογή Ροϊκού Μοντέλου

Όπως προαναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, 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 εκάστοτε πρόβλημα. Μια λανθασμένη επιλογή μοντέλου, θα οδηγήσει σε μη αξιόπιστα αποτελέσματα και πιθανόν σε αδυναμία σύγκλισης της λύσης. Στην παρούσα περίπτωση μελετήθηκαν δύο διαφορετικά προβλήματα, α) απλή μόνιμη ροή και β) παροχή μάζας. Η διαφορά που διακρίνεται μεταξύ τους είναι το προγραμματιστικό κομμάτι, συγκεκριμένα στην επιλογή των μοντέλων και των συνοριακών συνθηκών. Τα ιδανικά μοντέλα για την ροή που έχουμε στο δικό μας πρόβλημα είναι το k-ε και το k-ω SST.

#### ➤ Μοντέλο standard k-ε

Η λύση του μοντέλου standard k-ε δεν είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα ως προς τη σύγκλιση (Διάγραμμα 1).

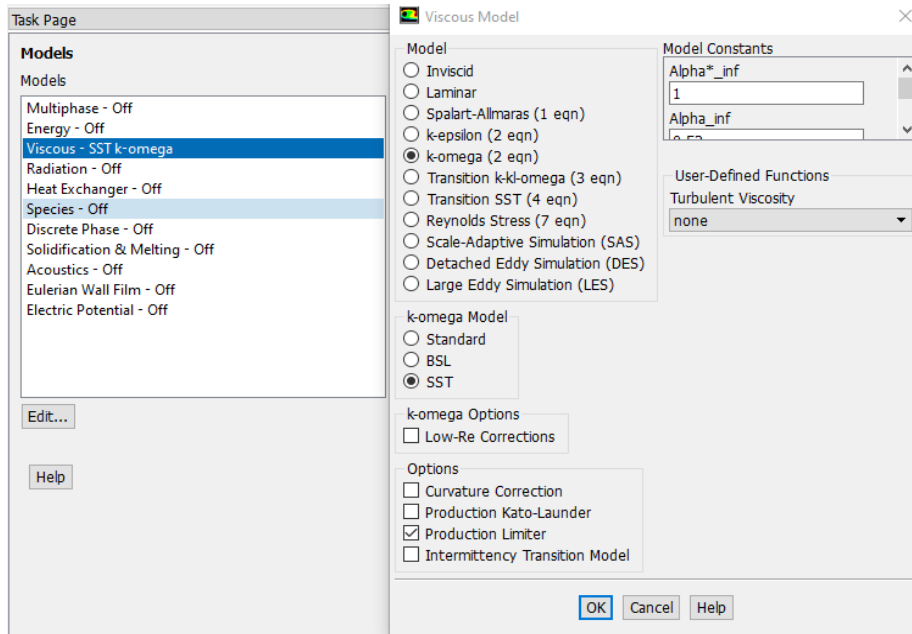


Διάγραμμα 1: Μοντέλο standard k-ε.



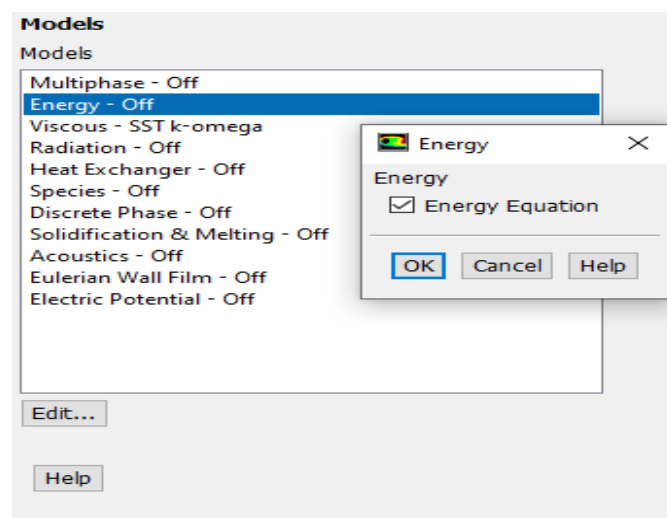
### ➤ Μοντέλο $k-\omega$ SST

Στη πραγματοποιείται επίλυση και για τα δύο προβλήματα με το μοντέλο  $k-\omega$  SST (Εικόνα 30). Στο πρόβλημα της απλής ροής, Επιλέγεται ροϊκό μοντέλο, και ακολουθεί ο ορισμός των συνοριακών συνθηκών.

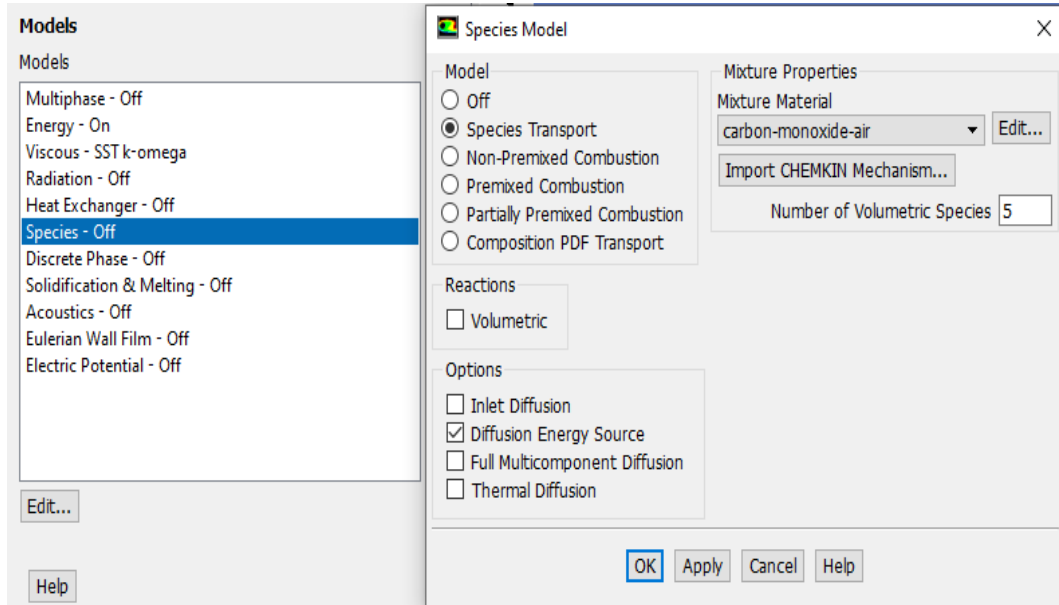


Εικόνα 30: Επιλογή μοντέλου  $k-\omega$  SST.

Ωστόσο, στο πρόβλημα ροής με παροχή μάζας, πέρα από το ροϊκό μοντέλο, πρέπει να ενεργοποιηθεί το μοντέλο της ενέργειας (Εικόνα 31) και το species transport επιλέγοντας το μονοξείδιο του άνθρακα σαν μείγμα (Εικόνα 32)



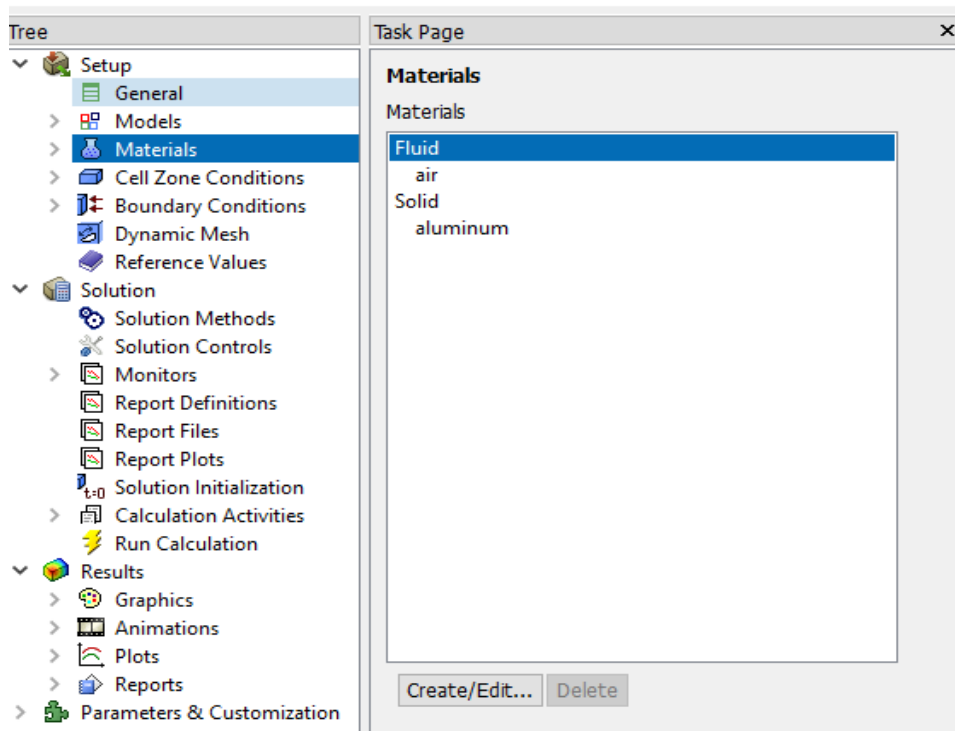
Εικόνα 31: Ενεργοποίηση μοντέλου ενέργειας.



Εικόνα 32: Επιλογή species transport.

#### 2.4.4. Καθορισμός υλικών και ιδιοτήτων

Ακολουθεί ο καθορισμός των υλικών που αποτελούν το πρόβλημα της περίπτωσης μελέτης. Τα υλικά τα οποία επιλέγονται για το θάλαμο προσομοίωσης είναι το προκαθορισμένο στερεό (solid)→ aluminum και ως ρευστό (fluid)→air (Εικόνα 33). Σημειώνεται ότι τα υλικά τα είναι ίδια και στα δύο προβλήματα.

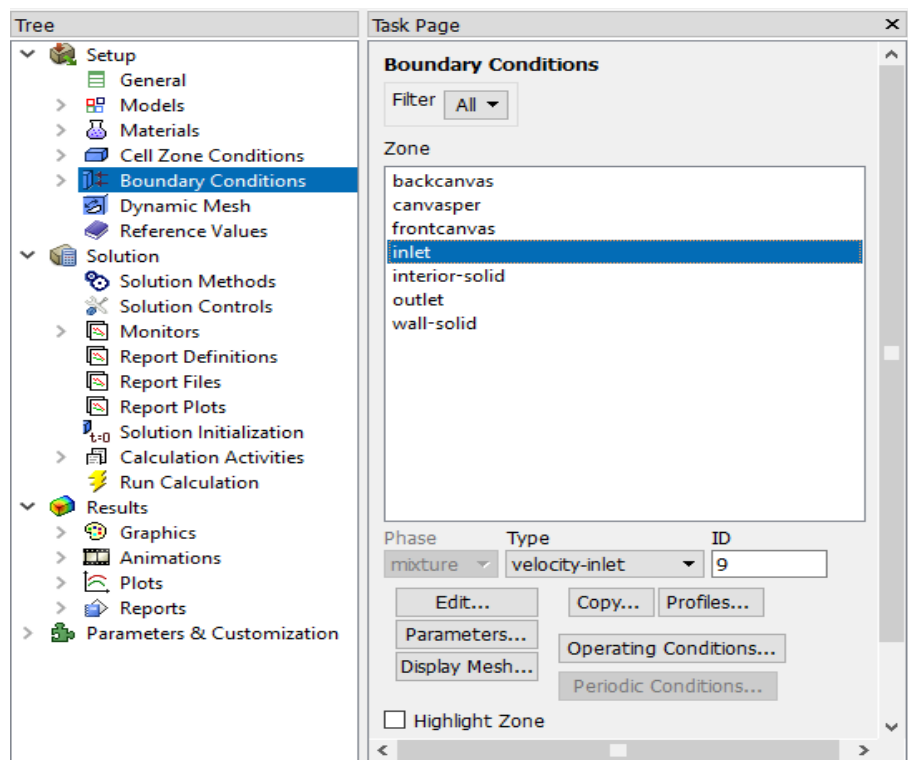


Εικόνα 33: Καθορισμός υλικών



### 2.4.5. Συνοριακές συνθήκες

Σε αυτό το κομμάτι προσδιορίζονται τα δεσμευτικά στοιχεία για τις ονοματισμένες επιφάνειες που επιθυμείται να μελετηθούν. Με αυτό τον τρόπο, θέτοντας δηλαδή τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες πίεσης και ταχύτητας, ορίζεται η ροή του αέρα μέσα στο θάλαμο προσομοίωσης. Με την μετάβαση στο παράθυρο του Setup και κάνοντας κλικ στην καρτέλα Boundary Conditions επιλέγεται κάθε επιφάνεια ξεχωριστά και στη συνέχεια μπορεί να ορισθεί η συνθήκη που επιθυμείται. Η έναρξη της διαδικασίας γίνεται με την είσοδο του ρευστού στον θάλαμο προσομοίωσης, την οποία αποτελούν οι πέντε οπές και την έχουμε ονομάσει ως inlet (Εικόνα 34).



Εικόνα 34: Επιλογή εισόδου ως περιοχή για συνοριακή συνθήκη.

Σε αυτήν λοιπόν την περιοχή σαν συνθήκη ορίζεται η ταχύτητα εισόδου του ρευστού. Ως αρχικό δεδομένο είναι η πυκνότητα και η παροχή μάζας του ρευστού, οπότε πρώτο βήμα είναι υπολογισμός της ταχύτητας.

Ορισμός αρχικών δεδομένων:

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

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

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



Η σχέση για την ογκομετρική παροχή μάζας είναι:

$$\dot{m} = \rho_{atm} \cdot Q \quad [2.2]$$

Η εξίσωση συνέχεια δίνεται από την σχέση:

$$Q = A \cdot u \quad [2.3]$$

Αντικαθιστώντας την ογκομετρική παροχή μάζας [2.2] στην εξίσωση συνέχειας [2.3] προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\dot{m} = \rho_{atm} \cdot A \cdot u \Rightarrow \dot{m} = \rho_{atm} \cdot A \cdot u \Rightarrow u = \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho_{atm}} \quad [2.4]$$

Ωστόσο, λόγω ότι οι οπές είναι πέντε η σχέση [2.4] γίνεται

$$u = \frac{1}{5} \cdot \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho_{atm}} \quad [2.5]$$

Όπου:

- $\dot{m}$  : Στιγμιαία παροχή μάζας ρευστού [lit/min]
- $\rho_{atm}$  : Πυκνότητα ατμοσφαιρικού αέρα [kg/m<sup>3</sup>]
- $Q$  : Ογκομετρική παροχή [m<sup>3</sup>/sec]
- $u$  : Μέση ταχύτητα εισόδου [m/sec]
- $d$  : διατομή οπών στην είσοδο και στην έξοδο [m]
- $A$  : Επιφάνεια διατομής [m<sup>2</sup>]

Επιπλέον όπου:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.00635^2}{4} [m^2] \quad [2.6]$$

$$\dot{m} = 12 \frac{lt}{min} = 12 * \frac{10^{-3}}{60} * \frac{m^3}{sec} = 0.2 * 10^{-3} \frac{kg}{sec} = 2 * 10^{-4} \frac{kg}{sec} \quad [2.7]$$

Πραγματοποιώντας αντικατάσταση των δεδομένων και των ανωτέρω στη σχέση [2.5] προκύπτουν τα ακόλουθα:

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

Για τον υπολογισμό του αριθμού Reynolds χρησιμοποιείται η σχέση:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} \quad [2.8]$$

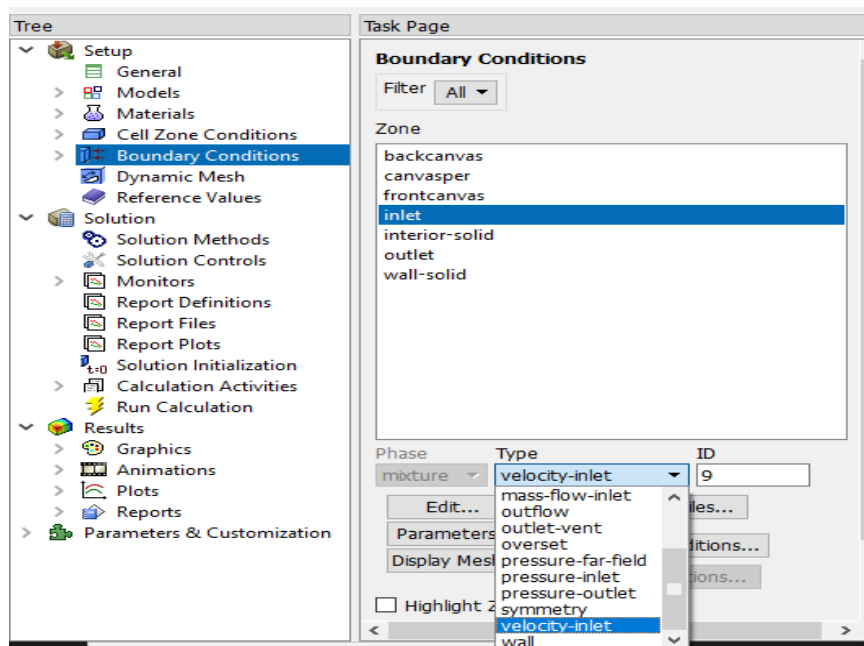




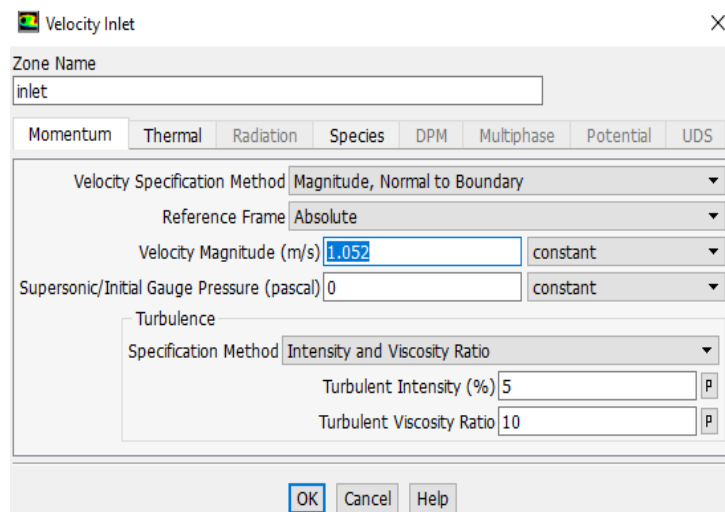
Πραγματοποιώντας αντικατάσταση της ταχύτητας

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

Μετά την ταχύτητα εισόδου του ρευστού, δίνεται η δυνατότητα ορισμού της στο πρόγραμμα. Επιλέγεται στην περιοχή inlet, και γίνεται κλικ στο Type που υπάρχει στο κάτω μέρος του παραθύρου (Εικόνα 35). Ως συνθήκη εισόδου επιλέγεται το velocity inlet και εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο πλέον εισάγονται τα δεδομένα της συνθήκης που είναι η ταχύτητα. Στη συνέχεια επιλέγεται το OK (Εικόνα 36).



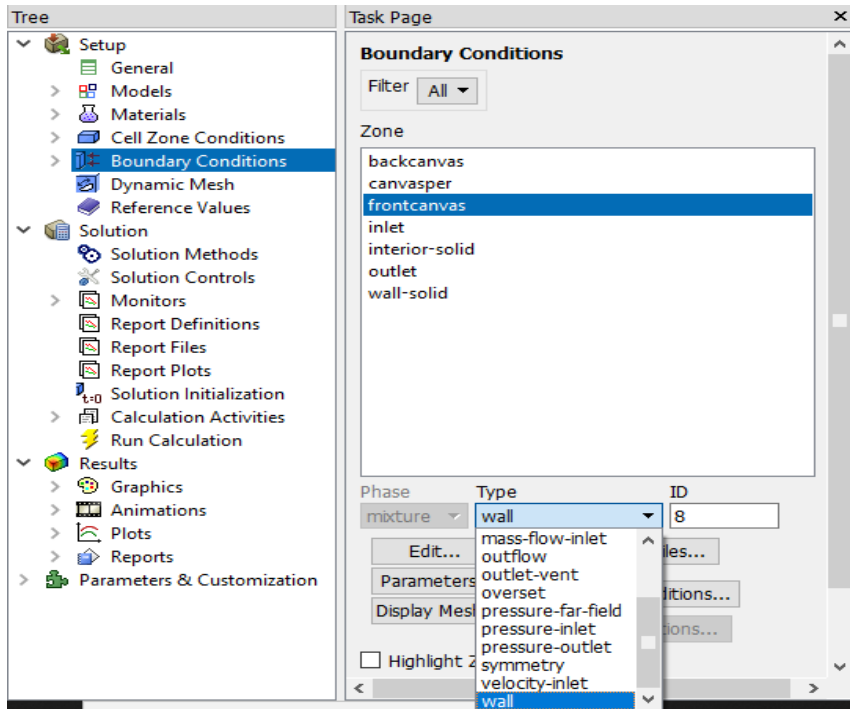
Εικόνα 35: Επιλογή συνοριακής συνθήκης εισόδου.



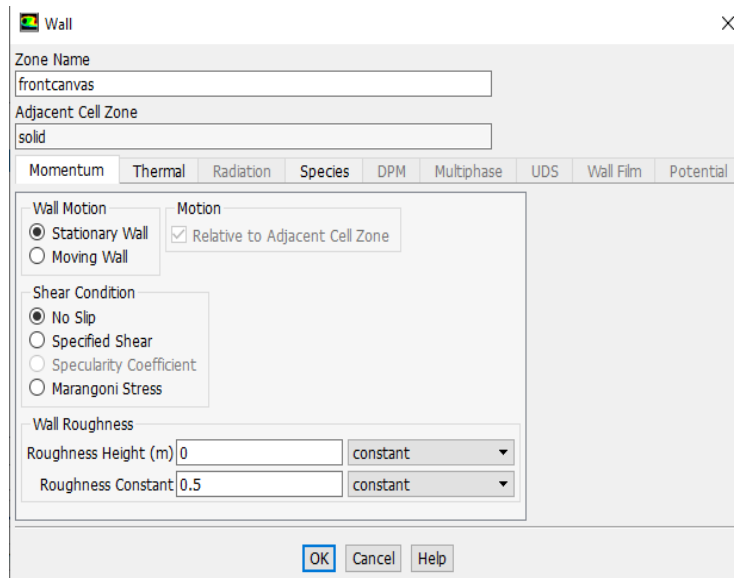
Εικόνα 36: Ορισμός ταχύτητας εισόδου



Η επόμενη συνθήκη θα οριστεί στην επιφάνεια του καμβά. Επιλέγεται η εμπρόσθια όψη και ορίζεται σαν Wall (Εικόνα 37). Στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγεται η επιλογή Stationary wall, εφόσον ο καμβάς είναι στερεωμένος στα 40 cm από την είσοδο. Ωστόσο, επειδή γίνεται εφαρμογή συντοριακών συνθηκών μη ολίσθησης γίνεται αποδεχθεί η επιλογή No slip (Εικόνα 38). Ακολουθεί αποθήκευση επιλογών και κλείσιμο παραθύρου.



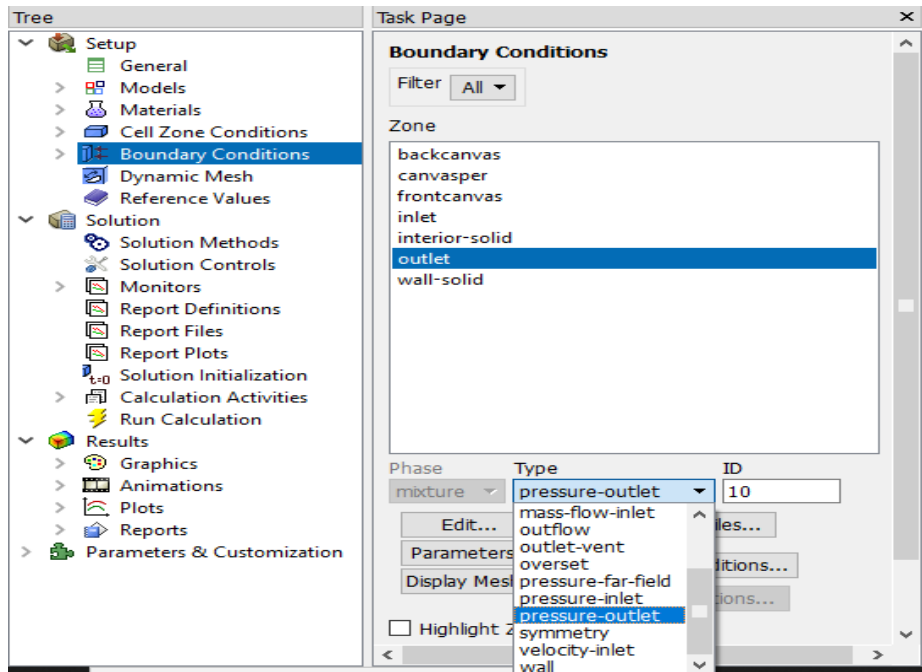
Εικόνα 37: Επιλογή συνοριακής συνθήκης στον καμβά.



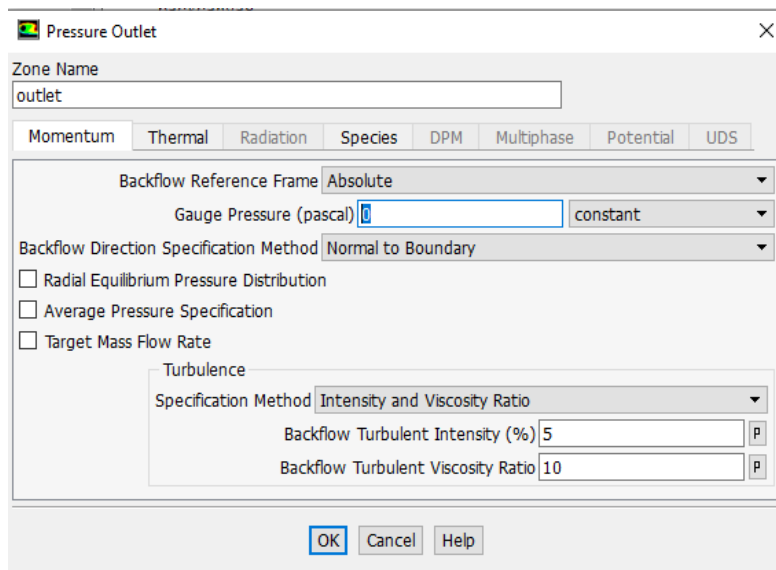
Εικόνα 38: Ορισμός συνθήκης μη ολίσθησης στον καμβά.



Τέλος, εφόσον έχει ορισθεί η συνοριακή συνθήκη εισόδου, απαιτείται να ορισθεί η συνθήκη στην έξοδο του θαλάμου. Αφού το αέριο εξέρχεται στην ατμόσφαιρα, η πίεση στο σημείο της εξόδου είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε είναι ως εξής, αρχικά επιλέγεται η περιοχή outlet, από το πεδίο Type, που υπάρχει στο κάτω μέρος του παραθύρου και ως συνθήκη εξόδου επιλέγεται το pressure outlet (Εικόνα 39). Στο αναδυόμενο παράθυρο εισάγονται τα δεδομένα της συνθήκης που είναι η πίεση (=0) και επιλέγεται OK (Εικόνα 40).



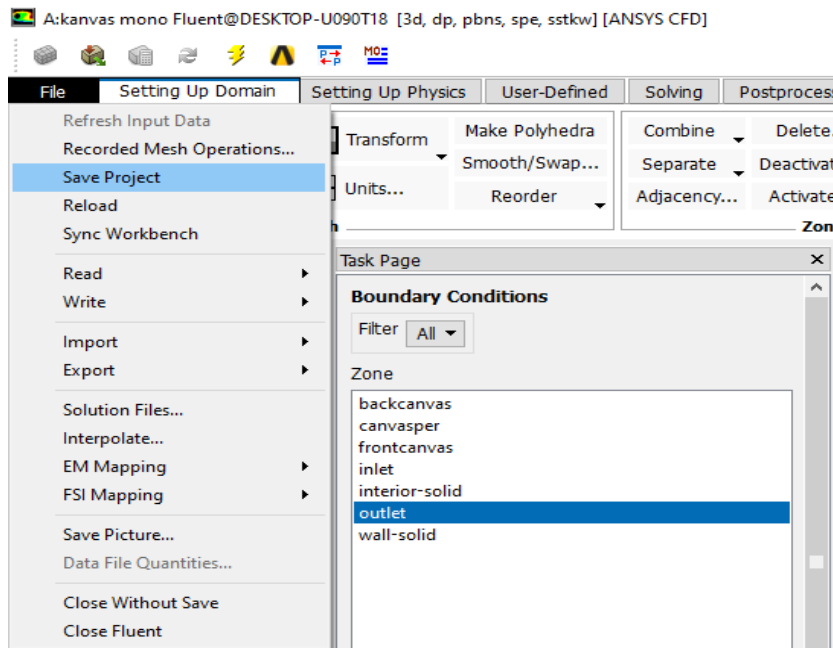
Εικόνα 39: Επιλογή συνοριακής συνθήκης στην έξοδο.



Εικόνα 40: Ορισμός πίεσης εξόδου.



Πριν ξεκινήσει η επίλυση του προβλήματος της περίπτωσης μελέτης, πραγματοποιείται αποθήκευση της μέχρι τώρα διαδικασίας της πορείας του project (Εικόνα 41).



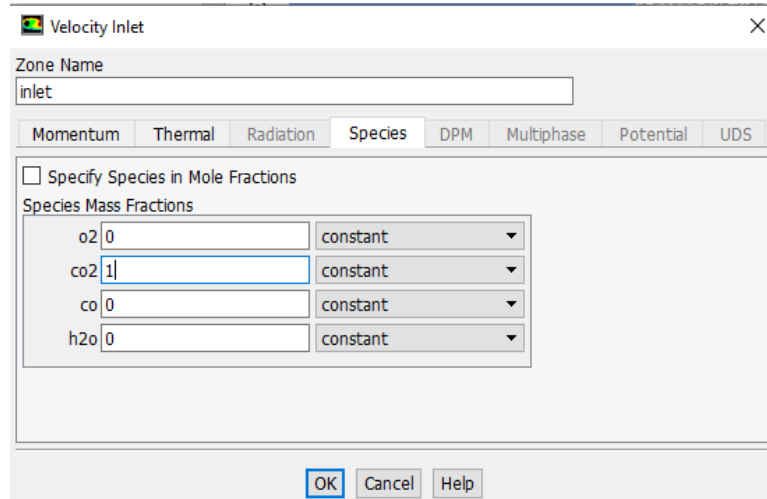
Εικόνα 41: Αποθήκευση project.

Για την επίλυση του δεύτερου προβλήματος με την παροχή μάζας πρέπει εκτός από τις συνθήκες που έχουν ορίσει παραπάνω για την απλή ροή, απαιτείται η επιλογή συνθήκης που αφορά τα species. Για αυτή την εκδοχή επιλέγονται τρία διαφορετικά προγράμματα με διαφορά στις συνοριακές συνθήκες.

Πίνακας 1: Συνοριακές συνθήκες πρώτου προγράμματος.

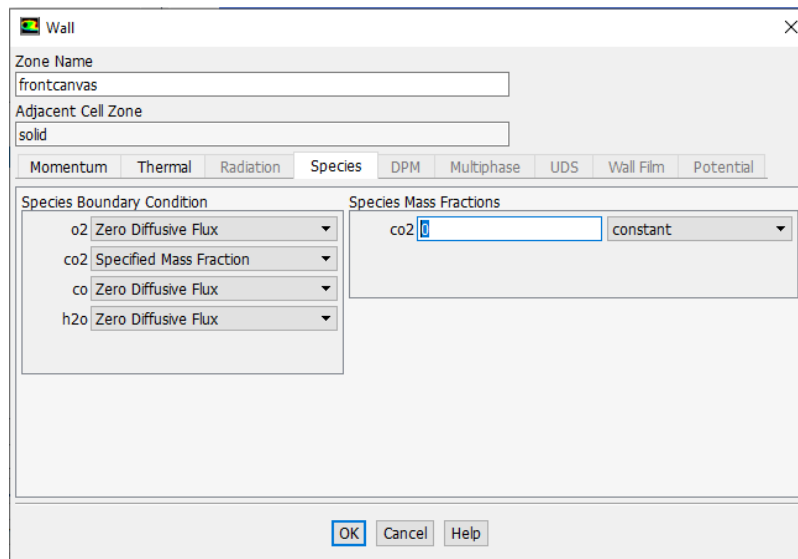
1° Πρόγραμμα	inlet	front canvas	outlet
momentum	velocity inlet =1.052 m/s	no slip, stationary wall	pressure outlet =0
species (CO <sub>2</sub> )	c=1	c=0	c=0

Επιλέγεται το inlet και εφόσον υπάρχει η κανονική συνθήκη ταχύτητας, γίνεται επιλογή της καρτέλας species και στο κελί που αναγράφεται το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) ορίζεται η τιμή του mass fraction σε 1 (Εικόνα 42).



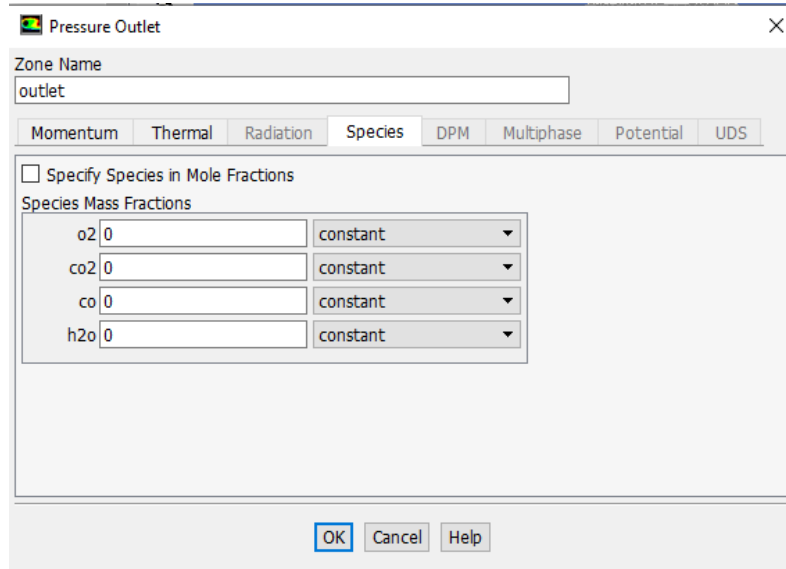
Εικόνα 42: 1<sup>ο</sup> Πρόγραμμα: Ορισμός mass fraction

Η επόμενη συνθήκη ορίζεται στην εμπρόσθια όψη του καμβά. Επιλέγεται η επιφάνεια και στην συνέχεια από την καρτέλα species στο πεδίο Species Mass Fraction στο κελί του αερίου διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και καταχωρείται η τιμή 0 (Εικόνα 43).



Εικόνα 43: 1<sup>ο</sup> Πρόγραμμα: Εμπρόσθια όψη του καμβά, ορισμός mass fraction

Τέλος, στην έξοδο ορίζεται το Species Mass Fraction στο κελί του αερίου διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και καταχωρείται η τιμή 0 (Εικόνα 43).

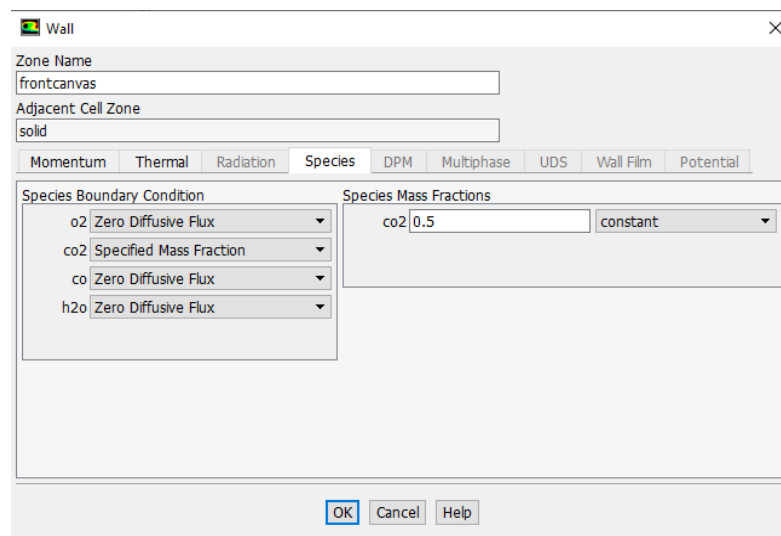


Εικόνα 44: 1<sup>ο</sup> Πρόγραμμα: Ορισμός mass fraction στην έξοδο

Όσον αφορά το δεύτερο πρόγραμμα, η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια, με τη διαφορά ότι η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) στην εμπρόσθια όψη του καμβά ορίζεται 0.5 (Πίνακας 2, Εικόνα 45).

Πίνακας 2: Συνοριακές συνθήκες δεύτερου προγράμματος.

2 <sup>ο</sup> Πρόγραμμα	inlet	front canvas	outlet
momentum	velocity inlet =1.052 m/s	no slip, stationary wall	pressure outlet =0
species ( $\text{CO}_2$ )	c=1	c=0.5	c=0



Εικόνα 45: 2<sup>ο</sup> Πρόγραμμα: ορισμός mass fraction εμπρόσθια όψη του καμβά



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 Πίνακα 3.

*Πίνακας 3: Συνοριακές συνθήκες τρίτου προγράμματος*

<b>3° Πρόγραμμα</b>	<b>inlet</b>	<b>front canvas</b>	<b>outlet</b>
<b>momentum</b>	velocity inlet =2.104 m/s	no slip, stationary wall	pressure outlet =0
<b>species (CO<sub>2</sub>)</b>	c=1	c=0.5	c=0

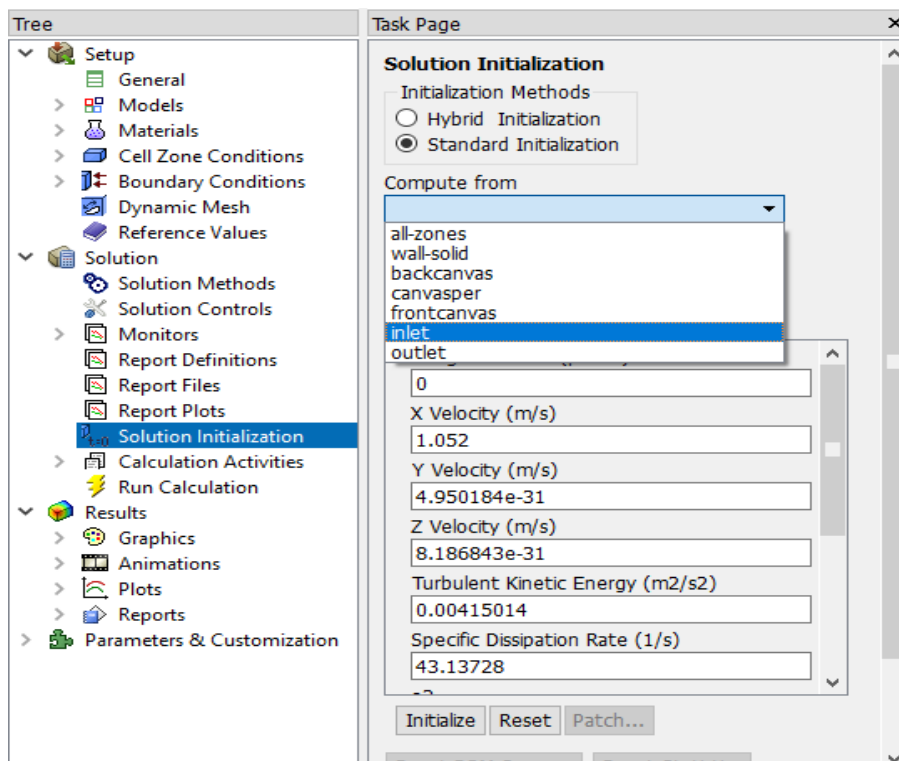
Με τον ίδιο τρόπο ορίζεται η ταχύτητα σε προηγούμενα προγράμματα, έτσι και σε αυτό το πρόγραμμα απλά καταγράφεται η ταχύτητα της και στην συνέχεια πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί.



## 3. ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ - SOLUTION

### 3.1. Αρχικοποίηση πεδίου ροής

Ένα βήμα πριν την επίλυση, είναι η αρχικοποίηση του πεδίου ροής στην είσοδο του θαλάμου, δηλαδή ορίζεται στο πρόγραμμα από ποιο σημείο θα ξεκινήσει τους υπολογισμούς. Επιλέγοντας την καρτέλα Solution initialization, στο Task page επιλέγεται η μέθοδος Standard Initialization και στη συνέχεια Compute from → Inlet. Για να ολοκληρωθεί η αρχικοποίηση επιλέγεται το πεδίο Initialize (κάτω μέρος του παραθύρου) (Εικόνα 46).

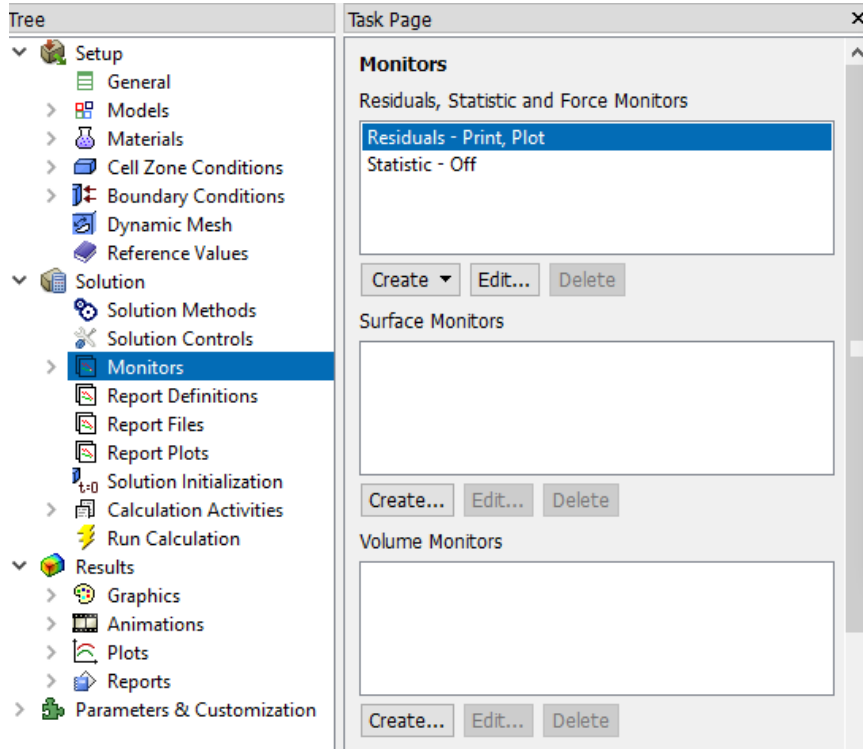


Εικόνα 46: Αρχικοποίηση πεδίου ροής

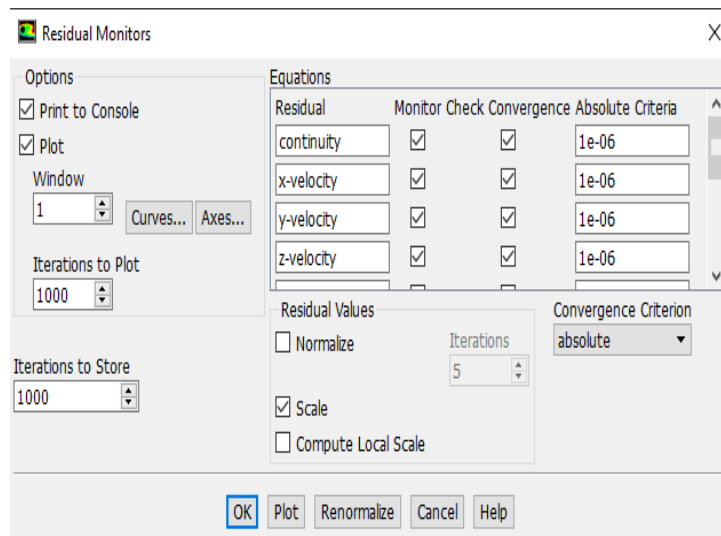
### 3.2. Ορισμός κριτηρίων σύγκλισης

Σε αυτό το βήμα ορίζονται τα κριτήρια σύγκλισης, δηλαδή τον αριθμό των επαναλήψεων της διαδικασίας επίλυσης έως ότου οι δηλωμένοι παράμετροι να ικανοποιούν το όριο ανοχής που έχει τεθεί. Στην περίπτωση μελέτης έχει τεθεί ως όριο σύγκλισης το  $10^{-6}$ . Η επιλογή του κριτηρίου πραγματοποιείται από την καρτέλα Monitors (Εικόνα 47) και στο αναδυόμενο παράθυρο επιλέγεται από το Monitors η επιλογή Residuals και εν συνέχεια OK (Εικόνα 48).





Εικόνα 47: Task page – monitors



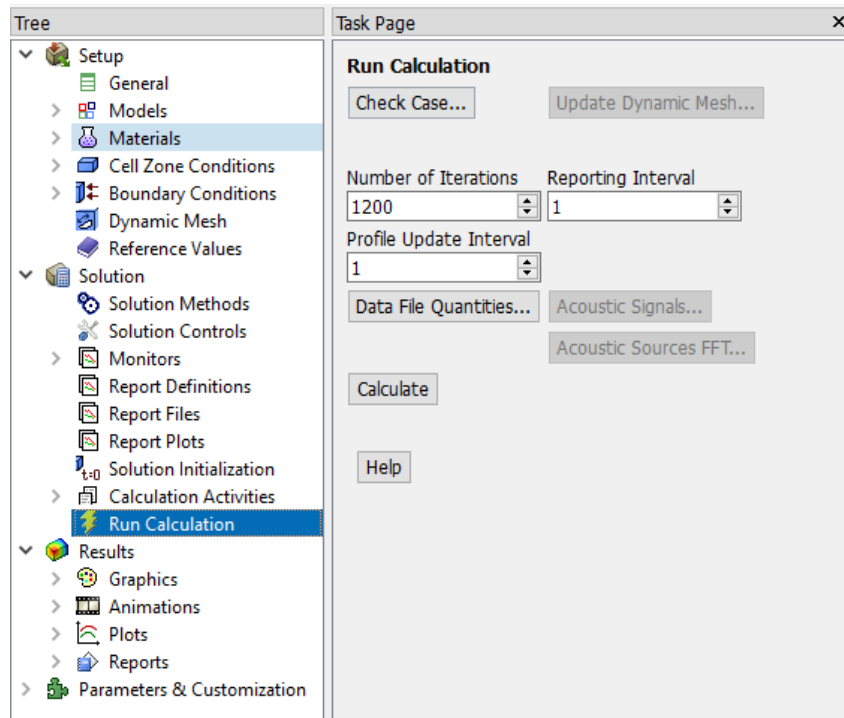
Εικόνα 48: Residual monitors

### 3.3. 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), δίνεται η δυνατότητα έναρξης των υπολογισμών. Η διαδικασία πραγματοποιείται μεταβαίνοντας στην καρτέλα Run Calculation



όπου και ορίζεται ο αριθμός των στοιχείων (Εικόνα 49). Στην περίπτωση μελέτης και για τις δυο εκδοχές, η τιμή αυτή είναι τα 1200 iterations.



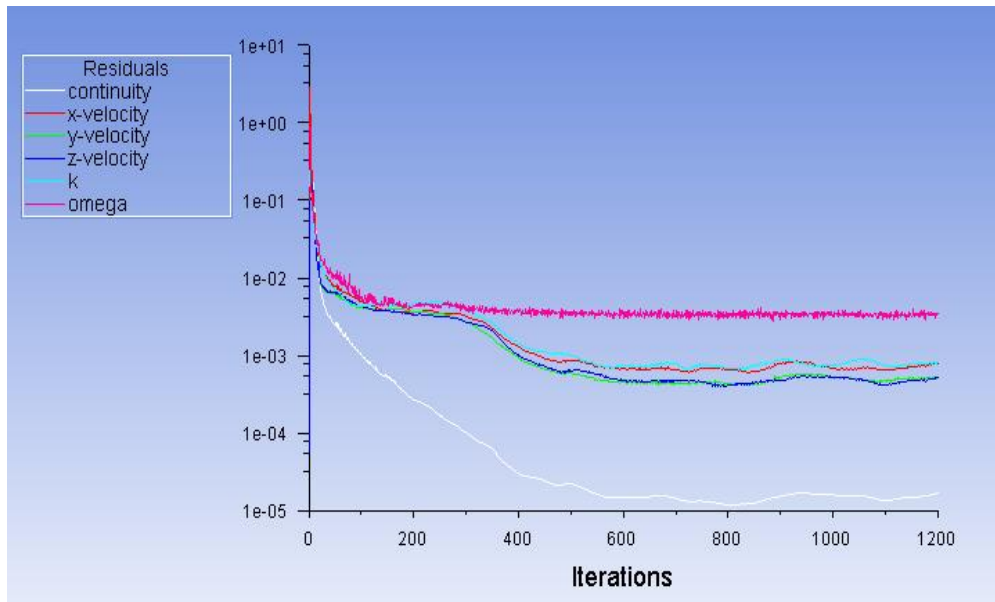
Εικόνα 49: Έναρξη επίλυσης



## 4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

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

### 4.1. Πρόβλημα Μόνιμης Ροής



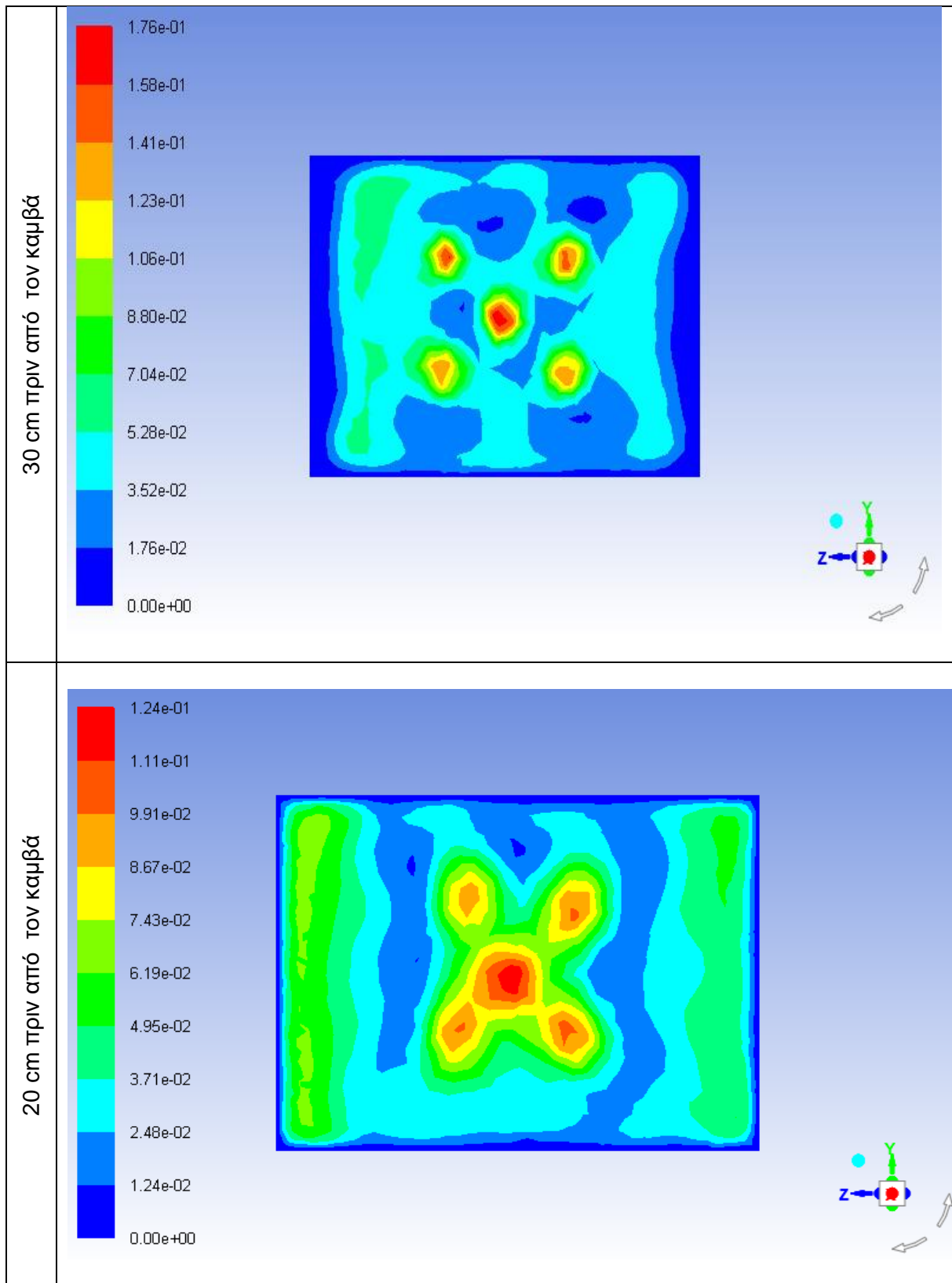
Διάγραμμα 2: Επίλυση προβλήματος μόνιμης ροής

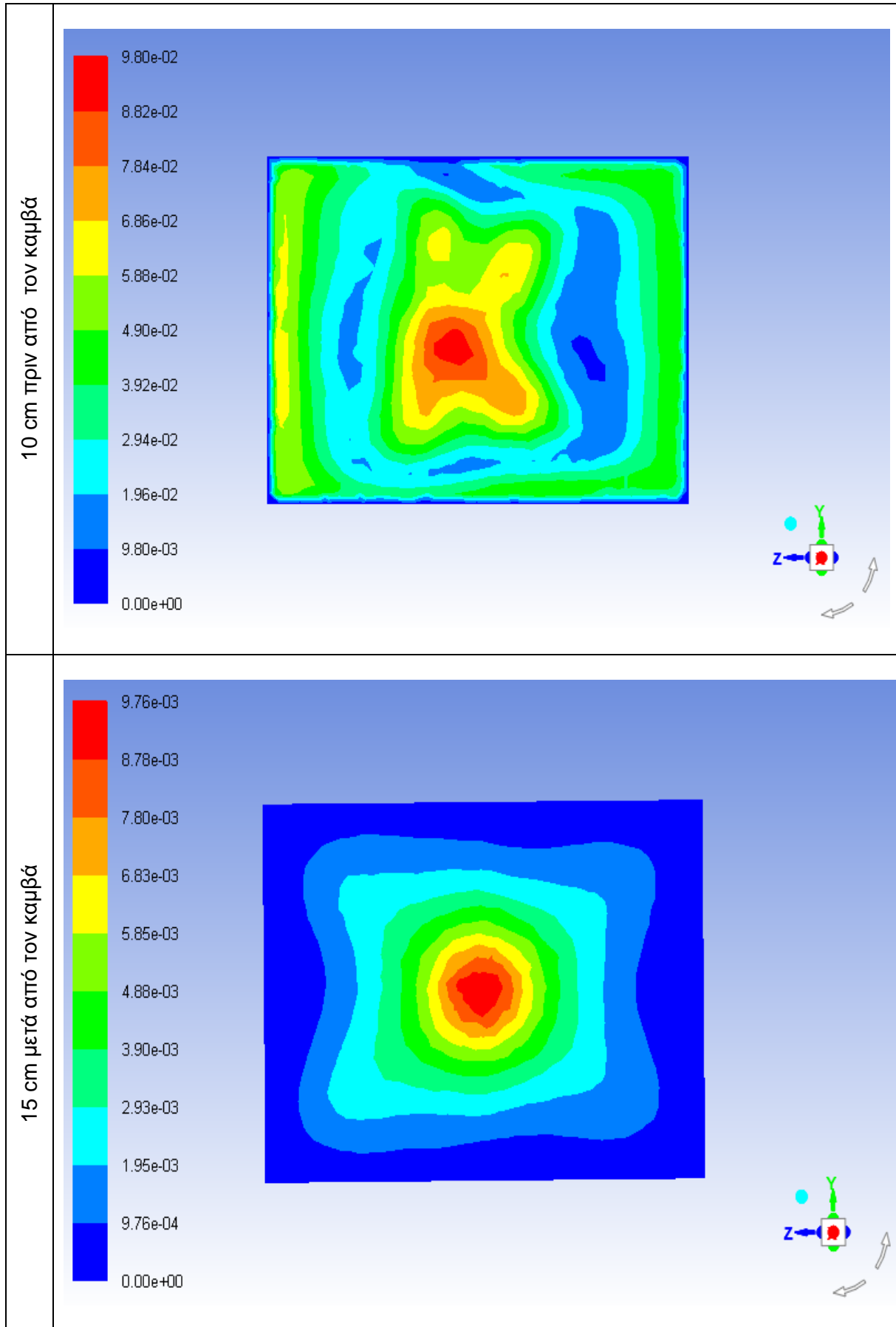
```
reversed flow in 40 faces on pressure-outlet 10.  
1195 1.6664e-05 7.7569e-04 5.1008e-04 5.0483e-04 8.1423e-04 3.4944e-03 0:00:47 5  
  
reversed flow in 37 faces on pressure-outlet 10.  
1196 1.6761e-05 7.6686e-04 5.2223e-04 5.1517e-04 7.9501e-04 2.9872e-03 0:00:38 4  
  
reversed flow in 42 faces 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.
```

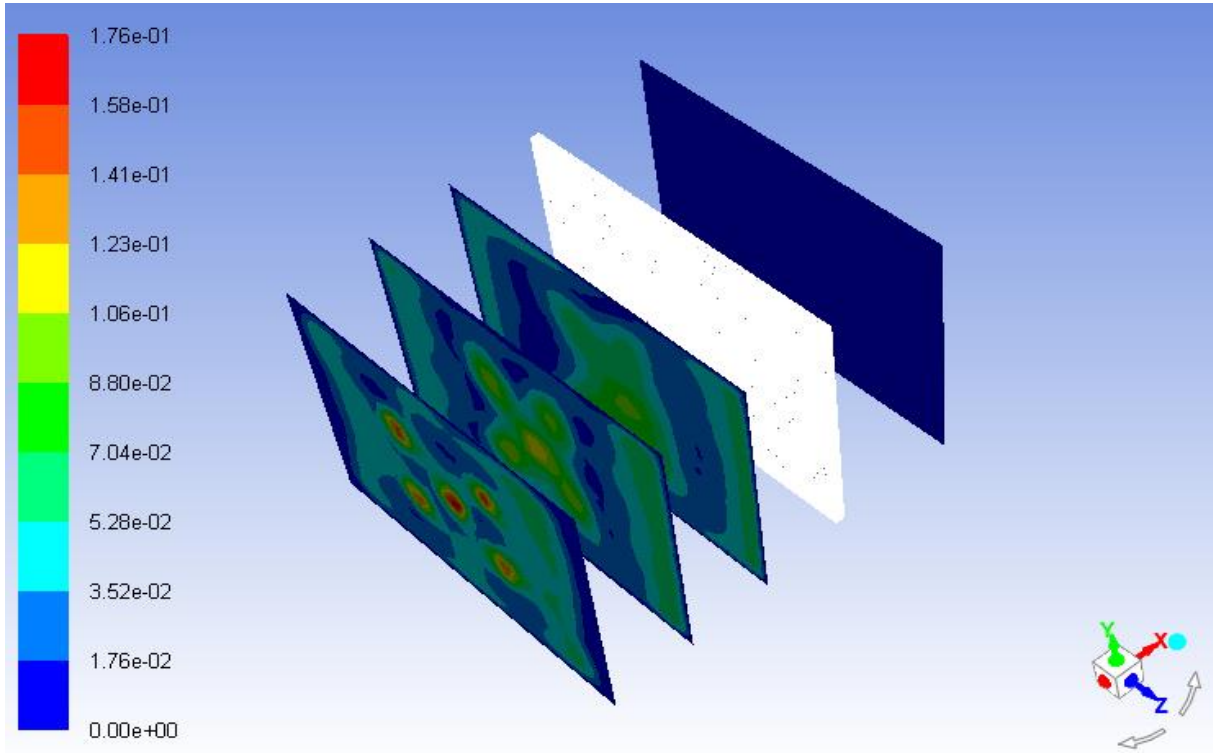
Εικόνα 50: Τιμές των residuals στα 1200 iterations (μόνιμη ροή)



Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά contours του velocity magnitude σε planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά (μόνιμη ροή)

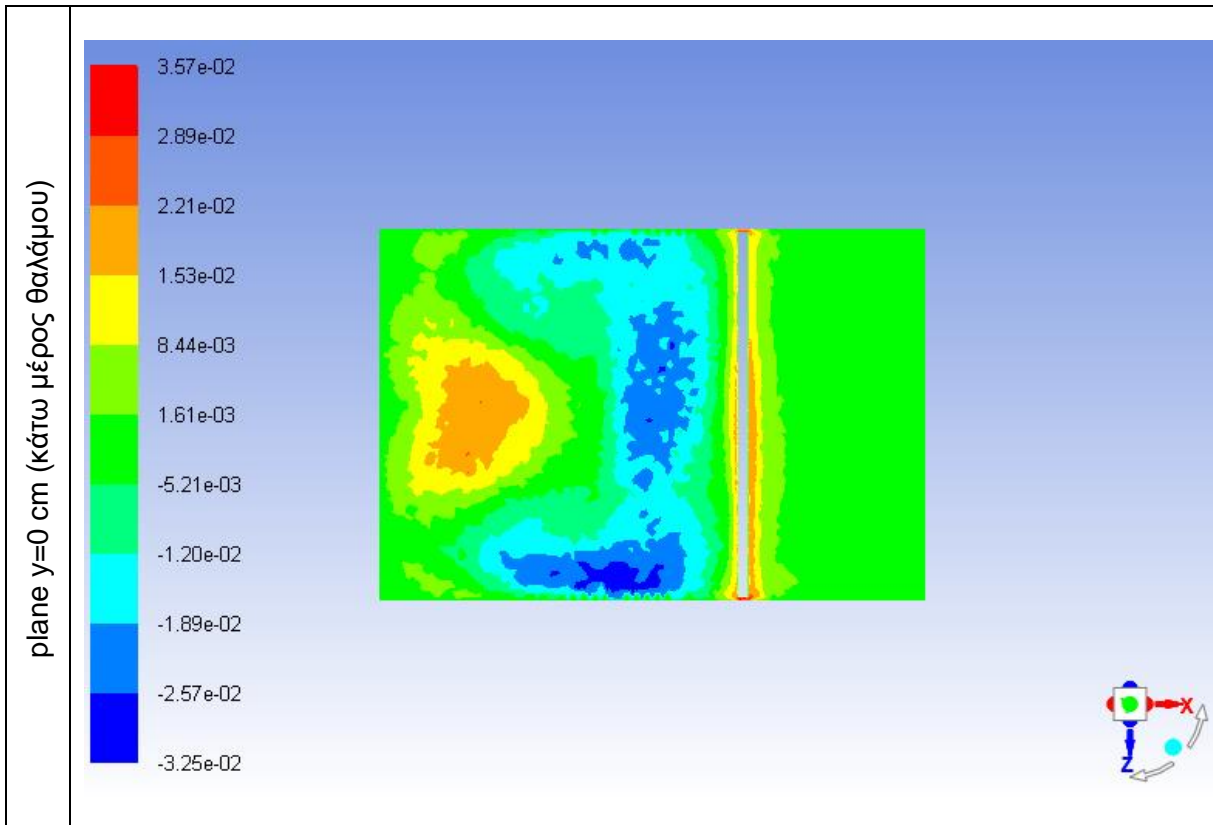


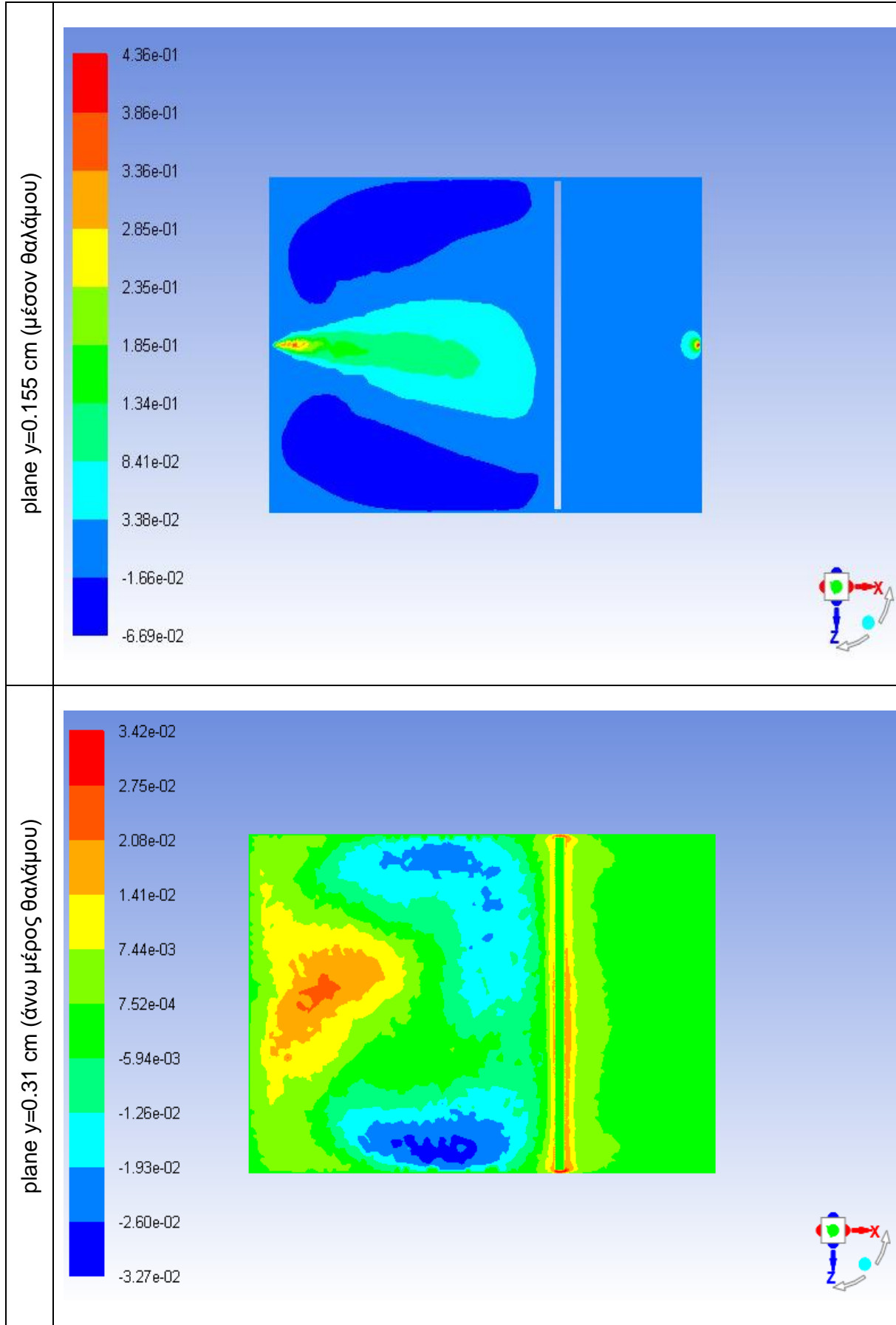




Εικόνα 51: Διάταξη των παραπάνω planes στον θάλαμο (μόνιμη ροή)

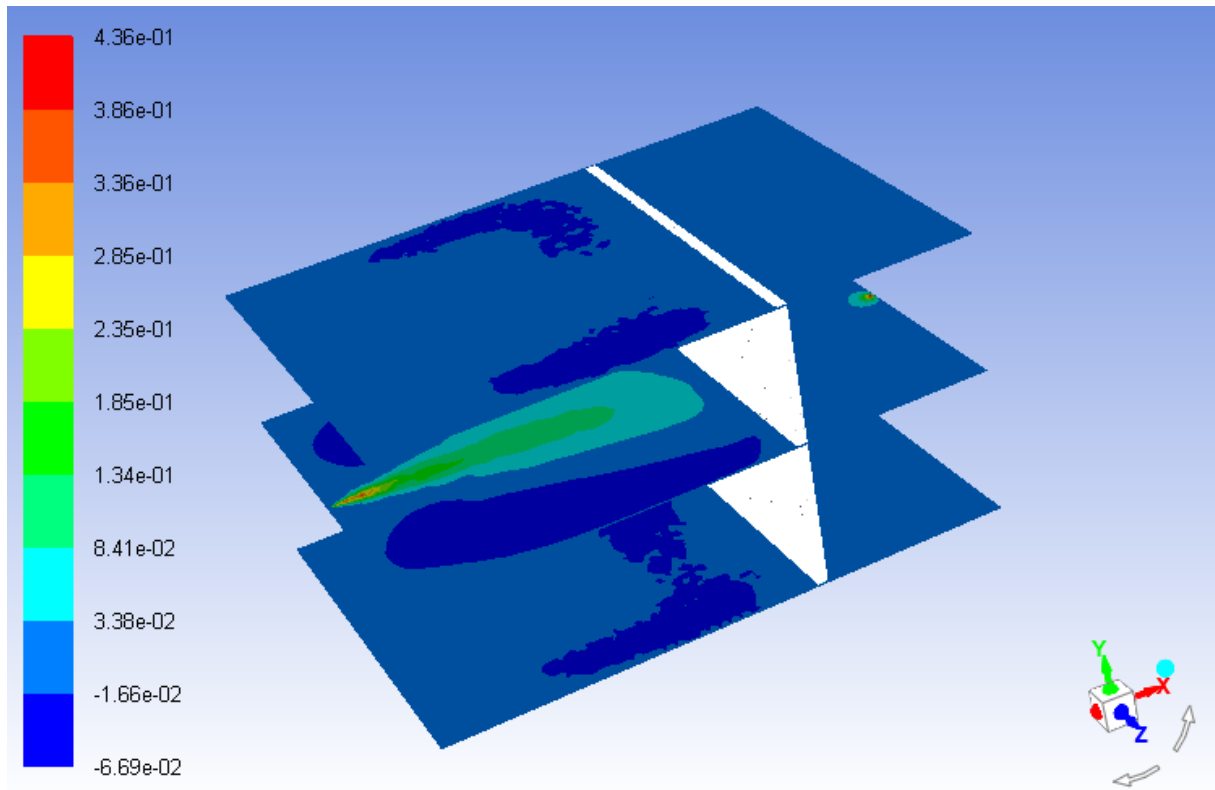
Πίνακας 5: Contours του x velocity σε planes κάθετα στον άξονα y (μόνιμη ροή)







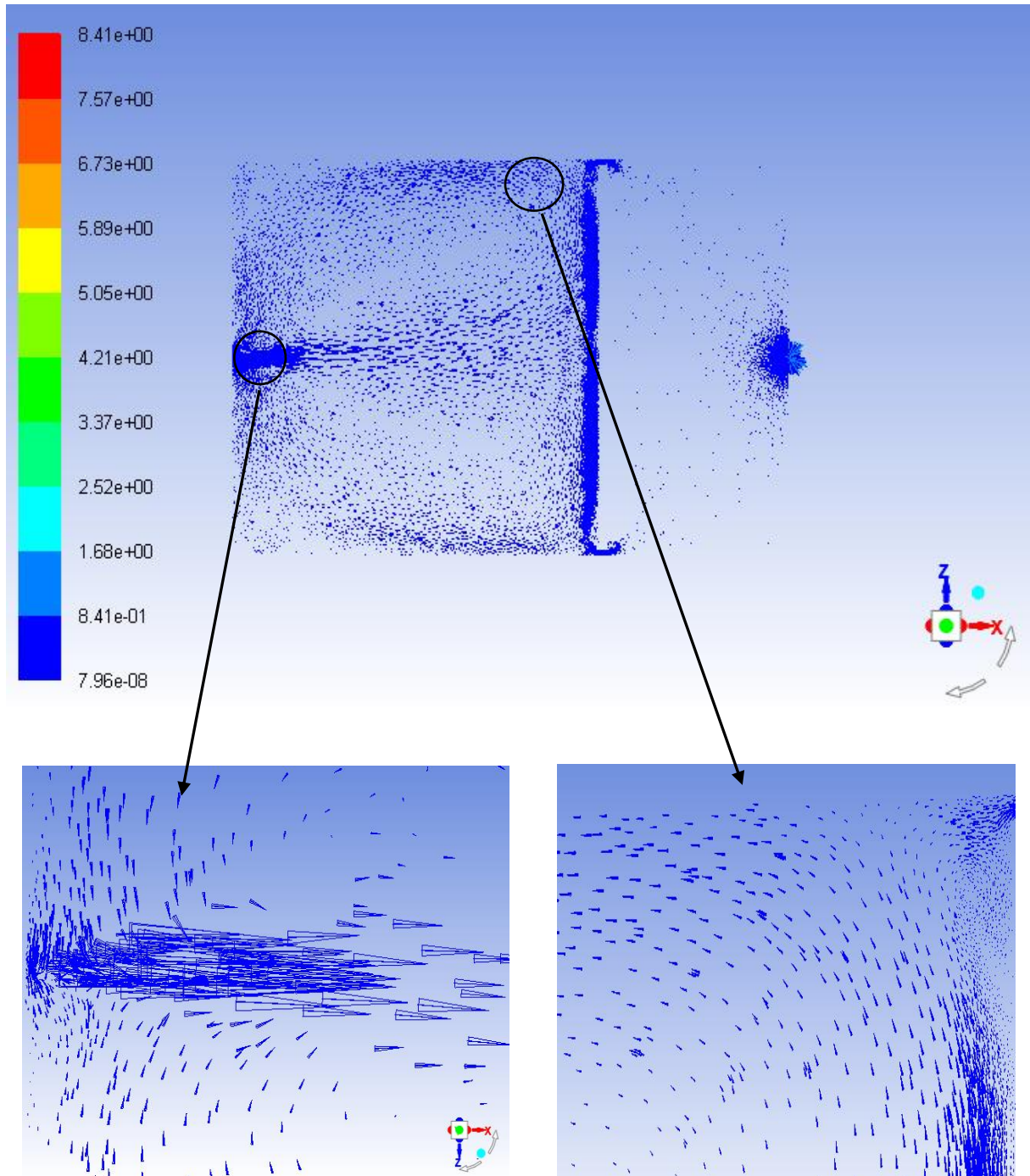
Στον Πίνακα 5, έχουν δημιουργηθεί planes κάθετα στον άξονα y με διαφορετικές αποστάσεις κάθε φορά την αρχή των αξόνων. Παρουσιάζονται όλα, μαζί με το καμβά για να γίνει κατανοητή η διάταξη τους στο χώρο (Εικόνα 52).



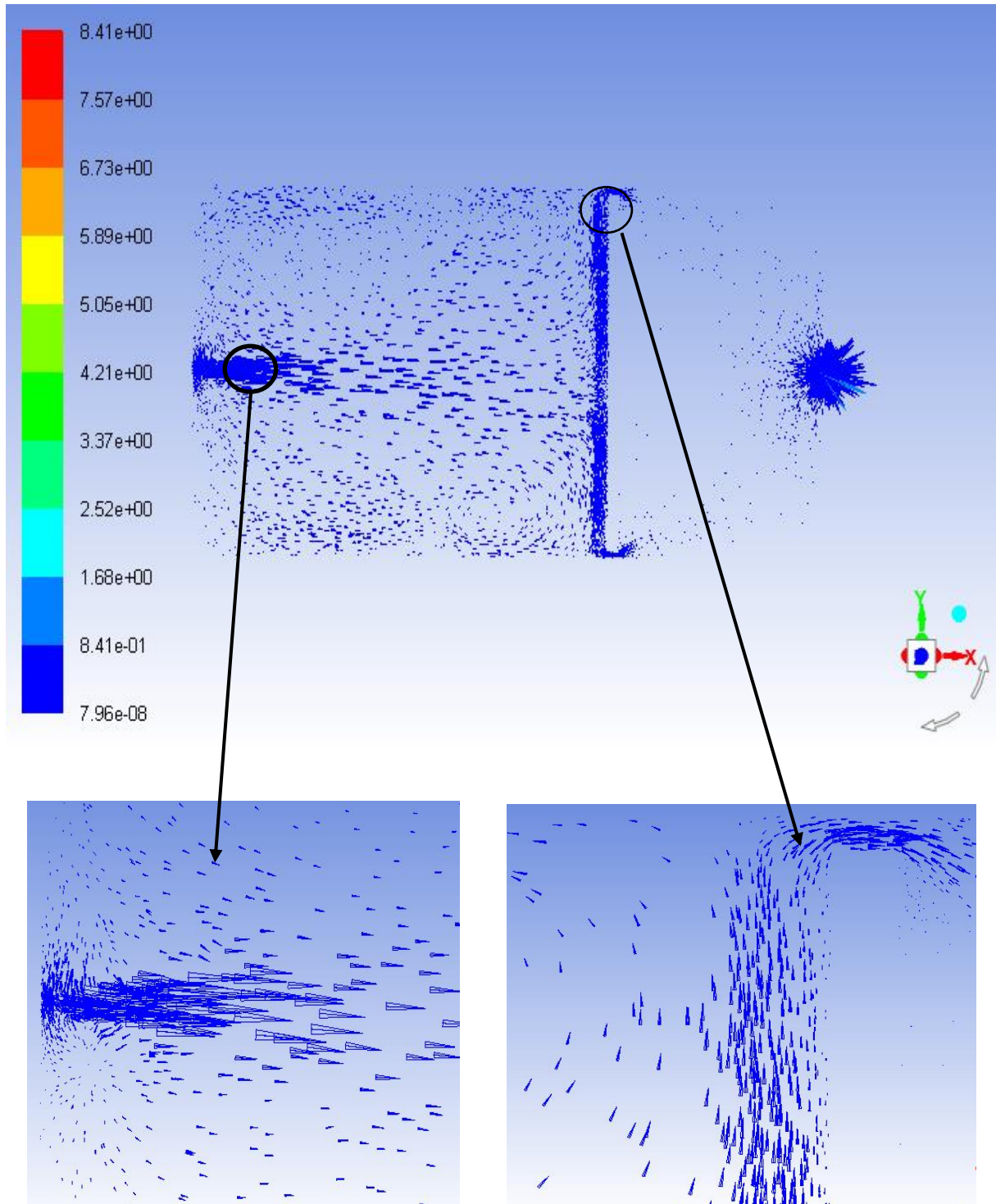
Εικόνα 52: Διάταξη των παραπάνω planes στο θάλαμο προσομοίωσης (μόνιμη ροή)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα vectors plots της ταχύτητας, σε ένα plane κάθετο στο άξονα y (Εικόνα 53) και σε ένα άλλο που είναι κάθετο στον άξονα z (Εικόνα 54).





Εικόνα 53: Vectors plot της ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο στον άξονα  $y$  ( $y=0.155$  cm) (μόνιμη ροή)



Εικόνα 54: Vectors plot της ταχύτητας σε επίπεδο κάθετο στον άξονα z ( $z=0.205\text{ cm}$ ) (μόνιμη ροή)

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι 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  $5 \cdot 10^2$ .

- Αριθμός Reynolds στην είσοδο:

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

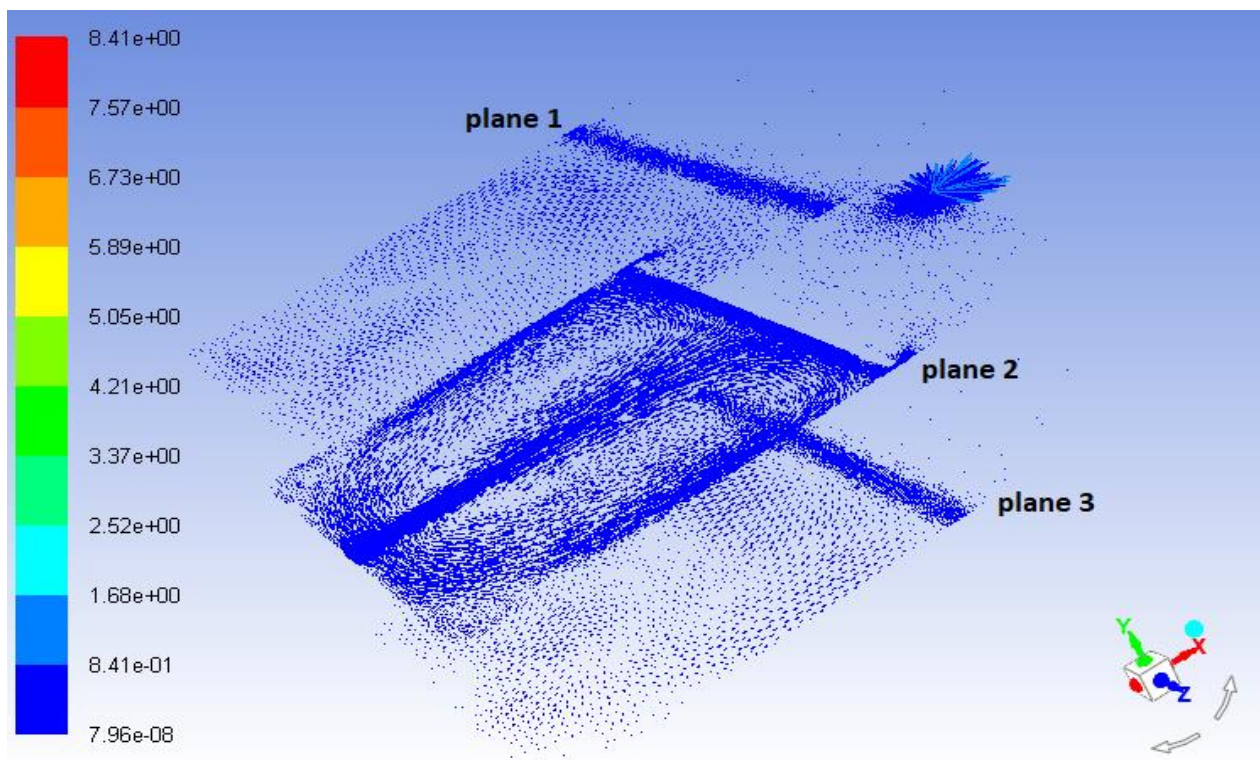
- Αριθμός Reynolds στο διάκενο παραπλεύρως του πίνακα

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

Τα planes που απεικονίζονται στην Εικόνα 55 και στην Εικόνα 56 έχουν δημιουργηθεί κατά μήκος του άξονα x και z και είναι τα εξής (Πίνακας 6).

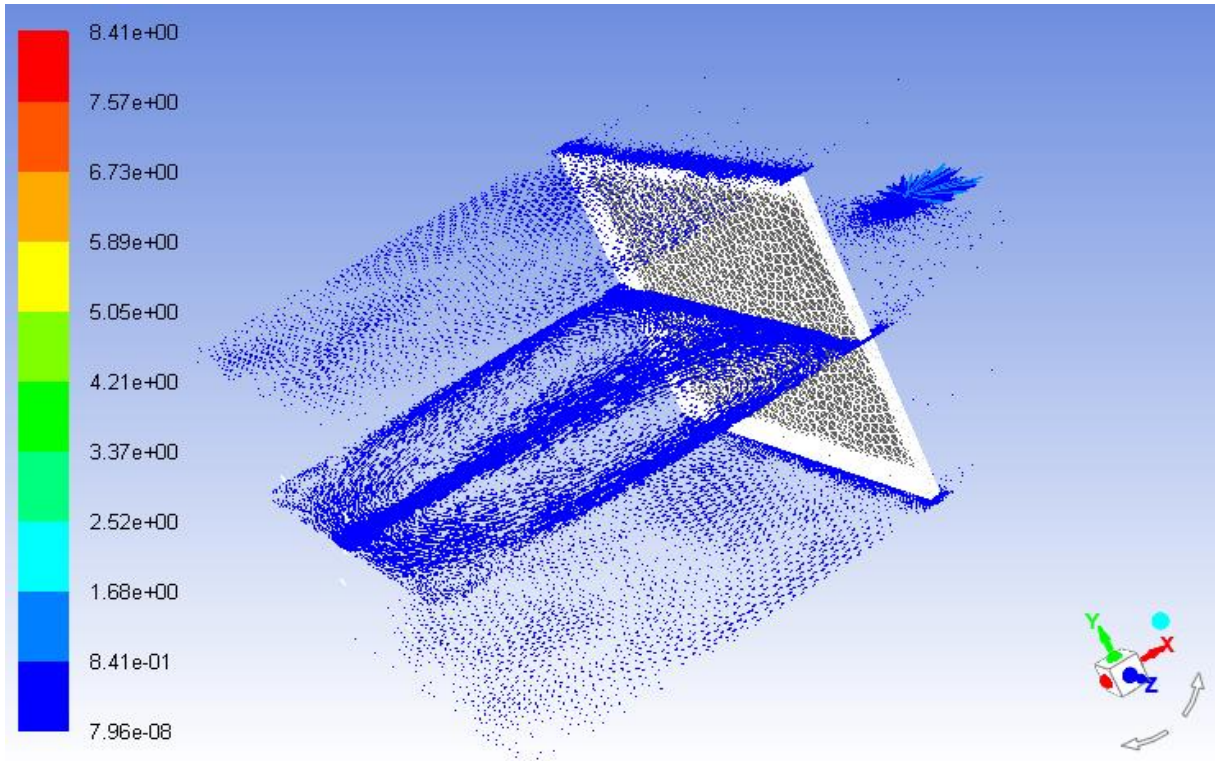
Πίνακας 6: Συντεταγμένες των planes (μόνιμη ροή)

	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

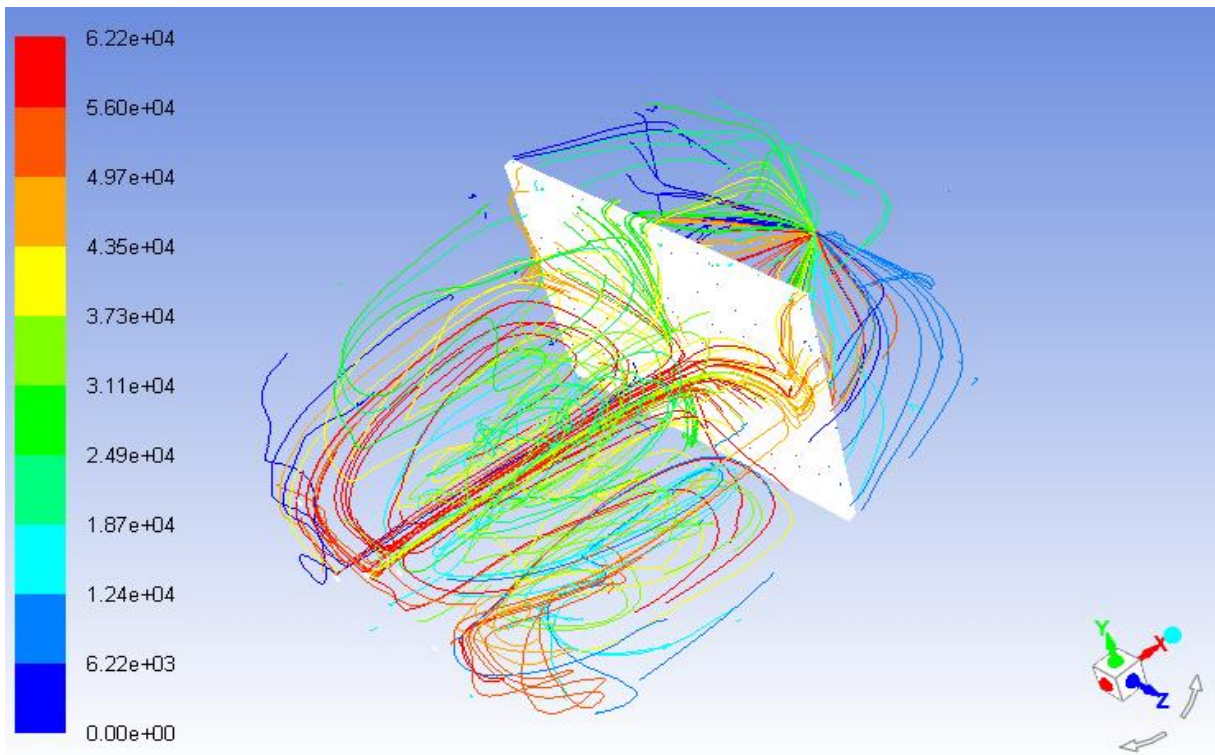


Εικόνα 55: Vector plot του velocity σε τρία διαφορετικά planes (μόνιμη ροή)





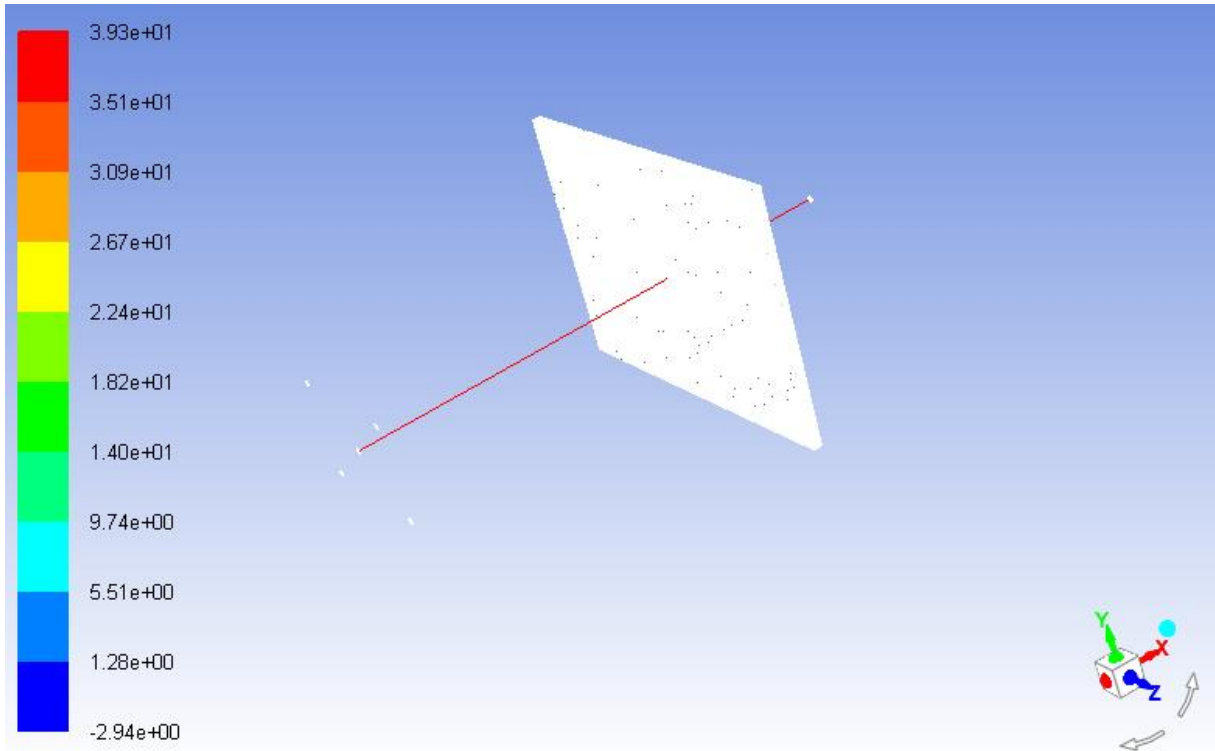
Εικόνα 56: Vector plot του velocity σε τρία διαφορετικά planes μαζί με το mesh των οπών εισόδου, εξόδου και του καμβά (μόνιμη ροή)



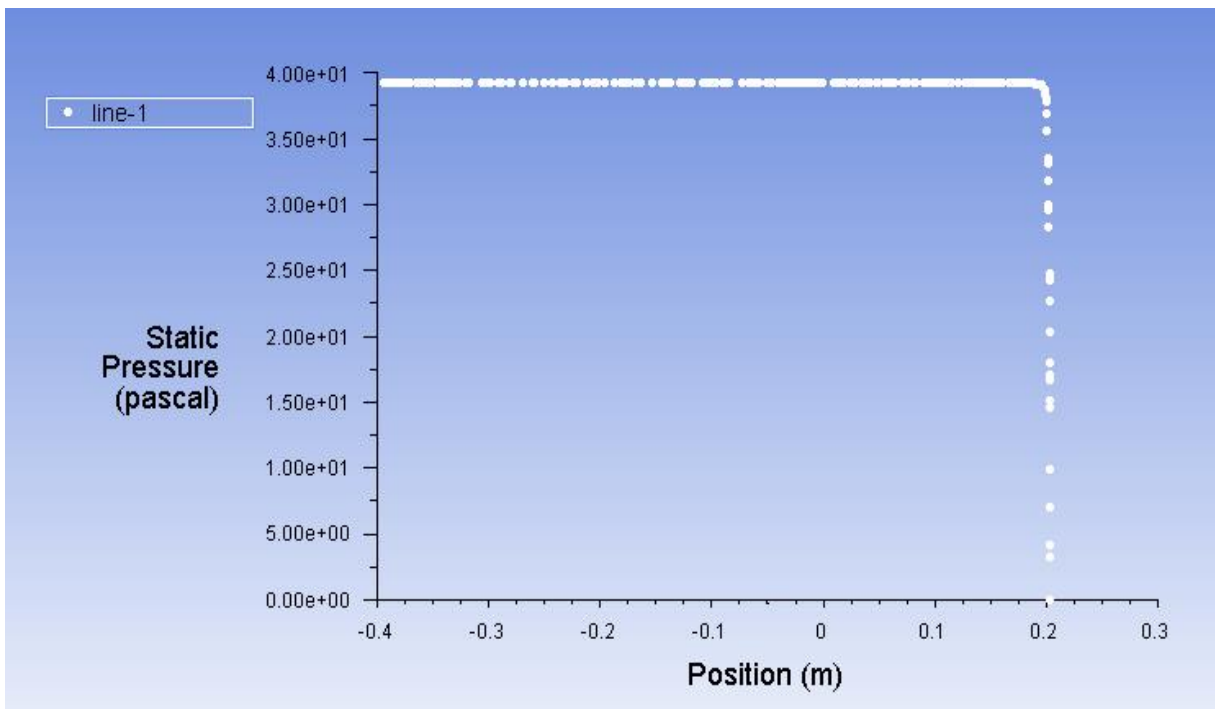
Εικόνα 57: Pathlines (μόνιμη ροή)



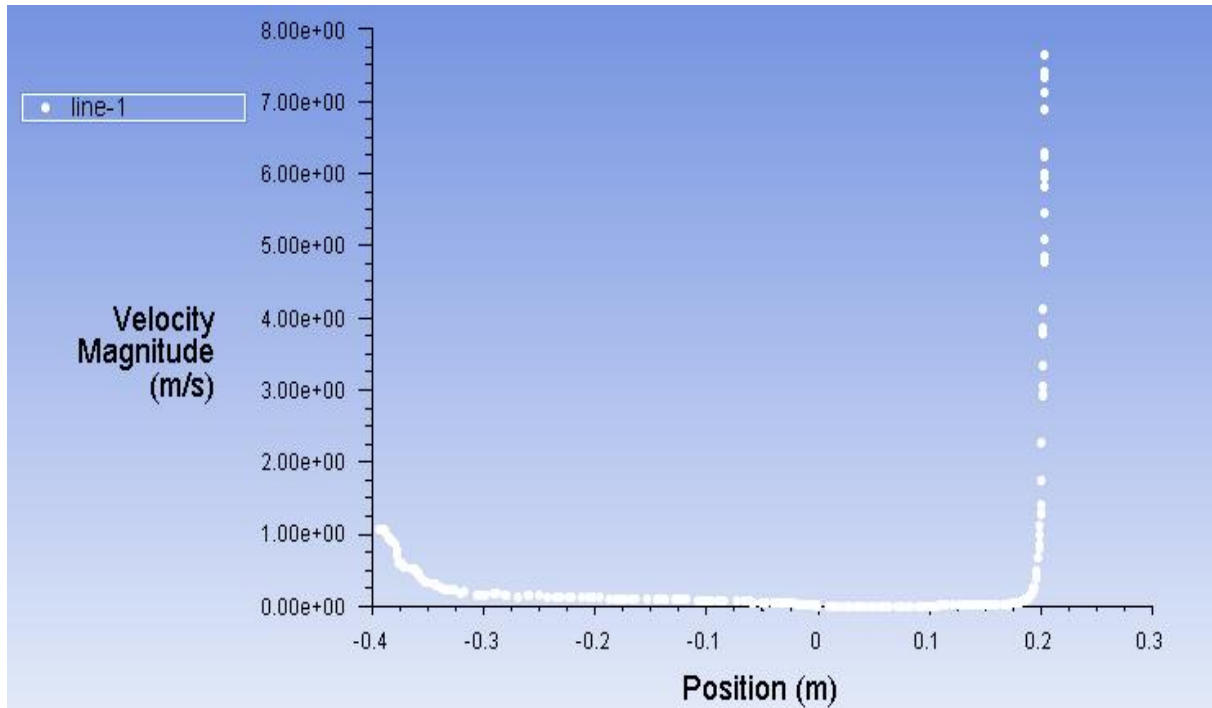
Παρακάτω παρουσιάζονται τα x-y plots (Διάγραμμα 4, 5 και 6), τα οποία έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με την κεντρική γραμμή που ξεκινάει από την κεντρική οπή εισόδου και καταλήγει στην οπή εξόδου (Εικόνα 58).



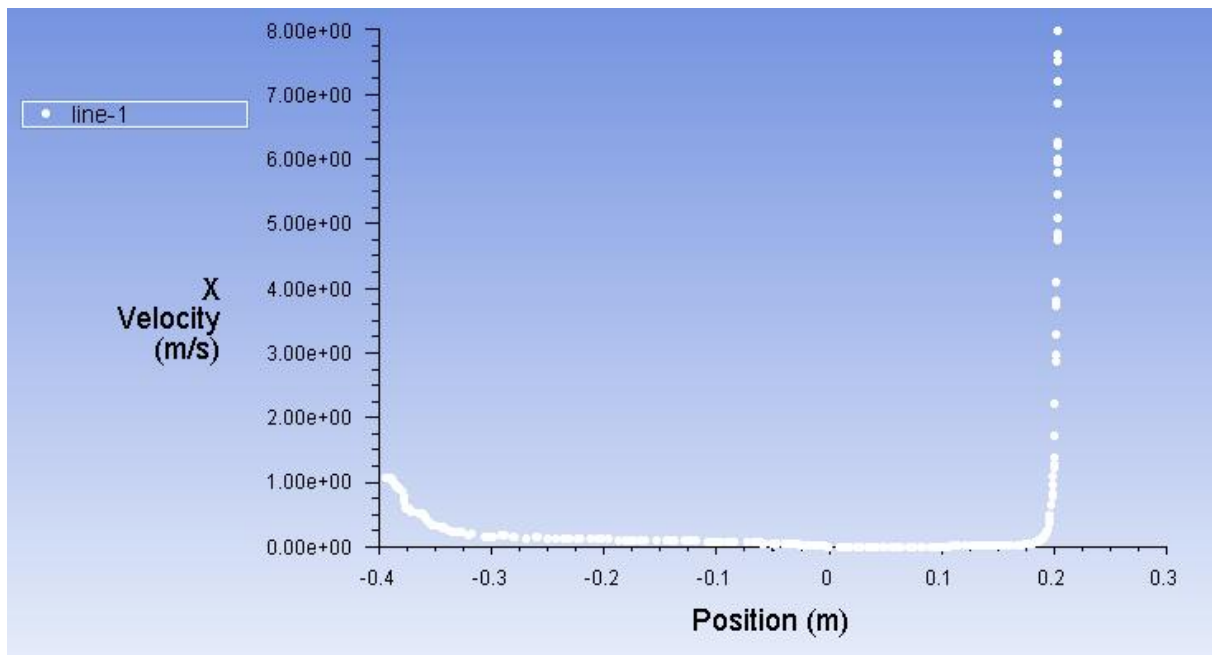
Εικόνα 58: Κεντρική γραμμή από είσοδο έως την έξοδο (μόνιμη ροή)



Διάγραμμα 3: Κατανομή πίεσης (line -1) (μόνιμη ροή)

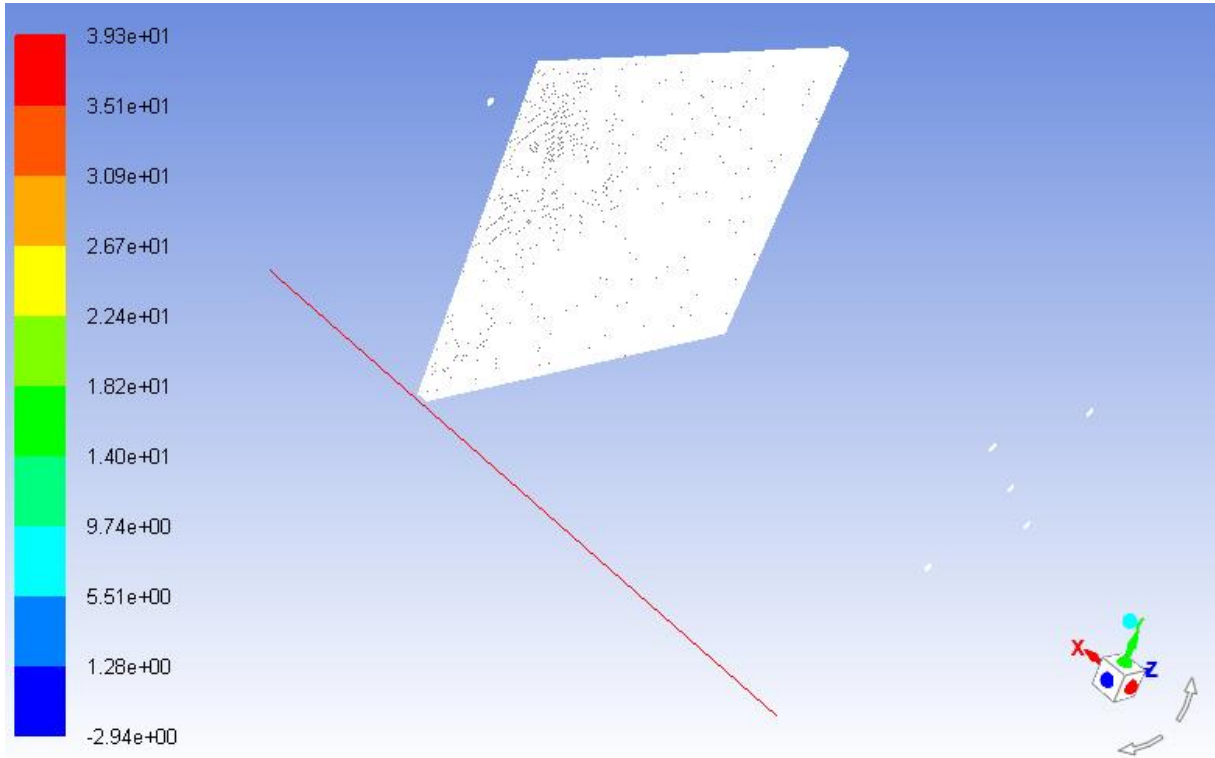


Διάγραμμα 4: Κατανομή ταχύτητας (line -1) (μόνιμη ροή)

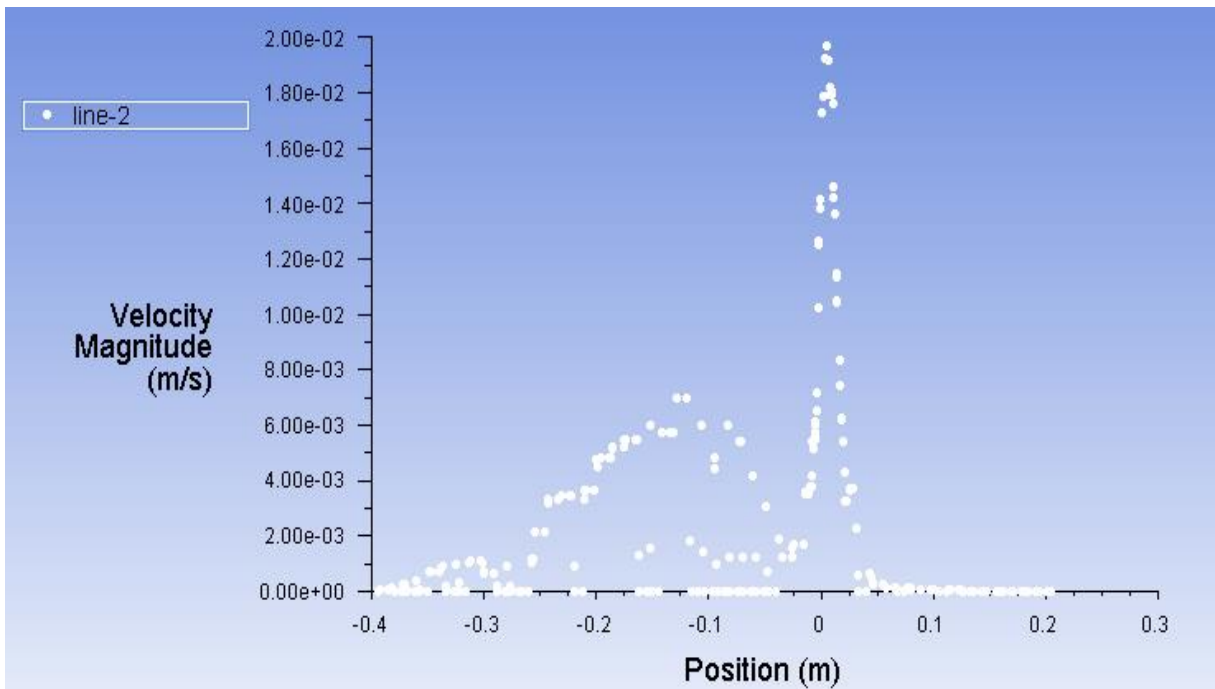


Διάγραμμα 5: Κατανομή ταχύτητας στον άξονα x (line -1) (μόνιμη ροή)

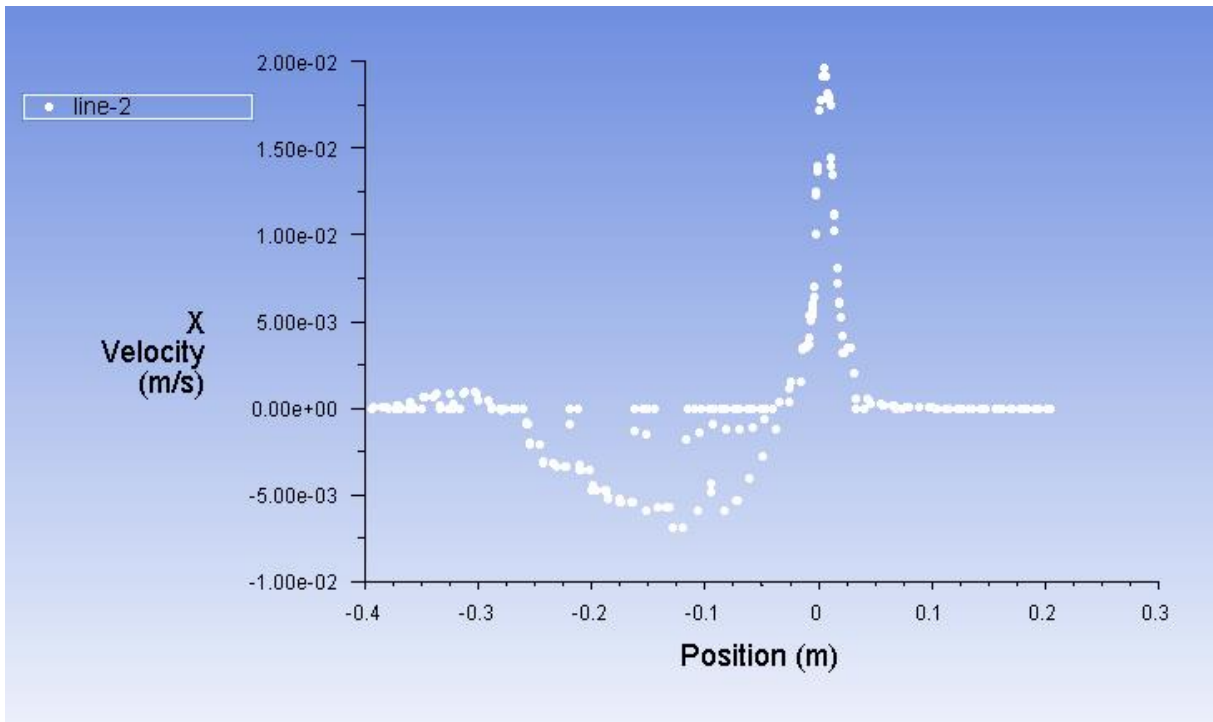
Στη συνέχεια τα x-y plots (Διάγραμμα 6 και 7), τα οποία έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με μια ευθεία γραμμή που ξεκινάει από μία εμπρόσθια γωνία του θαλάμου και καταλήγει στην απέναντι, περνώντας μέσα από το κενό περιμετρικά του καμβά χωρίς να ακουμπάει στο τοίχωμα (Εικόνα 59).



Εικόνα 59: Ευθεία γραμμή που διέρχεται από το κενό μεταξύ καμβά-τοιχώματος (μόνιμη ροή)



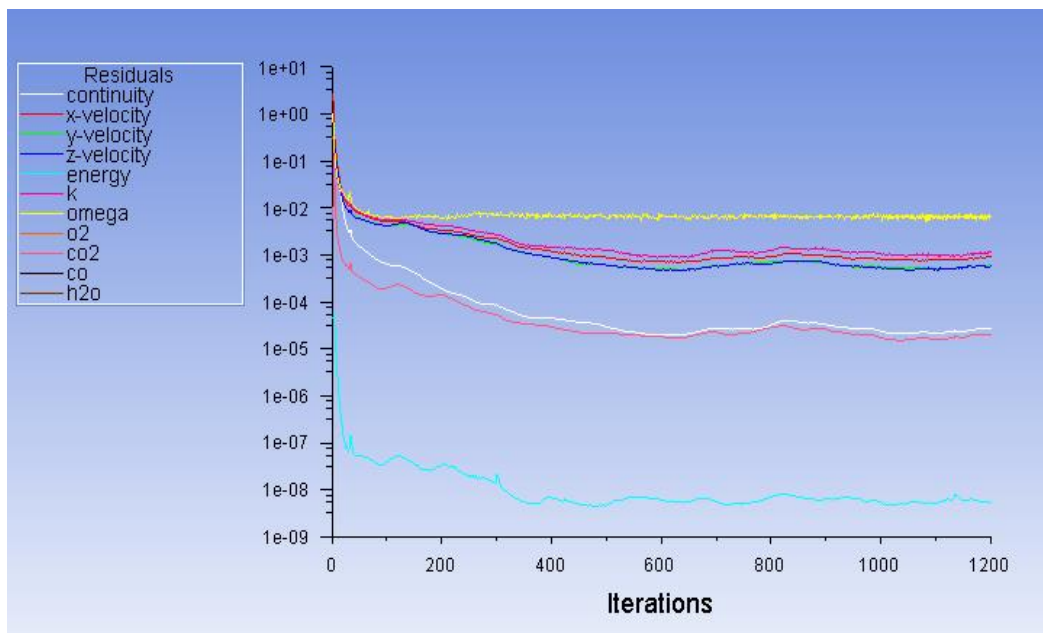
Διάγραμμα 6: Κατανομή ταχύτητας (μόνιμη ροή)



Διάγραμμα 7: Κατανομή ταχύτητας στον άξονα x (μόνιμη ροή)

## 4.2. Πρόβλημα ροής με παροχή μάζας

### 4.2.1. Πρόβλημα $c = 0$ εμπρόςθια όψη καμβά



Διάγραμμα 8: Επίλυση του προβλήματος ( $c=0$  εμπρόςθια όψη καμβά)





```
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

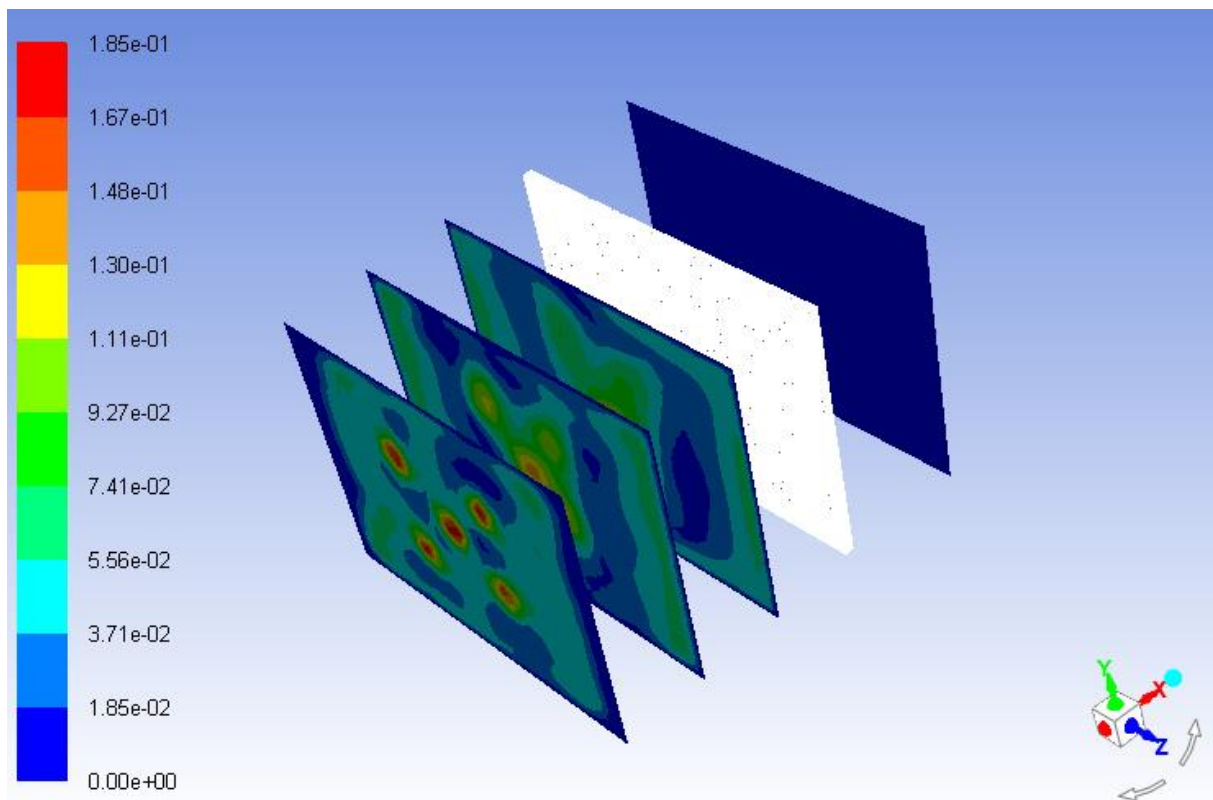
reversed flow in 42 faces on pressure-outlet 10.
1201 2.7710e-05 8.9787e-04 6.1117e-04 5.7185e-04 5.4047e-09 1.0951e-03 6.0113e-03 0.0000e+00 1.9796e-05 0.0000e+00 0.0000e+00

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 60: Τιμές των residuals στα 1200 iterations ( $c = 0$  εμπρόςθια όψη καμβά)

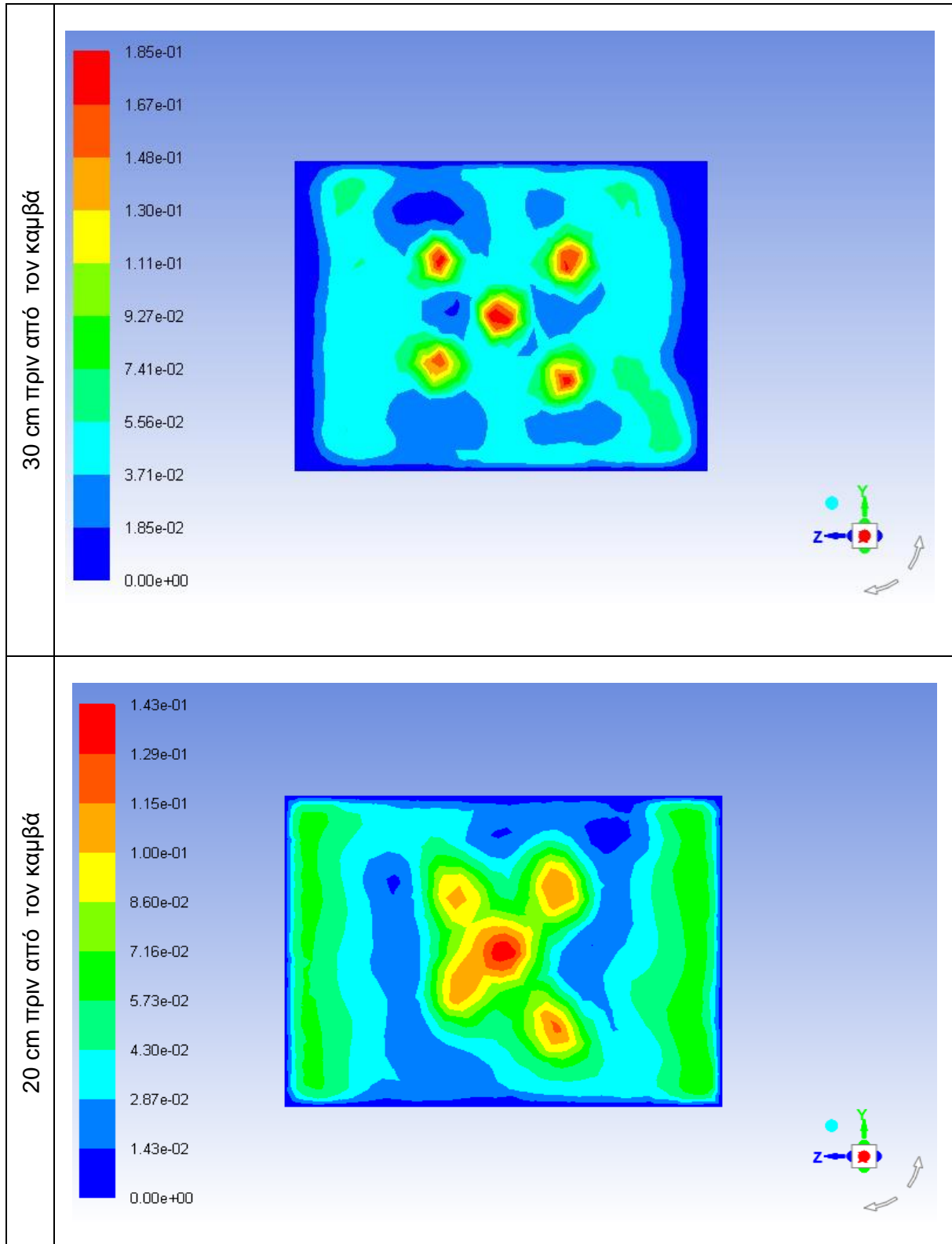
Στους Πίνακες 7 και 8, παρουσιάζονται contours των planes που έχουν δημιουργηθεί κάθετα στον άξονα x με διαφορετικές αποστάσεις κάθε φορά από τον καμβά. Στην Εικόνα 61 παρουσιάζονται όλα ταυτόχρονα με το καμβά για να γίνει κατανοητή η διάταξη τους στο χώρο.

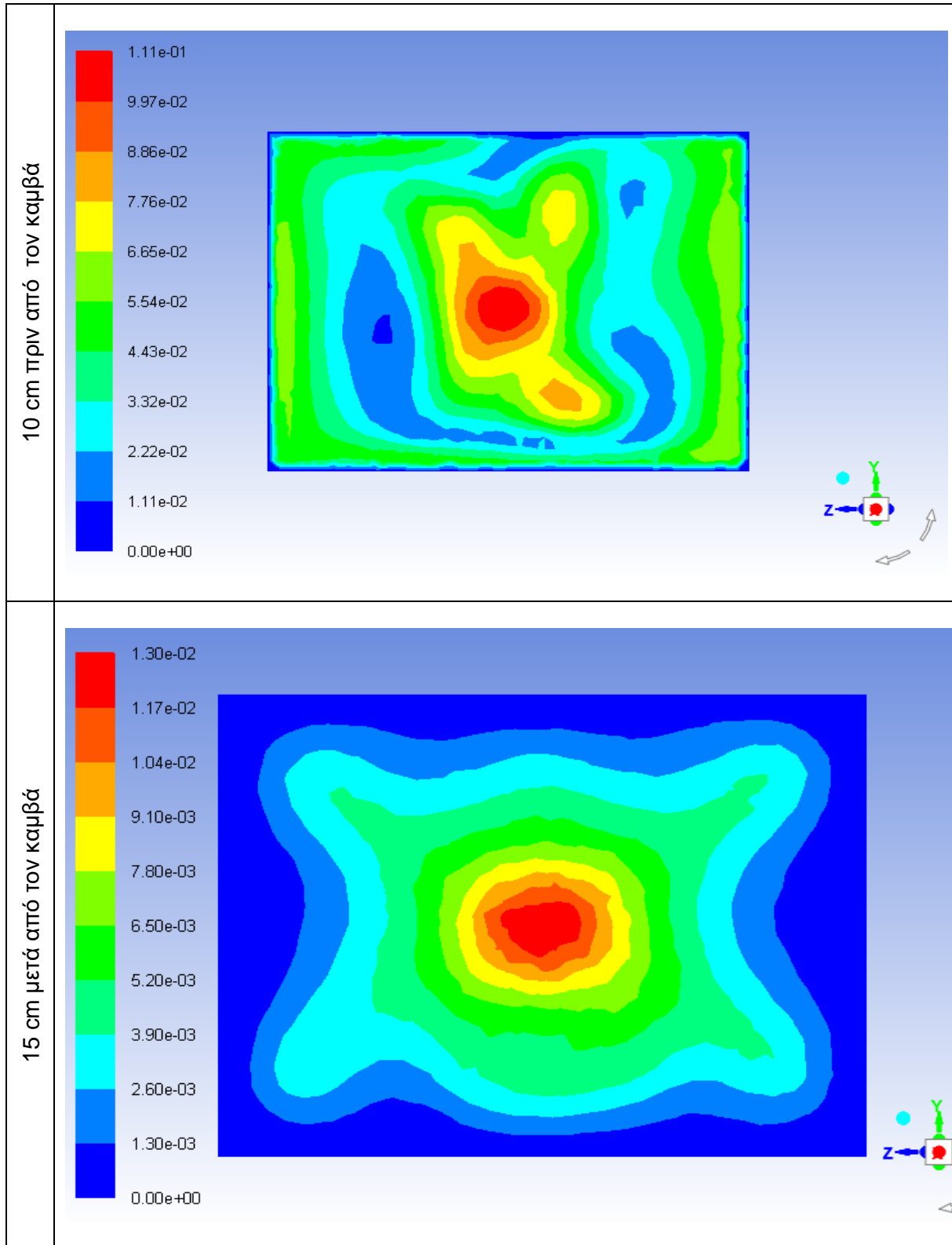


Εικόνα 61: Contour διαφορετικών plane στον θάλαμο προσομοίωσης ( $c=0$  εμπρόςθια όψη καμβά)



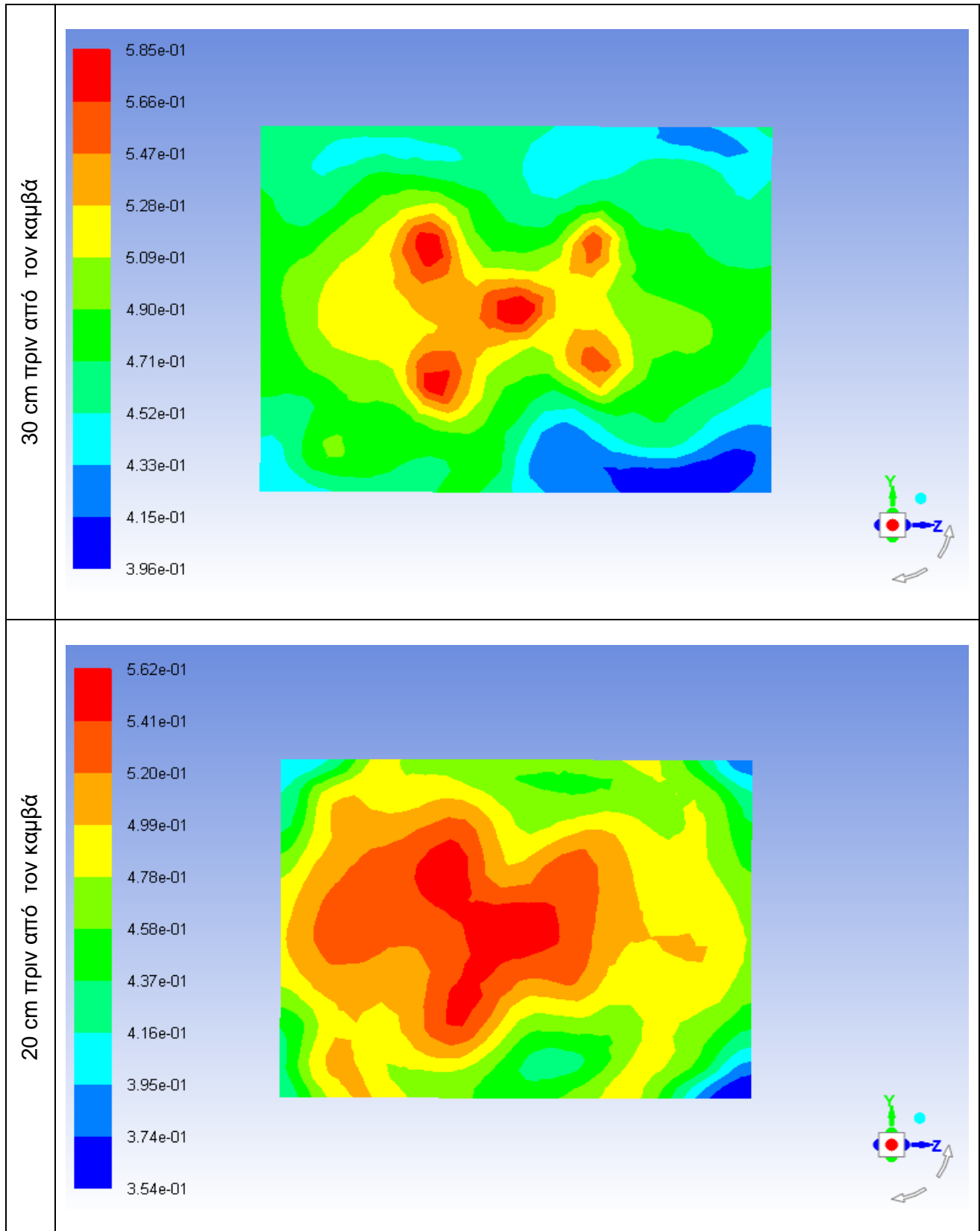
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά contours κατανομής της ταχύτητας σε παράλληλα planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά ( $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά)

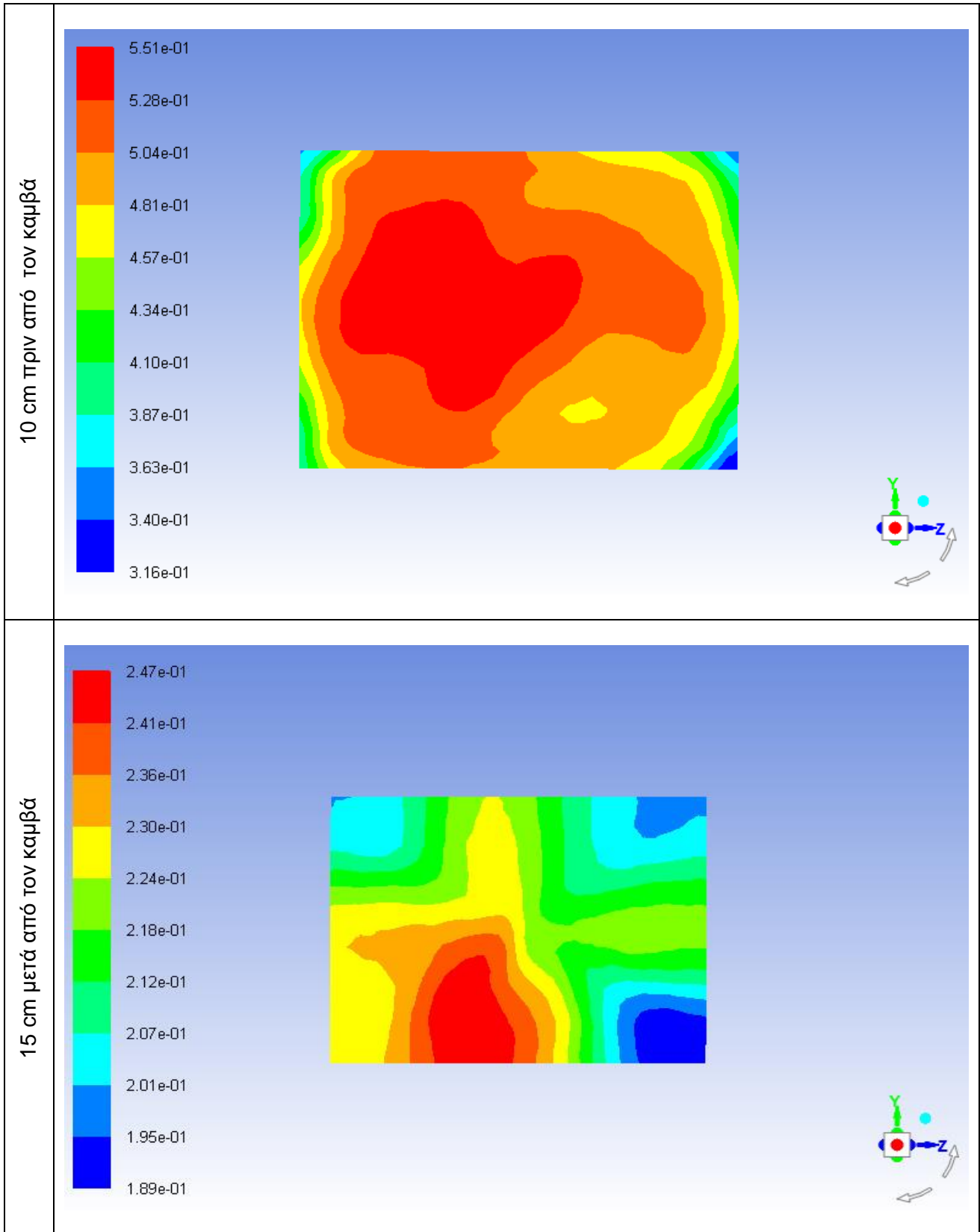




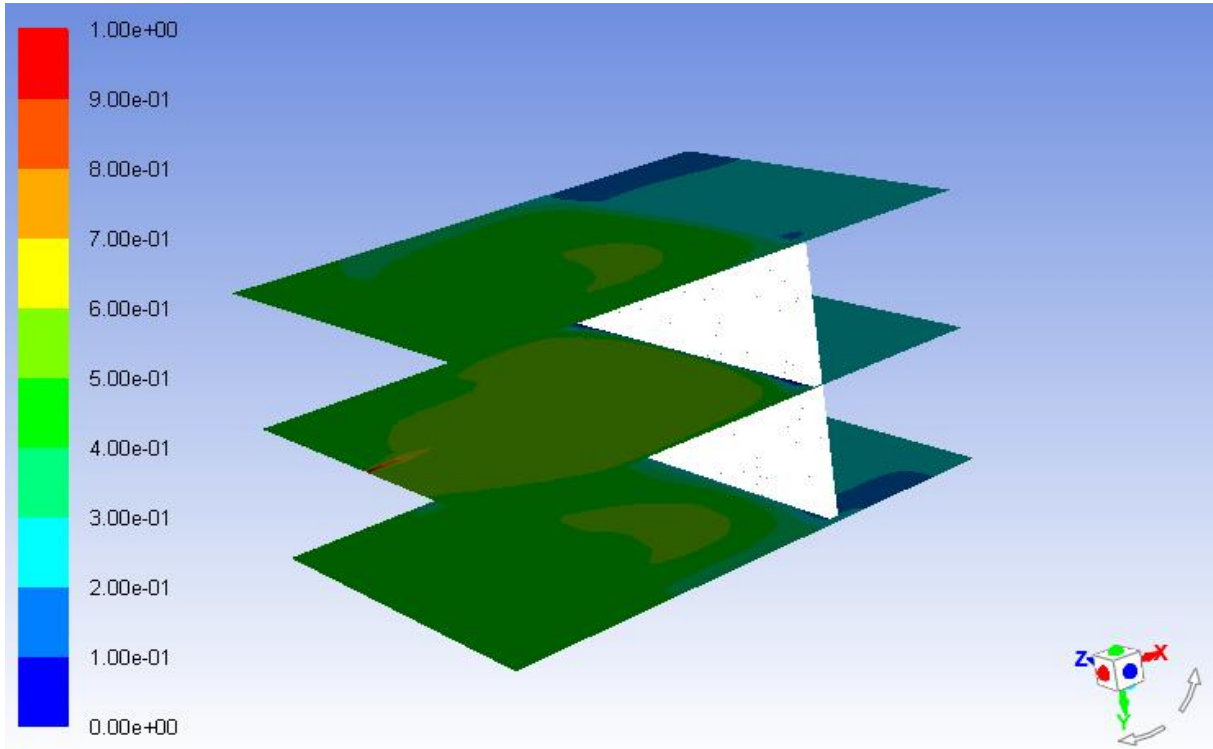


Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά contours του mass fraction  $CO_2$  σε παράλληλα planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά ( $c=0$  εμπρός/πίσω όψη καμβά)



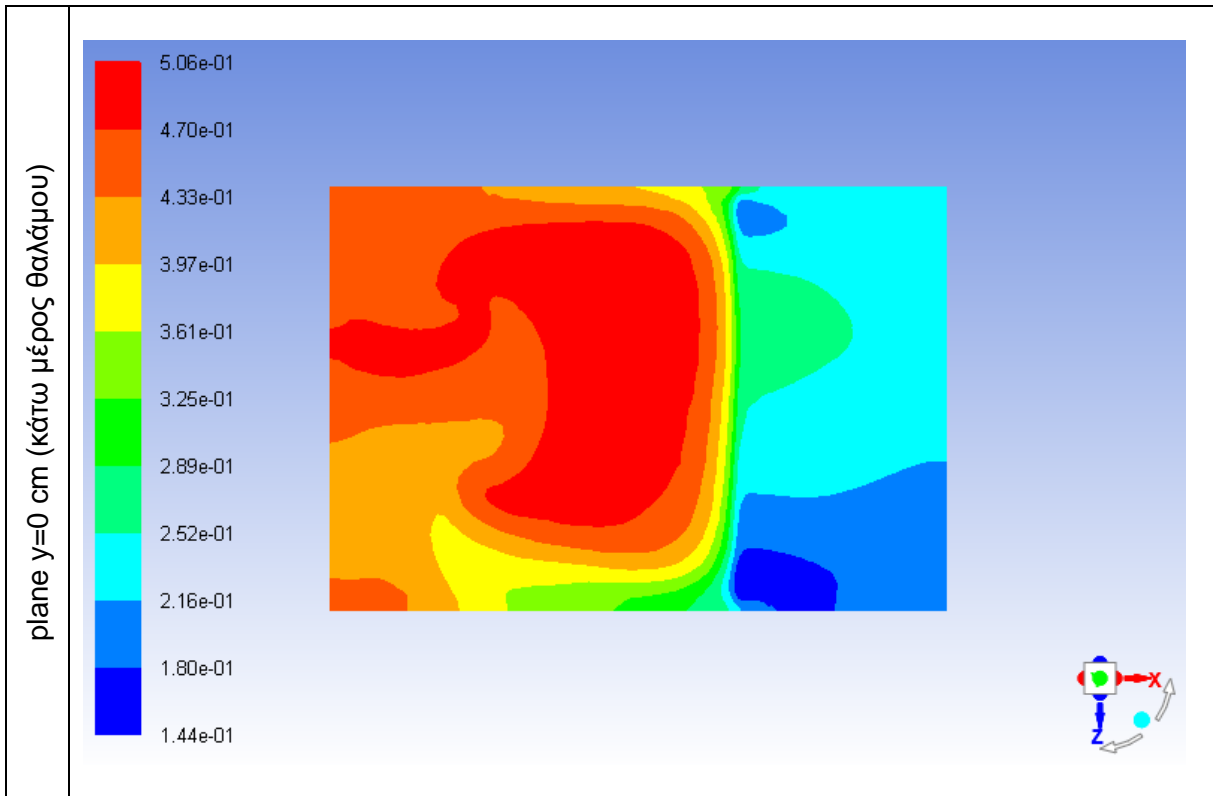


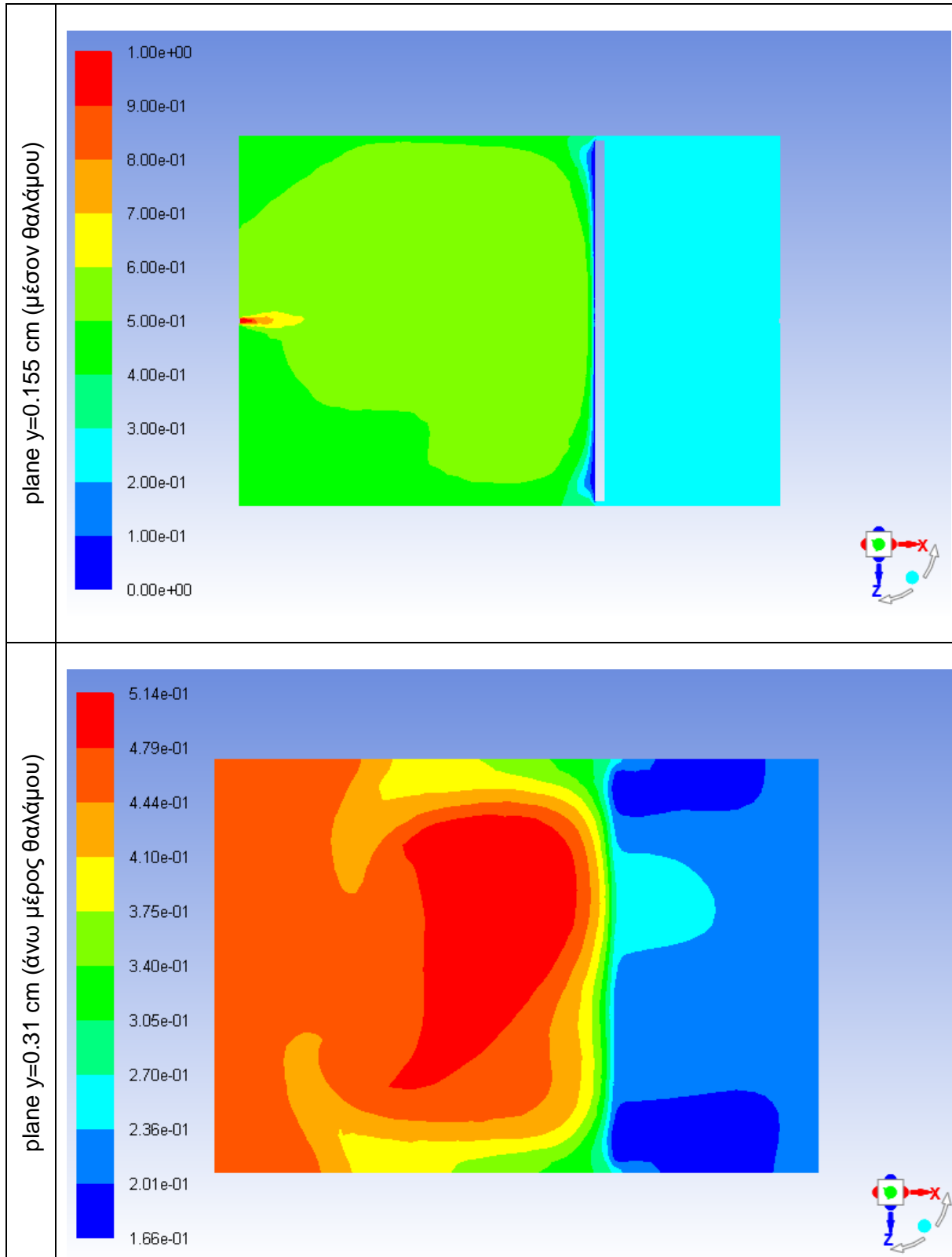
Στην Εικόνα 62 εμφανίζονται contours σε διαφορετικά planes, παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα στον άξονα y.



Εικόνα 62: Διάταξη παραπάνω planes στο θάλαμο προσομοίωσης ( $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά)

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά contours του mass fraction  $CO_2$  σε planes κάθετα στον άξονα  $y$  ( $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά)





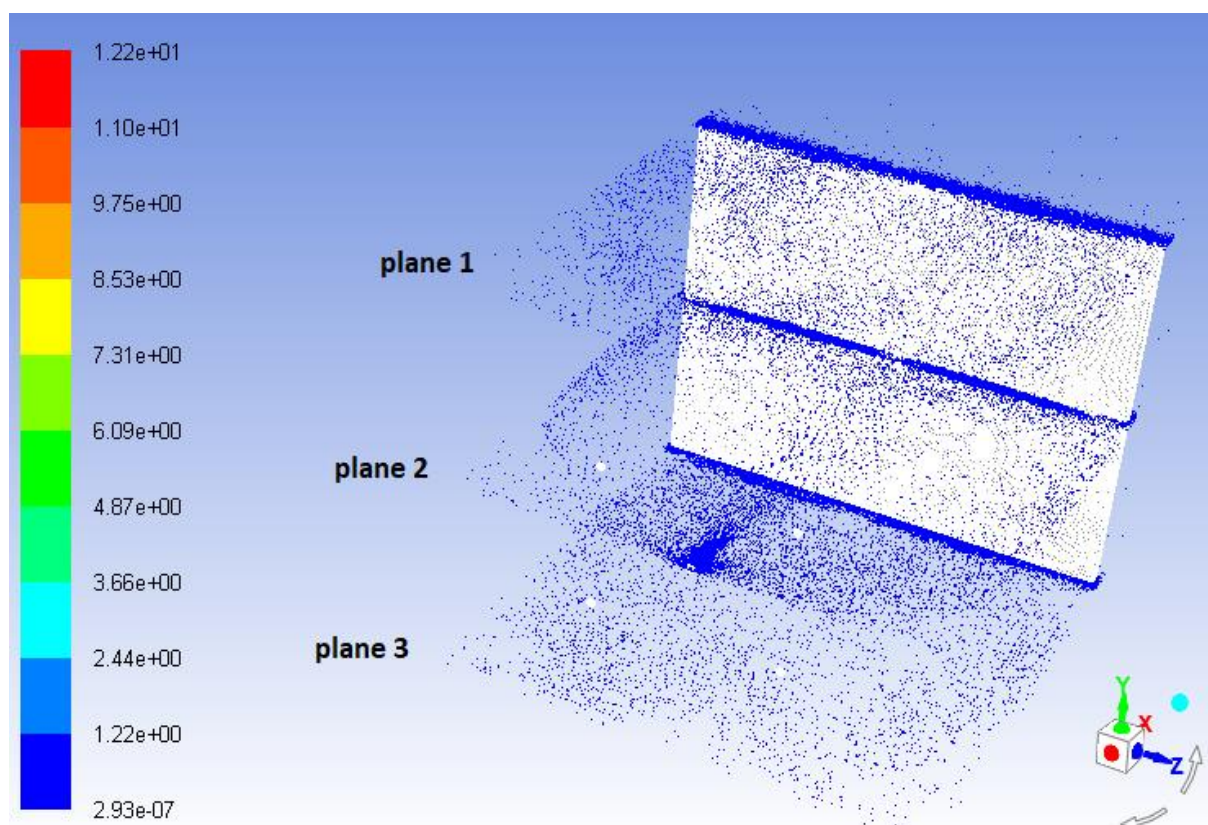


Τα planes που απεικονίζονται στις Εικόνες 63 και 64 έχουν δημιουργηθεί κατά μήκος του άξονα x και z. Στον Πίνακα 10 καταγράφονται συγκεντρωτικά οι συντεταγμένες των planes.

Πίνακας 10: Συντεταγμένες των planes ( $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά)

plane	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

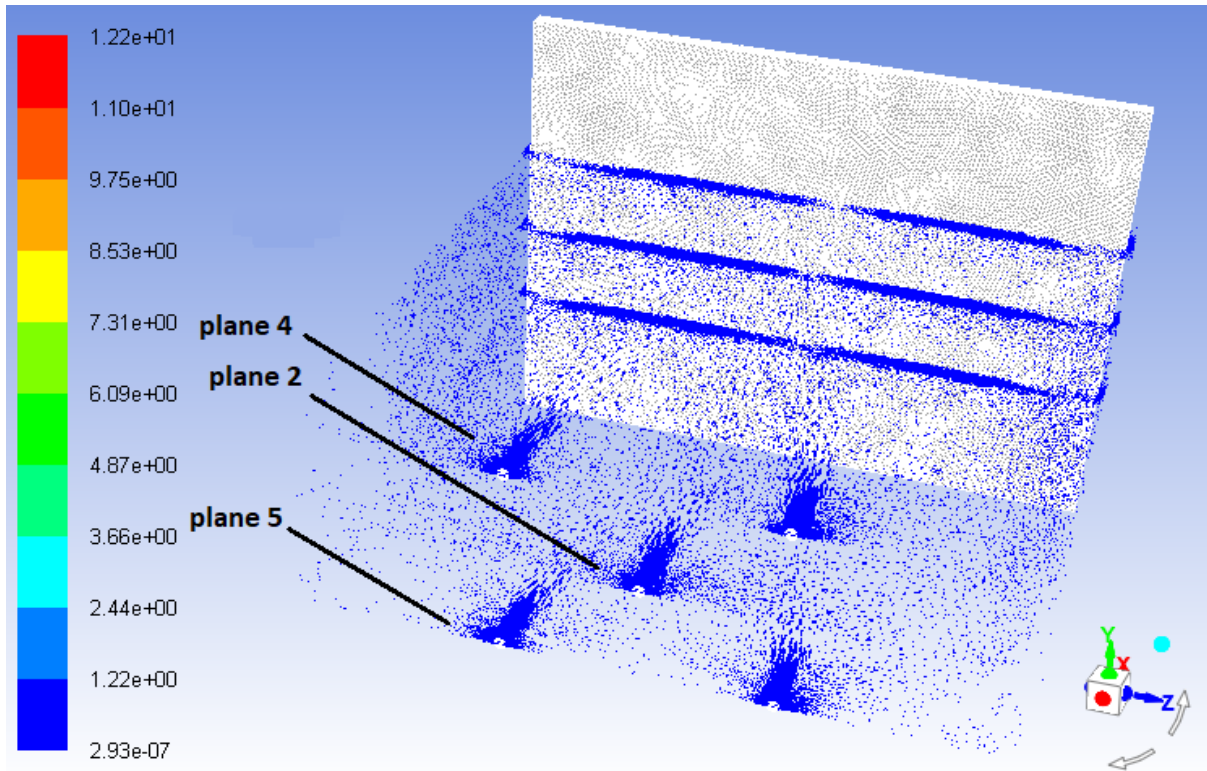
Στην Εικόνα 63, διακρίνονται τα plane 1 και 3, τα οποία απεικονίζουν τα διανύσματα της ταχύτητας της ροής που περνάει από το κενό που σχηματίζεται μεταξύ θαλάμου και καμβά αντίστοιχα. Ενώ στο plane 2 απεικονίζεται η ταχύτητα της ροής που ξεκινάει ακριβώς από την κεντρική οπή.



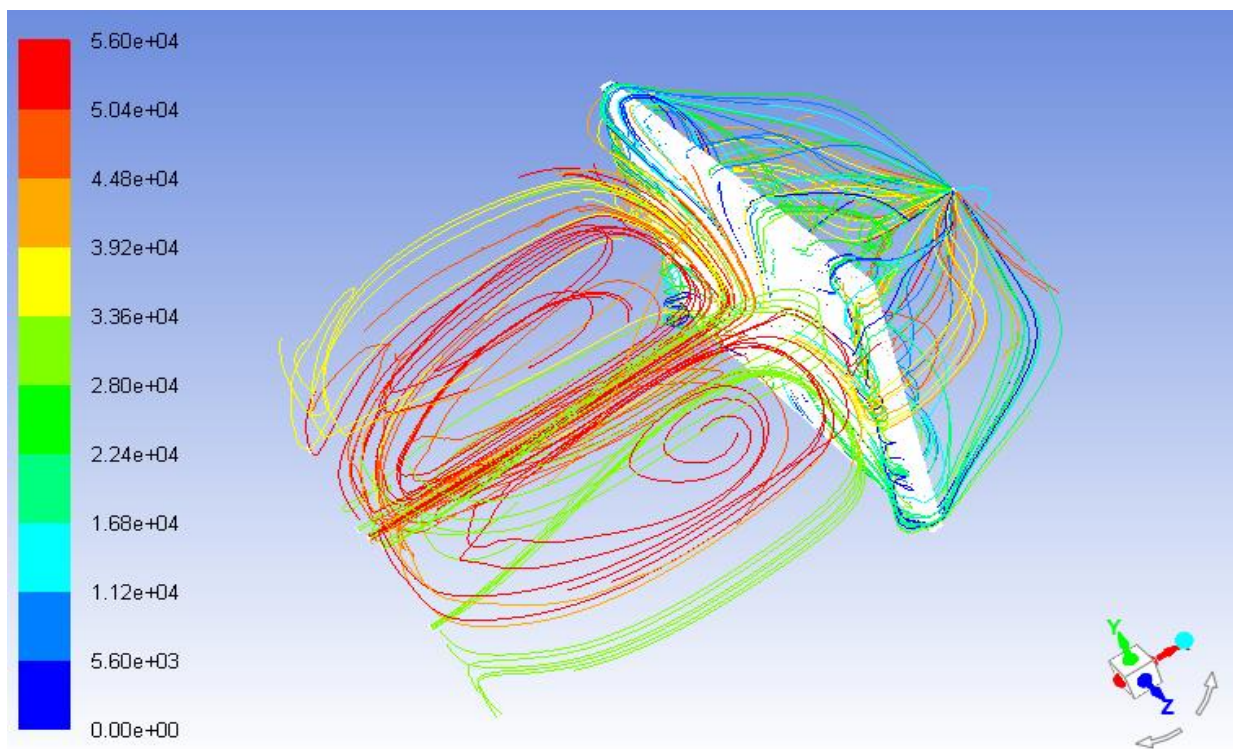
Εικόνα 63: Vectors plots του velocity σε τρία διαφορετικά planes ( $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά)

Στην Εικόνα 64, τα plane 4,5 απεικονίζουν τα διανύσματα της ταχύτητας της ροής που ξεκινά από τις υπόλοιπες οπές εισόδου. Αυτό που διακρίνεται στην αρχή του θαλάμου, είναι τα πέντε (5) σημεία, όπου φαίνονται τα διανύσματα να είναι πυκνότερα.





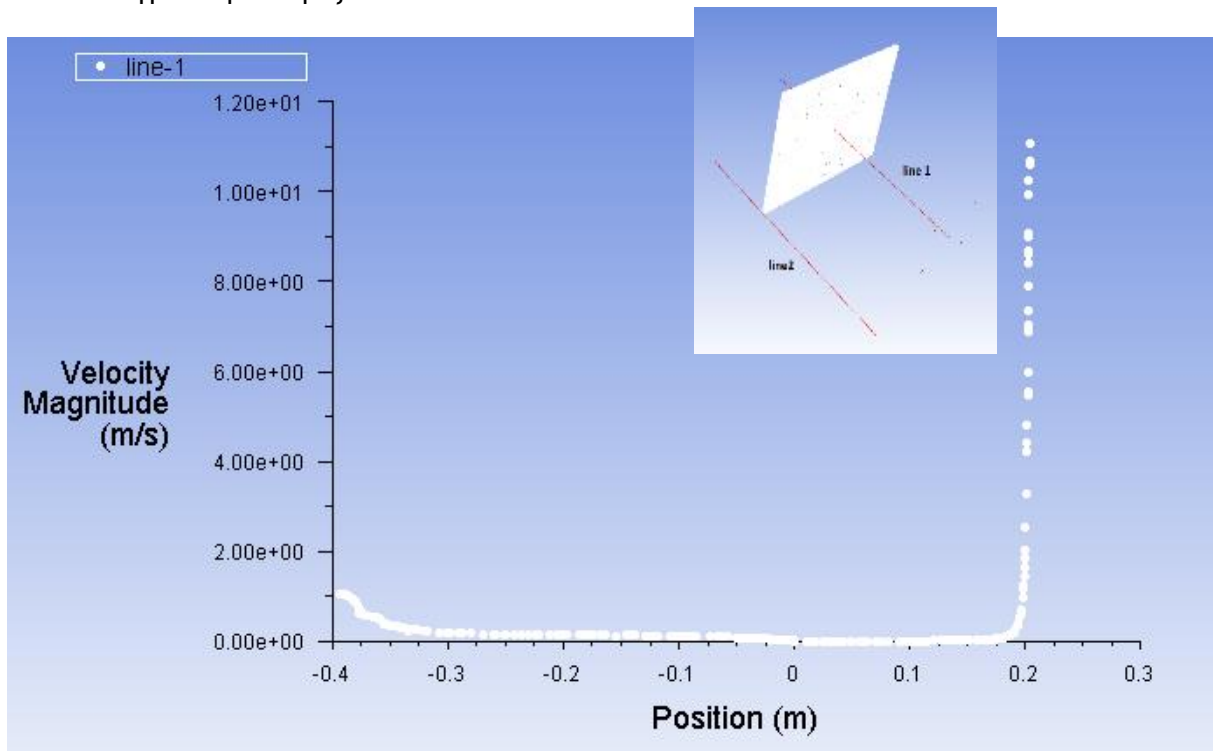
Εικόνα 64: Vectors plots του velocity σε τρία διαφορετικά planes ( $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά)



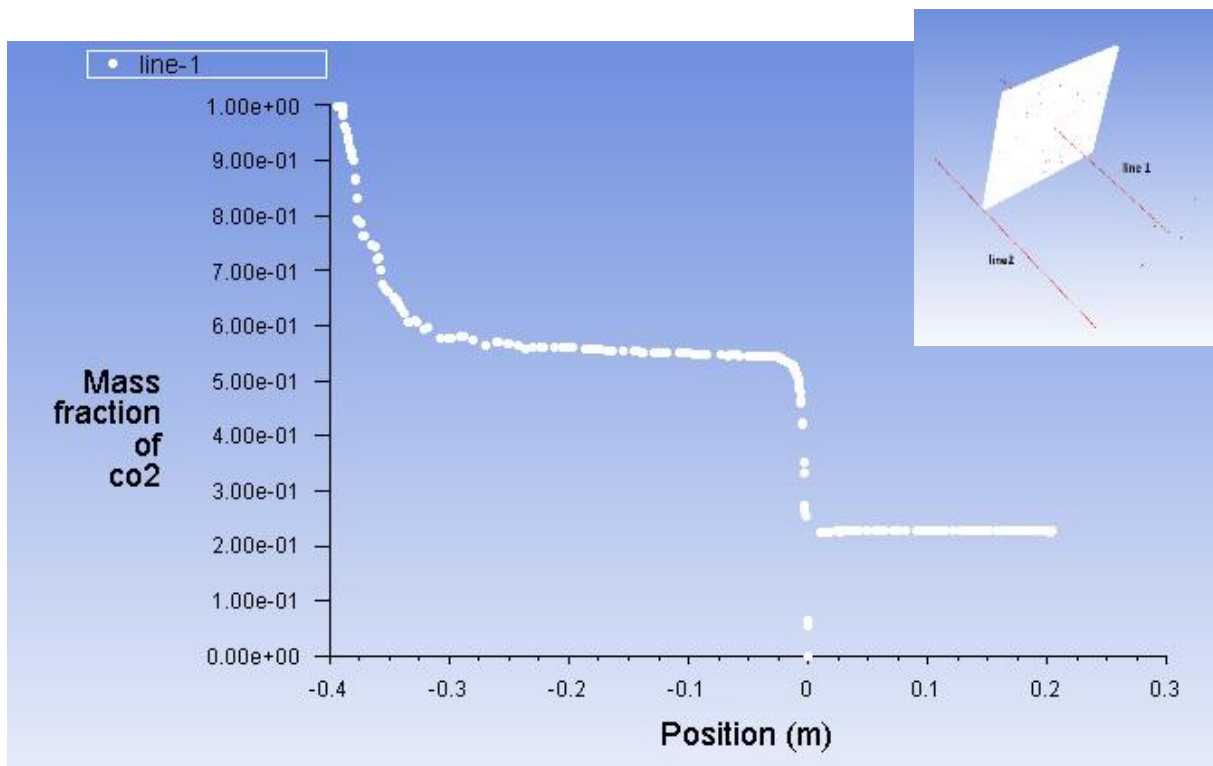
Εικόνα 65: Pathlines για  $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά



Παρακάτω παρουσιάζονται x-y plots, (Διάγραμμα 9 και 10), τα οποία έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με την κεντρική γραμμή που ξεκινάει από την κεντρική οπή εισόδου και καταλήγει στην οπή εξόδου.



Διάγραμμα 9: Κατανομή ταχύτητας (line- 1) ( $c=0$  εμπρόςθια όψη καμβά)



Διάγραμμα 10: Κατακράτηση  $CO_2$  επάνω στο καμβά (line- 1) ( $c=0$  εμπρόςθια όψη καμβά)

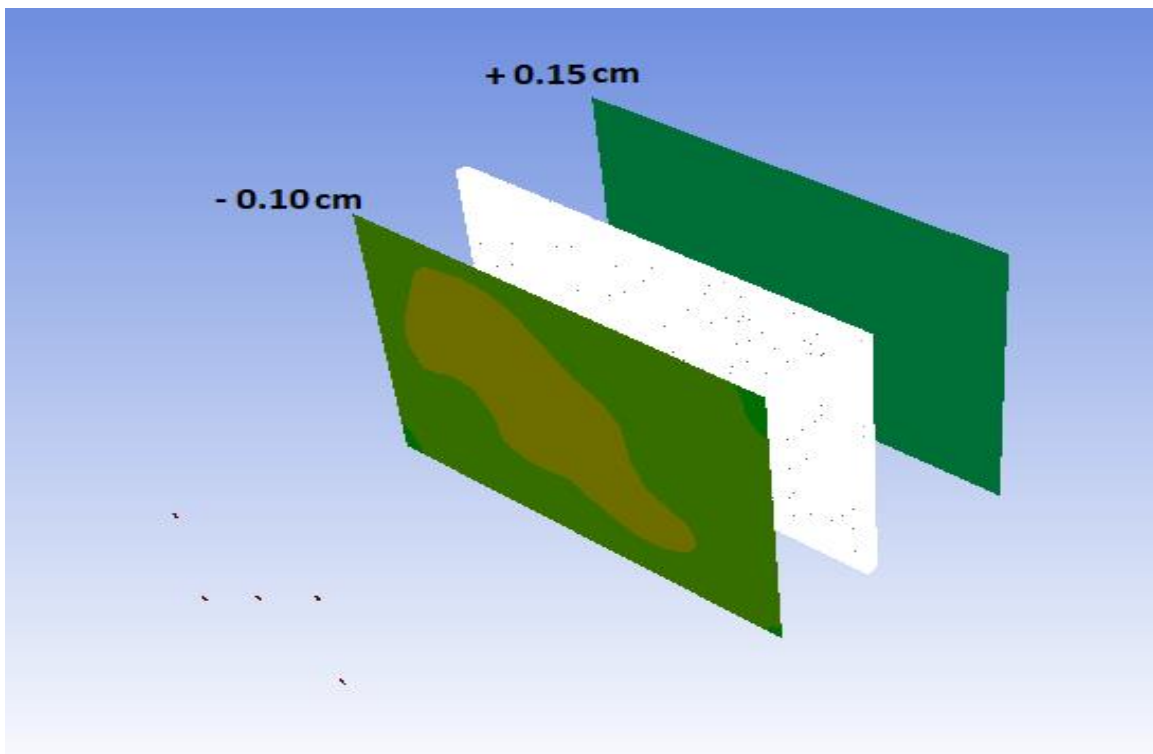


Από τα ανωτέρω Διαγράμματα παρατηρείται ότι το ποσοστό της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) πριν τον καμβά είναι περίπου 0.55. Σημειώνεται ότι η ροή λαμβάνεται υπόψιν από τη στιγμή που σταθεροποιείται. Αφού διαπεράσει τον καμβά το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) διακρίνεται ότι η συγκέντρωση είναι περίπου 0.23. Εφόσον είναι γνωστές οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) πριν και μετά τον καμβά υπολογίζεται το ποσοστό που επικάθεται επάνω στον καμβά και είναι:

$$c_{\text{απορ.}} = \frac{0.55 - 0.23}{0.55} 100\% = 58\% \quad [4.1]$$

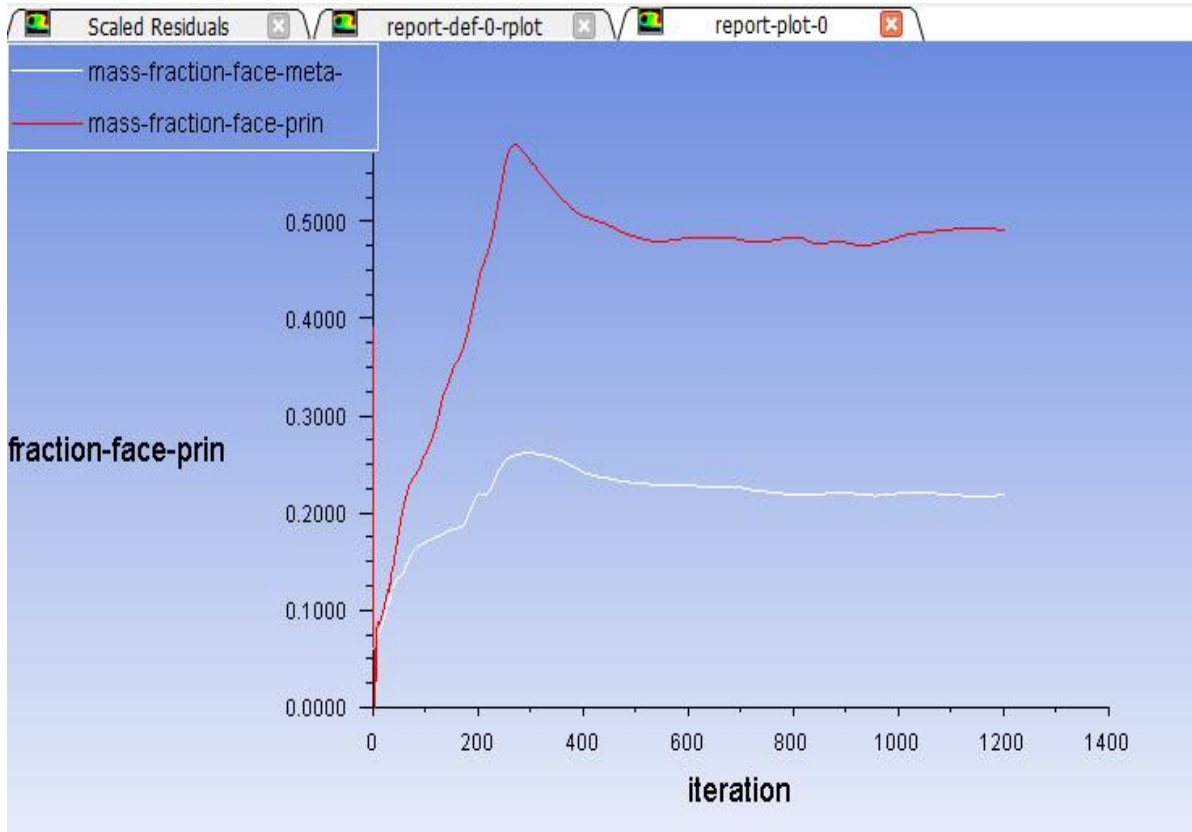
Οπότε, από τους ανωτέρω υπολογισμούς το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) που επικάθεται επάνω στον καμβά είναι περίπου 58%.

Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι αντιπροσωπευτικά αφού οι τιμές αφορούν μόνο την γραμμή που σχεδιάζεται. Έτσι για μεγαλύτερη ακρίβεια δημιουργούνται δύο (2) planes (Εικόνα 66), ένα 10 cm πριν τον καμβά και ένα 15 cm μετά τον καμβά. Αυτό δίνει την δυνατότητα να ληφθούν μέσες τιμές του mass fraction του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) πριν και μετά το πλάνο. Η προαναφερόμενη διαδικασία οδηγεί στον υπολογισμό του ποσοστού απορρόφησης του ρύπου από τον καμβά με μεγαλύτερη ακρίβεια.



Εικόνα 66: Διάταξη των planes σε σχέση με τον καμβά ( $c=0$  εμπρός όψη καμβά)

Στο Διάγραμμα 11, φαίνονται οι δύο καμπύλες των μέσων τιμών του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) mass fraction. Η άσπρη αφορά το plane μετά τον καμβά και η κόκκινη το plane πριν από αυτόν.



Διάγραμμα 11: CO<sub>2</sub> mass fraction plot (c=0 εμπρόςθια όψη καμβά)

Με το τέλος του υπολογισμού στα 1200 iterations, στο κομμάτι της κονσόλας του προγράμματος, λαμβάνονται οι ακριβείς τιμές των συγκεντρώσεων πριν και μετά τον καμβά (Εικόνα 67).

```
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 67: Results, 1200 iterations (c = 0 εμπρόςθια όψη καμβά)

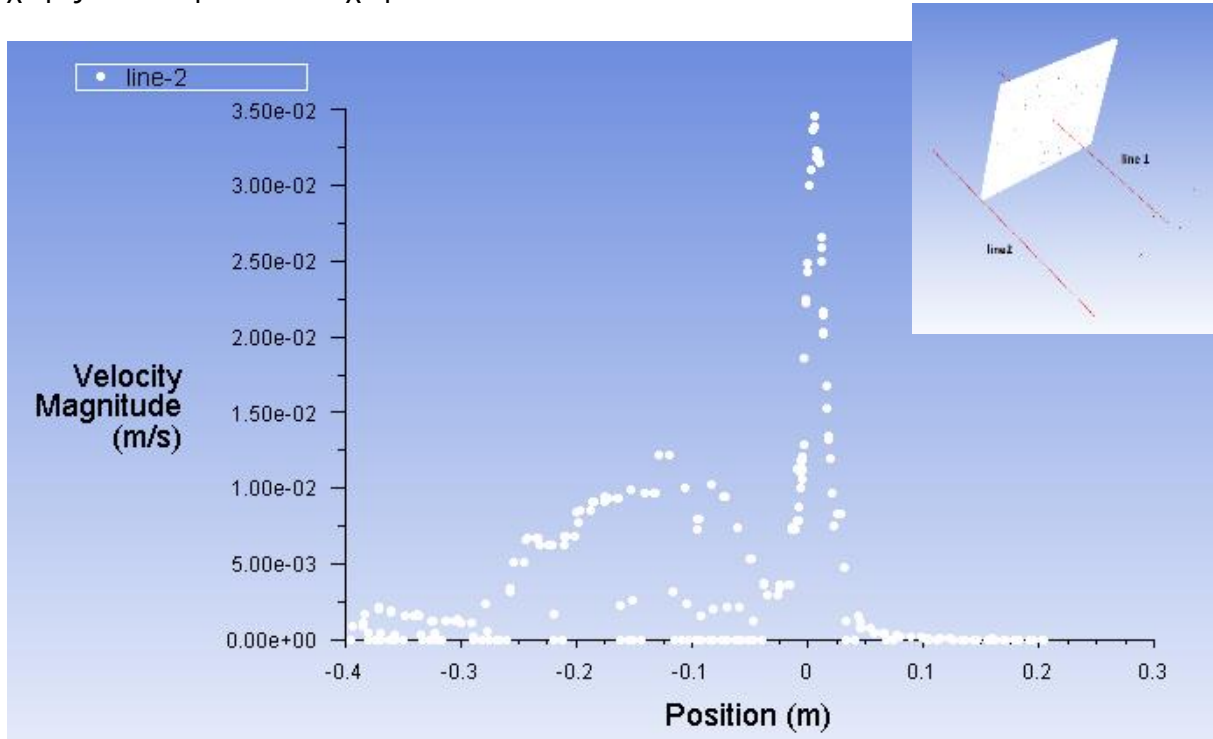
Με τα ανωτέρω αποτελέσματα δίνεται η δυνατότητα στον ακριβή υπολογισμό του ποσοστού απορρόφησης του ρύπου από τον καμβά, το οποίο προκύπτει ως εξής:

$$c_{\text{απορ.}} = \frac{0.49133 - 0.2185}{0.49133} 100\% = 55.53\% \quad [4.2]$$

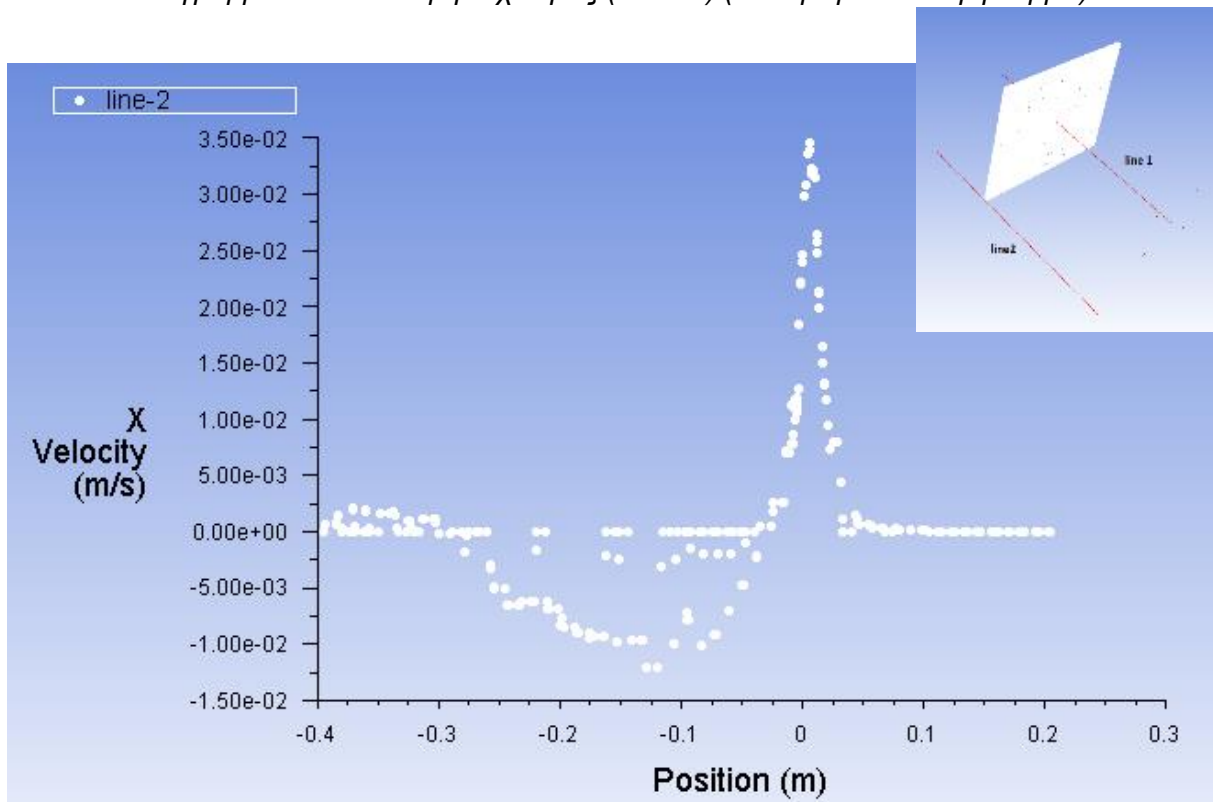
Οπότε, από τους ανωτέρω υπολογισμούς το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που επικάθεται επάνω στον καμβά είναι περίπου 56%.



Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα x-y plots (Διάγραμμα 12 και 13), 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 ακουμπά στο τοίχωμα.



Διάγραμμα 12: Κατανομή ταχύτητας (line - 2) ( $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά)

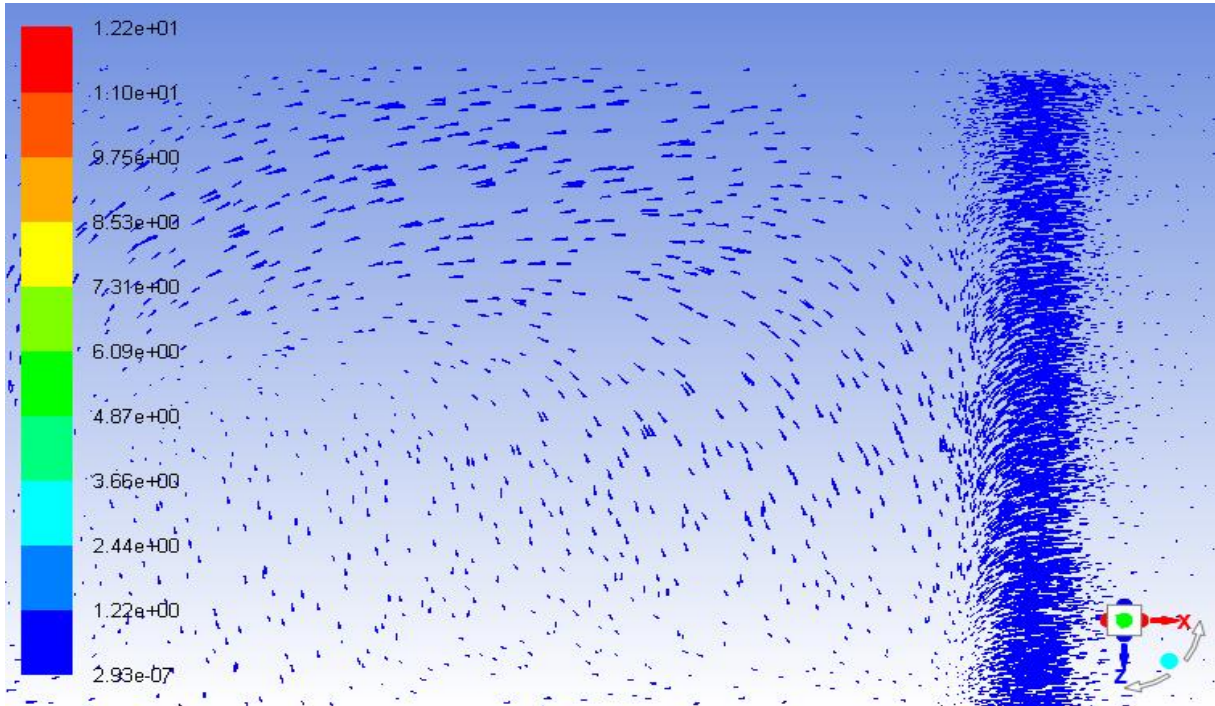


Διάγραμμα 13: Κατανομή ταχύτητας στον άξονα x (line - 2) ( $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά)

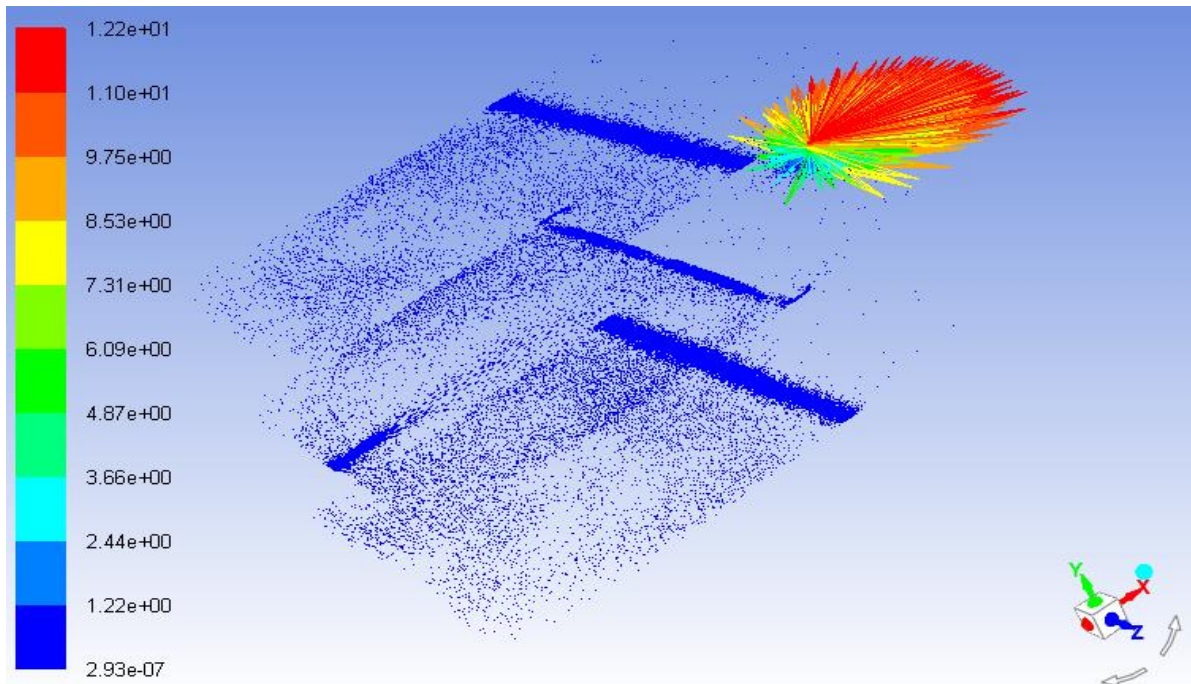




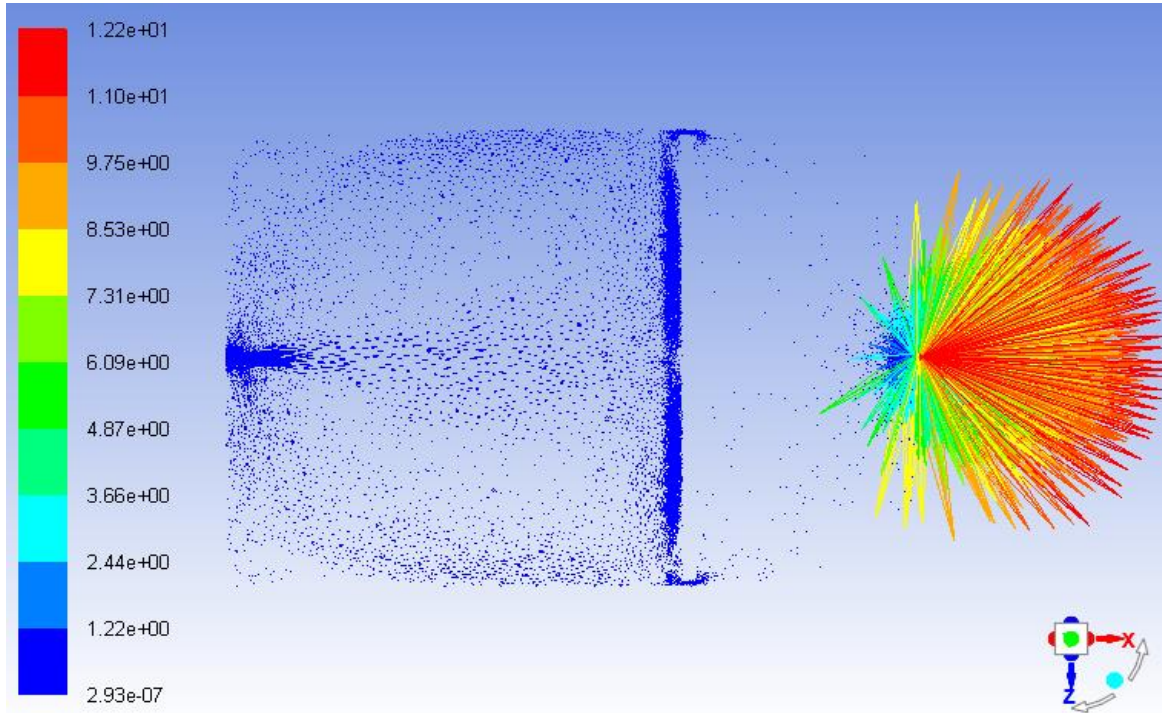
Στο Διάγραμμα 13 διακρίνεται ότι πριν τη θέση του καμβά, η ταχύτητα αποκτά και αρνητικές τιμές και αυτό οφείλεται στην ανακυκλοφορία (τύρβη) που σχηματίζεται στο εμπρόσθιο τμήμα του θαλάμου (Εικόνα 68).



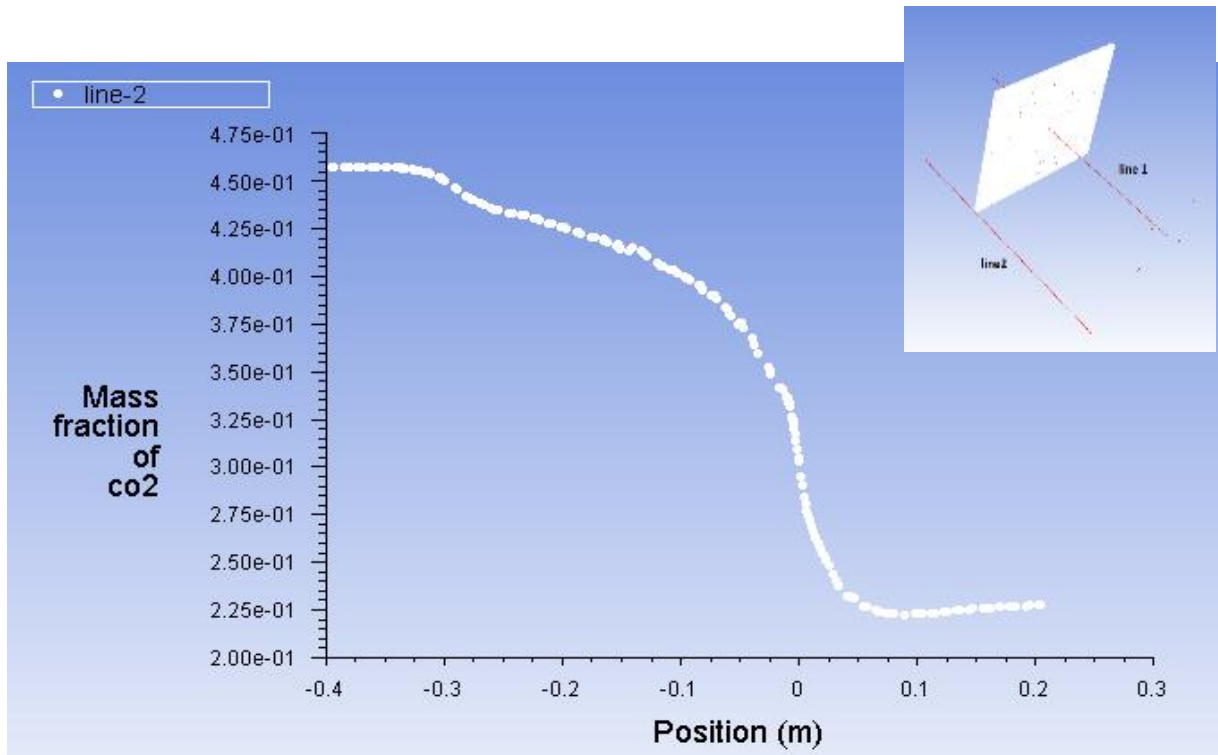
Εικόνα 68: Vectors plot της ταχύτητας στο εμπρόσθιο τμήμα του θαλάμου ( $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά)



Εικόνα 69: Vectors plot της ταχύτητας κατά μήκος του θαλάμου ( $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά) (όψη α)



Εικόνα 70: Vectors plot της ταχύτητας κατά μήκος του θαλάμου ( $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά) (όψη β)

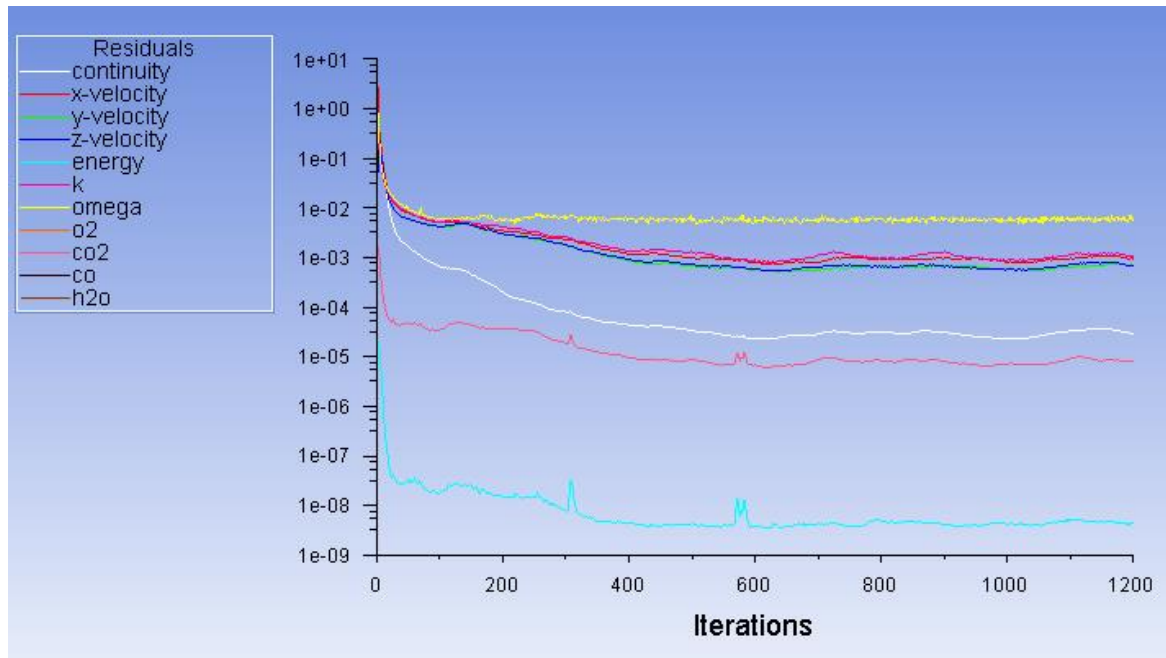


Διάγραμμα 14: Κατακράτηση  $CO_2$  επάνω στο καμβά (line -2) ( $c=0$  εμπρόσθια όψη καμβά)





#### 4.2.2. Πρόβλημα $c = 0.5$ εμπρόσθια όψη καμβά



Διάγραμμα 15: Διάγραμμα επίλυσης του προβλήματος  $c = 0.5$  εμπρόσθια όψη καμβά

```
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

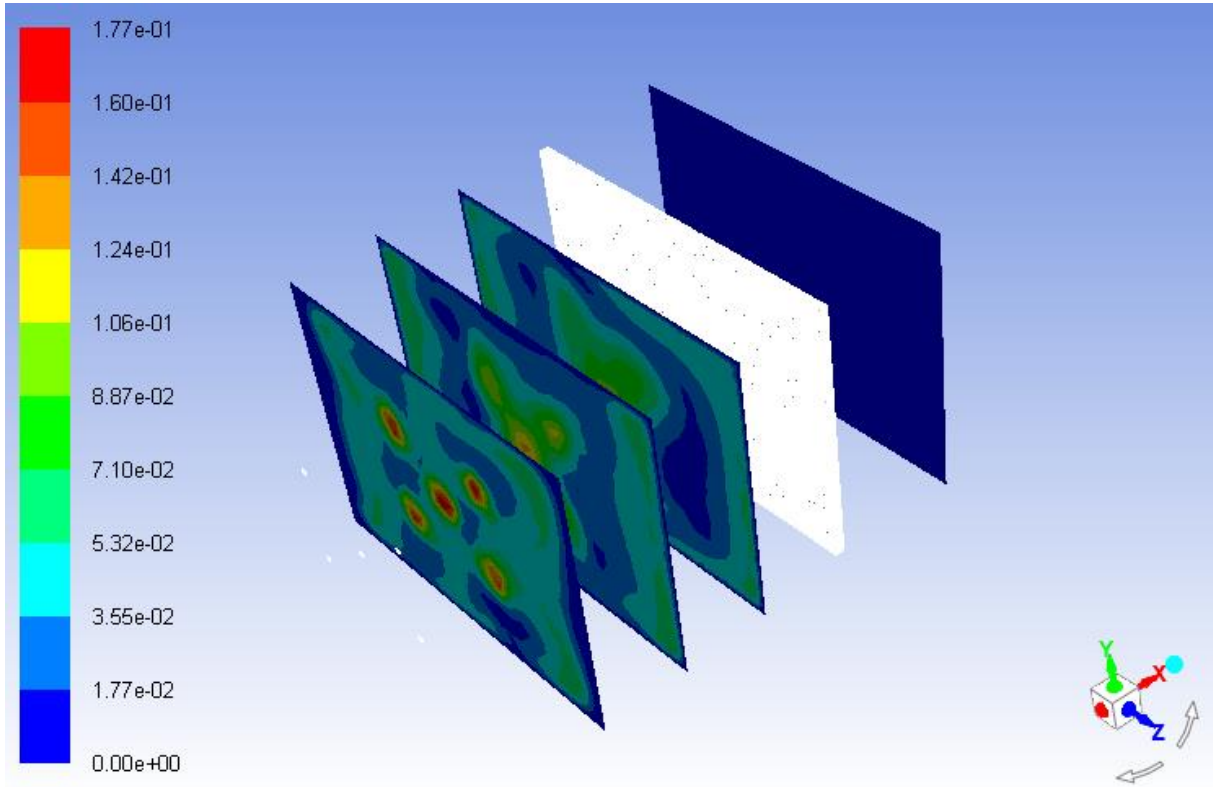
reversed flow in 43 faces on pressure-outlet 10.
1202 2.9111e-05 9.2609e-04 6.7775e-04 6.5686e-04 4.2815e-09 1.0342e-03 6.6856e-03 0.0000e+00 8.0425e-06 0.0000e+00 0.0000e+00

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.
```

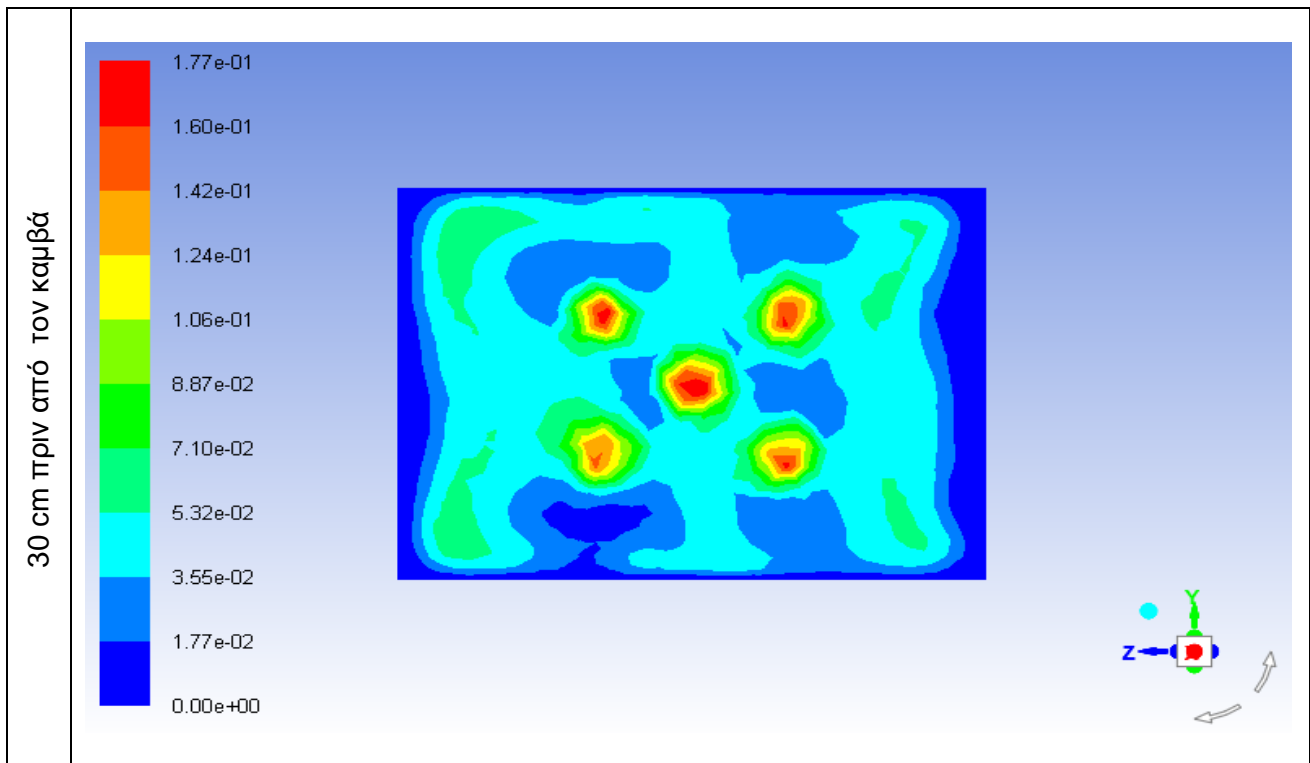
Εικόνα 71: Τιμές των residuals στα 1200 iterations ( $c = 0.5$  εμπρόσθια όψη καμβά)

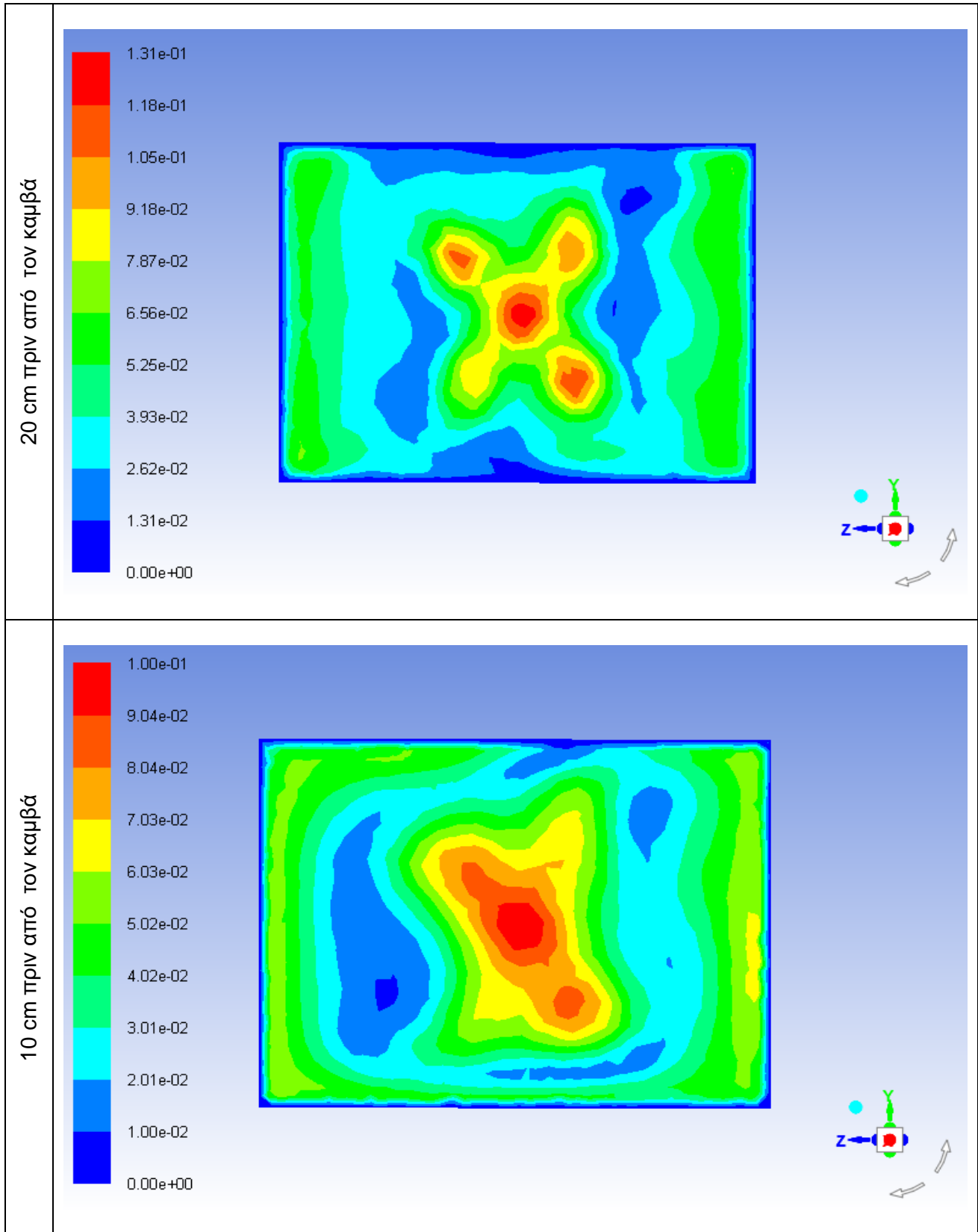
Στη συνέχεια δημιουργούνται τα planes (Εικόνα 72), τα οποία είναι κάθετα στον άξονα  $x$  με σκοπό να παρουσιαστούν τα contours και τα vectors plots που απαιτούνται.

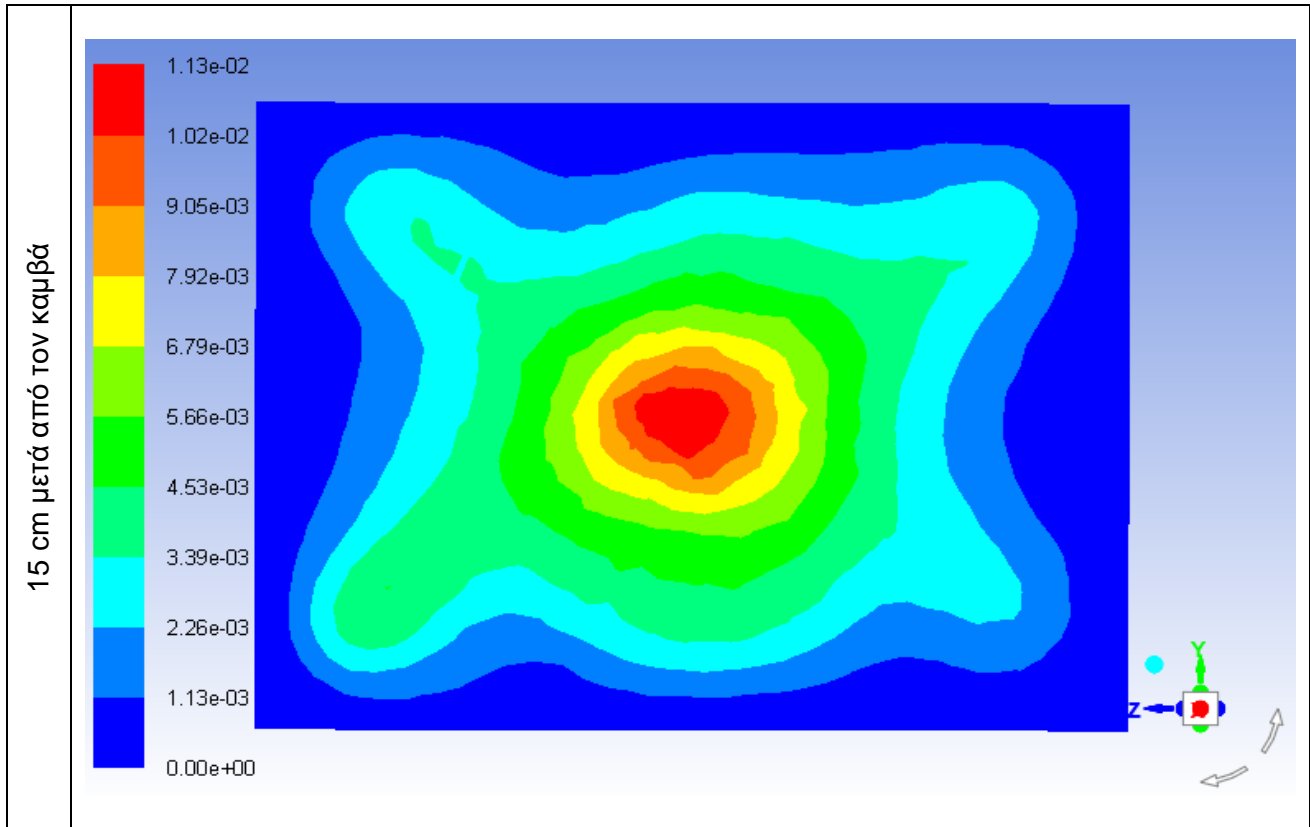


Εικόνα 72: Διάταξη planes που είναι κάθετα στον άξονα x ( $c = 0.5$  εμπρόςθια όψη καμβά)

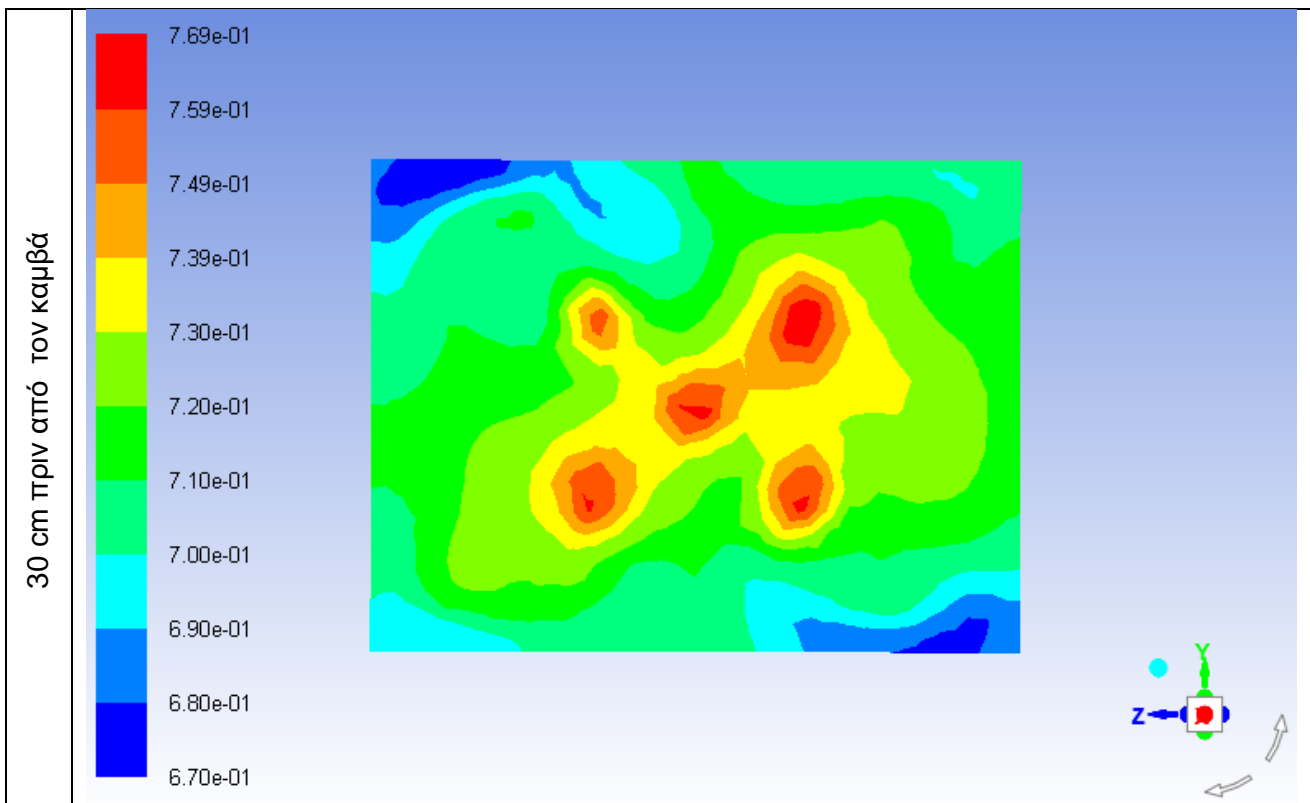
Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά contours κατανομής της ταχύτητας σε παράλληλα planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά ( $c = 0.5$  εμπρόςθια όψη καμβά)

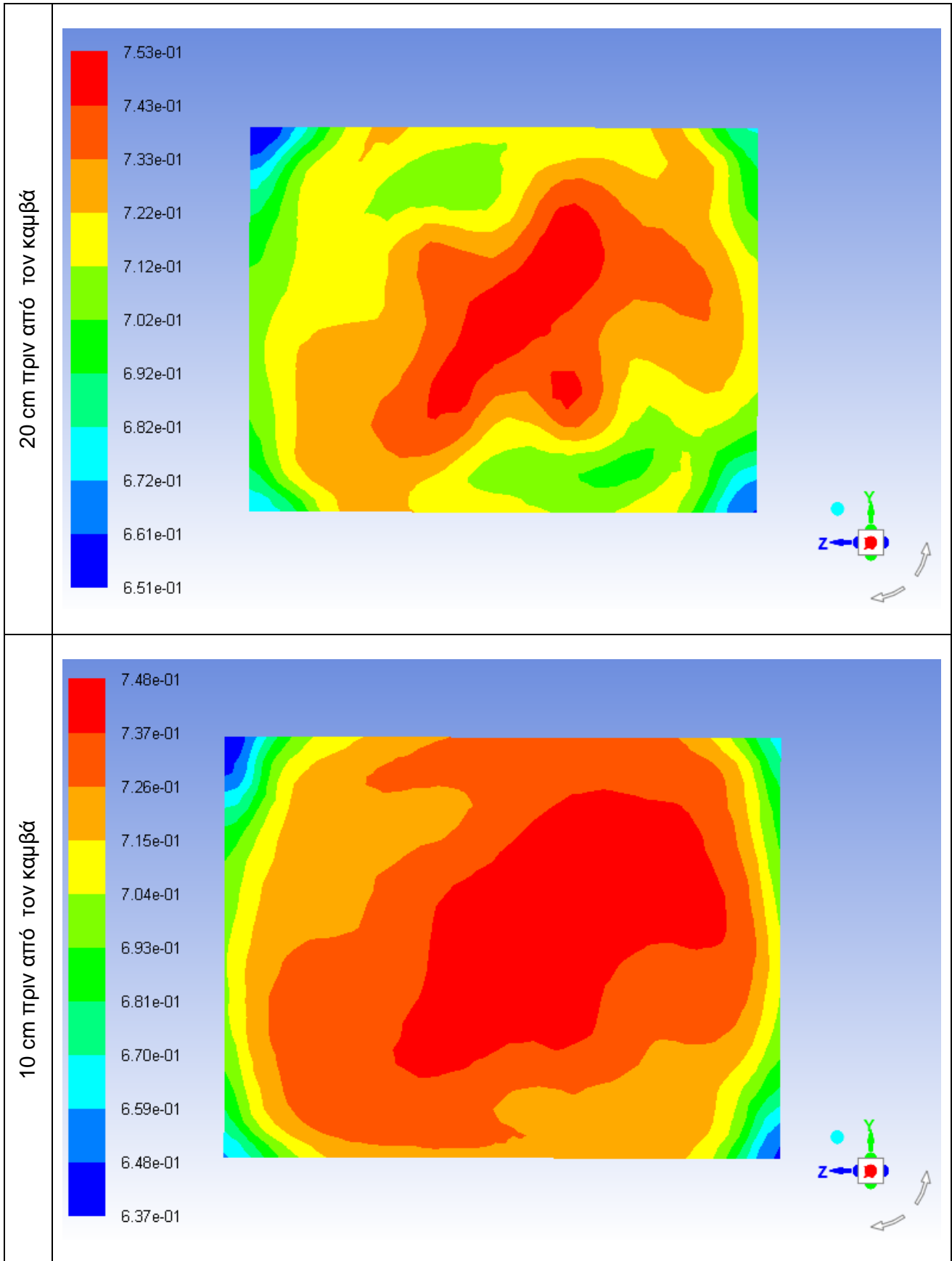


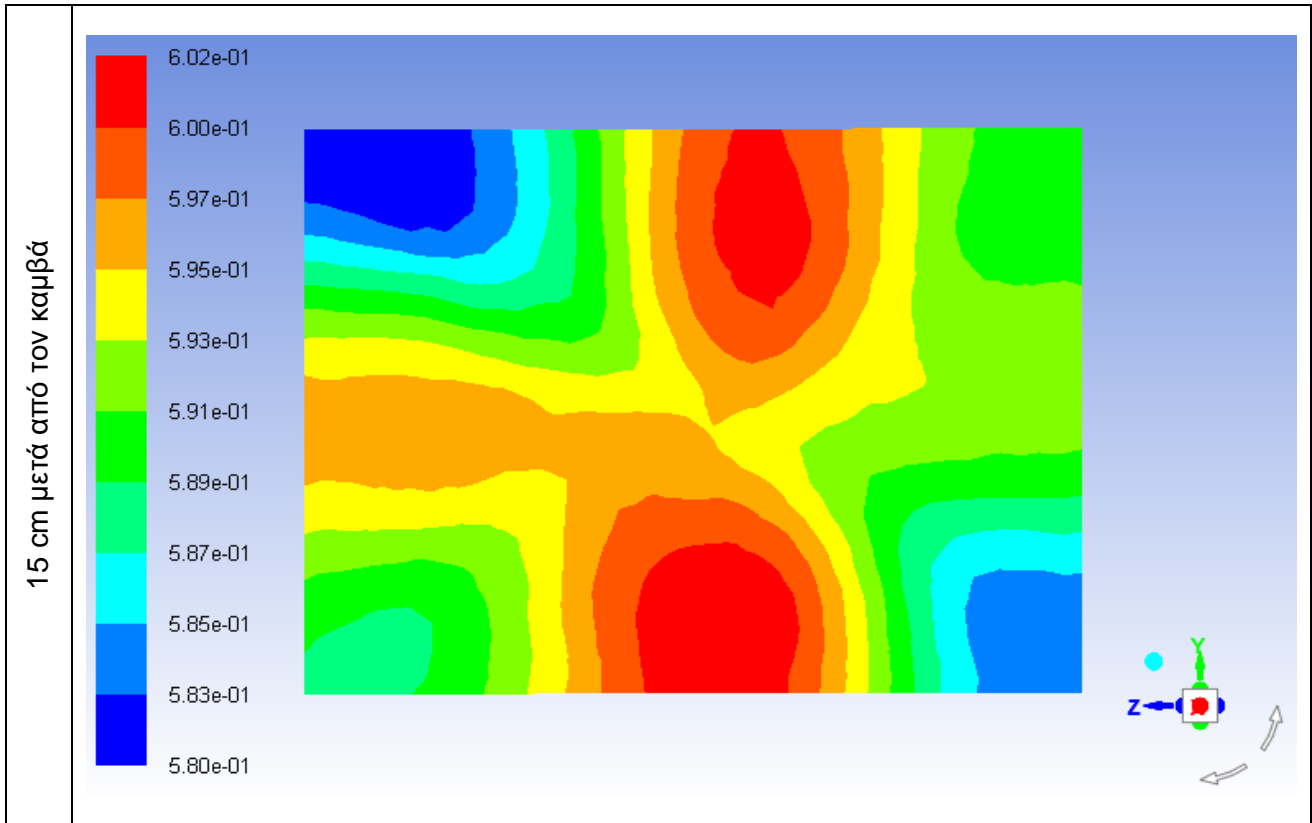




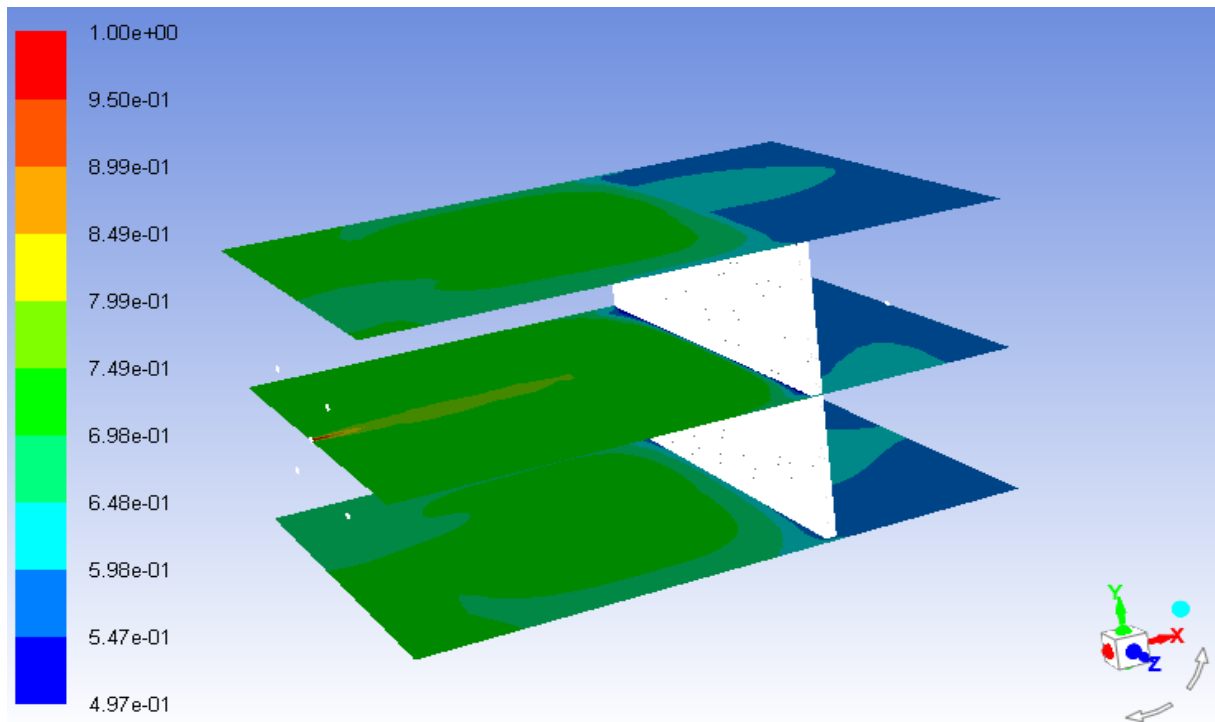
Πίνακας 12: Χαρακτηριστικά contours του mass fraction  $CO_2$  σε παράλληλα planes που έχουν σταθερή απόσταση από τον καμβά ( $c = 0.5$  εμπρός/πίσω όψη καμβά)







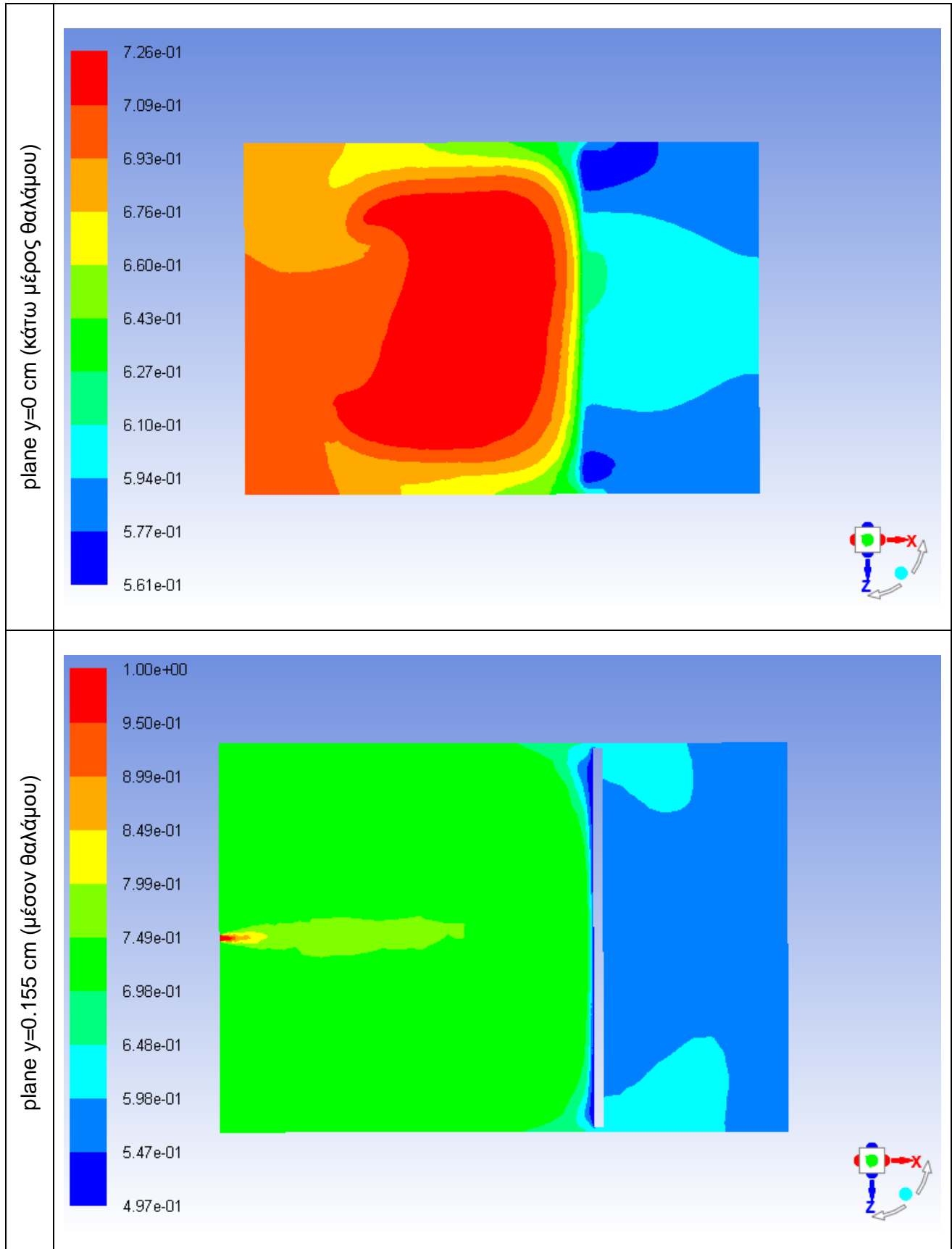
Έπειτα δημιουργούνται τρία (3) planes στο κέντρο και στα άκρα, τα οποία είναι κάθετα στον άξονα y (Εικόνα 73), με στόχο την παρουσίαση contours του mass fraction του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ).



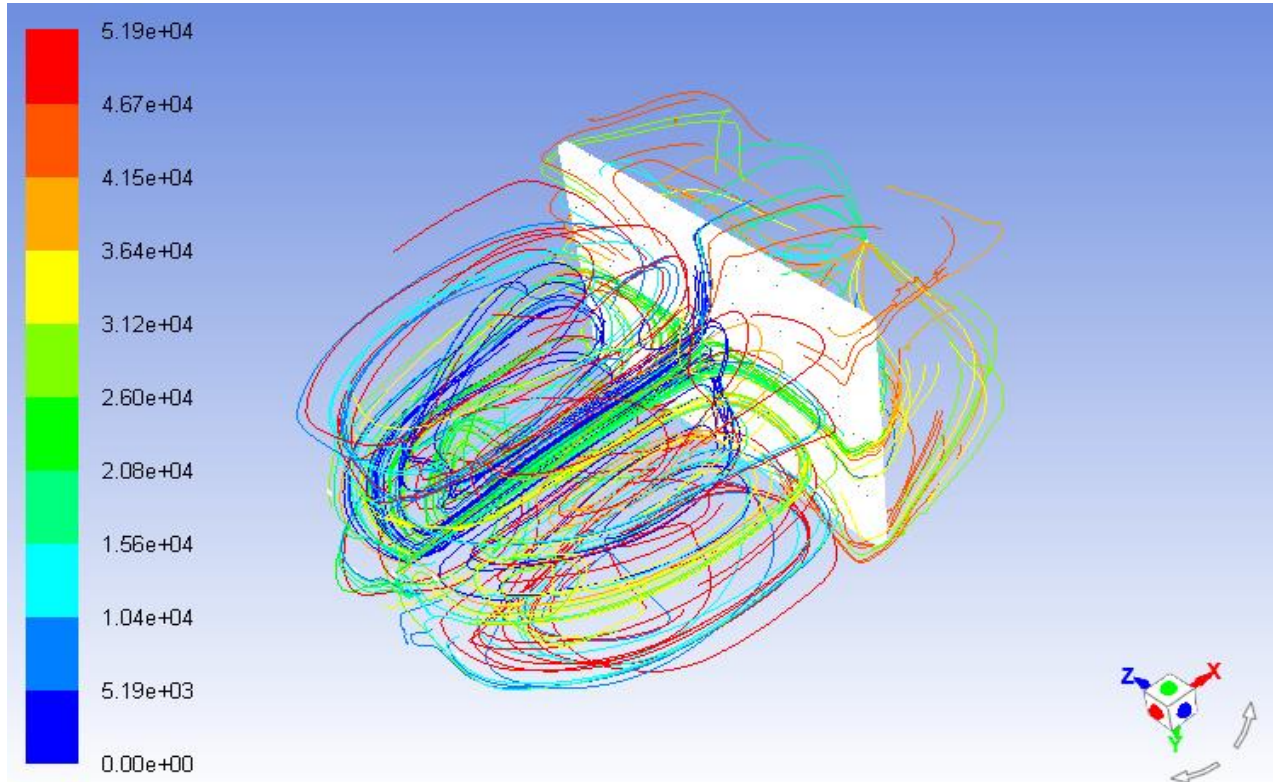
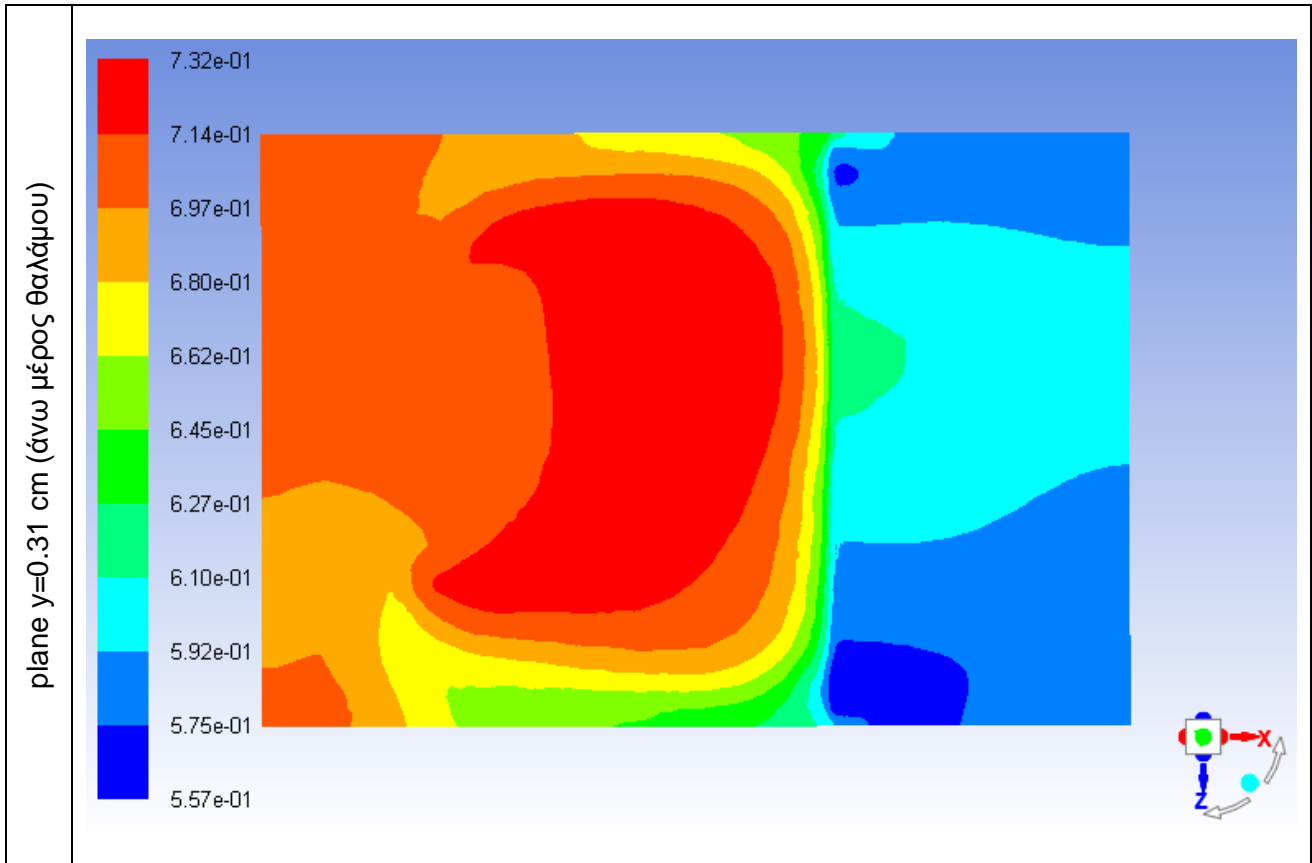
Εικόνα 73: Διάταξη των planes στο θάλαμο προσομοίωσης ( $c = 0.5$  εμπρός/πίσω όψη καμβά)



Πίνακας 13: Χαρακτηριστικά contours του mass fraction  $CO_2$  σε planes κάθετα στον άξονα  $y$   
( $c = 0.5$  εμπρόσθια όψη καμβά)



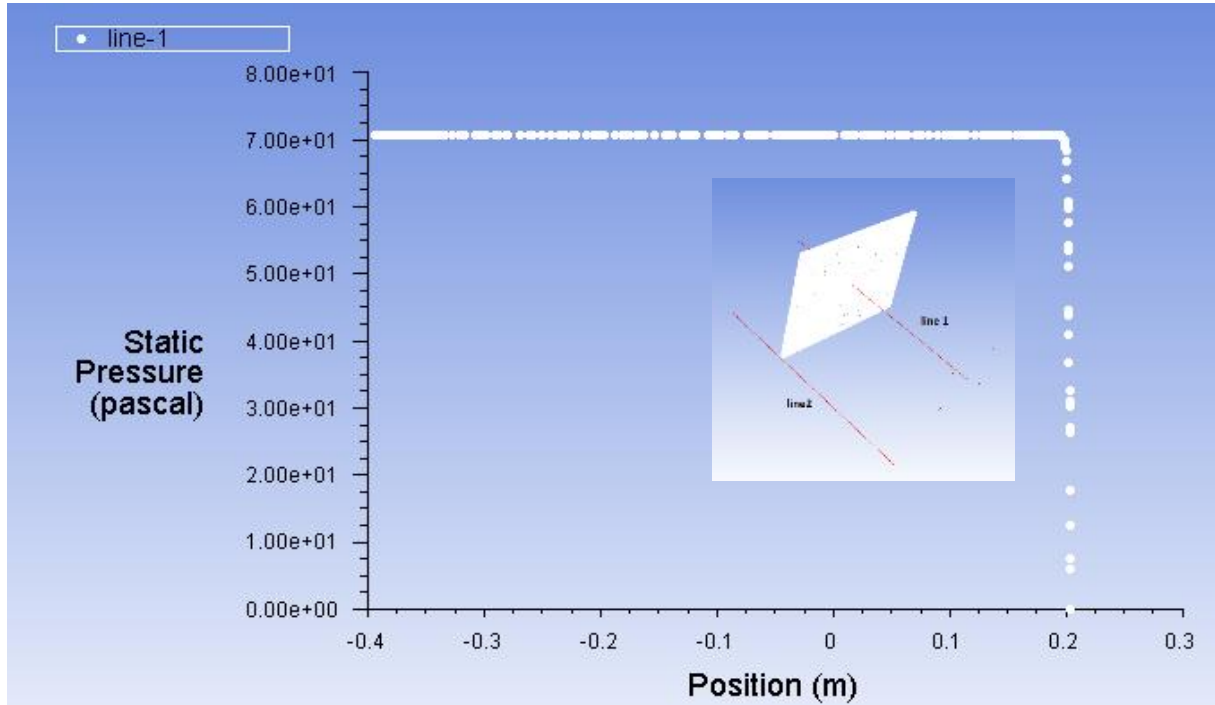




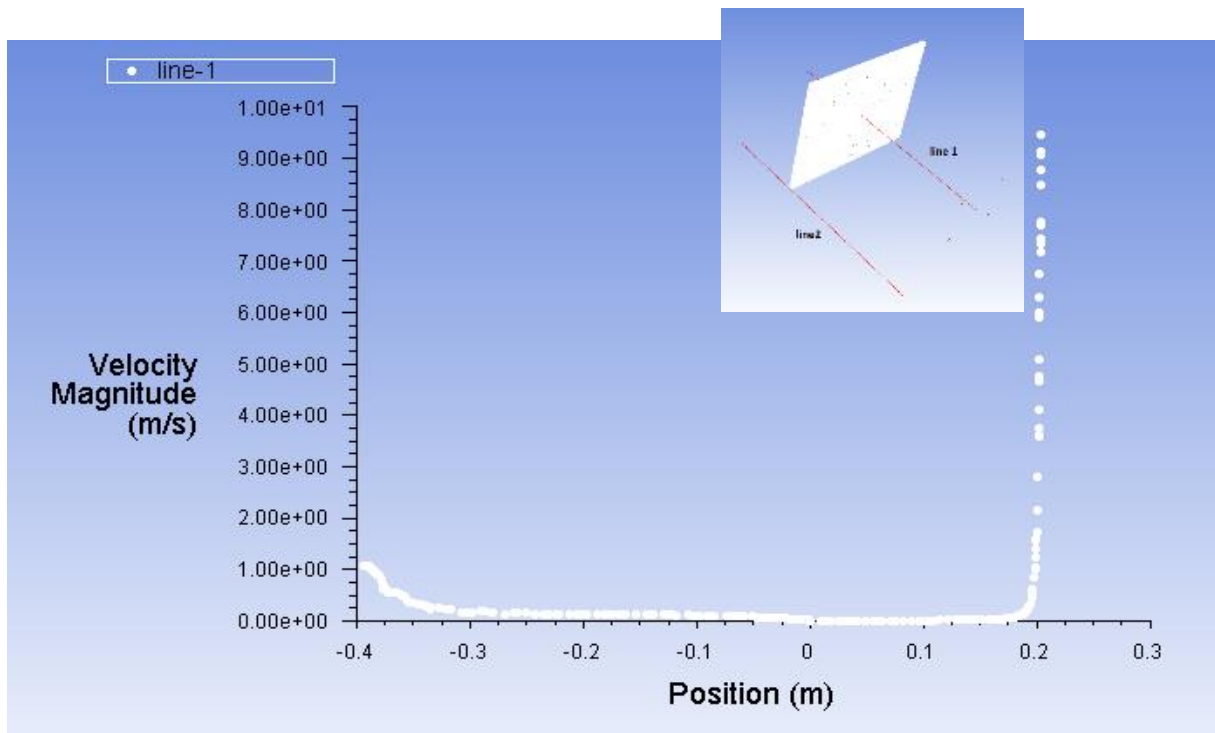
Εικόνα 74: Pathlines ( $c = 0.5$  εμπρόσθια όψη καμβά)



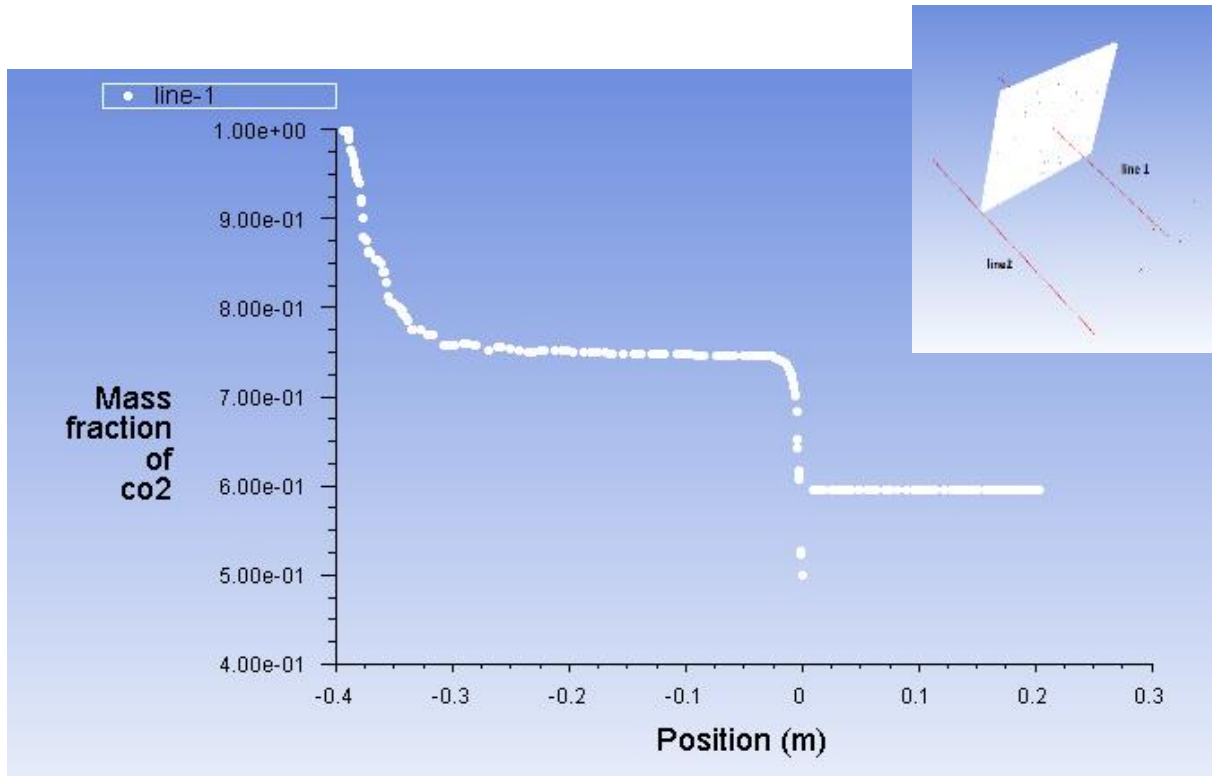
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα x-y plots (Διάγραμμα 16-17), τα οποία έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με την κεντρική γραμμή που ξεκινάει από την κεντρική οπή εισόδου και καταλήγει στην οπή εξόδου.



Διάγραμμα 16: Κατανομή πίεσης (line-1) ( $c = 0.5$  εμπρόςθια όψη καμβά)



Διάγραμμα 17: Κατανομή ταχύτητας (line-1) ( $c = 0.5$  εμπρόςθια όψη καμβά)



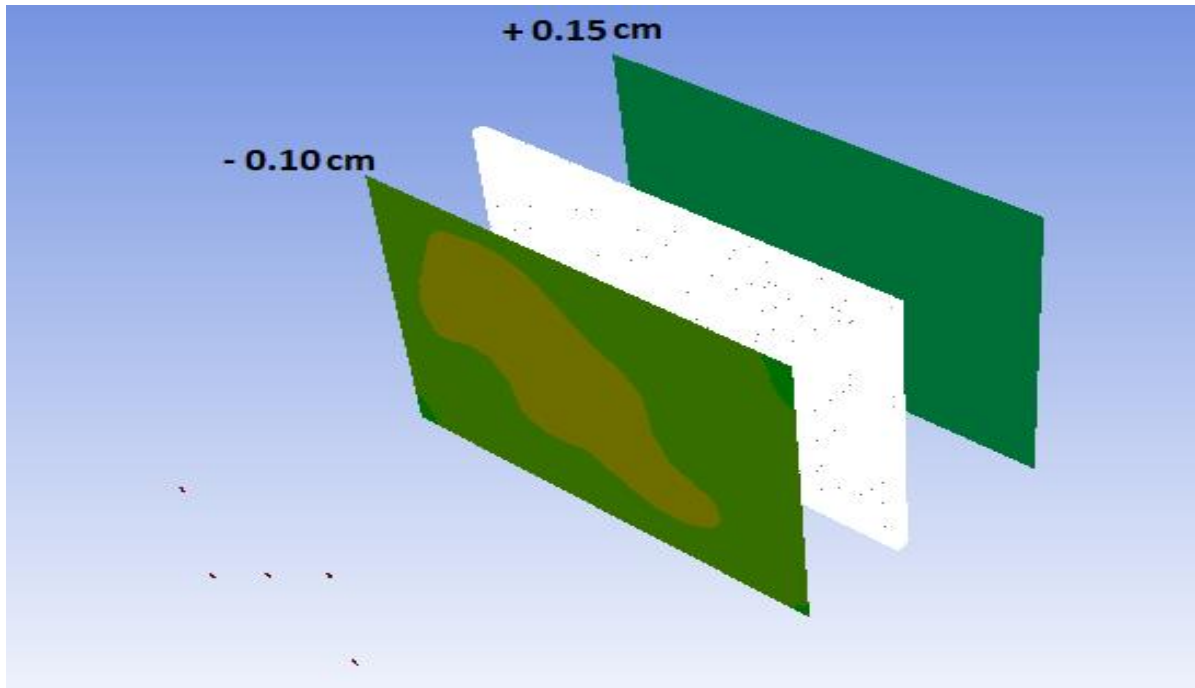
Διάγραμμα 18: Διάγραμμα κατακράτησης  $CO_2$  επάνω στον καμβά (line -1) ( $c = 0.5$  εμπρόσθια όψη καμβά)

Από Διάγραμμα 18 παρατηρείται ότι το ποσοστό της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ) πριν τον καμβά είναι περίπου 0.72. Σημειώνεται ότι η ροή λαμβάνεται υπόψιν από τη στιγμή που σταθεροποιείται. Αφού διαπεράσει τον καμβά το διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ) διακρίνεται ότι η συγκέντρωση είναι περίπου 0.58. Εφόσον είναι γνωστές οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ) πριν και μετά τον καμβά υπολογίζεται το ποσοστό που επικάθεται επάνω στον καμβά και είναι:

$$c_{\text{απορ.}} = \frac{0.72 - 0.58}{0.72} 100\% = 19.5\% \quad [4.3]$$

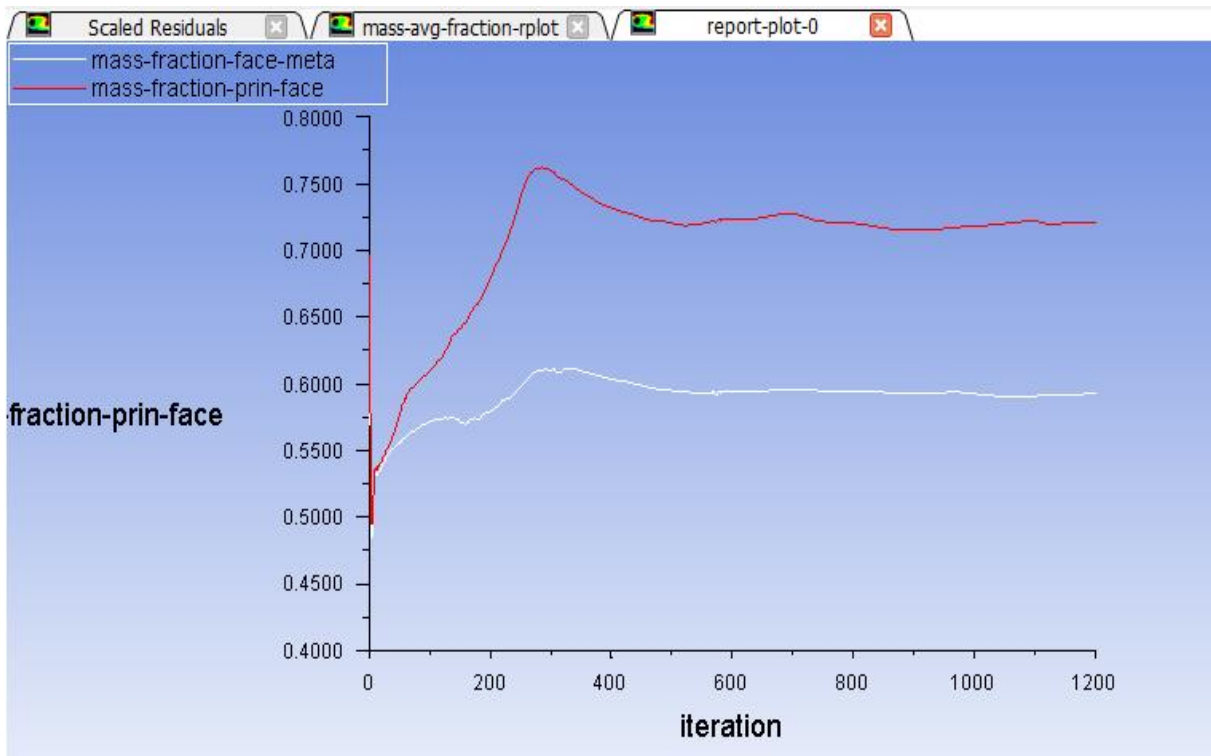
Οπότε προκύπτει ότι το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ) που επικάθεται επάνω στον καμβά είναι περίπου 19.5 %.

Όμως, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι αντιπροσωπευτικά αφού οι τιμές αφορούν μόνο την γραμμή που σχεδιάστηκε. Για μεγαλύτερη ακρίβεια δημιουργούνται δύο (2) planes (Εικόνα 75), ένα 10 cm πριν τον καμβά και ένα 15 cm μετά, με στόχο να ληφθούν οι μέσες τιμές του mass fraction του διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ) πριν και μετά το πινάκιο και να υπολογισθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το ποσοστό απορρόφησης του ρύπου από τον καμβά.



Εικόνα 75: Διάταξη των planes σε σχέση με τον καμβά ( $c = 0.5$  εμπρόςθια όψη καμβά)

Στο Διάγραμμα 19 φαίνονται οι δύο καμπύλες των μέσων τιμών  $\text{CO}_2$  mass fraction. Η άσπρη αφορά το plane μετά τον καμβά και η κόκκινη το plane πριν από αυτόν.



Διάγραμμα 19:  $\text{CO}_2$  mass fraction plot ( $c = 0.5$  εμπρόςθια όψη καμβά)



Με το τέλος του υπολογισμού στα 1200 iterations, στο κομμάτι της κονσόλας του προγράμματος, λαμβάνονται οι ακριβείς τιμές των συγκεντρώσεων πριν και μετά τον καμβά (Εικόνα 76).

```
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
```

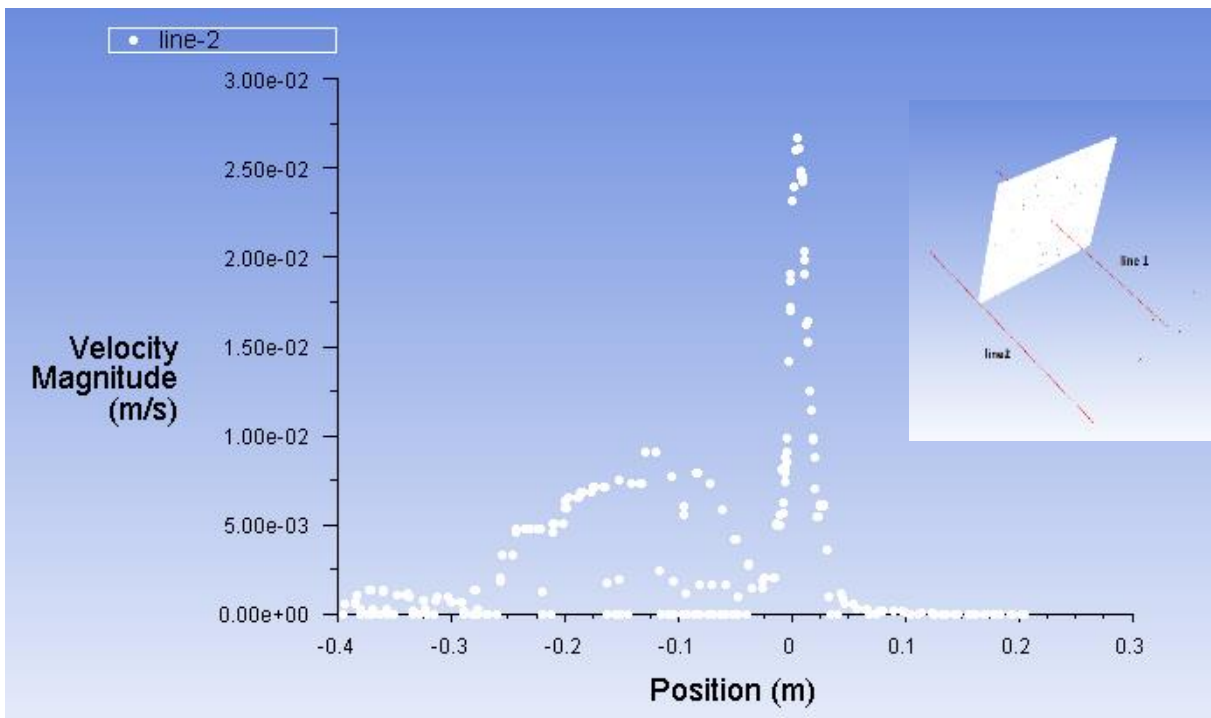
Εικόνα 76: Results, 1200 iterations ( $c = 0.5$  εμπρόσθια όψη καμβά)

Με τα ανωτέρω δίνεται η δυνατότητα των ακριβέστερων υπολογισμών του ποσοστού απορρόφησης του ρύπου από τον καμβά, ο οποίος προκύπτει ως εξής:

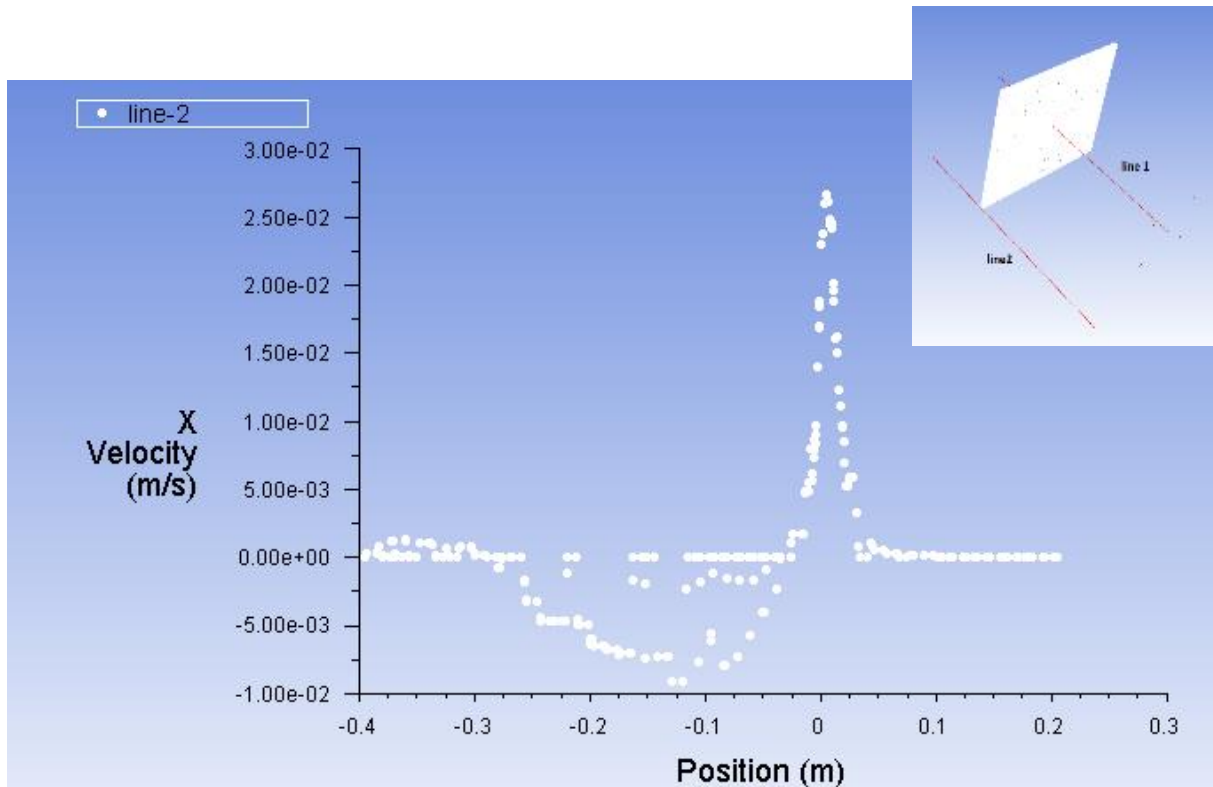
$$c_{\text{απορ.}} = \frac{0.72091 - 0.59234}{0.72091} 100\% = 17.83\% \quad [4.4]$$

Το ποσοστό απορρόφησης του ρύπου ανέρχεται περίπου στο 18 %.

Στην συνέχεια ακολουθούν τα x-y plots (Διάγραμμα 20 και 21), 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.

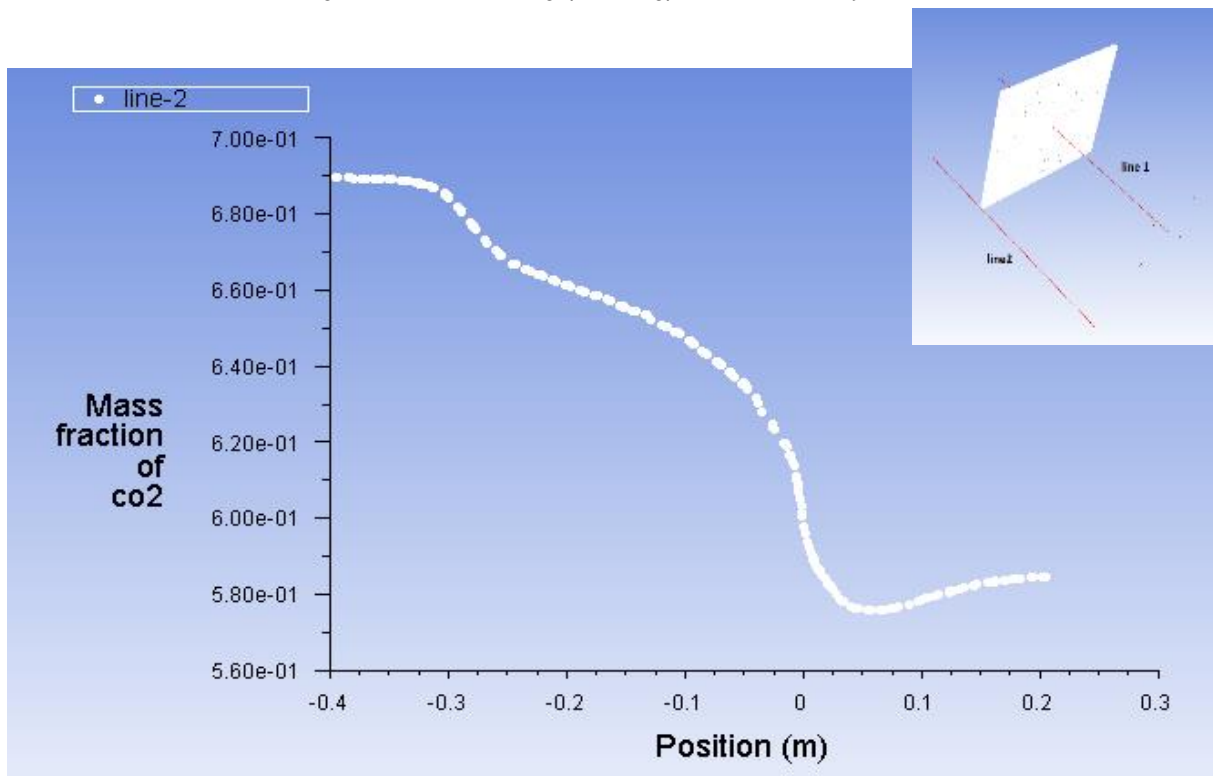


Διάγραμμα 20: Κατανομή ταχύτητας ( $c = 0.5$  εμπρόσθια όψη καμβά)



Διάγραμμα 21: Κατανομή ταχύτητας στον άξονα x ( $c = 0.5$  εμπρόςθια όψη καμβά)

Σημειώνεται ότι στο Διάγραμμα 22 διακρίνεται το αρνητικό πρόσημο της ταχύτητας λίγο πριν τον καμβά λόγω της ανακυκλοφορίας (τύρβης) που σχηματίζεται.

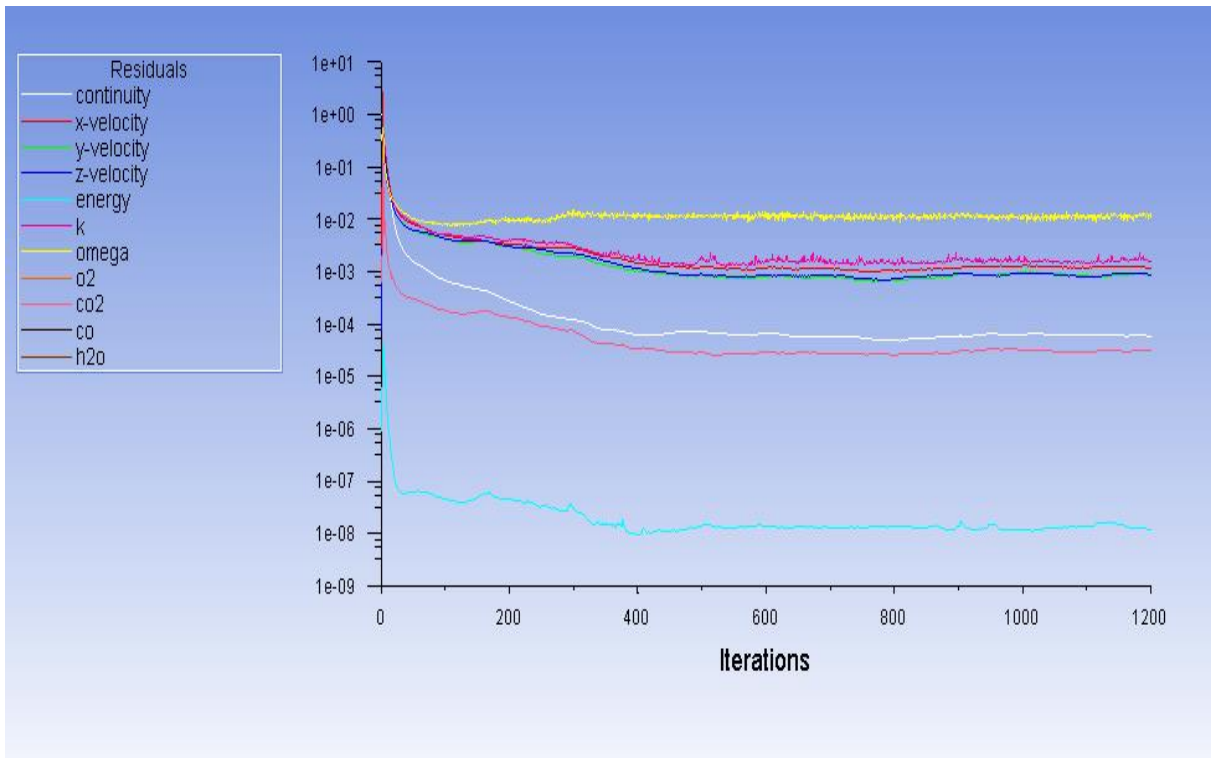


Διάγραμμα 22: Κατακράτηση  $CO_2$  επάνω στον καμβά ( $c = 0.5$  εμπρόςθια όψη καμβά)





### 4.2.3. Πρόβλημα $c = 0.5$ εμπρόσθια όψη καμβά (inlet velocity = 2.104 m/s)



Διάγραμμα 23: Επίλυση του προβλήματος για  $c = 0.5$  στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s

```
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

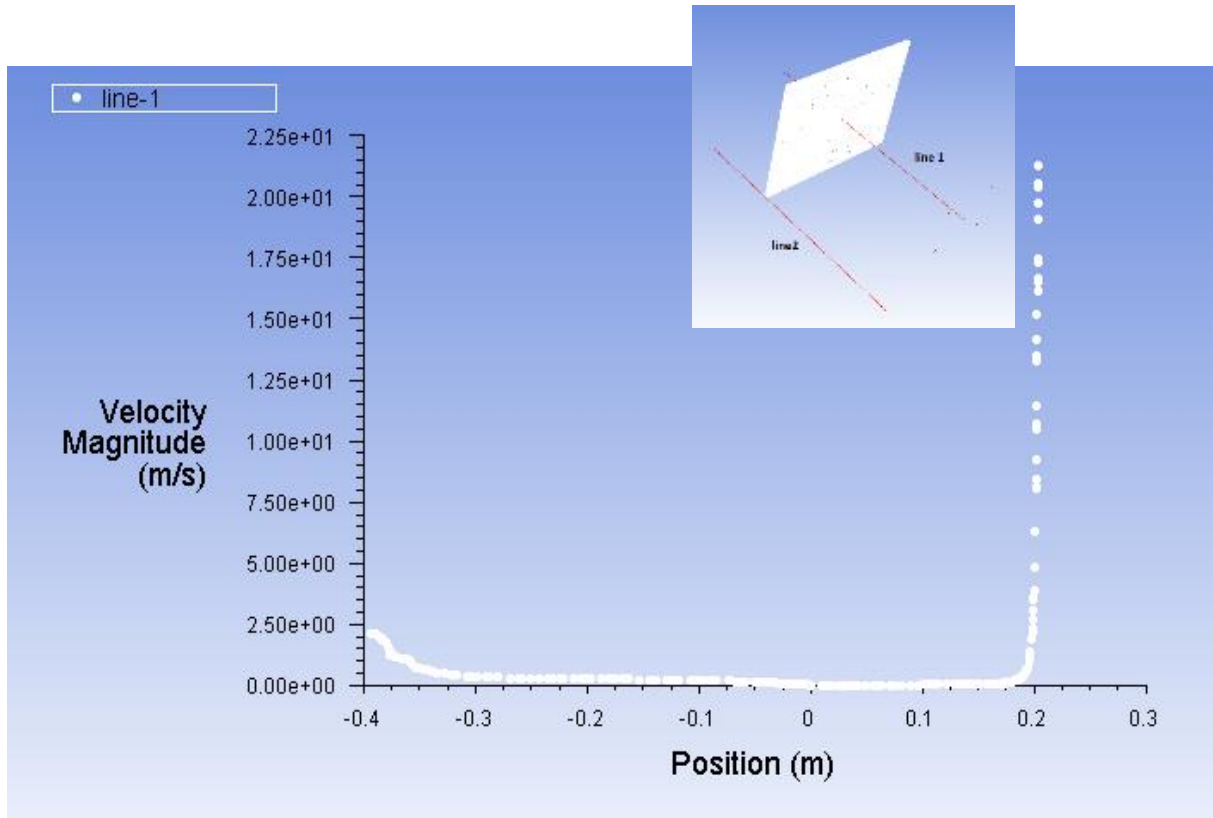
reversed flow in 44 faces on pressure-outlet 10.
1198 5.8834e-05 1.1693e-03 8.8266e-04 8.8205e-04 1.2279e-08 1.5719e-03 1.2071e-02 0.0000e+00 3.0705e-05 0.0000e+00 0.0000e+00 0:00:52

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

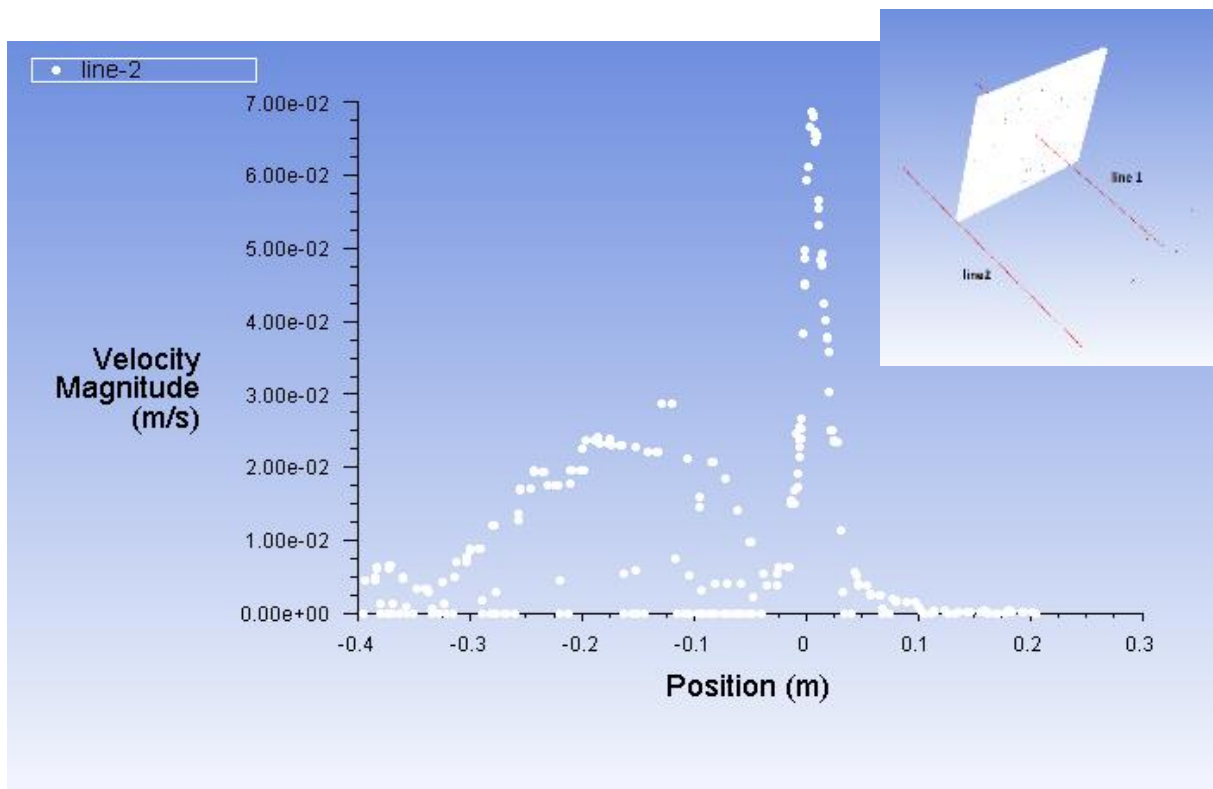
reversed flow in 45 faces on pressure-outlet 10.
iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy k omega o2 co2 co h2o time/i
1200 5.8296e-05 1.1622e-03 8.8712e-04 8.8608e-04 1.2076e-08 1.5682e-03 1.2377e-02 0.0000e+00 3.0754e-05 0.0000e+00 0.0000e+00 0:00:00
Writing data to C:\Users\Manolis\Desktop\mass 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 77: Τιμές των residuals στα 1200 iterations.

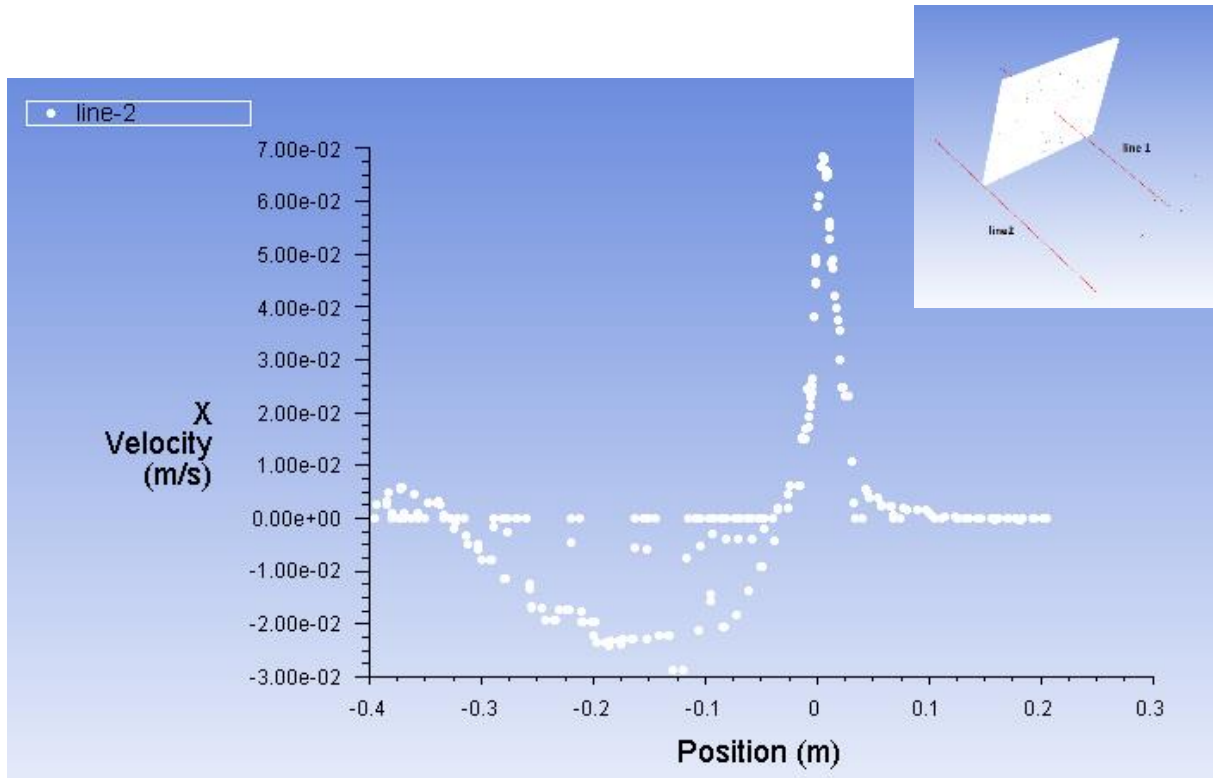




Διάγραμμα 24: Κατανομή ταχύτητας ( $c = 0.5$  στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s)



Διάγραμμα 25: Κατανομή ταχύτητας ( $c = 0.5$  στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s)



Διάγραμμα 26: Κατανομή ταχύτητας στον άξονα x (c = 0.5 στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s)

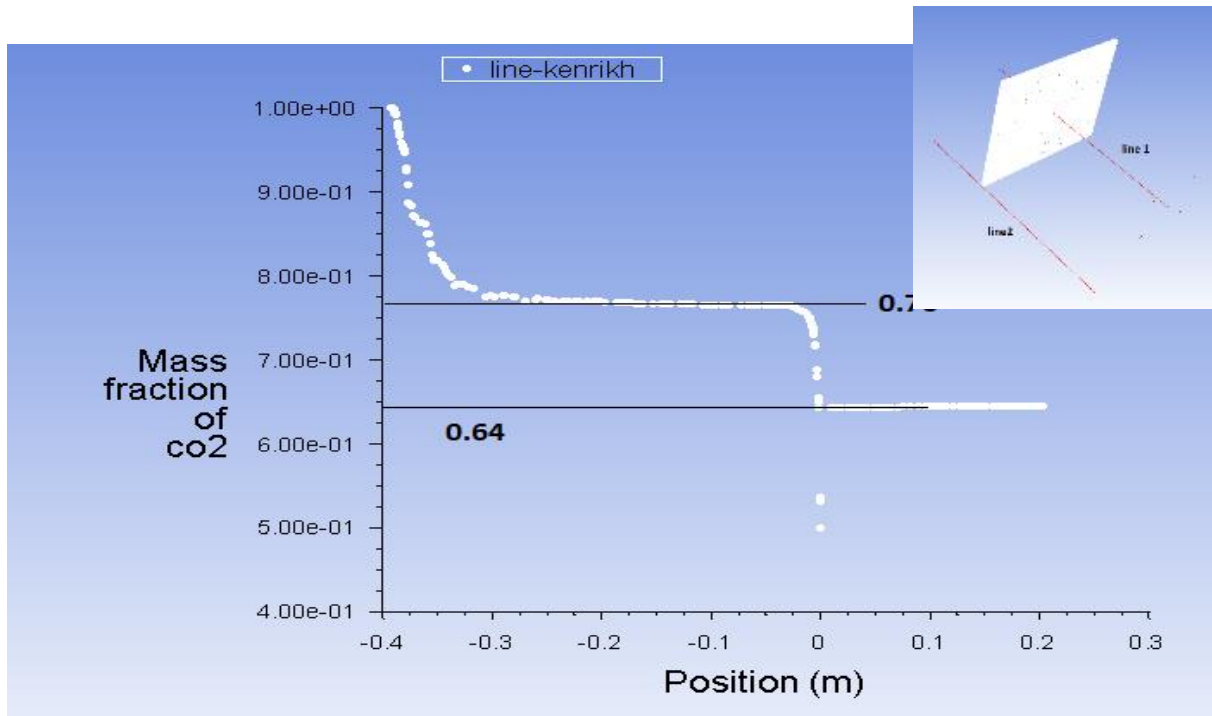
Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι οι μέγιστες ταχύτητες εμφανίζονται στην είσοδο, στην έξοδο και στο διάκενο του καμβά με το τοίχωμα, όπως αναμενόταν λόγω συνέχειας και έχουν αντίστοιχα τιμές τάξης 1, 0.8, 5 m/s. Οι αντίστοιχοι αριθμοί Reynolds με χαρακτηριστικά μεγέθη τις διαμέτρους στις οπές (d) και το διάκενο παραπλεύρως του πίνακα (h) κυμαίνονται από  $7.5 \cdot 10^2$  έως  $9 \cdot 10^2$ .

- Αριθμός Reynolds στην είσοδο:

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

- Αριθμός Reynolds στο διάκενο παραπλεύρως του πίνακα:

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



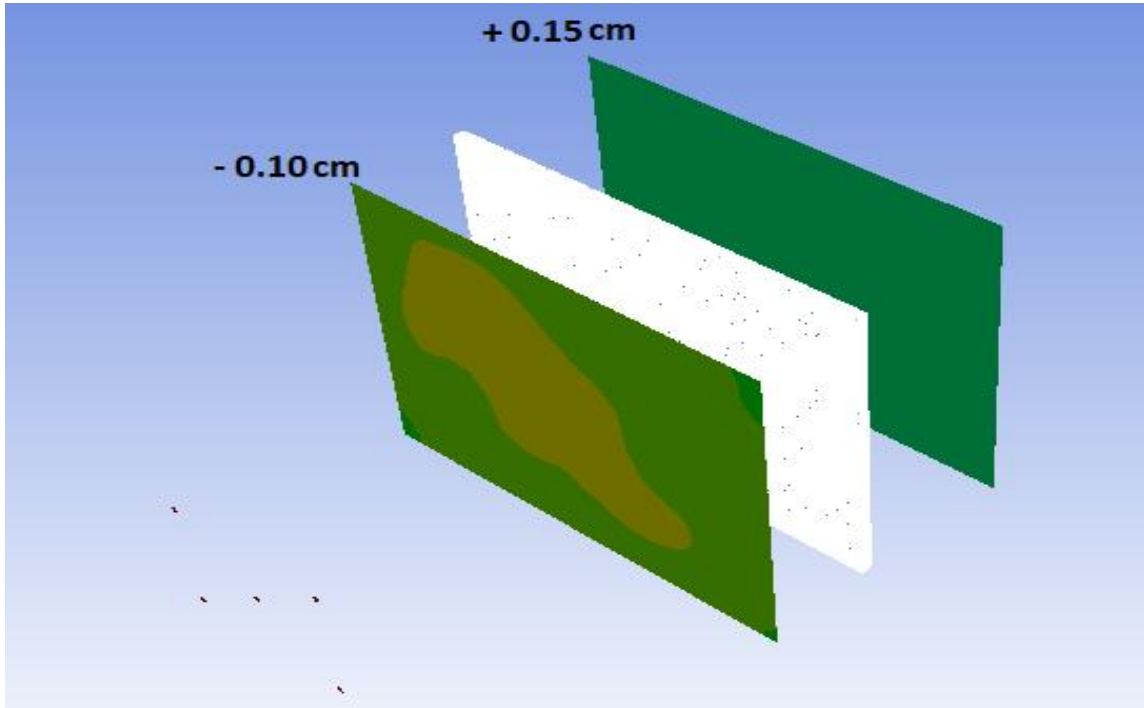
Διάγραμμα 27: Κατακράτησης CO<sub>2</sub> επάνω στο καμβά ( $c = 0.5$  στην εμπρόσθια όψη καμβά και  $inlet\ velocity = 2.104\ m/s$ )

Από τα ανωτέρω Διάγραμμα παρατηρείται ότι το ποσοστό της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) πριν τον καμβά είναι περίπου 0.76. Σημειώνεται ότι η ροή λαμβάνεται υπόψιν από τη στιγμή που σταθεροποιείται. Αφού διαπεράσει τον καμβά το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) διακρίνεται ότι η συγκέντρωση είναι περίπου 0.64. Εφόσον είναι γνωστές οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) πριν και μετά τον καμβά υπολογίζεται το ποσοστό που επικάθεται επάνω στον καμβά και είναι:

$$c_{απορ.} = \frac{0.76 - 0.64}{0.76} 100\% = 15,79\% \quad [4.4]$$

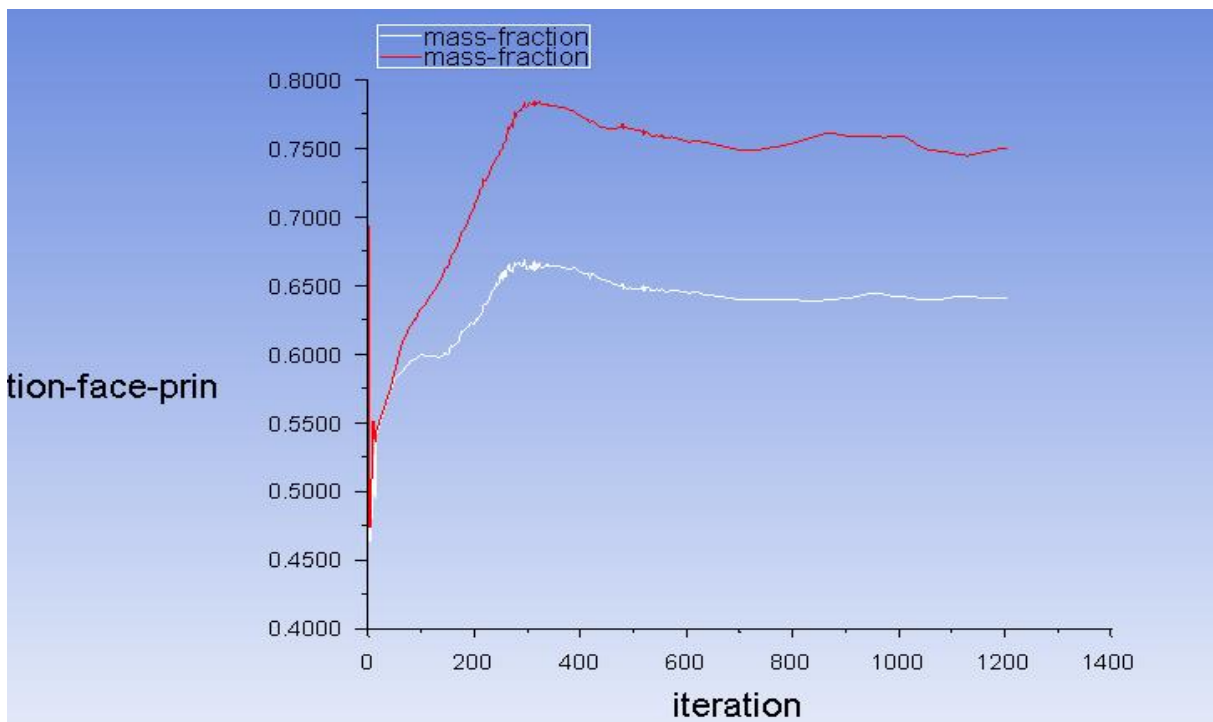
Οπότε, από τους ανωτέρω υπολογισμούς το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που επικάθεται επάνω στον καμβά είναι περίπου 16%. Διακρίνεται ότι για τη διπλάσια ταχύτητα εισόδου στην είσοδο, το ποσοστό απορρόφησης του CO<sub>2</sub> είναι μειωμένο.

Ομοίως όπως και ανωτέρω τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι αντιπροσωπευτικά αφού οι τιμές αφορούν μόνο την γραμμή που σχεδιάζεται. Έτσι για μεγαλύτερη ακρίβεια δημιουργούνται δύο (2) planes (Εικόνα 78), ένα 10 cm πριν τον καμβά και ένα 15 cm μετά τον καμβά. Αυτό δίνει την δυνατότητα να ληφθούν μέσες τιμές του mass fraction του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) πριν και μετά το πλάκα. Η προαναφερόμενη διαδικασία οδηγεί στον υπολογισμό του ποσοστού απορρόφησης του ρύπου από τον καμβά με μεγαλύτερη ακρίβεια.



Εικόνα 78: Διάταξη των planes σε σχέση με τον καμβά ( $c = 0.5$  στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s)

Στο Διάγραμμα 28 διακρίνονται οι δύο καμπύλες των μέσων τιμών  $\text{CO}_2$  mass fraction. Η άσπρη αφορά το plane μετά τον καμβά και η κόκκινη το plane πριν από αυτόν.



Διάγραμμα 28:  $\text{CO}_2$  mass fraction plot. (α) Πριν τον καμβά (κόκκινη γραμμή) (β) Μετά τον καμβά (λευκή γραμμή) ( $c = 0.5$  στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s)



```
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 79: Results, 1200 iterations ( $c = 0.5$  στην εμπρόσθια όψη καμβά και inlet velocity = 2.104 m/s)

Με τα ανωτέρω πραγματοποιείται ο ακριβής υπολογισμός του ποσοστού απορρόφησης του ρύπου από τον καμβά και προκύπτει ως εξής:

$$C_{\text{απορ.}} = \frac{0.75014 - 0.6412}{0.75014} \approx 0.1453 \quad [4.5]$$

Το ακριβές ποσοστό απορρόφησης του ρύπου είναι περίπου 15%.

Άρα επιβεβαιώνεται πως για διπλάσια ταχύτητα εισόδου το ποσοστό απορρόφησης ρύπου (διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ )) στον πίνακα είναι μειωμένο.



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ήταν η μελέτη ροής του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) στο εσωτερικό ενός πρότυπου θαλάμου που είναι τοποθετημένο ένα έργο τέχνης από καμβά. 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 x 41 x 31 cm (μήκος x πλάτος x ύψος) και εσωτερικά έχει τοποθετηθεί η βάση που τοποθέτησης του καμβά. Ο βασικός στόχος ήταν η διεξαγωγή προσομοίωσης της επίδρασης που έχει ο ατμοσφαιρικός αέρας στο ύφασμα-καμβά ενός έργου τέχνης με τη πάροδο του χρόνου.

Η μοντελοποίηση που πραγματοποιήθηκε στόχευε στην αρχική προσέγγιση του προβλήματος που εξετάστηκε, για την επίδραση της ταχύτητας ενός αερίου ρύπου στη χρωματική αλλοίωση και στην καταστροφή ενός έργου τέχνης από καμβά. Αρχικά πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με ατμοσφαιρικό αέρα ταχύτητας εισόδου 1.052 m/s. Στην συνέχεια έγινε αντικατάσταση του ατμοσφαιρικού αέρα με διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) με συγκέντρωση επάνω στον καμβά  $c=0$ , όπου σε αυτή την περίπτωση διαπιστώθηκε ότι το ποσοστό απορρόφησης του ρύπου στον καμβά ήταν 55.53%. Ακολούθησε η διαδικασία με συγκέντρωση επάνω στον καμβά  $c=0.5$ , όπου σε αυτή την περίπτωση διαπιστώθηκε ότι το ποσοστό απορρόφησης του ρύπου στον καμβά ήταν 18.83%. Έπειτα, το πρόβλημα επανεκτελέστηκε με την αλλαγή της παροχής μάζας διπλασιάζοντας την (2.104 m/s) στην είσοδο, κάτι που επιτεύχθηκε με τον ορισμό της ταχύτητας ρευστού, στην συνθήκη εισόδου. Σε αυτή την περίπτωση το ποσοστό ρύπου που επικάθεται επάνω στην εμπρόσθια όψη του καμβά είναι 14.53 %.

Το βασικό συμπέρασμα των ανωτέρων είναι ότι για διπλάσια ταχύτητα εισόδου, το ποσοστό απορρόφησης ρύπου είναι μικρότερο. Σύμφωνα με τους πειραματικούς υπολογισμούς το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο διότι 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.

## Προτάσεις Βελτίωσης

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία διερεύνησε μία από τις αιτίες που ευθύνονται για την αλλοίωση των έργων τέχνης. Δυνητικά, προτείνεται η βελτιστοποίηση της πειραματικής διαδικασίας με τη δημιουργία ακριβέστερου υπολογιστικού πλέγματος, το οποίο μπορεί να υποστηρίξει η υπολογιστή ισχύς που διατίθεται. Επίσης, με την ολοκλήρωση της δίνεται βήμα στη επανεκτέλεση των προσομοιώσεων διαφοροποιώντας τα χαρακτηριστικά του αερίου ρύπου είτε ως προς την συγκέντρωση του είτε ως προς την ταχύτητα του. Επιπλέον, μπορεί να πραγματοποιηθεί μια σειρά πειραματικών προσομοιώσεων με τα αέρια του φαινομένου του θερμοκηπίου που είναι και τα βασικότερα που επηρεάζουν αρνητικά τα έργα τέχνης.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] LA PRAIRIE <https://www.laprairie.com/el-gr/editorials-article?cid=art-conservation>
- [2] Κρήτης, Π., Επιστημών, Σ. Θ., & Υπολογιστών, Τ. Ε. Πολύγλωσσος Σημασιολογικός Χάρτης Πρόσβασης σε Βάσεις Γνώσεων Συντήρησης Έργων Τέχνης μέσω του Παγκόσμιου Ιστού.
- [3] <https://www.nationalgallery.gr/el/>
- [4] [iefimerida.gr](http://iefimerida.gr)
- [5] <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- [6] B.F. Armaly, F. Dursts, J. C. F. Pereira and B. Schonung, Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow, Institute of Hydromechanics, Section
- [7] Βούλτσου Διονυσία-Μαρία, Υπολογιστική προσομοίωση αποκόλλησης ροής σε απότομη διεύρυνση, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστημίου Πελοποννήσου Σχολή Μηχανικών Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2019.
- [8] <https://www.simscale.com/product/cfd/>
- [9] <https://simtec.gr/ansys-online-introductory-training-for-cfd-fea-2/>
- [10] <http://users.ntua.gr/cprovat/yliko/Notes%20for%20ANSYS.pdf>
- [11] [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/enus/help/flu\\_ug/%20flu\\_ug\\_GridExamples.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/enus/help/flu_ug/%20flu_ug_GridExamples.html)
- [12] <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node161.htm>
- [13] 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
- [14] Shaheed, R., Mohammadian, A., & Kheirkhah Gildeh, H. (2019). A comparison of standard  $k-\epsilon$  and realizable  $k-\epsilon$  turbulence models in curved and confluent channels. Environmental Fluid Mechanics, 19(2), 543-568.
- [16] Πανόπουλος Διονύσιος, Υπολογιστική μελέτη με το SST  $k-\omega$  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

[17] <https://www.solidworks.com/>

[18] 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.

[19] [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm)