



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**

Υπολογιστική προσομοίωση πυρκαγιάς εντός
αεριζόμενης σήραγγας κάνοντας χρήση μοντέλου
ακτινοβολίας

Διπλωματική Εργασία

Περικλής-Κωνσταντίνος Διαμαντίδης

Επιβλέπων: Τσαγγάρης Σωκράτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο κτίριο Ε του Τομέα Ρευστών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η υπολογιστική προσομοίωση πυρκαγιάς κάνοντας χρήση μοντέλου ακτινοβολίας, μέσω του εμπορικού πακέτου ANSYS. Η μελέτη προϋποθέτει ευρύ φάσμα γνώσεων στη Μηχανική των Ρευστών, Βιομηχανική Ρευστομηχανική και Υπολογιστική Ρευστομηχανική και απαιτεί βαθιά κατανόηση του φαινομένου σε μακροσκοπικό και μικροσκοπικό επίπεδο.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής Δρ. Σωκράτης Τσαγγάρης, στον οποίο οφείλω βαθιές ευχαριστίες για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου ένα τόσο απαιτητικό θέμα, την ουσιαστική καθοδήγηση που μου έδωσε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας και το κίνητρο που μου μεταλαμπάδευσε για την παρουσίαση ενός όσο το δυνατόν πιο άρτιου και στοιχειοθετημένου αποτελέσματος.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κωνσταντίνο Στόκο, υποψήφιο διδάκτωρ ο οποίος είχε αναλάβει την επιτήρηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, για την υποστήριξη του σε όλα τα βήματα της περάτωσης της εργασίας, από την εξοικείωσή μου με το εμπορικό πακέτο ANSYS Fluent μέχρι την αρωγή του στην αντιμετώπιση των διάφορων δυσκολιών που προέκυπταν προΐούσης της εκπόνησής της.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ίδρυμα που σε συνεννόηση με τους πάροχους του εμπορικού πακέτου ANSYS Workbench διοργάνωσαν δωρεάν σεμινάρια εξοικείωσης με το πρόγραμμα, τα οποία αποδείχτηκαν πολύτιμα στην μετέπειτα χρήση του πακέτου στο σύνολό του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την συμπαράστασή της, κατά τα χρόνια φοίτησης μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Περίληψη

Στη σύγχρονη εποχή, οι οδικές σήραγγες παίζουν σημαντικό ρόλο στην οικονομική και εμπορική ανάπτυξη μιας χώρας, καθώς επιτρέπουν την διακίνηση μεγάλου όγκου ανθρώπινου και υλικού δυναμικού. Ο μαζικός χαρακτήρας της χρήσης τους, κάνει αναγκαία την μελέτη διαχείρισης έκτακτων καταστάσεων, για τη διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής. Μια τέτοια έκτακτη κατάσταση είναι η εκδήλωση πυρκαγιάς, γι' αυτό και η διαχείριση του παραγόμενου καπνού είναι ένα πεδίο ερευνών που παρουσιάζει τεράστιο ενδιαφέρον.

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει το φαινόμενο της κίνησης του καπνού εντός αεριζόμενης σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς με χρήση μοντέλου ακτινοβολίας DO (Discrete Ordinates). Η μελέτη έγινε με υπολογιστική προσομοίωση, χρησιμοποιώντας το εμπορικό πακέτο ANSYS Fluent. Η χρήση εμπορικού πακέτου και όχι ιδίου κώδικα, κατέστησε αναγκαίο τον έλεγχο της αξιοπιστίας των παραμέτρων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα, για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Κάτι τέτοιο κατέστη δυνατόν, με την καταρχήν τέλεση υπολογιστικών προσομοιώσεων για περιπτώσεις μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία σε κοιλότητα και για την περίπτωση της εκδήλωσης πυρκαγιάς σε σήραγγα χωρίς την επίδραση της ακτινοβολίας.

Εν συνεχεία, τελέστηκε η κύρια προσομοίωση για διαφορετικές ταχύτητες εξαερισμού, λαμβάνοντας τον καπνό ως τον θερμό αέρα, και την φωτιά ως μια ογκομετρική πηγή θερμότητας. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά αντίστοιχης μελέτης όπου χρησιμοποιήθηκε DTM(Discrete Transfer Method) μοντέλο ακτινοβολίας και περιλαμβάνουν τις οπισθοροές, την μορφή της φλόγας, τις ισοθερμοκρασιακές καμπύλες και τα διανύσματα ταχύτητας σε επίπεδο μελέτης για τη μεταβατική κατάσταση και τέλος, τις καμπύλες θερμοκρασίας για γραμμή μελέτης σε προκαθορισμένη απόσταση από την εστία της φωτιάς. Ακόμα συγκρίθηκαν και συζητήθηκαν οι διαφορές που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα ανάμεσα στις προσομοιώσεις με και χωρίς την εφαρμογή μοντέλου ακτινοβολίας.

Abstract

In modern times, tunnels play an important role in the economic and commercial growth of a country, since they allow the transportation of large human and material resources. The massive nature of their use, makes it essential to perform case studies of emergency situations, to ensure the safety of human life. Fire is such an emergency situation, thus smoke management is a field of great interest.

The present thesis studies the flow of smoke in a ventilated tunnel in the case of fire using the DO (Discrete Ordinate) radiation model. The study was performed with a computational simulation using the ANSYS Fluent commercial program. The use of this program instead of a custom code, made it necessary to ensure that the input in each parameter due to adjustment, was credible. This was achieved, by first performing simulations of air flow inside cavities taking into account the convection and radiation phenomena, and simulations of the flow of smoke in a ventilated tunnel without modeling radiation.

Subsequently, the main computational simulation was performed, for different ventilation rates, taking the smoke as hot air and the fire as a volumetric heat source. Results predicted by DOM were compared with those of a different study which used the DTM (Discrete Transfer Method) radiation model. These include the smoke backflow, the flame shape, the transient temperature contours and velocity vectors in a specific region, and the vertical temperature profiles at a specific position from the fire. The differences which occur between the results of the simulation with and without taking radiation into account were also discussed.

keywords: Ventilation, Tunnel, Pool, Fire, Smoke, Turbulence, Radiation, Mesh, Fluent, ANSYS

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός της Διπλωματικής.....	2
1.2 Δομή της Διπλωματικής.....	2
1.2.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	2
1.2.2 Μαθηματικό Υπόβαθρο.....	3
1.2.3 Αξιολόγηση Μεθοδολογίας.....	3
1.2.4 Εφαρμογή Μεθοδολογίας στη Σήραγγα.....	3
1.2.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	3
1.2.6 Συμπεράσματα και Επίλογος.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	5
2.1 Κυκλοφορία.....	6
2.2 Ανάλυση.....	7
2.2.1 Κανονική Λειτουργία Σήραγγας.....	8
2.2.2 Λειτουργία Εκτακτης Ανάγκης Σήραγγας (Περίπτωση Πυρκαγιάς).....	9
2.3 Συστήματα Εξαερισμού Σήραγγας.....	11
2.3.1 Φυσικός Εξαερισμός.....	11
2.3.2 Διαμήκης Εξαερισμός.....	13
2.3.3 Ημιεγκάρσιος Εξαερισμός.....	17
2.3.4 Εγκάρσιος Εξαερισμός.....	18
2.3.5 Επιλογή τύπου συστήματος εξαερισμού.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο Μαθηματικό Υπόβαθρο	21
3.1 Εξισώσεις Διατήρησης.....	22
3.1.1 Εξίσωση Διατήρησης Μάζας.....	23
3.1.2 Εξίσωση Ορμής.....	23
3.1.3 Boussinesq Approximation.....	23
3.1.4 Εξίσωση Ενέργειας.....	24
3.2 Μοντέλα Τύρβης.....	24
3.2.1 Το Μοντέλο Τύρβης k-ε.....	26
3.2.1.1 Standard k-ε model.....	26
3.2.1.2 RNG k-ε model.....	28
3.2.2 Η παραγωγή τύρβης στα μοντέλα k-ε.....	31
3.2.3 Η επίδραση της άνωσης στην τύρβη στα μοντέλα k-ε.....	31
3.2.4 Η επίδραση της συμπίεστικότητας στην τύρβη στα μοντέλα k-ε.....	32
3.3 Μεταφορά Θερμότητας.....	32
3.3.1 Μεταφορά θερμότητας με Συναγωγή.....	33
3.3.2 Μεταφορά θερμότητας με Ακτινοβολία.....	34
3.3.2.1 Εισαγωγή - Φύση της Ακτινοβολίας.....	34
3.3.2.2 Το μοντέλο ακτινοβολίας DO (Discrete Ordinates).....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο Αξιολόγηση Μεθοδολογίας	43
4.1 Μελέτη περίπτωσης μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή σε κύβο.....	44
4.2 Μελέτη περίπτωσης μεταφοράς θερμότητας και ακτινοβολία σε κύβο.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο Εφαρμογή Μεθοδολογίας στη Σήραγγα	71
5.1 Αριθμητική Προσομοίωση.....	72
5.2 Μελέτη Πλέγματος.....	74
5.2.1 Κριτήρια Αξιολόγησης Πλέγματος.....	74
5.2.2 Διερεύνηση Πλεγμάτων.....	78
5.2.3 Διαμόρφωση Περίπτωσης στο FLUENT.....	98
5.2.4 Ειδικές Ρυθμίσεις Μοντέλου Τύρβης k-ε.....	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο Ανάλυση Αποτελεσμάτων	111
6.1 Εκλογή πλέγματος.....	112

6.2 Παρουσίαση – Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	120
6.2.1 Περίπτωση 1 ^η – Μελέτη χωρίς τη χρήση μοντέλου ακτινοβολίας.....	120
6.2.2 Περίπτωση 2 ^η – Μελέτη με τη χρήση μοντέλου ακτινοβολίας DO.....	138
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο Συμπεράσματα – Επίλογος.....	151
7.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.....	152
7.2 Σύνοψη της Έρευνας.....	152
7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	154
Βιβλιογραφία.....	155

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

Η μελέτη που θα ακολουθήσει αφορά την προσομοίωση της κίνησης του καπνού εντός αεριζόμενης σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς με την εφαρμογή δύο μοντέλων μεταφοράς θερμότητας, της συναγωγής και της ακτινοβολίας. Παρακάτω παρουσιάζεται ο σκοπός αυτής της εργασίας καθώς και η βασική δομή της.

1.1 Σκοπός της Διπλωματικής

Οι οδικές σήραγγες είναι βασικά έργα υποδομής που επιτρέπουν την ανάπτυξη οδικών αξόνων ταχείας κυκλοφορίας. Τέτοιοι άξονες ελαχιστοποιούν το χρόνο μετακίνησης ανάμεσα σε εμπορικά κέντρα, διευκολύνοντας την διακίνηση υλικού και ανθρώπινου δυναμικού και υποβοηθώντας συνεπώς την οικονομική ανάπτυξη. Ατυχήματα σε αυτές τις οδικές σήραγγες ως αποτέλεσμα πυρκαγιών προκαλούν μεγάλες απώλειες σε ανθρώπινες ζωές και συνεπώς είναι σκόπιμες μελέτες που αφορούν τον βέλτιστο εξαερισμό τους. Το βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη του εξαερισμού κατά την έκτακτη περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς σε σήραγγα οδικής κυκλοφορίας. Για να επιτευχθεί αυτό, μελετάται η ανάπτυξη του καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς εντός οδικής σήραγγας και πώς αυτή μεταβάλλεται για διαφορετικές ταχύτητες εξαερισμού. Η μελέτη γίνεται για δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη λαμβάνεται υπόψη μόνο η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, ενώ στη δεύτερη η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Η προσομοίωση γίνεται στο υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS FLUENT και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μελέτη του φαινομένου συγκρίνονται με αντίστοιχες μελέτες περίπτωσης πυρκαγιάς σε σήραγγα με διαφορετικό μοντέλο τύρβης (περίπτωση μελέτης με συναγωγή θερμότητας) και διαφορετικό μοντέλο ακτινοβολίας (περίπτωση μελέτης με συναγωγή και ακτινοβολία).

1.2 Δομή της Διπλωματικής

1.2.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά κάποια γενικά στοιχεία για τις οδικές σήραγγες, το ιστορικό τους, τις στοχεύσεις του σχεδιασμού τους. Στη συνέχεια αναλύεται το κομμάτι του εξαερισμού τους, παραθέτοντας και αναλύοντας τα είδη που υπάρχουν και τα κριτήρια εκλογής τους κατά το σχεδιασμό οδικών σήραγγων.

1.2.2 Μαθηματικό Υπόβαθρο

Στη συνέχεια, στο τρίτο κεφάλαιο «Μαθηματικό Υπόβαθρο», παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη μελέτη. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις που διέπουν τα φαινόμενα που μελετώνται στη μορφή που χρησιμοποιούνται από το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS Fluent, ενώ γίνεται ενδελεχής παρουσίαση παραμέτρων των εξισώσεων που παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου και η βαθιά κατανόησή τους αποτελεί προϋπόθεση για τον κατάλληλο χειρισμό τους και κατά συνέπεια την εκτέλεση ορθής προσομοίωσης.

1.2.3 Αξιολόγηση Μεθοδολογίας

Στο τέταρτο κεφάλαιο «Αξιολόγηση Μεθοδολογίας», γίνεται επαλήθευση της ορθότητας εκλογής παραμέτρων για τη βασική προσομοίωση που θα ακολουθήσει, μελετώντας απλές περιπτώσεις μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και με ακτινοβολία σε κύβο. Τα αποτελέσματα που εξάγονται συγκρίνονται με αυτά αντίστοιχων μελετών που έχουν δημοσιευτεί, και η σύγκρισή τους ή η πολύ μεγάλη εγγύτητά τους, διασφαλίζει ότι η κατάστρωση της κύριας προσομοίωσης γίνεται με αιτιολογημένο και αξιόπιστο τρόπο.

1.2.4 Εφαρμογή Μεθοδολογίας στη σήραγγα

Στο πέμπτο κεφάλαιο «Εφαρμογή Μεθοδολογίας στη σήραγγα» παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία κατάστρωσης της μελέτης περίπτωσης από τη διαμόρφωση της γεωμετρίας, την πλεγματοποίηση, και την διαμόρφωση των επιμέρους παραμέτρων για την εκτέλεση της προσομοίωσης μέσω του υπολογιστικού προγράμματος ANSYS FLUENT. Αναλυτικά, στο πρώτο κομμάτι του κεφαλαίου παρουσιάζεται μία ένθετη μελέτη για την βέλτιστη διαμόρφωση γεωμετρίας και πλέγματος, ενώ στο δεύτερο κομμάτι παρουσιάζεται η κατάστρωση της προσομοίωσης στο ANSYS Fluent με ειδικές ρυθμίσεις που διαπιστώθηκε ότι χρειάστηκαν να γίνουν για την σωστή εκτέλεσή της.

1.2.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Στο έκτο κεφάλαιο «Ανάλυση Αποτελεσμάτων» γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την υπολογιστική μελέτη κίνησης καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς σε σήραγγα. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κίνησης του αέρα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στη μεταβατική κατάσταση, για διαφορετικές ταχύτητες εξαερισμού, οι οπισθοροές και η μορφή της φλόγας που προκύπτουν στη μόνιμη κατάσταση, καθώς και

διαγράμματα θερμοκρασιών για μια γραμμή μελέτης σε συγκεκριμένη απόσταση από την εστία της φωτιάς. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με αυτά δύο διαφορετικών ερευνών στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικό μοντέλο τύρβης στην πρώτη και διαφορετικό μοντέλο ακτινοβολίας στη δεύτερη.

1.2.6 Συμπεράσματα και Επίλογος

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο «Συμπεράσματα και Επίλογος» τα συμπεράσματα και αποτελέσματα της μελέτης συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται δίνοντας στον αναγνώστη μια ολοκληρωμένη εικόνα της μελέτης που προηγήθηκε.

Κεφάλαιο 2^ο

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Ενώ σήραγγες κατασκευάζονται ήδη από τα αρχαία χρόνια, ο εξαερισμός σηράγγων έχει γίνει αντικείμενο μελέτης μόλις τα τελευταία 100 χρόνια, κάτι που επιβάλλεται λόγω των αυξανόμενων εκπομπών παραγώγων καύσης.

Η έκθεση σε αυτά τα αέρια παράγωγα καύσης μέσα σε σήραγγες, που προκύπτουν λόγω της μαζικής χρήσης οχημάτων, μπορεί να προκαλέσει δυσφορία σε επιβάτες και οδηγούς. Γι' αυτό το λόγο ο εξαερισμός προκύπτει ως προαπαιτούμενο αφού επιτυγχάνει να διυλίσσει τους ρυπαντές και να προσφέρει καλή ποιότητα αέρα, όπως επίσης να βελτιώσει την ορατότητα μέσα στη σήραγγα αλλά και, μέσα από μελέτες που γίνονται τα τελευταία χρόνια, να προσφέρει προστασία στην περίπτωση πυρκαγιάς «οδηγώντας» τον καπνό εκτός σήραγγας πριν η εισπνοή του προκαλέσει θανατηφόρες συνέπειες.

ΟΔΙΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Βασική στόχευση κατά τον σχεδιασμό αυτών των σηράγγων είναι, κατά την κανονική λειτουργία ο έλεγχος της στάθμης των ρυπαντών-παραγώγων από τις μηχανές εσωτερικής καύσης, και σε περιπτώσεις πυρκαγιάς ο έλεγχος του καπνού και των θερμών αερίων.

Μέχρι πρότινος, βασική στόχευση στο σχεδιασμό συστημάτων εξαερισμού ήταν να διατηρείται σε ασφαλή επίπεδα η στάθμη του μονοξειδίου του άνθρακα μέσα στη σήραγγα. Η αποτελεσματική εφαρμογή μέτρων για τον έλεγχο των εκπομπών αερίων με τη χρήση καταλύτη, ωστόσο, έστρεψε την προσοχή των σχεδιαστών στη διαχείριση της ροής του καπνού μέσα στη σήραγγα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

Το μέγεθος που ήταν πιο επικρατών σαν κριτήριο για την απομάκρυνση του καπνού από τη σήραγγα ήταν τα 100 cfm (cubic feet per minute-κυβικά πόδια ανά λεπτό) για κάθε πόδι λωρίδας στη σήραγγα (ASHRAE, 1991). Κάτι τέτοιο δεν έχει, όμως, ισχυρή επιστημονική βάση. Επιπλέον, για διαμήκη συστήματα εξαερισμού αυτό το μέγεθος (cfm*μήκος) δεν έχει πρακτικό νόημα μιας και ο ίδιος διαμήκης ρυθμός ροής θα χρειάζεται ανεξαρτήτου μήκους σήραγγας. Γι' αυτό το λόγο, πλέον χρησιμοποιείται το κριτήριο της κρίσιμης ταχύτητας. Ως κρίσιμη ταχύτητα ορίζουμε την διαμήκη ταχύτητα που χρειαζόμαστε για να αποφθεχθεί η οπισθοροή του καπνού μέσα στη σήραγγα. Αυτή εξαρτάται από την διατομή της σήραγγας και από το μέγεθος της φωτιάς.

2.1 Κυκλοφορία

Ο μηχανικός σχεδίασης συστημάτων εξαερισμού πρέπει να λαμβάνει υπόψη την κίνηση που εξυπηρετεί η σήραγγα, τον όγκο και το είδος των οχημάτων που διέρχονται από αυτή, καθώς κάτι τέτοιο είναι

στενά συνδεδεμένο με την εκπομπή CO. Όταν αυτό είναι αδύνατο, όπως στην περίπτωση που δεν τηρούνται δεδομένα, ή στα αρχικά στάδια σχεδιασμού νέων σηράγγων, ο μηχανικός πρέπει να κάνει τις απαραίτητες προσαρμογές και να χρησιμοποιήσει ει δυνατόν ακριβείς εκτιμήσεις για τα μεγέθη αυτά. Για παράδειγμα, σε μία σήραγγα κοντά σε πυκνά δομημένη περιοχή θα χρησιμοποιείται ως κριτήριο η μέγιστη χωρητικότητα της, αντίθετα με μια σήραγγα σε μια αγροτική ή ορεινή περιοχή.

Η μέγιστη χωρητικότητα για μία λωρίδα μήκους 12ft-3.7m σε μια σήραγγα με καλό φωτισμό είναι 2000 οχήματα ανά ώρα. Αυτό βασίζεται στην υπόθεση ότι έχουμε δύο λωρίδες συνολικά που κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση. Αλλαγή της κατεύθυνσης για τη μία από τις δύο λωρίδες, μειωμένο πλάτος και διαφορετικό είδος οχημάτων μπορεί να μεταβάλλει το παραπάνω μέγεθος. (διαγράμματα)

Ένας τρόπος υπολογισμού της χωρητικότητας είναι να διαιρέσουμε την ώρα, με το χρόνο που κάνει ένα όχημα για να διασχίσει την συγκεκριμένη απόσταση. Ακριβείς εκτιμήσεις του χρόνου αυτού περιέχονται στο Highway Capacity Manual (TRB, 1985). Ο μέσος χρόνος για ανοικτό δρόμο είναι λιγότερο από 1s και μπορεί να φτάσει ως τα 9s ή τα 12s. Έτσι για τη σήραγγα μια εκτίμηση χρόνου της τάξης των 1.8s θεωρείται ακριβής.

$$TRV = \frac{3600}{ARV}$$

Έτσι έχουμε

$$TRV = \text{traffic volume (vehicles / hour)}$$

$$ARV = \text{average headway(sec)}$$

Η «γεωγραφία» των οχημάτων που διέρχονται από τη σήραγγα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη. Φορτηγά και λεωφορεία επιβραδύνουν τη ροή και μεταβάλλουν τις εκπομπές αερίων. Σήραγγες σε αστικές περιοχές εξυπηρετούν οχήματα όπου το 15% αυτών είναι φορτηγά σε αντίθεση με αγροτικές περιοχές όπου το ποσοστό αυτό πέφτει στο 4 ή 5%.

2.2 Ανάλυση

Ακολουθεί μια ανάλυση για τις απαιτήσεις στο ρυθμό ροής αέρα μέσα σε σήραγγα για τις περιπτώσεις

- της διατήρησης της στάθμης CO και άλλων ρυπαντών σε ανεκτά επίπεδα (κανονική λειτουργία σήραγγας).
- της απομάκρυνσης του καπνού και των θερμών αερίων σε ενδεχόμενο πυρκαγιάς (λειτουργία έκτακτης ανάγκης).

2.2.1 Κανονική Λειτουργία Σήραγγας

Ιστορία

Η πρώτη μελέτη σ' αυτό το επιστημονικό πεδίο έγινε από το Γραφείο Ορυχείων των Ηνωμένων Πολιτειών την δεκαετία του 20 (Fieldner et al., 1921). Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας χρησιμοποιούνταν για πολλά χρόνια ως επιστημονική βάση κατά τον σχεδιασμό σήραγγων. Πρόσθετες μελέτες έγιναν για να συμπεριλάβουν τις περιπτώσεις κατασκευής σήραγγων σε μεγάλο υψόμετρο (1680-3200m) στα μέσα της δεκαετίας του 60 από το Τμήμα Αυτοκινητοδρόμων του Κολοράντο.

Μια ολοκληρωμένη μελέτη για σήραγγες σε υψόμετρο άνω των 700ft (2134m) έγινε από το Ινστιτούτο Κατασκευής Αυτοκινητοδρόμων του Ελβετικού Ινστιτούτου Τεχνολογίας και δημοσιεύτηκε με τον τίτλο "Report of Committee on Tunnel Ventilation to Swiss Department of Highways" (Stahel et al., 1961).

Κοινός παρανομαστής αυτών των μελετών ήταν ότι, αν ο σχεδιασμός γίνει ώστε να επιτυγχάνεται η παραμονή της στάθμης του CO κάτω από 120 ppm τότε όλοι οι υπόλοιποι ρυπαντές βρίσκονται κι αυτοί κάτω από τα επιτρεπτά όρια TLV-TWA (Threshold Limit Value-Time Weighted Averages).

Το TLV-TWA ορίζεται ως «οι τιμές τοξικών προϊόντων που χρησιμοποιούνται σαν οδηγοί στον έλεγχο απειλών για την υγεία και αντιπροσωπεύουν χρονικά σταθμισμένες συγκεντρώσεις στις οποίες μπορούν να εκτίθενται εργάτες για οκτώ ώρες την ημέρα (σε καθημερινή βάση) χωρίς δυσμενείς συνέπειες» (ACGIH, 1992, pp. 12-3-12-20).

US EPA Κατά την δεκαετία του 70 η US EPA ανέπτυξε ένα μοντέλο υπολογισμού εκπομπής ρυπαντών, το MOBILE. Το MOBILE υπολογίζει τους συντελεστές εκπομπής για οκτώ διαφορετικούς τύπους οχημάτων σε μικρά και μεγάλα υψόμετρα. Αυτές οι εκτιμήσεις εκπομπών, βασίζονται σε μεγέθη όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ταχύτητα των οχημάτων και η ηλικία τους και αφορούν μόνο βενζινοκινητήρες και όχι μηχανές diesel, μιας και οι τελευταίες παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες στη λειτουργία τους που καθιστούν δύσκολο τον ακριβή υπολογισμό των μεγεθών.

PIARC

Η PIARC έχει δημοσιεύσει ένα σύνολο από μεγέθη εκπομπών CO και NO_x για επιβατηγά οχήματα με μέση ταχύτητα τα 60χλμ/ώρα και για ντιζελοκίνητα φορτηγά και λεωφορεία. Οι τιμές αυτές φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Table 20-13. PIARC Emissions from Passenger Cars

Current Emission Law	Control	Carbon Monoxide (CO) q^* (m ³ /hr.veh)	Oxide of Nitrogen (NO _x) q^* (grams/hr.veh)
No law	no	1–1.5	120
EEC R 15/04	no	0.7	120
EEC R 15/04	yes	0.5	100
EEC 89/45B	yes	0.16	60
FTP 75	yes	0.14	40
Diesel engine	—	0.08	40

Based on vehicles traveling at 37 miles per hour (60 kilometers per hour); adapted from PIARC 1991.

Εικόνα 2. 1- Μεγέθη εκπομπών κατά PIARC (πηγή: ASHRAE, 1991)

Γενικά επιβαρυντικά για την εκπομπή ρυπαντών λειτουργεί το μεγάλο υψόμετρο (elevation effect) αλλά και η κλίση του δρόμου και η ταχύτητα των οχημάτων (speed and grade effect). Μέγαρα υψόμετρα (δηλαδή χαμηλή πίεση και άρα πλουσιότερο μίγμα αέρα-καυσίμου), υψηλότερες ταχύτητες και ανωφέρειες οδηγούν σε αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου και κατά συνέπεια στην αύξηση των ρυπαντών.

2.2.2 Λειτουργία Έκτακτης Ανάγκης Σήραγγας (Περίπτωση πυρκαγιάς)

Η παρουσία καπνού μέσα σε σήραγγα στο ενδεχόμενο πυρκαγιάς δημιουργεί προβλήματα για οδηγούς και πυροσβέστες. Υπάρχουν δύο τρόποι να διαχειριστούμε τον καπνό μέσα στη σήραγγα. Να τον εξάγουμε από αυτή ή να ελέγξουμε τη ροή του.

Εξαγωγή Καπνού (Smoke extraction)

Υπάρχει περιορισμένη κατανόηση για τη βάση της εξαγωγής καπνού σε μια σήραγγα. Το βασικό κριτήριο κατά ASHRAE των 100cfm/lane ft χρησιμοποιείται σαν γενικός κανόνας στα εγκάρσια συστήματα εξαερισμού. Ο καπνός, γενικά, πρέπει να εξάγεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πηγή της πυρκαγιάς ώστε να διευκολυνθεί η εκκένωση του χώρου και η πυρόσβεση αυτού.

Έλεγχος Καπνού

Ο έλεγχος του καπνού περιλαμβάνει τη ανάπτυξη μιας διαμήκουσ ταχύτητας, το μέγεθος της οποίας εμποδίζει τη δημιουργία οπισθοροής. Έτσι ο καπνός περιορίζεται στον χώρο της σήραγγας μετά το σημείο της εκδήλωσης της πυρκαγιάς και, αν δεν υπάρχει μηχανισμός εξαγωγής καπνού, ο καπνός θα βγει από την κατάντη είσοδο της σήραγγας.

Ακολουθούν εξισώσεις για τον υπολογισμό αυτής της κρίσιμης ταχύτητας.

$$V_c = K_g K \times \frac{(gH\dot{Q})}{(\rho_0 C_p A T_f)} \times 1/3$$

$$T_f = \frac{Q + T_0}{\rho_0 C_p A V_c}$$

όπου

V_c = κρίσιμη ταχύτητα

g = επιτάχυνση βαρύτητας

H = ύψος διατομής

\dot{Q} = ρυθμός ροής θερμότητας

ρ_0 = πυκνότητα περιβάλλοντος

C_p = ειδική θερμοχωρητικότητα

A = εμβαδό διατομής

T_f = θερμοκρασία θερμού αερίου

$K = 0.61$

K_g = συντελεστής διόρθωσης κλίσης

T_0 = θερμοκρασία περιβάλλοντος

Τα περισσότερα συστήματα εξαερισμού σήραγγων χωρίζονται σε ζώνες για να γίνει ευκολότερη η διαχείριση μιας έκτακτης κατάστασης. Αυτές οι ζώνες διευθετούνται ανάλογα με την τοποθέτηση των εγκαταστάσεων εξαερισμού, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα της διάταξης στη σήραγγα Holland.

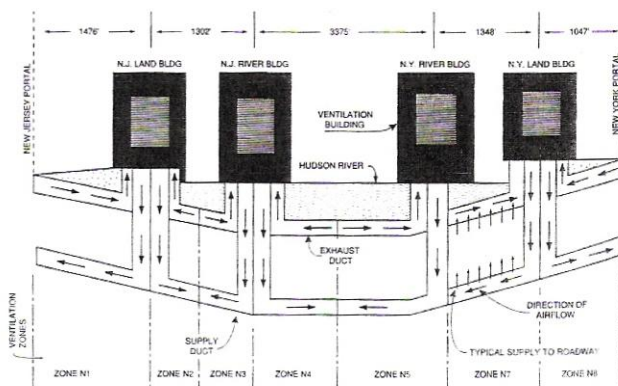


Fig. 20-9. Ventilation diagram of the Holland Tunnel.

Εικόνα 2. 2-Διάταξη σήραγγας Holland (πηγή: ASHRAE, 1991)

Ένα από τα προαπαιτούμενα του σχεδιασμού είναι ο εξαερισμός να γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε σε κάθε ζώνη, αν ένας

ανεμιστήρας τεθεί εκτός λειτουργίας, να διατηρείται η ροή αέρα στο 85% της κανονικής παροχής. Αυτό γίνεται είτε διαθέτοντας έναν περίσσιο ανεμιστήρα για έκτακτη ανάγκη είτε εγκαθιστώντας τέσσερις ανεμιστήρες σε κάθε ζώνη. Μ' αυτό τον τρόπο και λειτουργώντας οι τρεις από τους τέσσερις παράλληλα μπορούν να υπερκαλύψουν αυτό το κριτήριο παροχής.

Η αναγκαία παροχή αέρα, αλλάζει κατά τη διάρκεια της ημέρας ανάλογα με την κίνηση μέσα στη σήραγγα, επομένως για λόγους οικονομίας ενέργειας θα πρέπει και η λειτουργία του εξαερισμού να ρυθμίζεται ανάλογα. Αυτό γίνεται υιοθετώντας ένα σύστημα ανάδρασης, συζευγμένο με μηχανές πολλαπλών στροφών.

2.3 Συστήματα Εξαερισμού Σηράγγων

Όλες οι σήραγγες περιλαμβάνουν εξαερισμό, ο οποίος μπορεί να είναι φυσικός, να δημιουργείται λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων (φαινόμενο του εμβόλου-piston effect) ή να επιτυγχάνεται με τεχνικά μέσα. Βασική στόχευση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι να ελέγχονται οι συγκεντρώσεις των ρυπαντών κατά την κανονική λειτουργία και να απομακρύνεται ο καπνός και τα θερμά αέρια σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Ο σχεδιασμός πρέπει, συνεπώς να γίνεται με τα παραπάνω υπόψη, συμπεριλαμβάνοντας όμως και το κόστος κατασκευής και λειτουργίας. Γι' αυτό το λόγο, για μικρού μήκους σήραγγες (μικρότερες από 180m) προτιμώνται οι δύο πρώτοι τρόποι εξαερισμού, χωρίς να εγκαθίστανται δηλαδή περαιτέρω μηχανικά μέσα.

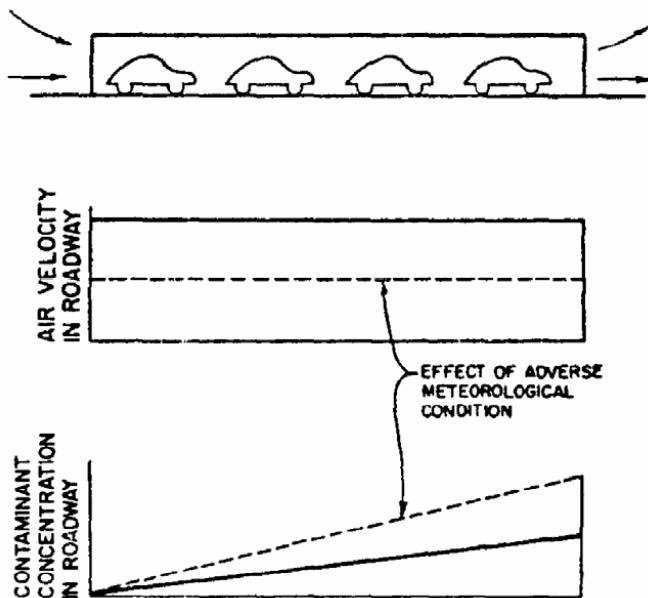
Αντίθετα, μεγαλύτερου μήκους σήραγγες ή που εξυπηρετούν μεγαλύτερο όγκο οχημάτων πρέπει να εφοδιάζονται με μηχανικά συστήματα εξαερισμού. Υπάρχουν, τέλος και οι περιπτώσεις όπου τα μηχανικά αυτά συστήματα τίθενται σε λειτουργία μόνο στην περίπτωση πυρκαγιάς ενώ στην κανονική λειτουργία αρκεί ο φυσικός εξαερισμός.

2.3.1 Φυσικός Εξαερισμός

Σήραγγες με φυσικό εξαερισμό βασίζονται κυρίως στις μετεωρολογικές συνθήκες και στη ροή αέρα που προκύπτει από την κίνηση των οχημάτων, για να διατηρούνται σε ικανοποιητικά επίπεδα οι συνθήκες περιβάλλοντος. Ο βασικός φυσικός μηχανισμός που υποβοηθά τον εξαερισμό είναι η διαφορά πίεσης στις δύο πύλες της σήραγγας που προκύπτει από διαφορές στο υψόμετρο, την θερμοκρασία περιβάλλοντος ή τον άνεμο. Δυστυχώς κανένας από αυτούς τους παράγοντες δεν είναι αξιόπιστος σχεδιαστικά μιας και μεταβολές που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της μέρας σ' αυτά τα μεγέθη μεταβάλλουν την «ικανότητα εξαερισμού». Ακόμη, δεν αρκεί απλά διαφορά πίεσης για να υπάρξει ροή αέρα μέσα στη σήραγγα. Πρέπει αυτή η διαφορά να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπερνική την αντίσταση της σήραγγας που προκύπτει από το μήκος της, τον

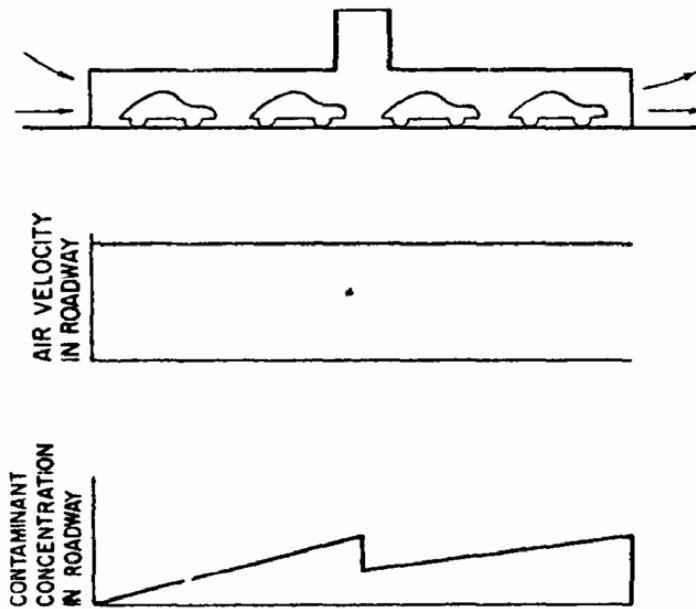
συντελεστή συνεκτικότητας, την υδραυλική διάμετρο και την πυκνότητα του αέρα.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι φυσικού εξαερισμού. Η ροή αέρα να γίνεται πύλη με πύλη (portal to portal) ή πύλη με αγωγό εξαερισμού (portal to shaft). Η πρώτη συναντάται κυρίως σε σήραγγες μονής κατεύθυνσης όπου δημιουργείται μια σταθερή ροή, η οποία απομακρύνει τους ρυπαντές, με αποτέλεσμα η υψηλότερη συγκέντρωσή τους να βρίσκεται στην έξοδο της σήραγγας. Αν η σήραγγα είναι διπλής κατεύθυνσης ή προκύψουν επιβαρυντικές μετεωρολογικές συνθήκες, η απόδοση αυτής της μεθόδου εξαερισμού μειώνεται.



Εικόνα 2. 3-Φυσικός Εξαερισμός Πύλη με Πύλη (portal to portal) - Πηγή: ASHRAE(1991)

Σε τέτοιες περιπτώσεις προτιμάται η φυσικά εξαεριζόμενη σήραγγα με ενδιάμεσο αγωγό. Ωστόσο και αυτή η μέθοδος είναι σε μεγάλο βαθμό εξαρτώμενη από τις συνθήκες περιβάλλοντος. Το υποβοηθητικό για τον εξαερισμό «φαινόμενο της καπνοδόχου» (stack effect) στον αγωγό, εξαρτάται από την εξωτερική θερμοκρασία, την θερμοκρασία των περικλειόντων βράχων, την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου καθώς και το ύψος του αγωγού. Η προσθήκη περισσότερων του ενός αγωγού μάλλον λειτουργεί επιβαρυντικά μιας και υπάρχει ο κίνδυνος να εγκλωβιστεί ανάμεσα στους αγωγούς, αέρας υψηλής περιεκτικότητας σε ρυπαντές.



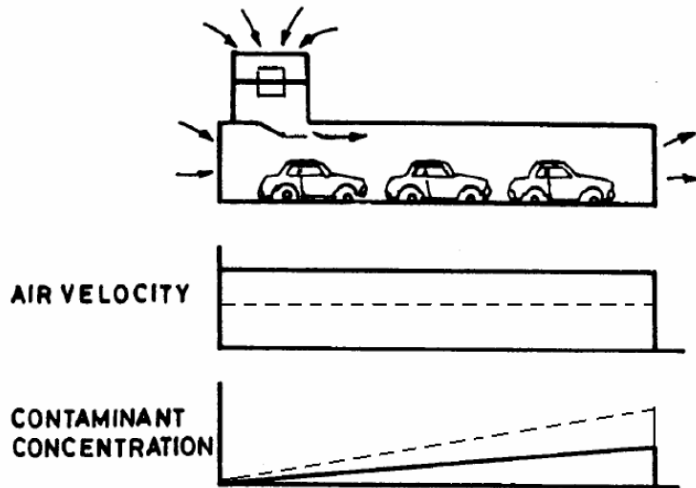
Εικόνα 2. 4 – Φυσικός Εξαερισμός Πύλη με Αγωγό (portal to shaft) Πηγή: ASHRAE (1991)

Οι πολλοί αστάθμητοι παράγοντες στην απόδοση του φυσικού εξαερισμού που αναφέρθηκαν παραπάνω περιορίζουν τη χρήση του σε μικρού μήκους σήραγγες εκτός εξαιρετικών περιπτώσεων όπου οι μετεωρολογικές συνθήκες το επιτρέπουν όπως η σήραγγα Via Mala στην Ελβετία ή η σήραγγα Tenda Pass ανάμεσα σε Γαλλία και Ιταλία. Ακόμα και αυτές όμως έχουν εφοδιαστεί με μηχανικά συστήματα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

2.3.2 Διαμήκης εξαερισμός

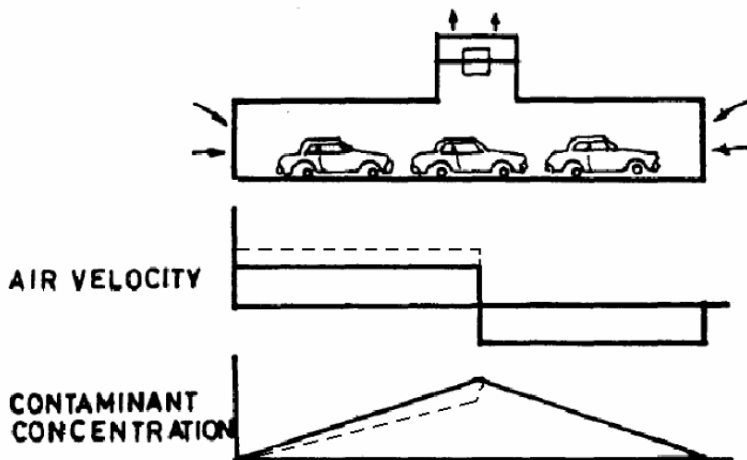
Σύστημα διαμήκους εξαερισμού, καλείται οποιοδήποτε σύστημα εισάγει ή αφαιρεί αέρα από τη σήραγγα, δημιουργώντας έτσι μια σταθερή διαμήκη ροή.

Συστήματα εισαγωγής αέρα χρησιμοποιούνται κυρίως σε σιδηροδρομικές σήραγγες αλλά τελευταία και σε οδικές. Η λειτουργία τους είναι να εισάγουν αέρα στη σήραγγα στη μία άκρη της. Αυτός αναμιγνύεται με τον αέρα που εισέρχεται στη σήραγγα λόγω του φαινομένου του εμβόλου. Τα συστήματα αυτά είναι αποτελεσματικά σε σήραγγες μονής κατεύθυνσης καθώς δημιουργούν μια ροή αέρα σταθερής ταχύτητας που απομακρύνει τους ρυπαντές με αποτέλεσμα η υψηλότερη συγκέντρωσή τους να παρατηρείται στην έξοδο.

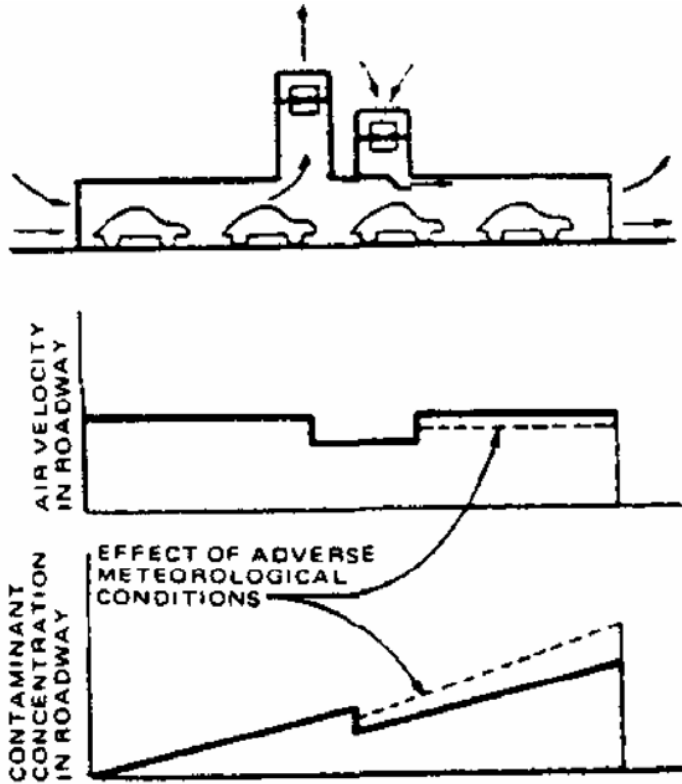


Εικόνα 2. 5- Σύστημα Εισαγωγής Αέρα Πηγή: ASHRAE (1991)

Συστήματα εξαγωγής αέρα με την παρουσία αγωγού είναι παρόμοια με τα συστήματα φυσικού εξαερισμού με αγωγό, μόνο που σε αυτή την περίπτωση η παρουσία ανεμιστήρα είναι αυτή που δημιουργεί την διαφορά πίεσης και κατά συνέπεια τη ροή αέρα μέσα στον αγωγό. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά για σήραγγες διπλής κατεύθυνσης. Τέλος υπάρχουν και τα συστήματα με δύο αγωγούς κοντά στο κέντρο της σήραγγας, έναν για εξαγωγή και έναν για εισαγωγή αέρα. Αυτό το είδος εξαερισμού προσφέρει καλύτερη ποιότητα αέρα στο δεύτερο μισό της σήραγγας μιας και αέρας υψηλής περιεκτικότητας σε ρυπαντές «ανταλλάσσεται» με ατμοσφαιρικό αέρα στον αγωγό.

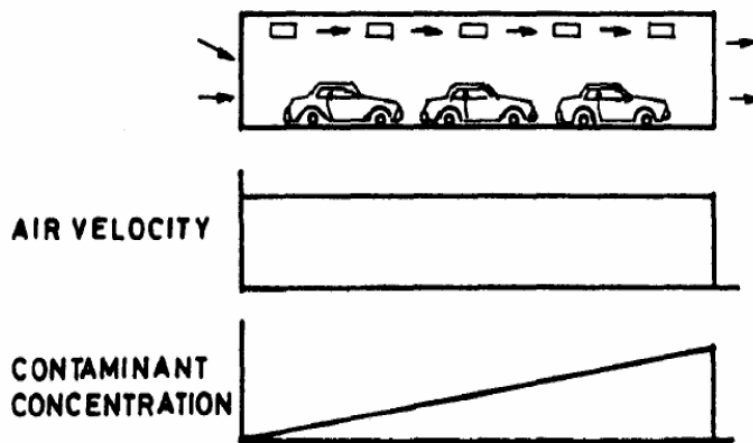


Εικόνα 2. 6- Σύστημα Εξαγωγής Αέρα Πηγή: ASHRAE (1991)

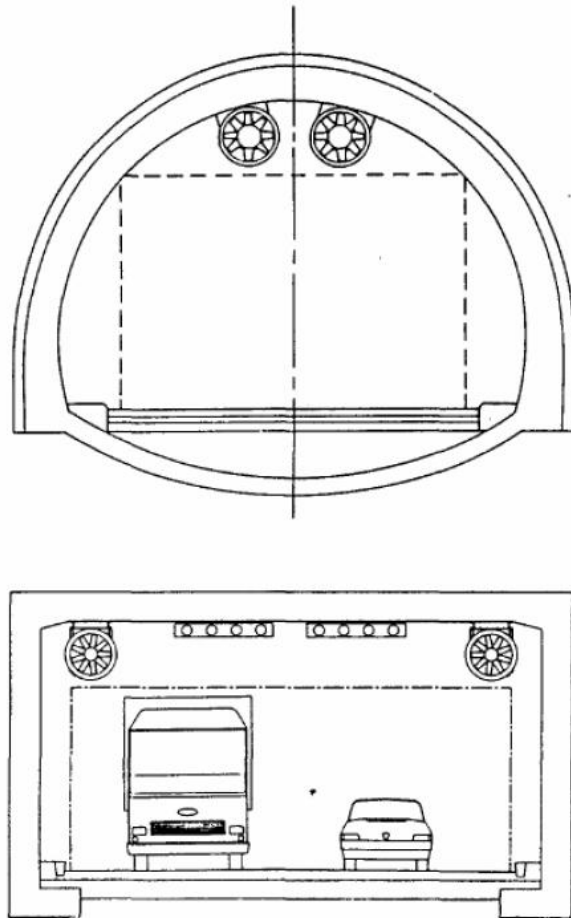


Εικόνα 2. 7- Μικτό Σύστημα Εισαγωγής-Εξαγωγής Αέρα Πηγή: ASHRAE (1991)

Jet Fan Τελευταία εξέλιξη είναι να εγκαθίστανται στην οροφή των σηράγγων φυσητήρες οι οποίοι δημιουργούν το ζητούμενο διάμηκες ρεύμα αέρα. Αυτός ο τρόπος είναι μινιμαλιστικός με την έννοια ότι δεν προβλέπεται επιπλέον χώρος στο σχεδιασμό για πολύπλοκα συστήματα εξαερισμού, προβλέπεται όμως μία γενική διαπλάτυνση της διατομής της σήραγγας.



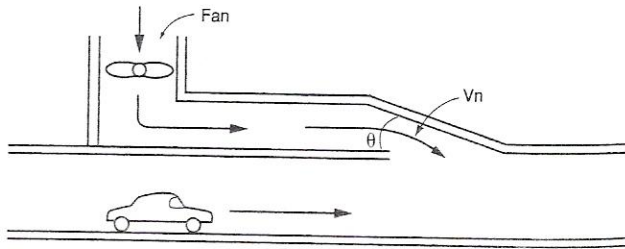
Εικόνα 2. 8- Σύστημα Εξαερισμού με Φυσητήρες Πηγή: ASHRAE (1991)



Εικόνα 2. 9- Σύστημα Εξαερισμού με Φυσητήρες-Διάφορες Διατάξεις Πηγή: ASHRAE (1991)

Saccardo Nozzle Υπάρχουν τα διαμήκη συστήματα με τη χρήση ακροφυσίου Saccardo. Η λογική τους βασίζεται στην εισαγωγή αέρα υπό πολύ μικρή γωνία, σχεδόν παράλληλα με το διαμήκη άξονα της σήραγγας υπό υψηλή ταχύτητα μέσω αυτού του τύπου ακροφυσίου. Τα βασικά του πλεονεκτήματα σε σχέση με τη χρησιμοποίηση ανεμιστήρων είναι

- Μειωμένο ύψος σήραγγας
- Μειωμένος αριθμός κινούμενων εξαρτημάτων για συντήρηση
- Η συντήρηση μπορεί να γίνει χωρίς να διακόπτεται η κυκλοφορία
- Μείωση του επιπέδου θορύβου μέσα στη σήραγγα
- Υψηλή αποδοτικότητα



Εικόνα 2. 10- Saccardo Nozzle πηγή: ASHRAE (1991)

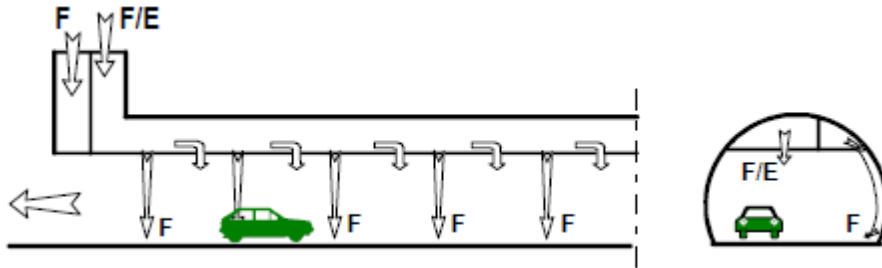
2.3.3 Ημιεγκάρσιος Εξαερισμός

Βασικό χαρακτηριστικό του ημιεγκάρσιου συστήματος είναι η ομοιόμορφη διανομή ή συλλογή του αέρα κατά το μήκος της σήραγγας. Ένα ημιεγκάρσιο σύστημα παροχής αέρα παράγει μία ομοιόμορφη συγκέντρωση ρυπαντών κατά το μήκος της σήραγγας, επειδή ο αέρας και τα καυσαέρια των οχημάτων εισέρχονται στην περιοχή του αυτοκινητόδρομου με τον ίδιο σχετικό ρυθμό. Σε μία σήραγγα ελεύθερης ροής με μία κατεύθυνση κυκλοφορίας οχημάτων η επιπρόσθετη διαμήκης ροή αέρα θα δημιουργηθεί με τα κινούμενα οχήματα στην περιοχή του αυτοκινητόδρομου. Ο αέρας μεταφέρεται στο δρόμο μέσω ενός αγωγού και ύστερα διανέμεται ομοιόμορφα μέσω σωλήνων. Να σημειωθεί ότι η πιο κατάλληλη περιοχή για την εισαγωγή αέρα στην οδική σήραγγα είναι στο επίπεδο των αγωγών εξάτμισης των οχημάτων ώστε να πραγματοποιηθεί η άμεση αραίωση των καυσαερίων.

Στο σύστημα ημιεγκάρσιου αερισμού, νωπός αέρας εισάγεται κατά μήκος της σήραγγας και ο ακάθατος αέρας διαφεύγει προς τα έξω, είτε από τα στόμια είτε από κατακόρυφους αγωγούς. Για το σύστημα αυτό πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις (Καβουλάκος, 1999):

- Μέγιστη ταχύτητα του αέρα 10 m/s μέσα στη σήραγγα.
- Το σύστημα αερισμού θα πρέπει να είναι αναστρέψιμης ροής για περίπτωση φωτιάς, και ικανό να εξάγει τουλάχιστον 150 m³/sec αέρα, από το δυσμενέστερο σημείο της σήραγγας.
- Προσαγωγή νωπού αέρα στη σήραγγα θα πρέπει να γίνεται αποκλειστικά μέσω στομιών πλήρους ρύθμισης.
- Σε περίπτωση πυρκαγιάς θα πρέπει να γίνεται άμεση μεταγωγή του συστήματος αερισμού στη λειτουργία απαγωγής. Τα στόμια νωπού αέρα στη περιοχή της φωτιάς θα πρέπει να ανοίγουν τελείως, για να εξάγουν αέρα από τη σήραγγα.
- Η μέγιστη απόσταση μεταξύ στομιών νωπού αέρα (στομιών απαγωγής) να είναι 50 m.

- Η στεγανότητα των κλειστών στομιών νωπού αέρα και των αγωγών αερισμού θα πρέπει να είναι επαρκής για να εξασφαλίζει την αποτελεσματική απαγωγή καπνού.



Εικόνα 2. 11– Ημιεγκάρσιος αερισμός με αγωγούς στην Οροφή Πηγή: Καβουλάκος (1999)

2.3.4 Εγκάρσιος Εξαερισμός

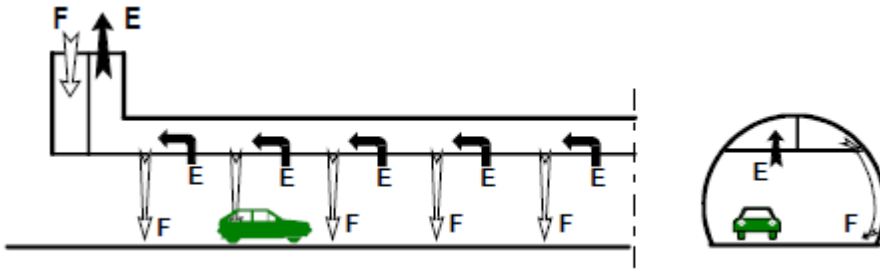
Η εγκάρσια ροή δημιουργείται από την ομοιόμορφη κατανομή του καθαρού αέρα ή/και της ομοιόμορφης συλλογής του αέρα κατά μήκος της σήραγγας. Αυτό το σχήμα ροής αέρος χρησιμοποιείται συνήθως στις οδικές σήραγγες αν και εφαρμόζεται περιστασιακά σε μοναδικές περιπτώσεις στις σήραγγες διέλευσης. Η ομοιόμορφη διανομή και η συλλογή του αέρα κατά μήκος μιας σήραγγας θα παράσχει ένα συνεχές επίπεδο θερμοκρασίας και ρύπων σε όλη τη σήραγγα. Το εγκάρσιο σύστημα εξαερισμού μπορεί να διαμορφωθεί σε πλήρως εγκάρσιο ή ημιεγκάρσιο (Beard & Carvel, 2005).

Σε αυτό το σύστημα γίνεται ταυτόχρονη εισαγωγή νωπού αέρα και απαγωγή ακάθαρτου αέρα κατά μήκος της σήραγγας. Οι ακόλουθες απαιτήσεις πρέπει να ικανοποιούνται (Καβουλάκος, 1999):

- Μέγιστη ταχύτητα του αέρα 10 m/s μέσα στη σήραγγα.
- Το σύστημα αερισμού θα πρέπει να είναι αναστρέψιμης ροής για την περίπτωση πυρκαγιάς και ικανό να εξάγει τουλάχιστον 150 m³/sec αέρα, από το δυσμενέστερο σημείο της σήραγγας.
- Ρυθμιζόμενα στόμια εισόδου νωπού αέρα και ελεγχόμενα στόμια εξόδου ακάθαρτου αέρα πρέπει να προβλέπονται συνδεδεμένα με τους αντίστοιχους αγωγούς εισαγωγής και απαγωγής αέρα. Αυτά θα πρέπει να ρυθμιστούν έτσι ώστε για τις συνθήκες σχεδιασμού, να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη διανομή του αέρα κατά μήκος της σήραγγας.
- Σε περίπτωση πυρκαγιάς η παροχή νωπού αέρα θα πρέπει να μειώνεται στο ένα τρίτο της μέγιστης δυνατής. Τα στόμια

απαγωγής στην περιοχή της θα πρέπει να είναι τελείως ανοικτά, και κλειστά σε όλο το υπόλοιπο μήκος της σήραγγας.

- Η μέγιστη απόσταση μεταξύ στομίων απαγωγής αέρα θα είναι 100 m, ενώ η μέγιστη απόσταση μεταξύ στομίων εισαγωγής θα είναι 50 m.
- Η στεγανότητα των κλειστών στομίων ναπού αέρα και των στομίων απαγωγής είναι αναγκαία για να εξασφαλίζεται αποτελεσματική απαγωγή καπνού



Εικόνα 2. 12–Εγκάρσιος αερισμός με αγωγούς στην οροφή Πηγή: Καβουλάκος (1999)

2.3.5 Επιλογή Τύπου Συστήματος Εξαερισμού

Το σύστημα εξαερισμού που εγκαθίσταται σε μια σήραγγα πρέπει να εξασφαλίζει ένα ασφαλές περιβάλλον και υπό κατάσταση έκτακτης ανάγκης και υπό κανονικές συνθήκες. Το σχέδιο των συστημάτων εξαερισμού για τις οδικές σήραγγες εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως το αναμενόμενο σχέδιο πυρκαγιάς και το επιθυμητό ύψος καθαρού καπνού. Ολόκληρος ο απαιτούμενος εξοπλισμός για τον αερισμό της σήραγγας σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης χρησιμοποιείται όπου είναι δυνατόν και για την κανονική λειτουργία της σήραγγας. Οι απαιτήσεις για όλο τον εξοπλισμό αερισμού καθορίζονται από τις ανάγκες τόσο υπό κανονικές συνθήκες κυκλοφορίας όσο και υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης (Μερεντίτης κα, 2004):

- Για υπεραστικές σήραγγες μήκους έως 500 m και για αστικές σήραγγες μήκους έως 250 m, εν γένει δεν προβλέπεται σύστημα αερισμού ούτε για την κανονική λειτουργία ούτε για την περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Η απομάκρυνση των ρύπων στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι εξασφαλίζεται από το φυσικό αερισμό. Ο μελετητής υπολογίζει τους εκπεμπόμενους ρύπους σε περίπτωση στάσεως και πολύ πυκνής κυκλοφορίας με χαμηλές ταχύτητες (π.χ. 10 km/h) και σε περίπτωση οριακών συνθηκών ρύπων στις δυσμενέστερες κυκλοφοριακά συνθήκες και φόρτους, και εισηγείται μέτρα ρύθμισης της κυκλοφορίας κατά την χρήση της σήραγγας.

- Για υπεραστικές σήραγγες μήκους άνω των 500 m, ο μελετητής προτείνει αιτιολογημένα το σύστημα ή το συνδυασμό συστημάτων αερισμού που ανταποκρίνεται στα ειδικά κριτήρια μελέτης του έργου και εξασφαλίζει τα μέγιστα τεchnοοικονομικά οφέλη, με βάση τα ακόλουθα:
 - Η θεώρηση του συστήματος θα γίνει κατά τα αρχικά στάδια της μελέτης. Ο μελετητής θα υπολογίσει και τεκμηριώσει το προτεινόμενο σύστημα αερισμού σε συνεργασία με τους λοιπούς παράγοντες του έργου (οδοποιοί, γεωτεχνικοί, περιβαλλοντολόγοι κτλ).
 - Γενικά, για μήκη από 500 m μέχρι 3 km προτιμάται διαμήκης αερισμός. Μελέτη και πρόταση άλλου συστήματος αερισμού πλην διαμήκους, δηλαδή ημιεγκάρσιου ή εγκαρσίου ή συνδυασμού συστημάτων, μπορεί να υποβληθεί προς έγκριση μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις και με απόλυτη τεκμηρίωση της τεchnοοικονομικής σκοπιμότητας για το σύνολο του έργου (έργα πολιτικού μηχανικού κλπ.) με ανάλυση των παραγόντων που επέβαλαν την λύση.
 - Για σήραγγες άνω των 3 km γίνεται τεchnοοικονομικής αξιολόγηση όλων των συστημάτων αερισμού συμπεριλαμβανομένου του διαμήκους με χρήση ενδιάμεσων σταθμών εναλλαγής αέρα το πολύ ανά 3 km.
- Για αστικές σήραγγες μονής κατευθύνσεως μήκους άνω των 250 m και μέχρι 800 m μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα διαμήκους εξαερισμού υπό την προϋπόθεση ότι θα ληφθούν πρόσθετα μέτρα διαχείρισης του καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς εάν το μήκος της σήραγγας υπερβαίνει τα 500 m (λόγω της πιθανότητας ακινητοποιήσεως οχημάτων, λόγω πυκνής κυκλοφορίας κατάντη του σημείου της πυρκαγιάς). Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν κυρίως έλεγχο της ταχύτητας αέρος κατά την κατεύθυνση της κυκλοφορίας με ταχύτητα όχι μεγαλύτερη των 1,5 m/sec επί 5 min περίπου ώστε να δοθεί χρόνος για να απομακρυνθούν οι χρήστες των αυτοκινήτων.
- Για αστικές σήραγγες μονής κατευθύνσεως πυρκαγιάς άνω των 800 m μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαμήκης εξαερισμός για την απομάκρυνση των ρύπων υπό τις εξής δύο προϋποθέσεις: να υπάρχει ανεξάρτητο σύστημα απαγωγής καπνού με φρέατα εκκαπνισμού εξοπλισμένα με ανεμιστήρες απαγωγής το πολύ ανά 800 m και η συγκέντρωση των ρύπων στο στόμιο εξόδου και η διάχυσή τους στην ατμόσφαιρα να είναι εντός των επιτρεπόμενων από τις περιβαλλοντικές διατάξεις ορίων, ενώ πρέπει να αποδεικνύεται με αντίστοιχη περιβαλλοντική μελέτη. Το συνολικό μήκος επομένως θα προκύψει από τους εκπεμπόμενους ρύπους υπό το μέγιστο κυκλοφοριακό φορτίο, λαμβάνοντας υπόψη και την συχνότητα ακινητοποιημένων οχημάτων σε όλο το μήκος της σήραγγας.
- Για αστικές σήραγγες δύο κατευθύνσεων μήκους άνω των 250 m η χρήση διαμήκους εξαερισμού για την απομάκρυνση του καπνού απαγορεύεται, λόγω της πιθανότητας ακινητοποιημένων οχημάτων σε όλο το μήκος της σήραγγας και κατά τις δύο κατευθύνσεις.

Κεφάλαιο 3^ο

Μαθηματικό Υπόβαθρο

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι αναλυτικές εξισώσεις που περιγράφουν τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας τα οποία μελετώνται από την παρούσα εργασία.

Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιούνται ως βάση για την ανάπτυξη των αλγορίθμων του υπολογιστικού πακέτου ANSYS FLUENT που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη και η γνώση τους έχει αξία:

- για την βαθιά κατανόηση του φυσικού φαινομένου που λαμβάνει χώρα.
- για την ορθή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την υπολογιστική προσομοίωση.
- για την βέλτιστη χρήση του εμπορικού πακέτου και την δυνατότητα μέγιστης αξιοποίησης της περιορισμένης ευελιξίας που προσφέρει ο κλειστός κώδικάς του, ώστε να είναι δυνατή η αντιμετώπιση αντικειμενικών δυσκολιών που προκύπτουν από τη φύση του φαινομένου.

3.1 Εξισώσεις Διατήρησης

Γενικά, κατά τη μελέτη ενός φαινομένου, η οπτική και μόνο επισκόπησή του δεν είναι αρκετή για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Πολλές φορές μάλιστα, η πειραματική υλοποίησή του είναι δύσκολη κι έτσι περιοριζόμαστε στην υπολογιστική προσομοίωση κάτι που σημαίνει ότι ακόμη και η οπτική θεώρηση είναι αδύνατη. Συνεπώς η εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων για θεμελιώδη μεγέθη είναι ο μοναδικός τρόπος αξιόπιστης μελέτης. Ιδιαίτερα στην περίπτωση των ρευστομηχανικών προβλημάτων, τέτοια θεμελιώδη μεγέθη εξάγονται με την επίλυση ενός συνόλου εξισώσεων που είναι γνωστές ως εξισώσεις διατήρησης (εξισώσεις Navier-Stokes).

Οι βασικές αυτές εξισώσεις που περιγράφουν τη φυσική της ροής των ρευστών είναι οι εξής:

- Η Εξίσωση Συνέχειας
- Η Εξίσωση Ορμής
- Η Εξίσωση Ενέργειας

Η επίλυσή τους μας δίνει τη δυνατότητα να γνωρίζουμε σε κάθε ξεχωριστό σημείο στο χώρο την τιμή μεγεθών όπως η πίεση και η θερμοκρασία, καθώς και πώς αυτές μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του φαινομένου. Μελετούμε δηλαδή το φαινόμενο χρησιμοποιώντας χωρική ή Eulerian περιγραφή

3.1.1 Εξίσωση Διατήρησης Μάζας

Η εξίσωση διατήρησης μάζας εκφράζει τον πρώτο βασικό νόμο της Μηχανικής, ότι μάζα δεν καταστρέφεται ούτε δημιουργείται από το μηδέν. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι αν έχουμε ένα κλειστό όγκο ελέγχου, το πόσο της μάζας του ρευστού που εισέρχεται μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι ίδιο με το ποσό της μάζας που εξέρχεται από αυτόν. Επειδή αυτή η διατύπωση επιβεβαιώνει μία βασική υπόθεση της ρευστομηχανικής, την υπόθεση της συνέχειας, η εξίσωση διατήρησης της μάζας είναι γνωστή και ως εξίσωση της συνέχειας. Η διαφορική μορφή της εξίσωσης είναι (Fluent, 2006):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

όπου ρ : η πυκνότητα
και \mathbf{u} : το διάνυσμα ταχύτητας

Για ασυμπίεστο ρευστό, όπου η πυκνότητα ρ είναι σταθερή, η εξίσωση συνέχειας γίνεται:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

3.1.2 Εξίσωση Ορμής

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής εκφράζει το δεύτερο βασικό νόμο της κλασικής μηχανικής που ονομάζεται και Δεύτερος Νόμος του Νεύτωνα, ότι δηλαδή η χρονική μεταβολή της ορμής ενός σώματος ισούται με το άθροισμα των δρωσών δυνάμεων. Η εξίσωση ορμής είναι (Fluent, 2006):

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{u} \right) + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{S} + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

όπου ρ : η πυκνότητα
 \mathbf{u} : το διάνυσμα ταχύτητας
 p : η πίεση
 \mathbf{g} : η επιτάχυνση της βαρύτητας
 \mathbf{S} : οι εξωτερικές δυνάμεις (πχ ηλεκτροστατική)
 $\boldsymbol{\sigma}$: ο τανυστής τάσεων

3.1.3 Boussinesq Approximation

Η προσέγγιση Boussinesq είναι μια μέθοδος προσέγγισης της πυκνότητας του ρευστού, η οποία βασίζεται στην εξής παραδοχή. Μεταβολές της πυκνότητας θεωρούνται αμελητέες και δεν λαμβάνονται υπόψη σε κανέναν όρο των εξισώσεων διατήρησης, πλην

του όρου που αντιπροσωπεύει την επίδραση του βαρυτικού πεδίου στην εξίσωση της ορμής, οποίος και αντικαθίσταται από $(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g$ όπου ρ_0 η πυκνότητα του ρευστού, β ο συντελεστής θερμικής διαστολής και T_0 η θερμοκρασία λειτουργίας.

Αυτό γίνεται διότι στον όρο αυτό, η πυκνότητα πολλαπλασιάζεται με την επιτάχυνση της βαρύτητας και συνεπώς αμελητέες διαφορές αποκτούν σημαντική υπόσταση.

3.1.4 Εξίσωση Ενέργειας

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας εκφράζει τον γενικευμένο Νόμο Θερμοδυναμικής (Α΄ Αξίωμα), σύμφωνα με τον οποίο η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια ενός συστήματος είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα του ποσού της θερμότητας που απορροφά το σύστημα από το περιβάλλον και του έργου των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν πάνω στο σύστημα. Η εξίσωση ενέργειας γενικά:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot q_r + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h_i \rho D_i \nabla Y_i \quad \text{όπου}$$

h : η ενθαλπία του ρευστού

u : το διάνυσμα της ταχύτητας

Dp/Dt : ο ρυθμός μεταβολής p

q_r : η θερμική ακτινοβολία

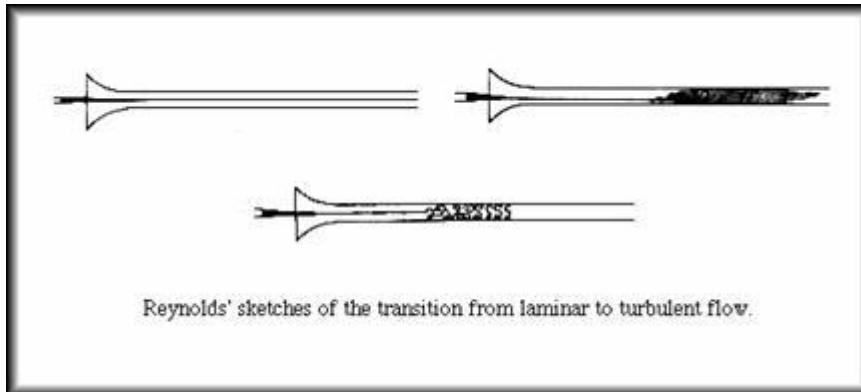
k : η θερμική αγωγιμότητα

T : η θερμοκρασία

3.2 Μοντέλα Τύρβης

Στα φαινόμενα που θα μελετήσουμε παρατηρούμε δύο είδη ροών, **τη στρωτή ροή και την τυρβώδη ροή.**

Η διαφορά μεταξύ των δύο γίνεται εμφανής πειραματικά, με την εισαγωγή λεπτής δέσμης χρώματος στην ροή μέσω βελόνας, όπως φαίνεται στο σχήμα και παρακολούθηση της πορείας της.



Εικόνα 3. 1-Μετάβαση από Στρωτή σε Τυρβώδη Ροή

Σε μικρές ταχύτητες το χρώμα κινείται μαζί με το ρευστό σχηματίζοντας μια απολύτως ευθεία γραμμή, με σαφή σχεδόν όρια, ελάχιστα διαχεόμενη σε κατεύθυνση κάθετα στην κίνησή της. Είναι η περίπτωση της **στρωτής ροής**.

Όταν αυξήσουμε την παροχή μέσα στον σωλήνα, η χρωματισμένη γραμμή αρχίζει να αναμιγνύεται με το περιβάλλον ρευστό, αφού σχηματίσει αρκετά μεγάλες διακυμάνσεις κάθετα με την κίνησή της. Οι διακυμάνσεις αυτές προκαλούν ταχεία ανάμιξη του χρώματος με το περιβάλλον ρευστό έως ότου όλη η διατομή έχει χρωματιστεί. Αυτή η περίπτωση της ροής ονομάζεται **τυρβώδης**.

Η βασική ιδέα για την μαθηματική περιγραφή μιας τέτοιας ροής όπως προτάθηκε από τον Reynolds (1895) είναι η διάσπαση της ταχύτητας και των υπόλοιπων βασικών μεγεθών σε μέση χρονικά τιμή \bar{A} και τυρβώδη διακύμανση A'

$$u = \bar{u} + u' \quad \bar{u}' = 0$$

$$v = \bar{v} + v' \quad \bar{v}' = 0$$

$$p = \bar{p} + p' \quad \bar{p}' = 0$$

και εν συνεχεία αντικατάσταση τους στις αρχικές εξισώσεις. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός συστήματος νέων εξισώσεων που ονομάζονται RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\overline{\rho u_i' u_j'})$$

Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων είναι παρόμοιο με αυτό για τη στρωτή ροή μόνο που τώρα περιλαμβάνεται και ο όρος $\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'}$ της τυρβώδους διατμητικής τάσης που ονομάζεται **τάση Reynolds**. Η ύπαρξη επιπλέον αγνώστων σημαίνει ότι για την επίλυσή του συστήματος πρέπει να εισάγουμε και κάποιες επιπλέον εξισώσεις, οι οποίες θα συσχετίζουν τις τάσεις Reynolds με τα άλλα μέσα χρονικά μεγέθη, για να γίνει το λεγόμενο κλείσιμο (συμπλήρωμα) του προβλήματος (closure). Αυτές οι εξισώσεις είναι ημιεμπειρικές και αποτελούν τη λεγόμενη **μοντελοποίηση της τύρβης**.

Σημαντικό εργαλείο στην εξαγωγή αυτών των εξισώσεων είναι η **υπόθεση Boussinesq**, η οποία δεν πρέπει να συγχέεται με την προσέγγιση Boussinesq την οποία αναφέραμε παραπάνω. Η υπόθεση Boussinesq συσχετίζει τις τάσεις Reynolds με τις μέσες ταχύτητες της ροής με τον ακόλουθο τρόπο

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$$

Η υπόθεση Boussinesq χρησιμοποιείται από τα μοντέλα τύρβης που θα αναφέρουμε παρακάτω αλλά και γενικότερα, λόγω του χαμηλού υπολογιστικού κόστους που προκύπτει, όσον αφορά τον υπολογισμό της τυρβώδους συνεκτικότητας μ_t . Μειονεκτεί στο ότι λαμβάνει το μ_t ως μια μονοδιάστατη ισοτροπική ποσότητα κάτι που δεν είναι αυστηρά σωστό. Ωστόσο αν δεν χρησιμοποιούνταν, θα έπρεπε να προστεθούν επιπλέον εξισώσεις μεταφοράς για κάθε τανυστή Reynolds ξεχωριστά καθώς και μία ακόμη για το ϵ . Αυτό σημαίνει πέντε επιπλέον εξισώσεις για τις δύο διαστάσεις και επτά για τις τρεις διαστάσεις. Γίνεται φανερό συνεπώς η χρησιμότητα της υπόθεσης στην οικονομία υπολογισμών.

Παρακάτω παρατίθεται το μοντέλο τύρβης k- ϵ που επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία, μετά και τη χρήση της υπόθεσης Boussinesq στην εξαγωγή των εξισώσεων.

3.2.1 Το Μοντέλο Τύρβης k- ϵ

Γενικά, τα μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων επιτρέπουν τον καθορισμό της τυρβώδους ταχύτητας και μήκους, λύνοντας δύο διαφορετικές εξισώσεις μεταφοράς. Ένα από τα πιο σημαντικά είναι το k- ϵ model.

3.2.1.1 Standard k- ϵ model

Το standard k-ε model του FLUENT έχει αναδειχθεί σε βασικό εργαλείο υπολογισμών από τη στιγμή που προτάθηκε από τους Launder και Spalding λόγω της ευρωστίας, της οικονομίας, και της επιθυμητής ακρίβειας που προσφέρει, για ένα ευρύ φάσμα των τυρβωδών ροών στις βιομηχανικές προσομοιώσεις μεταφοράς ροής και θερμότητας. Είναι ένα ημιεμπειρικό μοντέλο και η παραγωγή των πρότυπων εξισώσεων στηρίζεται στις φαινομενολογικές εκτιμήσεις και την εμπειρία.

Το μοντέλο τύρβης k-ε χρησιμοποιεί τις εξισώσεις μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k (turbulence kinetic energy) και τη συνάρτηση καταστροφής ε (turbulence eddy dissipation). Η εξίσωση μεταφοράς για το **k** προκύπτει από την ακριβή εξίσωση (Fluent, 2006):

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

ενώ η εξίσωση μεταφοράς για το **ε** (που αντικαθιστά την ακριβή):

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

Στις παραπάνω εξισώσεις το **G_k** αντιπροσωπεύει την παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας εξαιτίας των μέσων συνιστωσών ταχύτητας, το **G_b** αντιπροσωπεύει την παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας εξαιτίας της ανωστικής τάσης, ενώ το **Y_M** αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά της φθίνουσας διαστολής της συμπιεστής τύρβης στο συνολικό ποσοστό της συνάρτησης καταστροφής. Τα **C_{1ε}**, **C_{2ε}**, **C_{3ε}** είναι σταθερές και σ_k, σ_ε είναι οι τυρβώδεις αριθμοί Prandtl για το k και ε αντίστοιχα. Τα **S_k**, **S_ε** είναι τιμές πηγής θερμότητας ορισμένες από το χρήστη.

Η μοντελοποίηση της τυρβώδους συνεκτικότητας **μ_t** με συνδυασμό k και ε είναι η εξής:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \text{ όπου } C_\mu \text{ είναι σταθερά}$$

Οι συνήθεις τιμές των εμπειρικών συντελεστών **C_{1ε}**, **C_{2ε}**, **C_μ**, **σ_k**, **σ_ε** είναι:

$$C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$$

Με την πάροδο του χρόνου και την εκτεταμένη χρήση του παραπάνω μοντέλου έγιναν φανερά κάποια μειονεκτήματά του. Αυτό οδήγησε στην εισαγωγή τροποποιήσεων που ως στόχο έχουν την βελτίωση της απόδοσης. Από αυτές τις τροποποιήσεις προέκυψε το **RNG k-ε model**.

3.2.1.2 RNG k-ε model

Το RNG (ReNormalization Group) k-ε model εξάχθηκε χρησιμοποιώντας μια στατιστική μέθοδο που ονομάζεται «θεωρία της επανακανονικοποίησης ομάδας» (renormalization group theory). Είναι παρόμοιο με το standard k-ε model με τις ακόλουθες διαφοροποιήσεις:

- Περιέχει ακόμα έναν όρο στην εξίσωση μεταφοράς για το ε που βελτιώνει την ακρίβεια σε ροές που παρουσιάζουν ταχείες παραμορφώσεις (rapidly strained flows)
- Ενσωματώνει την επίδραση των δινών στην τύρβη
- Περιλαμβάνει έναν αναλυτικό τύπο για τον τυρβώδη αριθμό Prandtl τη στιγμή που το standard model ζητά την εισαγωγή του ως σταθερά από τον χρήστη
- Παρέχει μια διαφορική συνάρτηση για την ενεργή συνεκτικότητα, η οποία προκύπτει με αναλυτικό τρόπο, δίνοντας τη δυνατότητα μελέτης ροών μικρού αριθμού Reynolds

Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν το RNG k-ε model πιο αξιόπιστο και πιο ακριβές από το standard k-ε model, για ένα ευρύ φάσμα ροών.

Συγκεκριμένα οι εξισώσεις για το k και το ε που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο είναι οι ακόλουθες

Η εξίσωση για την τυρβώδη κινητική ενέργεια (k)

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

Η εξίσωση για την συνάρτηση καταστροφής ε

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

Στις παραπάνω εξισώσεις το G_k αντιπροσωπεύει την παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας εξαιτίας των μέσων συνιστωσών ταχύτητας, το G_b αντιπροσωπεύει την παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας εξαιτίας της ανωστικής τάσης, ενώ το Y_M αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά της φθίνουσας διαστολής της συμπιεστής τύρβης στο συνολικό ποσοστό της συνάρτησης καταστροφής. Τα α_k και a_ε είναι οι

ανάστροφοι ενεργοί αριθμοί Prandtl για τα k και ε αντίστοιχα. Τα S_k, S_ε είναι τιμές πηγής θερμότητας ορισμένες από το χρήστη.

Οι συνήθεις τιμές των εμπειρικών συντελεστών $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ είναι $C_{1\varepsilon}=1.42, C_{2\varepsilon}=1.68$

Ο όρος R_ε

Η βασική διαφορά με τις εξισώσεις του standard model έγκειται στην ύπαρξη ενός επιπλέον όρου, του R_ε στην δεύτερη εξίσωση.

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \quad \text{όπου } \eta \equiv S_k / \varepsilon, \eta_0 = 4.38, \beta = 0.012$$

Το πόσο επηρεάζει αυτός ο όρος το αποτέλεσμα μπορεί να γίνει οπτικά αντιληπτό. Αντικαθιστώντας τον στη συνάρτηση καταστροφής ε προκύπτει μια τροποποιημένη εκδοχή αυτής η

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\text{όπου } C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$$

- όταν το $\eta < \eta_0$, για περιπτώσεις δηλαδή όπου έχουμε ήπιες παραμορφώσεις ροής, το R_ε είναι θετικό και έτσι το $C_{2\varepsilon}^*$ γίνεται μεγαλύτερο του $C_{2\varepsilon}$. Επειδή όμως το η παίρνει τιμές μέσα σε ένα περιορισμένο διάστημα, οι διαφοροποιήσεις στο $C_{2\varepsilon}^*$ δεν είναι μεγάλες και κατά συνέπεια τα αποτελέσματα για το k και το ε προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια αυτά του standard k- ε model.
- όταν το $\eta > \eta_0$, για περιπτώσεις δηλαδή όπου έχουμε ταχείες και έντονες παραμορφώσεις ροής, το R_ε είναι αρνητικό και έτσι το $C_{2\varepsilon}^*$ μπορεί να γίνει -απουσία φραγμένου διαστήματος για το η -πέρα πολύ μικρότερο του $C_{2\varepsilon}$. Σε σύγκριση με το standard k- ε model αυτή τη φορά, λύνοντας τις εξισώσεις για το k και το ε βλέπουμε ότι η μικρότερη καταστροφή του ε , το ενισχύει ενώ ταυτόχρονα μειώνει το k κάτι που οδηγεί σε πολύ μικρότερες τιμές τυρβώδους συνεκτικότητας (μ_t).

Η ενεργή συνεκτικότητα

Το RNG k-ε model παρέχει στο χρήστη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μια διαφορική εξίσωση για την τυρβώδη συνεκτικότητα που είναι η ακόλουθη

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad \text{όπου} \quad \hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu} \quad C_v = 100$$

ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση γίνεται φανερό με ποιο τρόπο επηρεάζεται το effective turbulent transport από τον ενεργό αριθμό Reynolds, κι έτσι μπορούν να μοντελοποιηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια ροές με μικρούς αριθμούς Reynolds.

Για μεγάλους αριθμούς Reynolds, η εξίσωση μας δίνει

$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ όπου $C_\mu = 0.0845$ πολύ κοντά στην εμπειρικά τεκμηριωμένη τιμή 0.09 που χρησιμοποιείται από το standard k-ε model.

Η επίδραση των δινών

Όταν στην κύρια ροή υπάρχουν δίνες αυτές επηρεάζουν την τύρβη. Το RNG k-ε model δίνει τη δυνατότητα να ενσωματωθεί αυτή η επίδραση μεταβάλλοντας την τυρβώδη συνεκτικότητα με κατάλληλο τρόπο. Συγκεκριμένα:

$$\mu_t = \mu_{t0} f\left(a_s, \Omega, \frac{k}{\varepsilon}\right)$$

όπου το μ_{t0} είναι η τιμή της τυρβώδους συνεκτικότητας χωρίς την επίδραση της δίνης, το Ω είναι ένας χαρακτηριστικός αριθμός που υπολογίζεται από το ANSYS FLUENT και το a_s είναι μία σταθερά που παίρνει διαφορετικές τιμές ανάλογα με το αν η ροή εμφανίζει έντονα ή όχι το φαινόμενο των δινών.

Τυρβώδης αριθμός Prandtl

Οι ανάστροφοι ενεργοί αριθμοί Prandtl α_k και α_ε παίρνουν τιμές από τον ακόλουθο τύπο που προκύπτει αναλυτικά μέσα από την θεωρία RNG

$$\left| \frac{a - 1.3929}{a_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{a + 2.3929}{a_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}}$$

όπου $\alpha_0=1.0$ και για $\left(\frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}}\right) \ll 1$, $\alpha_k=\alpha_\varepsilon \approx 1.393$

3.2.1.3 Η παραγωγή τύρβης στα μοντέλα k-ε

Ο όρος G_k αναφέρεται στην παραγωγή τύρβης και είναι πανομοιότυπος για το standard και το RNG k-ε model. Από την εξίσωση μεταφοράς για το k, ο G_k μπορεί να ορισθεί ως:

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

ή αν εφαρμοστεί η υπόθεση Boussinesq, προκύπτει η απλοποιημένη μορφή

$$G_k = \mu_t S^2$$

όπου $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$, modulus rate-of-strain tensor

3.2.2 Η επίδραση της άνωσης στην τύρβη στα μοντέλα k-ε

Όταν υπάρχει ταυτόχρονα μη μηδενικό πεδίο βαρύτητας και μεταβολή στη θερμοκρασία τότε επηρεάζεται η παραγωγή τόσο της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k, όσο και του ε.

Για το k

Ο όρος G_b στην εξίσωση μεταφοράς της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k, εκφράζει την παραγωγή τύρβης λόγω των ανωστικών τάσεων και είναι ίσος με:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

όπου το Pr_t είναι ο τυρβώδης αριθμός Prandtl για την ενέργεια και το g_i η επιτάχυνση της βαρύτητας στην iη διεύθυνση. Στο standard k-ε model ο Pr_t είναι ίσος με 0.85, ενώ στο RNG k-ε model είναι ίσος με 1/α.

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής β, ορίζεται ως

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

με αποτέλεσμα το G_b για ιδανικά αέρια να εκφυλίζεται σε

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

Για το ε

Η επίδραση των ανωστικών ροών στην παραγωγή του ε ποσοτικοποιείται με την ύπαρξη του συντελεστή $C_{3\varepsilon}$ στην εξίσωση μεταφοράς του. Ο συντελεστής αυτός δεν ζητείται από το χρήστη του ANSYS FLUENT αντίθετα υπολογίζεται από την σχέση

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right|$$

όπου το v είναι η παράλληλη και το u η κάθετη

συνιστώσα της ταχύτητας ως προς το βαρυτικό πεδίο. Αυτό σημαίνει ότι για φύλλα διάτμησης των οποίων η διεύθυνση της κύριας ροής είναι παράλληλη προς το βαρυτικό πεδίο, η τιμή του συντελεστή είναι ένα ενώ στην αντίθετη περίπτωση ο συντελεστής αυτός μηδενίζεται.

3.2.3 Η επίδραση της συμπιεστότητας στην τύρβη στα μοντέλα $k-\varepsilon$

Για ροές μεγάλων αριθμών Mach, η συμπιεστότητα επηρεάζει την τύρβη μέσα από τη λεγόμενη "dilatation dissipation-φθίνουσα διαστολή", η οποία δε λαμβάνεται υπόψη μόνο για ασυμπίεστες ροές. Παραμέλησή της, σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, οδηγεί σε αδυναμία πρόβλεψης της πειραματικά παρατηρούμενης μείωσης στο ρυθμό εξάπλωσης της συμπιεστής ανάμιξης, για αυξανόμενους αριθμούς Mach. Για να ενσωματωθούν τέτοιες επιδράσεις στα μοντέλα $k-\varepsilon$ του ANSYS FLUENT, ο συντελεστής φθίνουσας διαστολής Y_M περιλαμβάνεται στην εξίσωση του k και ορίζεται, σύμφωνα με την πρόταση του Sarkar, ως $Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2$, όπου M_t είναι ο τυρβώδης αριθμός Mach ο οποίος με τη σειρά του ισούται με $M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$ με $a(\equiv \sqrt{\gamma RT})$ ταχύτητα του ήχου

3.3 Μεταφορά Θερμότητας

Η ροή θερμικής ενέργειας από ύλη που καταλαμβάνει μια συγκεκριμένη περιοχή στο χώρο, σε ύλη που καταλαμβάνει μια διαφορετική περιοχή στο χώρο ονομάζεται μεταφορά θερμότητας και γίνεται με τρεις βασικούς τρόπους: με αγωγή, με συναγωγή και με ακτινοβολία. Η αγωγή αναφέρεται στη μεταφορά θερμότητας που οφείλεται στη μικροσκοπική διάχυση και τις τυχαίες κινήσεις μορίων μέσα σε ένα σώμα. Αν εκτός από τα προαναφερθέντα, μεταφέρεται θερμική ενέργεια και λόγω της μακροσκοπικής κίνησης ρευστού τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της συναγωγής. Αν τέλος, η θερμότητα μεταφέρεται μεταξύ σωμάτων μέσω ηλεκτρομαγνητικών

κυμάτων τότε έχουμε το φαινόμενο της ακτινοβολίας. Παρακάτω θα αναλυθεί το φαινόμενο της συναγωγής.

3.3.1 Μεταφορά Θερμότητας με Συναγωγή

Η γενική εξίσωση της ενέργειας που επιλύεται από το ANSYS FLUENT σε προβλήματα μεταφοράς θερμότητας είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + \overline{(\tau_{eff} \cdot \vec{v})}) + S_h \quad \text{όπου}$$

- το $\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)$ αναφέρεται σε μη μόνιμο φαινόμενο
- τα $\nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p))$ και $k_{eff} \nabla T$ αναφέρονται στην αγωγή θερμότητας
- ο $\sum_j h_j \vec{J}_j$ περιγράφει την διάχυση των ειδών
- το $\overline{(\tau_{eff} \cdot \vec{v})}$ περιγράφει την απαγωγή θερμότητας λόγω τύρβης
- ο S_h είναι πηγή ή καταβόθρα ενθαλπίας
- το k_{eff} είναι η ενεργή αγωγιμότητα ($k+k_t$ όπου k_t είναι η αγωγιμότητα λόγω τύρβης και εξαρτάται από τα μοντέλα τύρβης που μελετήθηκαν παραπάνω)
- το J_j είναι η ροή διάχυσης του είδους j
- το $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$ όπου η ενθαλπία $h = \sum_j Y_j h_j$ για ιδανικά αέρια και $h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho}$ για ασυμπίεστες ροές όπου το Y_j είναι το κλάσμα μάζας του είδους j και το $h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dt$ όπου $T_{ref} = 298.15K$

Όταν η ροή ρευστού προκύπτει όχι από κάποιο εξωτερικό αίτιο αλλά από θερμοκρασιακές διαφορές μέσα στο ίδιο το ρευστό, οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν σε διαφορές στην πυκνότητα και άρα σε εμφάνιση ανωστικών ροών, δηλαδή μακροσκοπικής κίνησης ρευστού, τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της ελεύθερης συναγωγής.

Στην καθαρή ελεύθερη συναγωγή η βαρύτητα της συμβολής των ανωστικών δυνάμεων στην εξέλιξη του φαινομένου μετρείται από τον αριθμό Rayleigh

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3\rho}{\mu\alpha} \quad \text{όπου} \quad \beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p \quad \text{ο συντελεστής θερμικής διαστολής και}$$

$$a = \frac{k}{\rho c_p} \quad \text{η θερμική διάχυση}$$

Για αριθμούς $Ra < 10^8$ παρατηρείται στρωτή ροή ενώ η μεταβατική κατάσταση προς την τυρβώδη εμφανίζεται για $10^8 < Ra < 10^{10}$

Ειδικότερα για την περίπτωση της τυρβώδους ροής σε μοντέλα k-ε η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή περιγράφεται από την «μοντελοποιημένη» ενεργειακή εξίσωση

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i(\tau_{ij})_{eff}\right) + S_h$$

όπου E είναι η ολική ενέργεια, k_{eff} η ενεργή θερμική αγωγιμότητα και $(\tau_{ij})_{eff}$ ο διαφορικός τανυστής τάσεων. Πιο συγκεκριμένα:

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

για το standard k-ε model

$$k_{eff} = k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad \text{όπου} \quad Pr_t = 0.85$$

για το RNG k-ε model

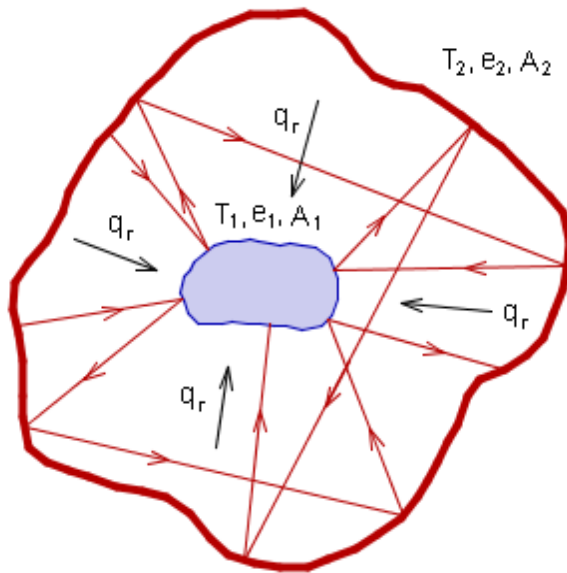
$k_{eff} = \alpha c_p \mu_{eff}$ όπου το α υπολογίζεται όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω αλλά για $\alpha_0 = 1/Pr = k/\mu c_p$

3.3.2 Μεταφορά θερμότητας με Ακτινοβολία

3.3.2.1 Εισαγωγή-Φύση της Ακτινοβολίας

Γενικά

Είναι γνωστό ότι όλα τα σώματα με θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Έστω σώμα θερμοκρασίας $T_1 > 0K$, το οποίο περιβάλλεται από σημαντικά μεγαλύτερο σώμα θερμοκρασίας $T_2 > T_1$. Θεωρούμε ότι ο χώρος ανάμεσα



Εικόνα 3. 2 - Μεταφορά Θερμότητας με ακτινοβολία

στα δύο σώματα είναι το κενό έτσι ώστε η μεταφορά θερμότητας με αγωγή ή συναγωγή να αποκλείεται. Παρατηρείται ψύξη του θερμότερου σώματος, που σημαίνει ότι υπάρχει μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο, το φαινόμενο δε ονομάζεται μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία. Είναι χρήσιμο να υπογραμμιστεί ότι και τα δύο σώματα εκπέμπουν ενέργεια, απλώς το θερμότερο εκπέμπει μεγαλύτερο ποσό από αυτό που δέχεται, και έτσι προκύπτει η ψύξη του.

Άλλο παράδειγμα θερμικής ακτινοβολίας είναι η μετάδοση θερμότητας από τον

ήλιο στη γη. Για να γίνει η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, δε χρειάζεται να παρεμβαίνει κάποιο υλικό μέσο μεταξύ των δύο σωμάτων, δηλαδή του πομπού (ήλιου) και του δέκτη (γη), όπως συμβαίνει με την αγωγή και τη συναγωγή. Η διάδοση θερμότητας με ακτινοβολία βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλο εύρος περιπτώσεων, όπως στη σωστή λειτουργία των θερμοκοιτίδων, στα δοχεία thermos κ.α. Αν και έχουν διατυπωθεί διάφορες θεωρίες για την ερμηνεία του φαινομένου, ο πραγματικός μηχανισμός μετάδοσης της ακτινοβολίας δεν έχει πλήρως κατανοηθεί. Για την ερμηνεία των φαινομένων της ακτινοβολίας έχουν αναπτυχθεί δύο βασικές θεωρίες

- Η Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία Maxwell, σύμφωνα με την οποία η μετάδοση της ενέργειας γίνεται υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.
- Η Θεωρία Max Planck, η οποία υιοθετεί την ύπαρξη φωτονίων ή κβάντα με τη βοήθεια των οποίων γίνεται η μετάδοση της θερμότητας.

Και οι δύο θεωρίες έχουν χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της εκπομπής και της διάδοσης της ακτινοβολίας. Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell χρησιμοποιείται κυρίως για τη μελέτη των ιδιοτήτων των φαινομένων της ακτινοβολίας των υλικών σωμάτων ενώ με τη θεωρία του Planck μπορεί να υπολογισθεί το μέγεθος της ακτινοβολουμένης ενέργειας ενός σώματος.

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

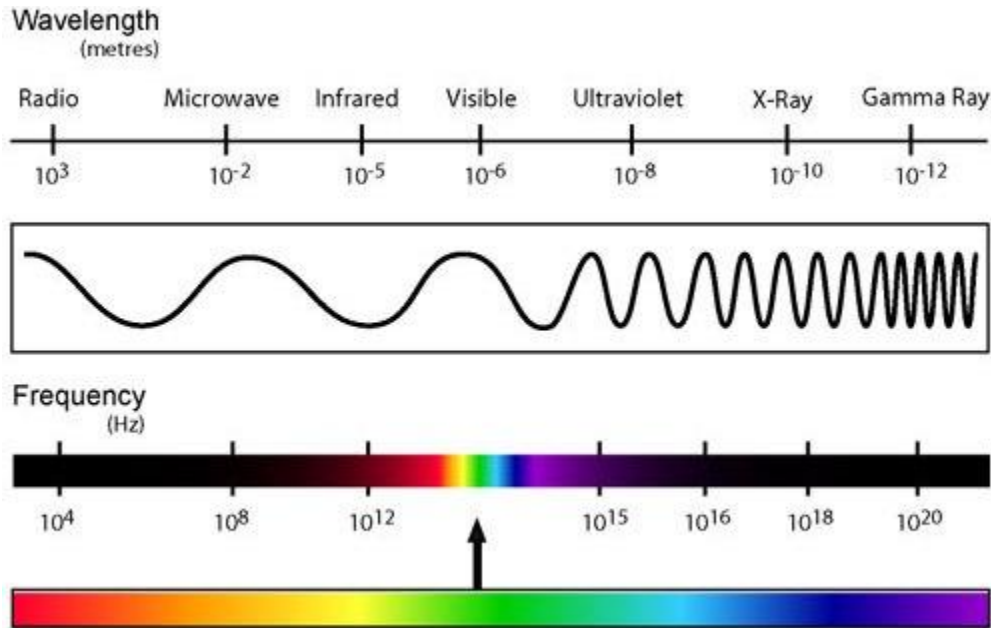
Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι το σύνολο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με μήκος κύματος λ από 0 έως ∞ m. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε ένα αριθμό περιοχών που ονομάζονται ζώνες (bands) και περιλαμβάνουν ένα εύρος μήκων κύματος και διακρίνονται κυρίως από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και ανίχνευση της ακτινοβολίας στην οποία αναφέρονται. Δεν υπάρχει θεμελιώδης διαφορά στην ακτινοβολία των διάφορων ζωνών του φάσματος. Οι μεταξύ τους διαφορές οφείλονται στο μήκος κύματος και κατ' επέκταση με την επίδραση τους στην ύλη. Τα πιο γνωστά είδη ακτινοβολίας είναι τα εξής:

- Ορατή ακτινοβολία με μήκος κύματος 0.4-0.7 μm . Πρακτικά αυτά τα μήκη κύματος αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι.
- Ακτινοβολία X (X-Rays) με μήκος κύματος $10^{-4}\sim 10^{-2}$ μm .
- Υπεριώδης ακτινοβολία (Ultra-Violet) με μήκος κύματος 0.01~1 μm .
- Υπέρυθρη ακτινοβολία (Infra-Red) με μήκος κύματος 1~1000 μm . Η ζώνη της υπέρυθρης ακτινοβολίας διακρίνεται σε τρεις επιμέρους περιοχές:
 - Κοντινό υπέρυθρο με μήκος κύματος 0.75~1.5 μm .
 - Μέσο υπέρυθρο με μήκος κύματος 1.5~7 μm .
 - Μακρινό υπέρυθρο με μήκος κύματος 7~1000 μm .

Το μήκος κύματος της θερμικής ακτινοβολίας, λ , και η συχνότητα διάδοσής της, ν , συνδέονται με τη σχέση: $\lambda = \frac{c}{\nu}$ όπου c η ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας στο μέσο, η οποία αν θεωρηθεί ότι δεν παρεμβάλλεται κάποιο υλικό μέσο ισούται με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό $c_0 = 2.9979 \cdot 10^8$ m/s.

Θεωρούμε ότι κάθε σώμα με $T > 0\text{K}$ μπορεί να εκπέμπει ακτινοβολία με μήκος κύματος από $\lambda = 0$ έως $\lambda = \infty$. Το μήκος κύματος εξαρτάται από τη φύση του σώματος που το εκπέμπει, τη θερμοκρασία του κ.α.

Η περιοχή του φάσματος με μήκη κύματος από $\lambda = 0.1 - 100$ μm αντιστοιχεί στην περιοχή που εκπέμπεται η **θερμική ακτινοβολία**.



Εικόνα 3.3 - Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Διάκριση σωμάτων

Ένα σώμα, γενικά, εκπέμπει και δέχεται θερμική ακτινοβολία. Ανάλογα με τον τρόπο που εκπέμπει ακτινοβολία, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις

Ημιδιαπερατό (Semi-transparent) : Το σώμα από το οποίο η συνολικά εκπεμπόμενη ενέργεια προέρχεται από όλη τη μάζα του. Στην περίπτωση αυτή το φαινόμενο είναι ογκομετρικό φαινόμενο. Παραδείγματα ημιδιαπερατών σωμάτων είναι το γυαλί σε υψηλές θερμοκρασίες, τα αέρια, οι ατμοί κ.α.

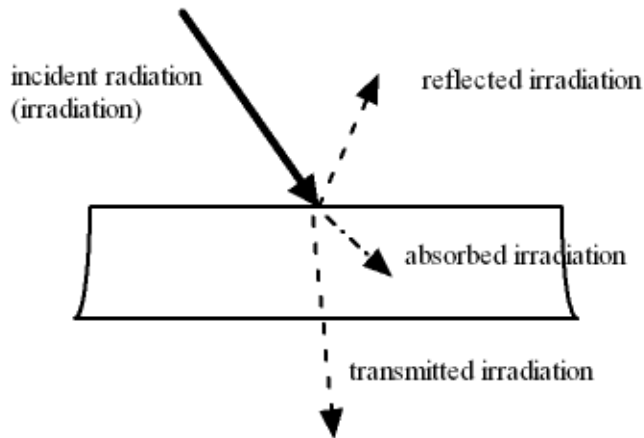
Αδιαφανές (Opaque) : Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το εσωτερικό του χάνεται χωρίς να μπορέσει να φτάσει στην επιφάνειά του. Άρα η ακτινοβολία εκπέμπεται μόνο από την επιφάνεια του σώματος και το φαινόμενο είναι επιφανειακό. Αδιαφανή είναι διάφορα στερεά σώματα, τα μέταλλα, το ξύλο κ.α.

Είναι δυνατόν ένα σώμα να συμπεριφέρεται ως ημιδιαπερατό για ορισμένες θερμοκρασίες και για άλλες ως αδιαφανές. Τυπικό παράδειγμα είναι το γυαλί το οποίο για υψηλές θερμοκρασίες είναι ημιδιαπερατό, ενώ γίνεται αδιαφανές σε μέτριες ή χαμηλές θερμοκρασίες.

Ανάλογα με τον τρόπο που ένα σώμα δέχεται ακτινοβολία διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

Πραγματικό σώμα

Είναι το σώμα το οποίο όταν δέχεται ακτινοβολία, κατ' ένα ποσοστό της την απορροφά, ένα ποσοστό της το ανακλά και ένα ποσοστό διέρχεται διαμέσου του και διαφεύγει.



Εικόνα 3.4 – Πραγματικό Σώμα

Οι ιδιότητες ανάκλασης, απορρόφησης και διάβασης ακτινοβολίας σώματος περιγράφονται από τους αντίστοιχους συντελεστές που είναι

- **Συντελεστής απορρόφησης α :** ορίζεται ως το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από το σώμα και δίδεται από τη σχέση

$$\alpha = \frac{I_{\alpha\pi}}{I_0} \quad \text{όπου } I_{\alpha\pi} = \text{Ισχύς απορροφούμενης ακτινοβολίας}$$

$$I_0 = \text{Ισχύς προσπίπτουσας ακτινοβολίας}$$

Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται από:

- το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας
- την κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας
- τη φύση της απορροφούσας επιφάνειας
- τη $T_{\text{σώματος}}$ που εκπέμπει και όχι τη $T_{\text{σώματος}}$ που απορροφά

- **Συντελεστής ανάκλασης ρ :** ορίζεται ως το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που ανακλάται στην επιφάνεια του σώματος και δίδεται από τη σχέση

$$\rho = \frac{I_{\alpha\nu}}{I_0} \quad \text{όπου } I_{\alpha\nu} = \text{Ισχύς ανακλώμενης ακτινοβολίας}$$

$$I_0 = \text{Ισχύς προσπίπτουσας ακτινοβολίας}$$

Η ανάκλαση εξαρτάται από:

- Διεύθυνση πρόσπτωσης ακτινοβολίας στο σώμα
- Διεύθυνση ανάκλασης ακτινοβολίας από το σώμα

Η ανάκλαση χωρίζεται σε δύο είδη, στην κατοπτρική και την διάχυτη.

- Διάχυτη ανάκλαση (scatter): έχουμε όταν η ένταση της ακτινοβολίας που ανακλάται είναι ανεξάρτητη από τη γωνία ανακλάσεως, δηλαδή παρουσιάζεται ομοιόμορφη ανάκλαση προς όλες τις κατευθύνσεις
- Κατοπτρική ανάκλαση πέφτει υπό γωνία θ και ανακλάται υπό γωνία θ

Σε πραγματικό σώμα η ανάκλαση είναι συνδυασμός των δύο παραπάνω.

- **Συντελεστής διάβασης τ :** ορίζεται ως το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που διέρχεται δια μέσω της επιφάνειας του σώματος και δίδεται από τη σχέση

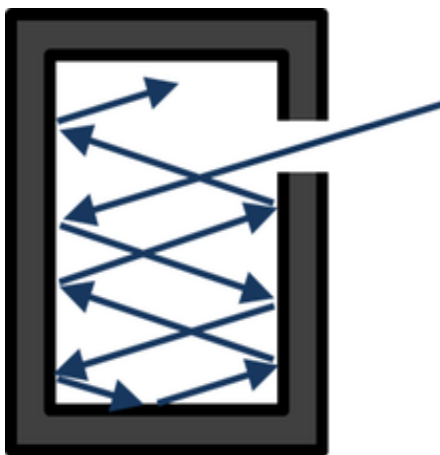
$$\tau = \frac{I_{\tau}}{I_0} \quad \text{όπου } I_{\text{αν}} = \text{Ισχύς διερχόμενης ακτινοβολίας}$$

$I_0 =$ Ισχύς προσπίπτουσας ακτινοβολίας

Ο συντελεστής αυτός σχετίζεται με την οπτική πυκνότητα του σώματος ή του μέσου. Όσο πιο «πυκνό» είναι αυτό, τόσο λιγότερο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας διέρχεται διαμέσου του.

Ένα πραγματικό σώμα δεν εκπέμπει διάχυτα και ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις του χώρου.

Μέλαν σώμα (Black Body)



Εικόνα 3. 5 – Μέλαν Σώμα

Ένα σώμα στο οποίο παρατηρείται απορρόφηση του συνόλου της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας που δέχεται και το οποίο δεν επιτρέπει την ανάκλαση ή διέλευση δια μέσου του, μέρους αυτής, ονομάζεται μέλαν σώμα. Ως μοντέλο μελανού σώματος θεωρείται ένας κλειστός χώρος με οπή στην οποία αν εισέλθει ακτινοβολία, παγιδεύεται, ανακλάται και δε μπορεί να διαφύγει. Το μέλαν σώμα είναι μια εξιδανικευμένη περίπτωση και χρησιμεύει για συγκρίσεις εκπομπής και απορρόφησης ακτινοβολίας με πραγματικά σώματα.

Το μέλαν σώμα εκπέμπει ομοιόμορφα προς

όλες τις κατευθύνσεις του χώρου και εξ' ορισμού ισχύει ότι οι συντελεστές ανάκλασης και διάβασης μηδενίζονται ενώ ο συντελεστής απορρόφησης παίρνει την τιμή 1.

Φαίο σώμα (Gray Body)

Το φαίο σώμα είναι αυτό για το οποίο οι συντελεστές απορρόφησης, ανάκλασης και διάβασης είναι σταθεροί για όλα τα μήκη κύματος και ανεξάρτητοι κατεύθυνσης και θερμοκρασίας. Το φαίο σώμα δηλαδή, απορροφά σταθερό ποσοστό προσπίπτουσας ακτινοβολίας από οποιαδήποτε κατεύθυνση και για οποιοδήποτε μήκος κύματος και εκπέμπει σταθερό ποσοστό της ακτινοβολίας μέλανος σώματος (προς όλες τις κατευθύνσεις και για όλα τα μήκη κύματος). Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι το φαίο σώμα λειτουργεί ως τροποποιημένο μέλαν σώμα, με την έννοια ότι συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο αλλά εκπέμπει και απορροφά σε μικρότερο ποσοστό από το μέλαν ή ότι αποτελεί μια υπεραπλουστευμένη εκδοχή του πραγματικού σώματος που χρησιμοποιείται σε προσομοιώσεις λόγω του μικρού υπολογιστικού του κόστους

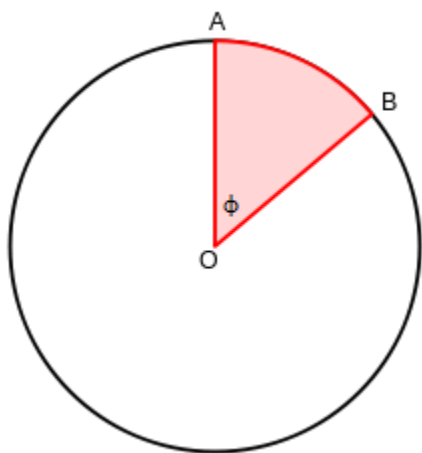
Κατοπτρικό σώμα

Είναι το αντίθετο του μελανού σώματος. Δε μπορεί να απορροφήσει καθόλου την προσπίπτουσα ακτινοβολία την οποία ανακλά εξ' ολοκλήρου.

Εδώ κρίνεται σκόπιμο να διευκρινιστούν κάποιες έννοιες ακόμα που σχετίζονται με την ακτινοβολία

Στερεά γωνία

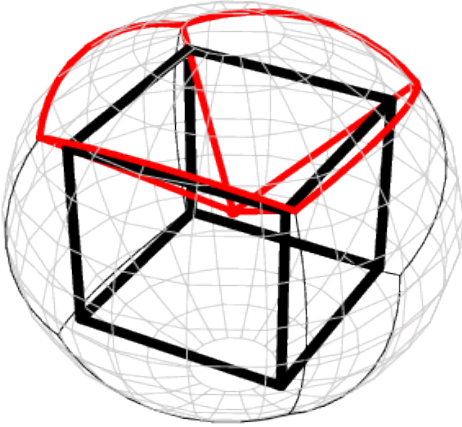
Η στερεά γωνία αποτελεί γεωμετρικό ανάλογο της επίπεδης γωνίας στις τρεις διαστάσεις. Για να γίνει πλήρως κατανοητή θα



εξεταστεί πρώτα το παράδειγμα της επίπεδης γωνίας. Έστω γωνία φ του σχήματος και κύκλος με κέντρο την κορυφή της γωνίας και τυχαία ακτίνα r . Οι πλευρές της γωνίας τέμνονται με τον κύκλο στα σημεία A, B με αποτέλεσμα η γωνία $\varphi = \hat{A}OB$ να περικλείει τόξο AB το οποίο έχει συγκεκριμένο μήκος. Μετρημένη σε ακτίνια η γωνία θα είναι ίση με το μήκος τόξου προς την ακτίνα ή $\varphi = \frac{AB}{r}$. Στις τρεις διαστάσεις και στην

Εικόνα 3. 6 - Επίπεδη Γωνία

περίπτωση της σφαίρας με τον ίδιο τρόπο που ακολουθήθηκε παραπάνω, εξάγεται αυτή τη φορά επιφάνεια σφαίρας E και όχι τόξο κύκλου. Η στερεά



Εικόνα 3. 7 – Στερεά Γωνία

γωνία Ω που αντιστοιχεί σε αυτή την επιφάνεια, μετρημένη σε στερεακτίνια, θα είναι $\Omega = \frac{E}{r^2}$

Γενικά, και σε συνάρτηση με την ακτινοβολία, αν δίνεται ένα σημειακό κέντρο εκπομπής και μια επιφάνεια σε απόσταση από αυτό, μπορούμε να προβάλουμε την επιφάνεια αυτή σε σφαίρα τυχαίας ακτίνας που θα την περικλείει, και να υπολογίσουμε τη στερεά γωνία διαιρώντας την προκύπτουσα επιφάνεια της σφαίρας με το τετράγωνο της ακτίνας της σφαίρας.

Η όλη διαδικασία φαίνεται οπτικοποιημένη στο διπλανό σχήμα και ο

γενικός τύπος είναι $\Omega \equiv \iint_S \frac{\hat{n} \cdot da}{r^2}$

Πρακτικά η στερεά γωνία έχει να κάνει με το πόσο μικρό ή μεγάλο φαίνεται ένα αντικείμενο, δηλαδή τι μέρος του οπτικού πεδίου καλύπτει.

Γωνιακή διακριτοποίηση (angular discretization)

Παρατηρείται ότι η εκπομπή θερμότητας με ακτινοβολία γίνεται σε πολλές κατευθύνσεις. Υπολογιστικά πακέτα όπως το ANSYS FLUENT επιτρέπουν να οριστεί ο αριθμός των κατευθύνσεων επιλέγοντας διακριτοποίηση γωνιών θ (ζενίθ) και φ (αζιμούθιο). Αυτή η διαδικασία ονομάζεται γωνιακή διακριτοποίηση

3.3.2.2 Το μοντέλο ακτινοβολίας DO (Discrete Ordinates)

Ολοκληρωδιαφορική Εξίσωση Μεταφοράς με Ακτινοβολία

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I(\vec{r}, \hat{s})}{\partial t_r} + \frac{\partial I(\vec{r}, \hat{s})}{\partial s} = -(\kappa_a + \sigma_s) I(\vec{r}, \hat{s}) + \kappa_a I_b(\vec{r}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I'(\vec{r}, \hat{s}') \Phi(\hat{s}, \hat{s}') d\omega$$

όπου

- $I_b(\vec{r}) = \frac{\sigma T^4}{\pi}$, ακτινοβολούμενη ισχύς μελανού σώματος
- κ_a , συντελεστής απορρόφησης
- σ_s , συντελεστής σκέδασης
- σ , σταθερά Stefan-Boltzmann

Το μοντέλο Διακριτών Συντεταγμένων (Discrete Ordinates) DO, επιλύει την εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας (radiative transfer

equation) για ένα πεπερασμένο αριθμό στερεών γωνιών, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε ένα ξεχωριστό διάνυσμα θέσης \vec{s} , το οποίο είναι σαφώς ορισμένο στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων για τρεις διαστάσεις (x, y, z) . Η λεπτότητα της γωνιακής διακριτοποίησης (το πλήθος των γωνιών ϕ και θ) ελέγχεται από τον χρήστη.

Το ANSYS FLUENT μελετά την εξίσωση μεταφοράς ακτινοβολίας, αναλύοντας το εκάστοτε διάνυσμα θέσης \vec{s} στις συνιστώσες του ως προς τους άξονες x, y, z και εν συνεχεία την επιλύει τόσες φορές όσα είναι το πλήθος των διανυσμάτων θέσης \vec{s} .

Δύο υλοποιήσεις του μοντέλου είναι διαθέσιμες, η συζευγμένη (με την ενέργεια) και η μη-συζευγμένη. Η μη-συζευγμένη υλοποίηση είναι σειριακή στη φύση της και χρησιμοποιεί ένα παραπλήσιο του DO, μοντέλο που ονομάζεται μοντέλο πεπερασμένου όγκου. Στη συζευγμένη υλοποίηση οι εξισώσεις επιλύονται ταυτόχρονα για κάθε κελί ξεχωριστά, υποθέτοντας ότι οι χωρικοί «γείτονες» είναι γνωστοί. Η τελευταία μέθοδος επιταχύνει τη σύγκλιση σημαντικά σε σύγκριση με τη μη-συζευγμένη όταν η οπτική πυκνότητα του μέσου που συμμετέχει είναι μεγάλη, αντίθετα δεν εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα για περιπτώσεις χαμηλής οπτικής πυκνότητας.

Κεφάλαιο 4^ο

Αξιολόγηση Μεθοδολογίας

Η υπολογιστική προσομοίωση που αναλύεται στην παρούσα μελέτη αφορά, όπως είπαμε, την περίπτωση της εκδήλωσης πυρκαγιάς μέσα σε αεριζόμενη σήραγγα. Βασικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα, των οποίων το θεωρητικό υπόβαθρο αναλύθηκε παραπάνω, είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Συνεπώς, πριν προχωρήσουμε στην κατάστρωση της κύριας προσομοίωσης κρίνεται αναγκαίο να αξιολογηθεί ως προς την ακρίβεια και την αξιοπιστία της η βασική μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για προβλήματα μεταφοράς θερμότητας. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί καταστρώνονται προσομοιώσεις σύμφωνα με τις μελέτες των:

- Ravnik κα. (2008) που εξετάζει περίπτωση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή σε κύβο.
- Colomer κα. (2004) που εξετάζει περίπτωση μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία σε κύβο.

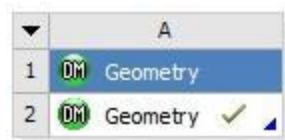
Εν συνεχεία συγκρίνονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου FLUENT με αυτά των παραπάνω μελετών.

4.1 Μελέτη περίπτωσης μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή σε κύβο

Η μελέτη των Ravnik κα. αφορά την μεταφορά θερμότητας με συναγωγή που προκύπτει από τη διαφορά θερμοκρασίας στα τοιχώματα μιας κλειστής γεωμετρίας. Συγκεκριμένα οι γεωμετρίες που αξιολογούνται είναι κύβος και παραλληλεπίπεδο υπό κλίση πρώτα 0 και έπειτα 60 μοιρών, δηλαδή έχουμε τέσσερις διακριτές γεωμετρίες, ενώ η μελέτη γίνεται για τρεις αριθμούς Rayleigh (10^3 , 10^4 , 10^5) σε κάθε γεωμετρία. Συνεπώς, μελετούνται συνολικά δώδεκα περιπτώσεις.

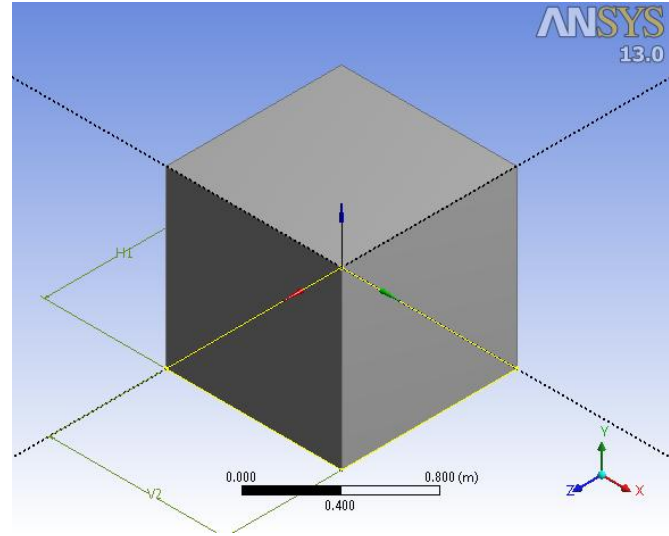
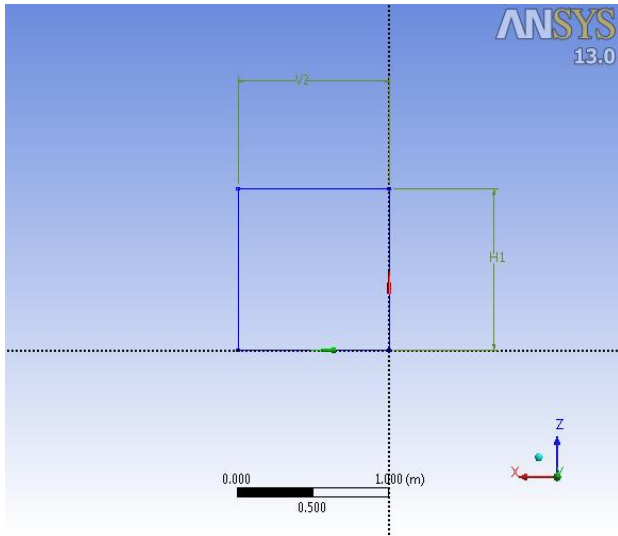
Στην παρούσα εργασία η προσομοίωση έγινε σε κύβο διαστάσεων 1X 1X1 για τους τρεις διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh (Ra) που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Διαμόρφωση Γεωμετρίας



Αρχικά, διαμορφώνεται η γεωμετρία μελέτης, χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο εργαλείο του ANSYS Workbench, το DesignModeler.

Κατασκευάζεται ένα τετράγωνο διαστάσεων 1x1 σε όποιο επίπεδο επιθυμούμε και έπειτα χρησιμοποιώντας την εντολή «extrude» ολοκληρώνεται η επιφάνεια στον εναπομένοντα άξονα με όρια που θέτουμε εμείς ώστε να προκύψει η γεωμετρία του κύβου που μας ενδιαφέρει.



Εικόνα 4. 1 – Διαμόρφωση Γεωμετρίας στο Fluent

Διαμόρφωση Πλέγματος

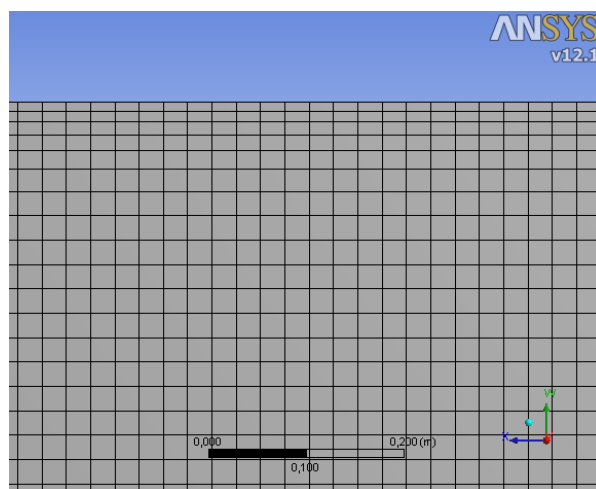
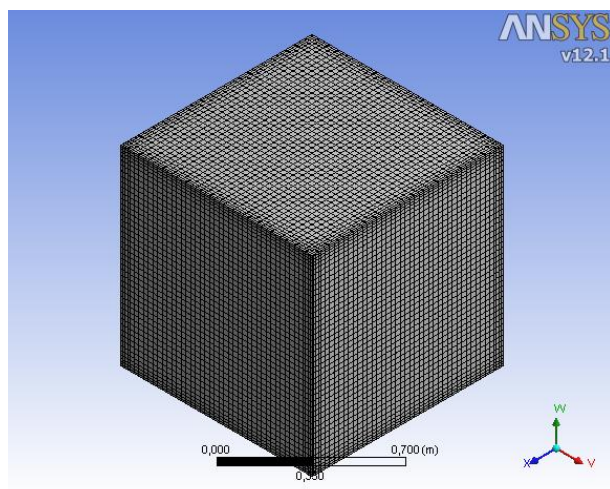


- Επιλέγουμε Μέθοδο Πλεγματοποίησης MultiZone
- Εισάγουμε Μέγεθος Στοιχειώδους Όγκου (Element Size) με την επιλογή «Body Sizing»
- Εισάγουμε Inflation. Για να είναι ακριβής ο υπολογισμός το πλέγμα θα πρέπει να πυκνώσει στην περιοχή πάνω από τα αδιαβατικά τοιχώματα της κλειστής κοιλότητας, μιας και αυτά διέπονται από συνθήκες μη εισχώρησης, δηλαδή εμφανίζουν οριακό στρώμα. Αυτό ακριβώς επιτυγχάνεται με τη λειτουργία του Inflation. Επιλέγουμε η απόσταση του πρώτου κόμβου από το τοίχωμα να είναι υποδεκαπλάσια από την κανονική όπως αυτή ορίστηκε στο Element Size.

Details of "Body Sizing" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	2,5e-002 m
Behavior	Soft
Curvature Normal Angle	Default
Growth Rate	Default

Details of "Inflation" - Inflation	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Boundary	6 Faces
Inflation Option	First Layer Thickness
First Layer Height	2,5e-003 m
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2

Εικόνα 4. 2 – Καρτέλες Επιλογών για το Element Size και το Inflation στο Fluent



Εικόνα 4. 3 – Γενική Μορφή και Λεπτομέρεια Πλέγματος

- Με αυτό τον τρόπο υλοποιούνται τέσσερα πλέγματα:
 - ο Πλέγμα A, που έχει Element Size ίσο με 0.01m και First Layer Height ίσο με 0.001m

Statistics	
Nodes	8087
Elements	7448
Mesh Metric	Element Quality
Min	0,183562783716947
Max	0,999999999960239
Average	0,465248162337011
Standard Deviation	0,271625362735476

Εικόνα 4. 4 – Ποιότητα Πλέγματος για το Πλέγμα Α

- ο Πλέγμα Β, που έχει Element Size ίσο με 0.05m και First Layer Height ίσο με 0.005m

Statistics	
Nodes	32584
Elements	30625
Mesh Metric	Element Quality
Min	0,163967524358942
Max	0,999999999960241
Average	0,538662866346188

Εικόνα 4. 5 - Ποιότητα Πλέγματος για το Πλέγμα Β

- ο Πλέγμα Γ, που έχει Element Size ίσο με 0.025m και First Layer Height ίσο με 0.0025m

Statistics	
Nodes	145944
Elements	139725
Mesh Metric	Element Quality
Min	0,15439465150373
Max	0,999999999960243
Average	0,647009397837835
Standard Deviation	0,343632398717889

Εικόνα 4. 6 - Ποιότητα Πλέγματος για το Πλέγμα Γ

- ο Πλέγμα Δ, που έχει Element Size ίσο με 0.0125m και First Layer Height ίσο με 0.00125m

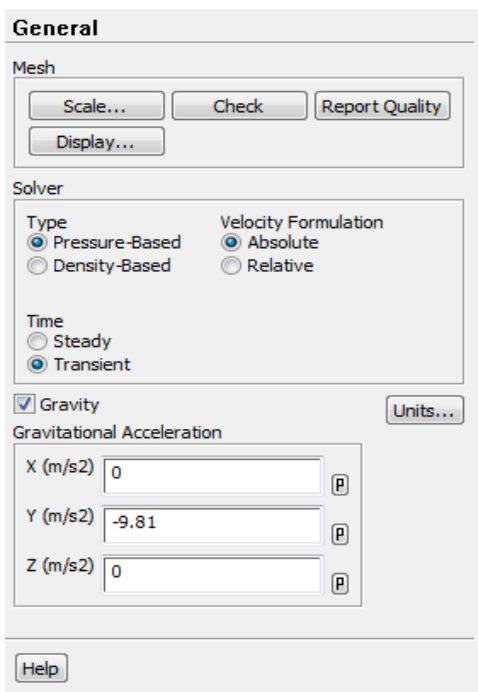
Statistics	
Nodes	809464
Elements	787525
Mesh Metric	Element Quality
Min	0,151434374410269
Max	0,999999999960257
Average	0,768719787104692
Standard Deviation	0,322934050102745

Εικόνα 4. 7 - Ποιότητα Πλέγματος για το Πλέγμα Δ

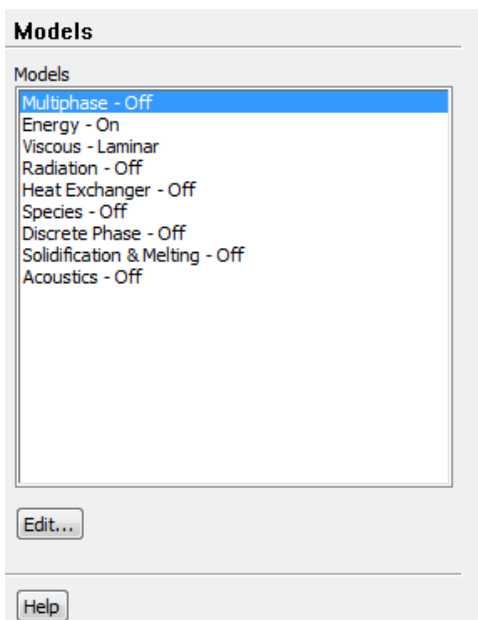
Διαμόρφωση Υπολογιστικού Μοντέλου στο Fluent

Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή της κατάστρωσης του προβλήματος με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου FLUENT.

Ανοίγοντας το παράθυρο του Fluent εμφανίζεται μια στήλη από επιλογές, με τις οποίες συγκεκριμενοποιούμε τα μοντέλα που χρησιμοποιούμε, τις οριακές συνθήκες και τις ιδιότητες των υλικών μας.



- Στην επιλογή «General» του Problem Setup εισάγουμε την επιτάχυνση της βαρύτητας, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ στον άξονα Y όπως είναι σχεδιασμένος ο κύβος βάζοντας αρνητικό πρόσημο, λόγω αντίθετης κατεύθυνσης. Η ενεργοποίηση της βαρύτητας είναι απαραίτητη σε ροές με μεγάλες μεταβολές στην πυκνότητά λόγω θερμοκρασίας, που προκαλούν ανωστική ροή (buoyant flow). Τα υπόλοιπα μένουν ως έχουν μιας και έχουμε να κάνουμε με μελέτη μόνιμης κατάστασης.



- Στη συνέχεια, πατώντας στην επιλογή «Models» ενεργοποιούμε την εξίσωση ενέργειας και επιλέγουμε μοντέλο στρωτής ροής (laminar), μιας και ο αριθμός Rayleigh που είναι κριτήριο για τον χαρακτηρισμό της ροής δεν υπερβαίνει σε καμία από τις τρεις

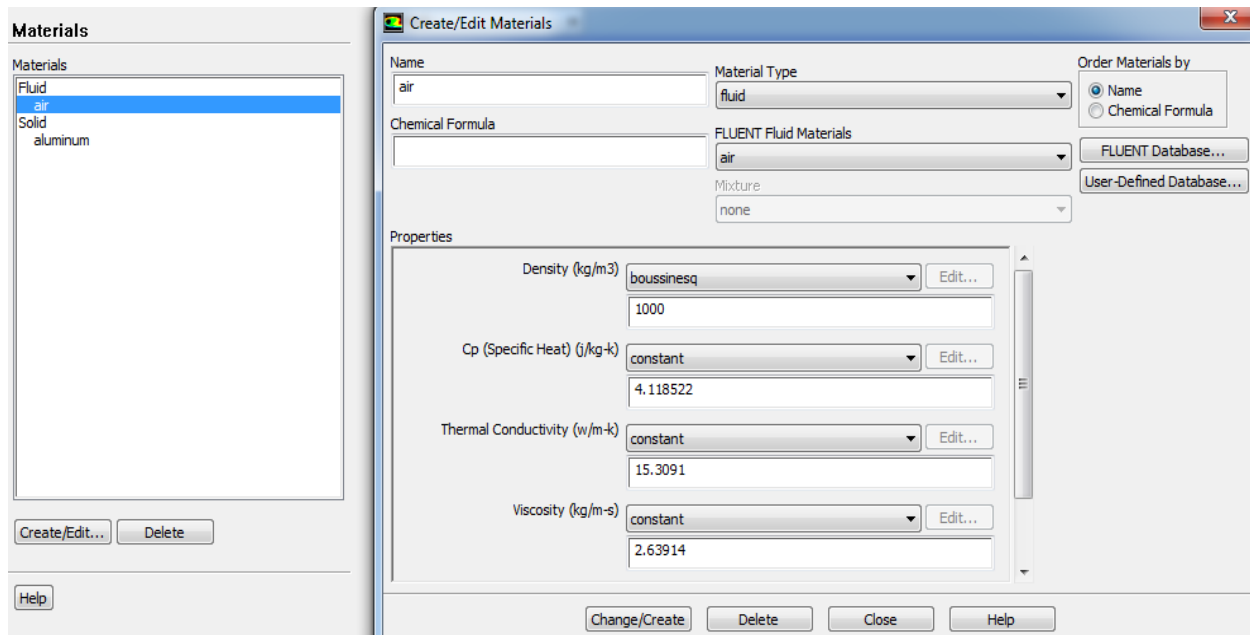
περιπτώσεις που εξετάζονται τιμές ώστε να παρατηρηθούν φαινόμενα τύρβης.

- Η επιλογή «Materials» μας επιτρέπει να δώσουμε τιμές στις ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου. Η μελέτη των Ravnik κα. δίνει τιμές για τους αδιάστατους αριθμούς Prandtl και Rayleigh. Συγκεκριμένα

$$Pr = \frac{v \cdot c_p}{k} = \frac{v_0}{x_0} = 0.71$$

$$Ra = \frac{g_0 \beta_t \Delta T}{v_0 x_0} = 10^3, 10^4, 10^5$$

Η επιτάχυνση της βαρύτητας θεωρείται ίση με 9.81 m/s²



Εικόνα 4. 9 – Ορισμός Επιμέρους Παραμέτρων στο Fluent

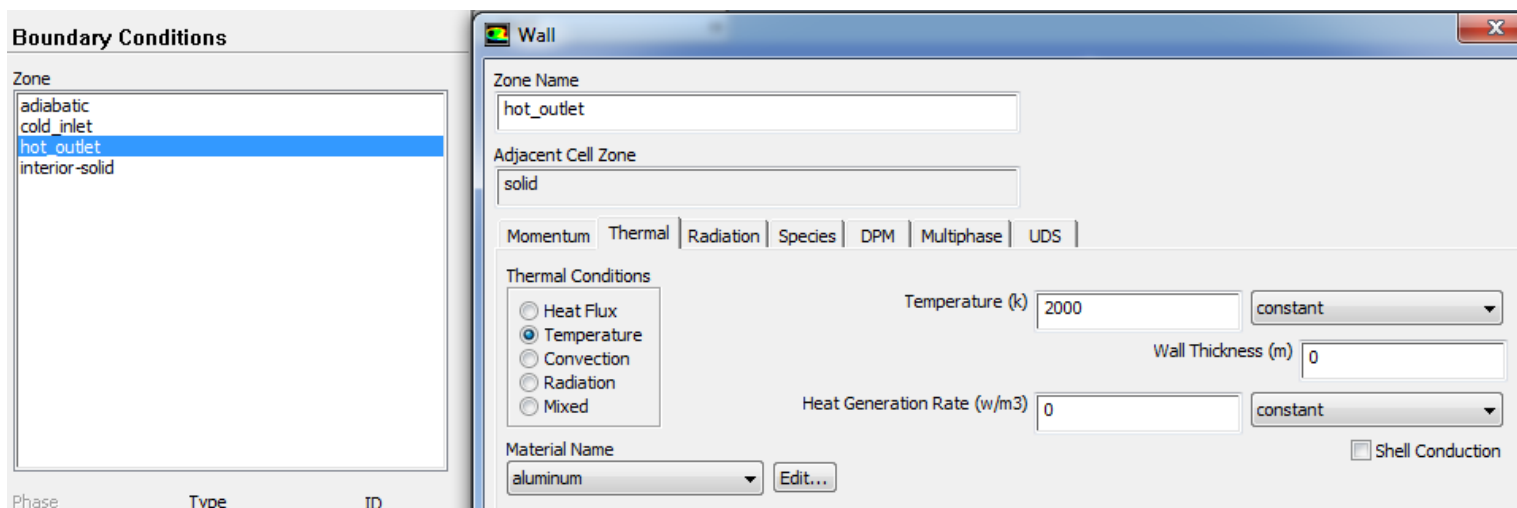
Για την πυκνότητα επιλέγουμε μοντέλο Boussinesq, ενώ παράλληλα για την πυκνότητα, την θερμική αγωγιμότητα και τον συντελεστή θερμικής διαστολής εκλέγουμε μόνοι μας τιμές που είναι σε λογικά πλαίσια και τα υπόλοιπα μεγέθη παίρνουν τιμές τέτοιες ώστε να ικανοποιούνται οι αριθμοί Prandtl και Rayleigh. Έτσι στην παρούσα μελέτη εκλέγουμε τις εξής τιμές:

k (thermal conductivity)=15.309 W/m.K

β_t (thermal expansion coefficient)=0.00001

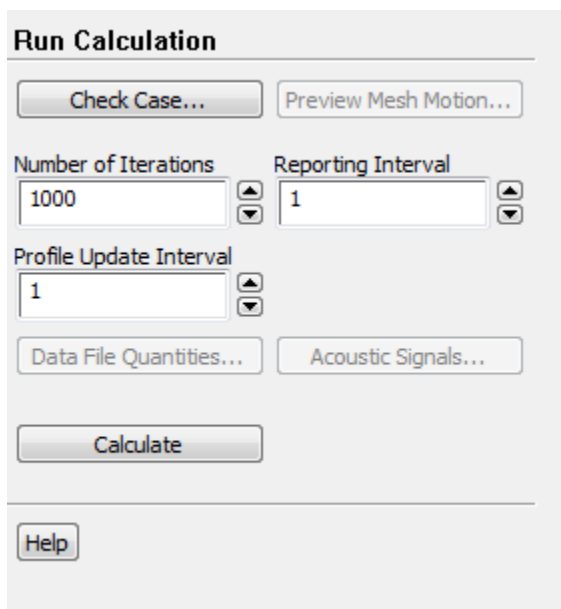
ρ_0 =1000kg/m³

- Στο επόμενο βήμα θα ορίσουμε τις οριακές συνθήκες (Boundary Conditions) του προβλήματος, δηλαδή θα ορίσουμε τις θερμοκρασίες στο θερμό και στο ψυχρό τοίχωμα. Επιλέγουμε $T_{hot}=2000K$ και $T_{cold}=1000K$. Οι υπόλοιπες πλευρές του κύβου θεωρούνται αδιαβατικά τοιχώματα.



Εικόνα 4. 10 – Ορισμός Θερμοκρασίας στα Τοιχώματα

- Ορίζουμε αριθμό επαναλήψεων στο «Run Calculation» και τρέχουμε την προσομοίωση.



Εικόνα 4. 11 – Καθορισμός Αριθμού Επαναλήψεων

Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στο πρώτο κομμάτι της ανάλυσης αυτής θα αναζητηθεί η ανεξαρτησία πλέγματος για την περίπτωση όπου $Ra=10^4$.

Σημειώνεται ότι τα δεδομένα της θερμοκρασίας εξάχθηκαν πάνω σε μία ευθεία γραμμή που ξεκινούσε από το μέσον του θερμού τοιχώματος και κατέληγε στο μέσον του ψυχρού τοιχώματος. Έπειτα αδιαστατοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τον εξής τύπο

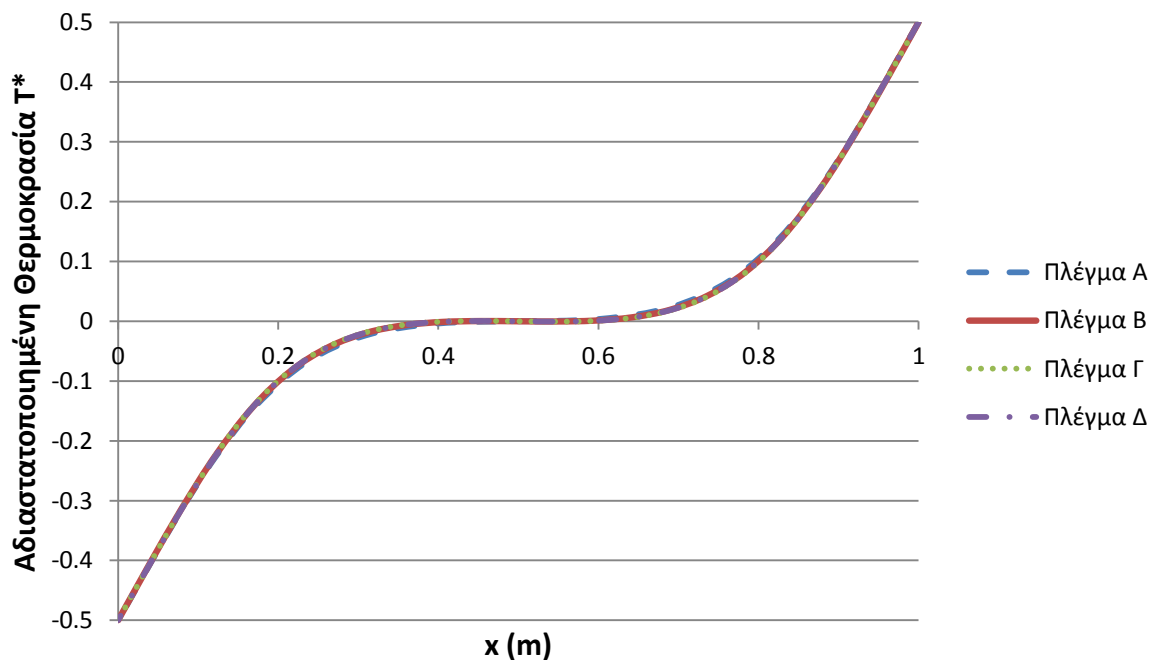
$$T_{ad} = \frac{T - \left(\frac{T_{hot} + T_{cold}}{2} \right)}{\Delta T}$$

Οι ταχύτητες πάρθηκαν σε δύο ευθείες, η μεν u_x στην $(0.5, 0.5, z)$ για $z \in [0, 1]$ και η u_z στην $(x, 0.5, 0.5)$ για $x \in [0, 1]$ και στη συνέχεια αδιαστατοποιήθηκαν ως εξής

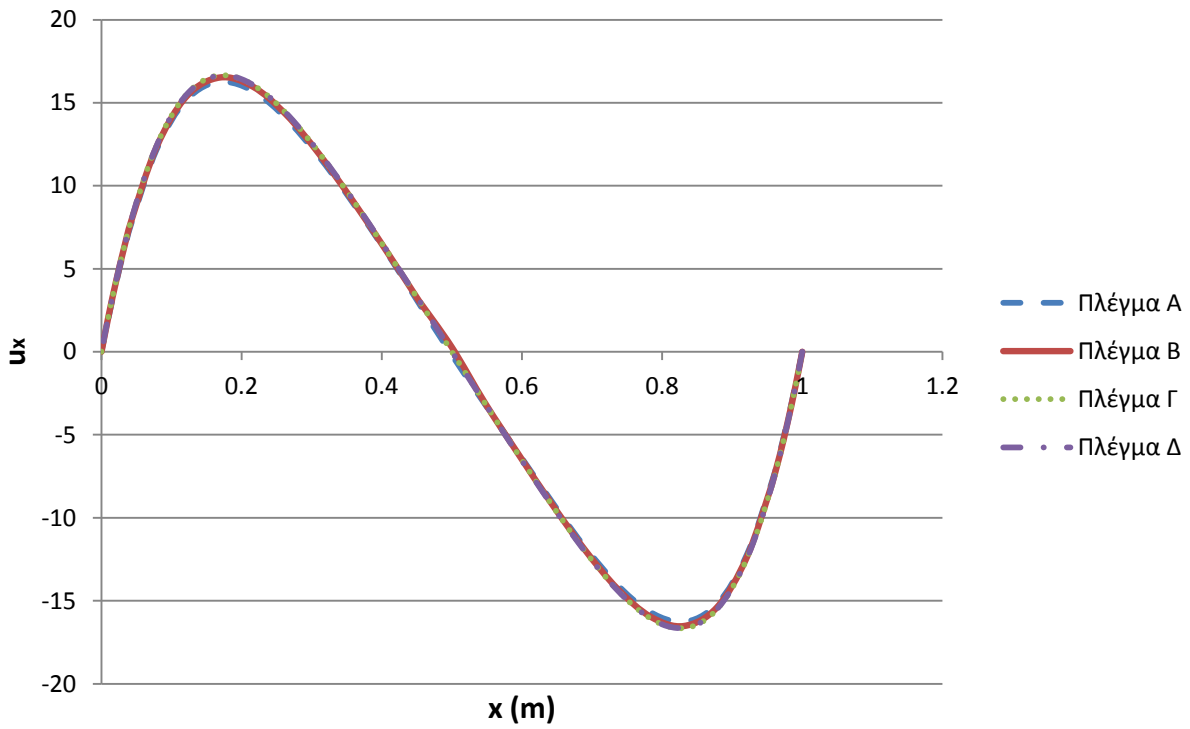
$$u_{ad} = \frac{u}{a_0}$$

$$a_0 = \frac{v_0}{Pr}$$

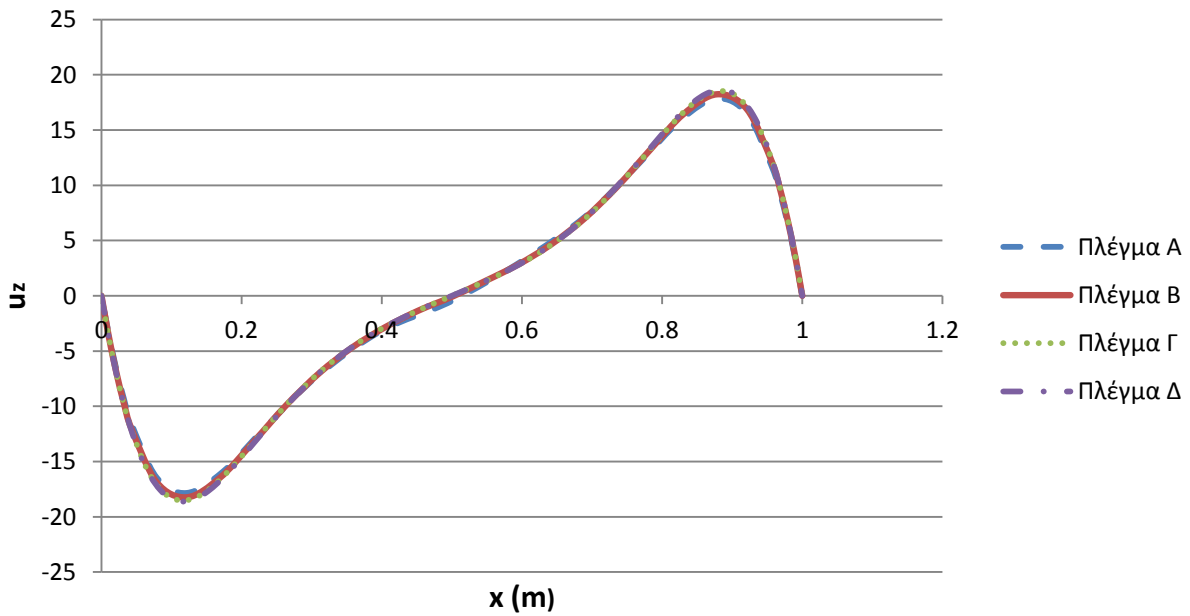
όπου v_0 η δυναμική συνεκτικότητα του εργαζόμενου μέσου



Εικόνα 4. 12 – Διάγραμμα Θερμοκρασίας πάνω στη γραμμή μελέτης



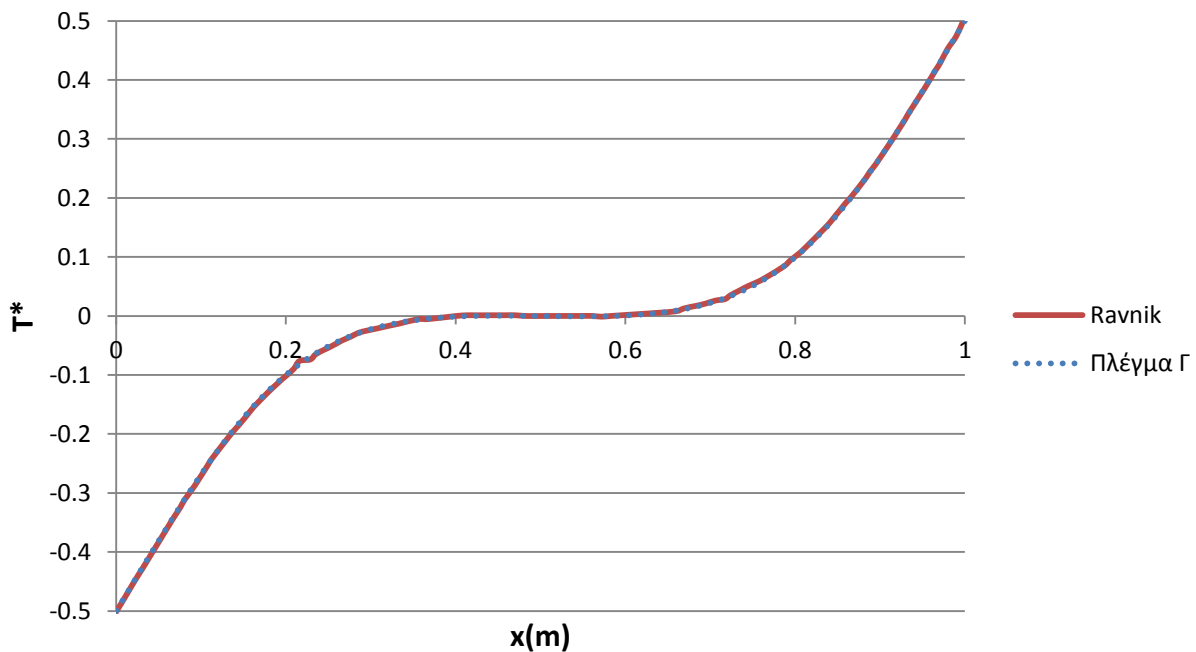
Εικόνα 4. 13 - Διάγραμμα Ταχύτητας u_x πάνω στη γραμμή μελέτης



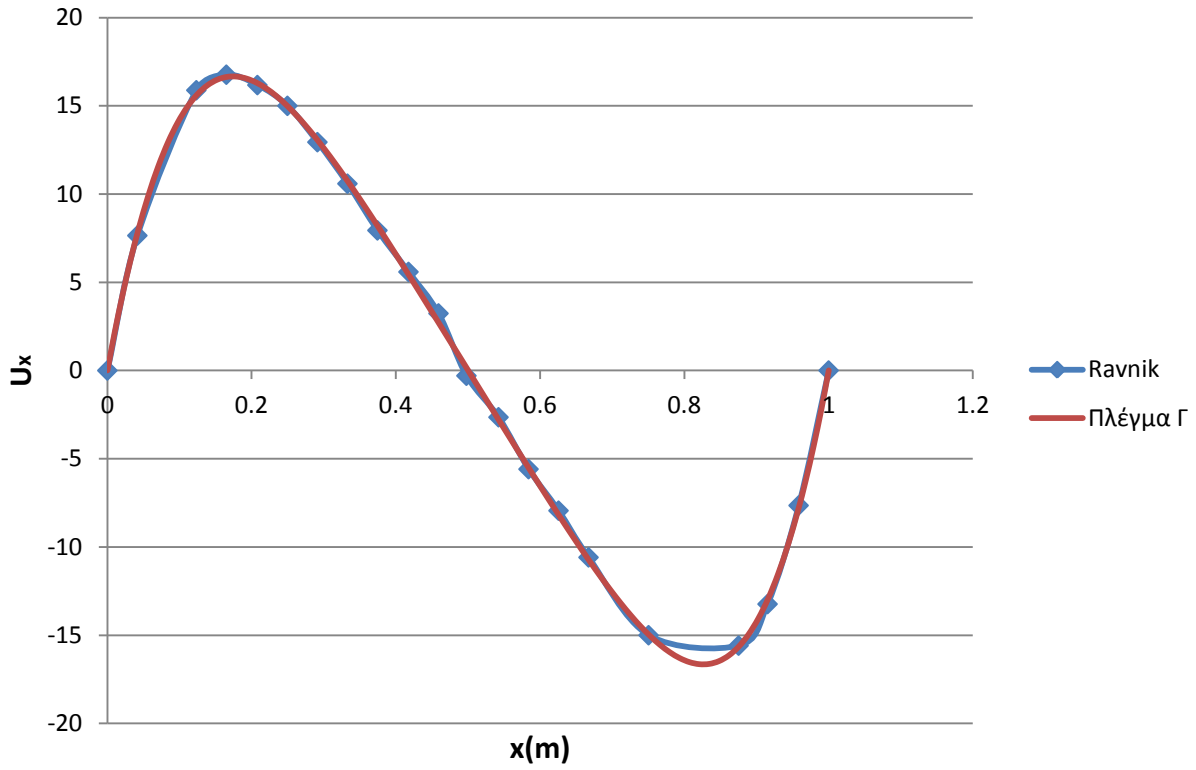
Εικόνα 4. 14- Διάγραμμα Ταχύτητας u_z πάνω στη γραμμή μελέτης

Στα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα για τα πυκνότερα πλέγματα δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές, συγκεκριμένα ανάμεσα στα πλέγματα Γ και Δ οι διαφορές κυμαίνονται στο 1-2%. Μπορούμε να πούμε με ασφάλεια συνεπώς ότι έχουμε φτάσει σε ανεξαρτησία πλέγματος και επιλέγουμε το Πλέγμα Γ , ως το πλέγμα που θα χρησιμοποιηθεί στην παρουσίαση των υπόλοιπων διαγραμμάτων.

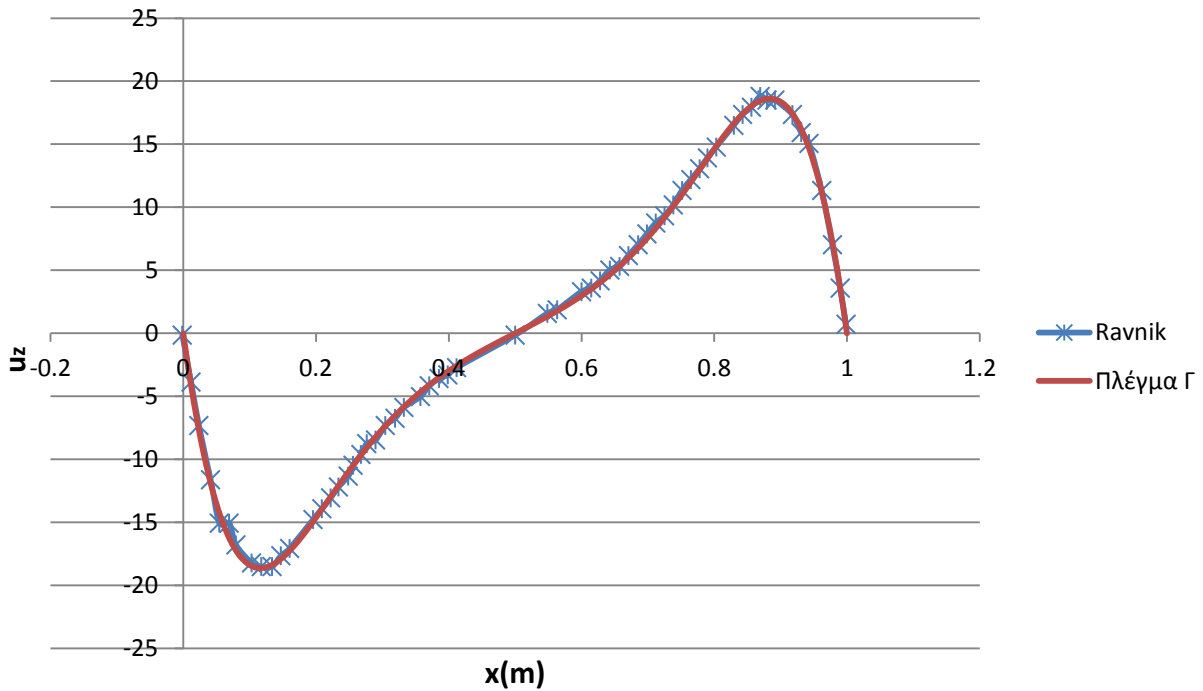
Σημαντικό στοιχείο, πέραν της ανεξαρτησίας πλέγματος, είναι και το κατά πόσον οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωσή μας έχουν συνάφεια με αυτές που προέκυψαν από τη μελέτη του Ravnik. Γι' αυτό το λόγο, στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται αυτή η σύγκριση τιμών. Ύπαρξη σύμπτωσης στις τιμές, ή έστω πολύ κοντινής γειτνίασης θα εξασφαλίσει την αξιοπιστία της μεθόδου μας και θα επιτρέψει με ασφάλεια την εξαγωγή των διαγραμμάτων για την περίπτωση όπου $Ra=10^3$ και $Ra=10^5$.



Εικόνα 4. 15 – Σύγκριση εξαγόμενων θερμοκρασιών με Ravnik et al (2008)

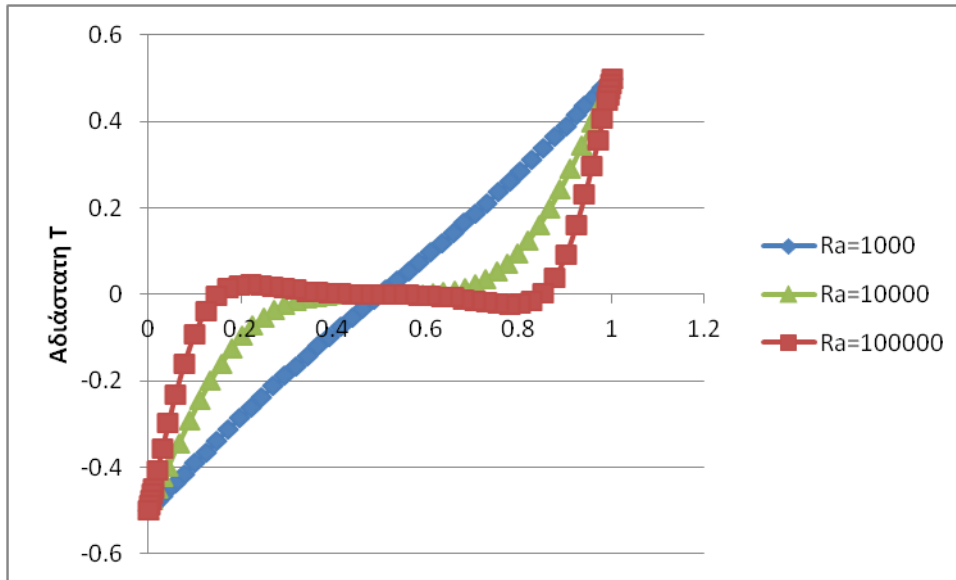


Εικόνα 4. 16 - Σύγκριση εξαγόμενων ταχυτήτων u_x με Ravnik et al (2008)

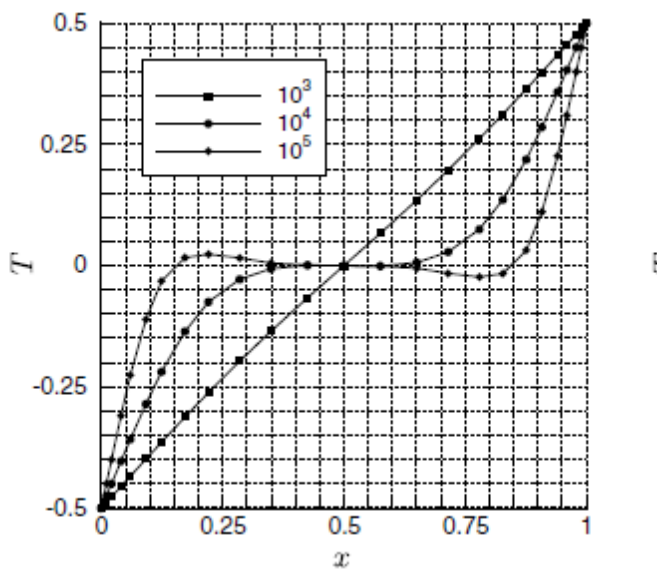


Εικόνα 4. 17 - Σύγκριση εξαγόμενων ταχυτήτων u_z με Ravnik et al (2008)

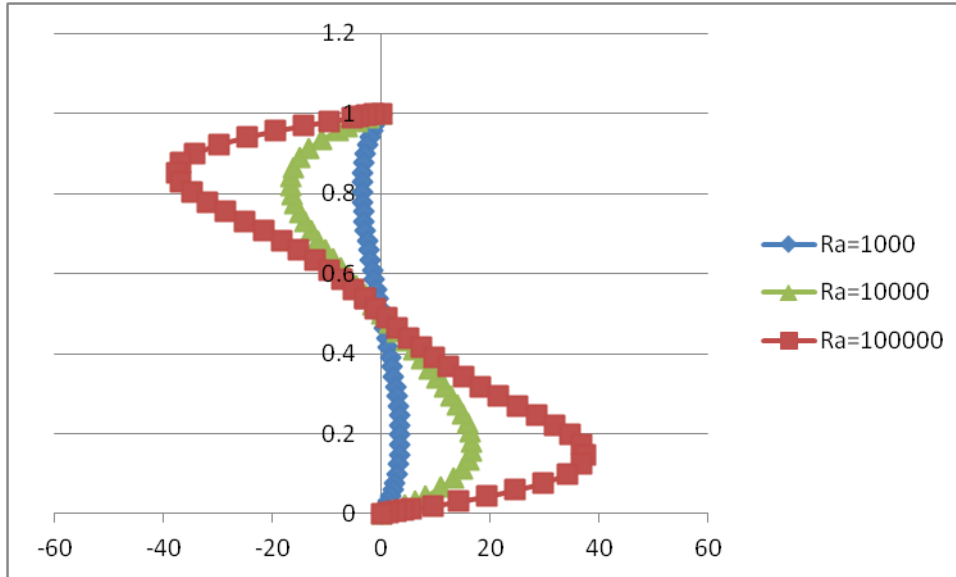
Παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγάλη προσέγγιση ανάμεσα στα αποτελέσματά μας σε σχέση με αυτά του Ravník, μπορούμε συνεπώς να εξάγουμε και τα υπόλοιπα διαγράμματα. Ακολουθεί η παράθεση των διαγραμμάτων και η σύγκριση με αυτά του Ravník



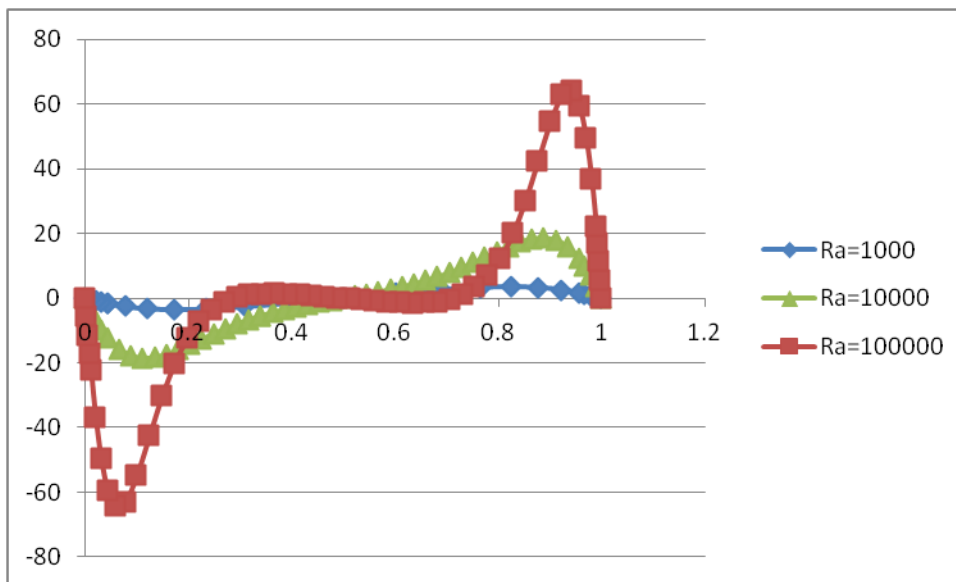
Εικόνα 4. 18 – Θερμοκρασίες για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh



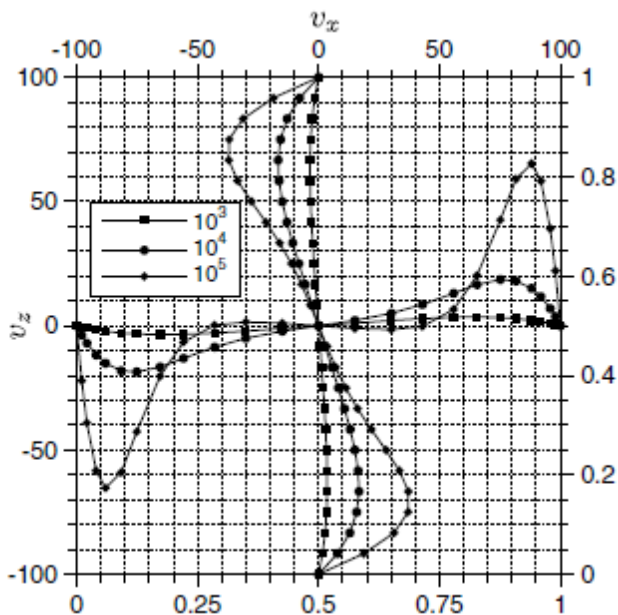
Εικόνα 4. 19 - Θερμοκρασίες για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh Ravník et al. (2008)



Εικόνα 4. 20 - Ταχύτητες u_x για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh



Εικόνα 4. 21 - Ταχύτητες u_z για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh



Εικόνα 4. 22 – Ταχύτητες u_x , u_z για διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh Ravnik et al. (2008)

Για το πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή σε κλειστή κοιλότητα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας των τοιχωμάτων της, το υπολογιστικό πακέτο έβγαλε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η αξιολόγηση της μεθοδολογίας συνεχίζεται παρακάτω με τη δεύτερη μελέτη που έγινε πάνω στην εργασία των Colomer κα.

4.2 Μελέτη περίπτωσης μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία σε κοιλότητα.

Η μελέτη των Colomer κα. αφορά την μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία σε κλειστή κυβική κοιλότητα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο τοιχώματα. Για την προσομοίωση της επίδρασης της ακτινοβολίας χρησιμοποιείται το μοντέλο των Διακριτών Συντεταγμένων (Discrete Ordinates), ενώ η μελέτη γίνεται για τέσσερις διαφορετικούς αριθμούς Rayleigh (10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6). Εξάχθηκαν διαγράμματα για τη ροή θερμότητας από το θερμό τοίχωμα σε δύο περιπτώσεις. Μία στην περίπτωση της ύπαρξης μόνο φαινομένων συναγωγής θερμότητας και μία με την προσθήκη της επίδρασης της ακτινοβολίας. Στην τελευταία εξετάστηκαν οι περιπτώσεις της θεώρησης του εργαζόμενου μέσου ως διαφανούς (transparent medium) και ως φαιού (gray body).

Στην παρούσα έρευνα υλοποιήθηκε η προσομοίωση για ένα αριθμό Rayleigh (10^4), λαμβάνοντας το μέσο ως διαφανές, με και χωρίς την επίδραση της ακτινοβολίας.

Διαμόρφωση Γεωμετρίας και Πλέγματος

Η προσομοίωση, όπως και η προηγούμενη που αναπαρήγαγε τη μέλετη των Ravioli κα., αφορά κύβο διαστάσεων 1X1X1. Συνεπώς, τα βήματα για την κατασκευή της γεωμετρίας και του πλέγματος είναι ίδια με παραπάνω. Έτσι παράγουμε πάλι τα ίδια πλέγματα A, B, Γ και Δ.

Διαμόρφωση Υπολογιστικού Μοντέλου στο *Fluent*

Περίπτωση 1^η

Για την περίπτωση της μη επίδρασης της ακτινοβολίας η κατάστρωση της προσομοίωσης γίνεται με τον ίδιο τρόπο με παραπάνω, μόνο που αλλάζουν οι ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου.

- Λαμβάνοντας υπόψη τα κάτωθι στοιχεία, το $g=9.81\text{m/s}^2$ και την οπτική πυκνότητα $\tau=0$

$$Pl = \frac{k\Delta T}{L\sigma_B T_c^4} = 0.043$$

$$Pr = \frac{\nu C_p}{k} = 0.71$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T L^3 \rho_0^2 c_p}{k\nu} = 10^4$$

$$\dot{T}_0 = \frac{T_c}{\Delta T} = 15$$

και εκλέγοντας πυκνότητα, συντελεστή θερμικής διαστολής (β_τ) και θερμοκρασία του ψυχρού τοιχώματος (T_c) προσδιορίζονται όλες οι ιδιότητες του υλικού στην επιλογή «Materials».

$$\rho = 1000\text{kg/m}^3$$

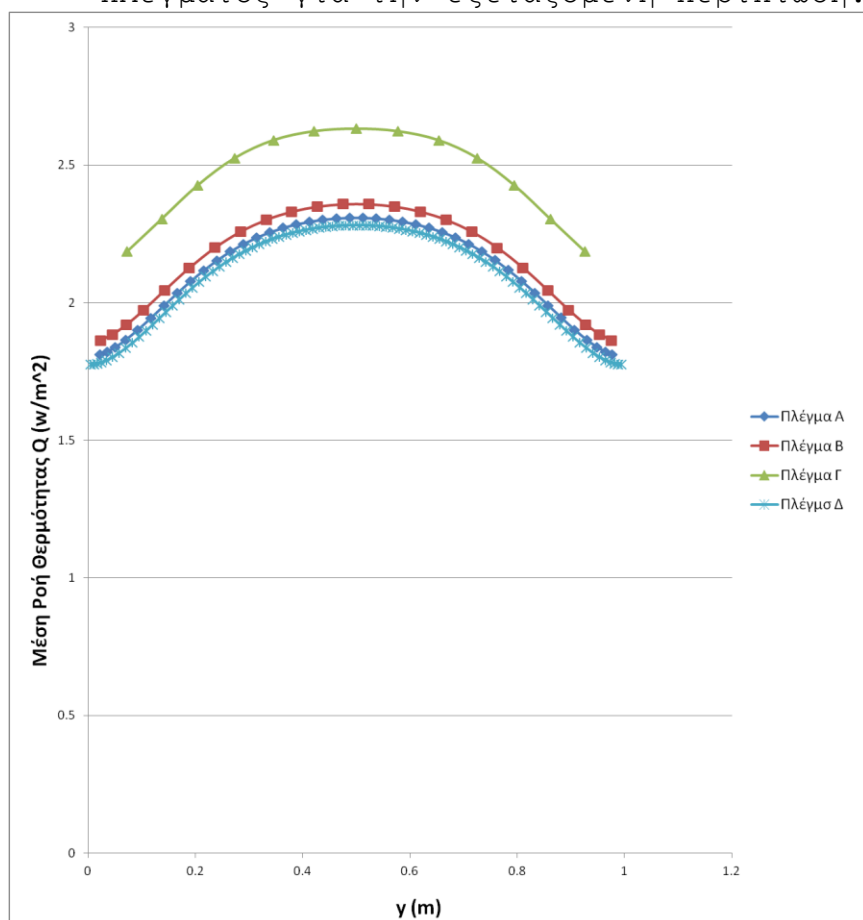
$$T_{cold} = 1500\text{K}$$

$$\beta_\tau = 0.00001 (1/k)$$

Ανάλυση αποτελεσμάτων

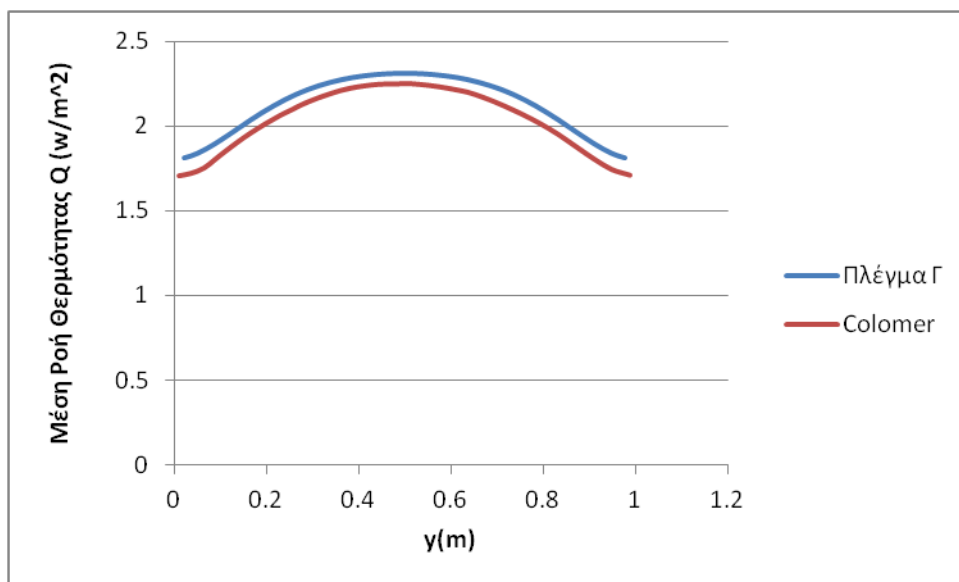
Τα αποτελέσματα εξάχθηκαν με το αντίστοιχο εργαλείο του ANSYS Workbench, CFD-Post. Αφορούν την ροή θερμότητας στο θερμό τοίχωμα και η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε

- την εξαγωγή των θερμοκρασιών στο επίπεδο που σχηματίζουν οι πιο κοντινοί κόμβοι από θερμό τοίχωμα (η απόστασή τους έχει οριστεί προηγουμένως από τον ορισμό του «First Layer Thickness» στην επιλογή «Inflation» κατά τη διάρκεια της πλεγματοποίησης)
- τον υπολογισμό της ροής θερμότητας (Heat Flux) για κάθε κόμβο από τον τύπο $Q = k \frac{DT}{dx}$ όπου το DT είναι η διαφορά της θερμοκρασίας κάθε κόμβου από αυτήν του θερμού τοιχώματος.
- Την ομαδοποίηση των κόμβων, άρα και των ροών θερμότητας σ' αυτούς ανά ευθείες που διατρέχουν κατακόρυφα την επιφάνεια και την εύρεση μιας μέσης τιμής για την ροή θερμότητας κάθε τέτοιας ευθείας.
- Την κατάστρωση διαγραμμάτων με τις τιμές που προκύπτουν που αποτελούν ουσιαστικά διαγράμματα μέσω τιμών ροής θερμότητας μια οριζόντιας ευθείας που διατρέχει κατά πλάτος την εξεταζόμενη επιφάνεια.
- Η διαδικασία ακολουθήθηκε για κάθε πλέγμα ξεχωριστά και παράχθηκε διάγραμμα για την μελέτη της ανεξαρτησίας πλέγματος για την εξεταζόμενη περίπτωση.



Εικόνα 4. 23 – Διάγραμμα Ροής Θερμότητας για διαφορετικά πλέγματα

Παρατηρείται ταχεία σύγκλιση των αποτελεσμάτων με την πυκνωση του πλέγματος, τέτοια ώστε οι διαφορές ανάμεσα στα πλέγματα Γ και Δ να είναι εντός ορίων αποδοχής της ανεξαρτησίας στο πλέγμα Γ. Ακολουθεί η σύγκρισή των αποτελεσμάτων του πλέγματος Γ που εκλέχθηκε με τα αποτελέσματα από την μελέτη των Colomer κα.



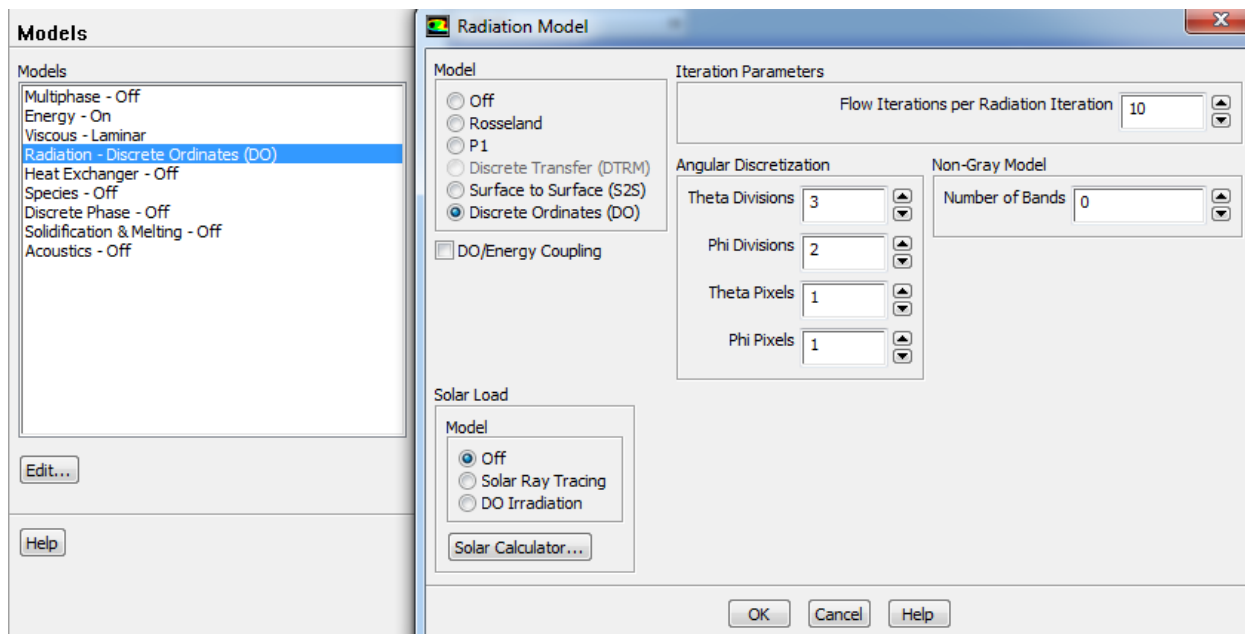
Εικόνα 4. 24 – Σύγκριση αποτελεσμάτων με αυτά των Colomer et al (2004)

Οι διαφορές των δύο κυμαίνονται κοντά στο 2% και επομένως μπορούμε να δεχτούμε την προσομοίωση που διενεργήθηκε από το υπολογιστικό πακέτο FLUENT πάνω στην συγκεκριμένη περίπτωση ως αξιόπιστη.

Περίπτωση 2^η

Διαμόρφωση Πλέγματος, Γεωμετρίας και Υπολογιστικού Μοντέλου στο Fluent

Για την περίπτωση της επίδρασης της ακτινοβολίας η κατάστρωση της προσομοίωσης γίνεται με παρόμοιο τρόπο με πριν, μόνο που ενεργοποιείται στην καρτέλα «Models» το μοντέλο ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται και από τους Colomer κα, δηλαδή το DOM. Λόγω της φύσης του φαινομένου της ακτινοβολίας, όπως αναλύθηκε και στο θεωρητικό υπόβαθρο, πρέπει να οριστούν και γωνίες ϕ και θ διάδοσης της. Ακόμη εκτός από ανεξαρτησία πλέγματος θα πρέπει να εξεταστεί και ανεξαρτησία αριθμού αυτών των γωνιών, δηλαδή η γωνιακή διακριτοποίηση.

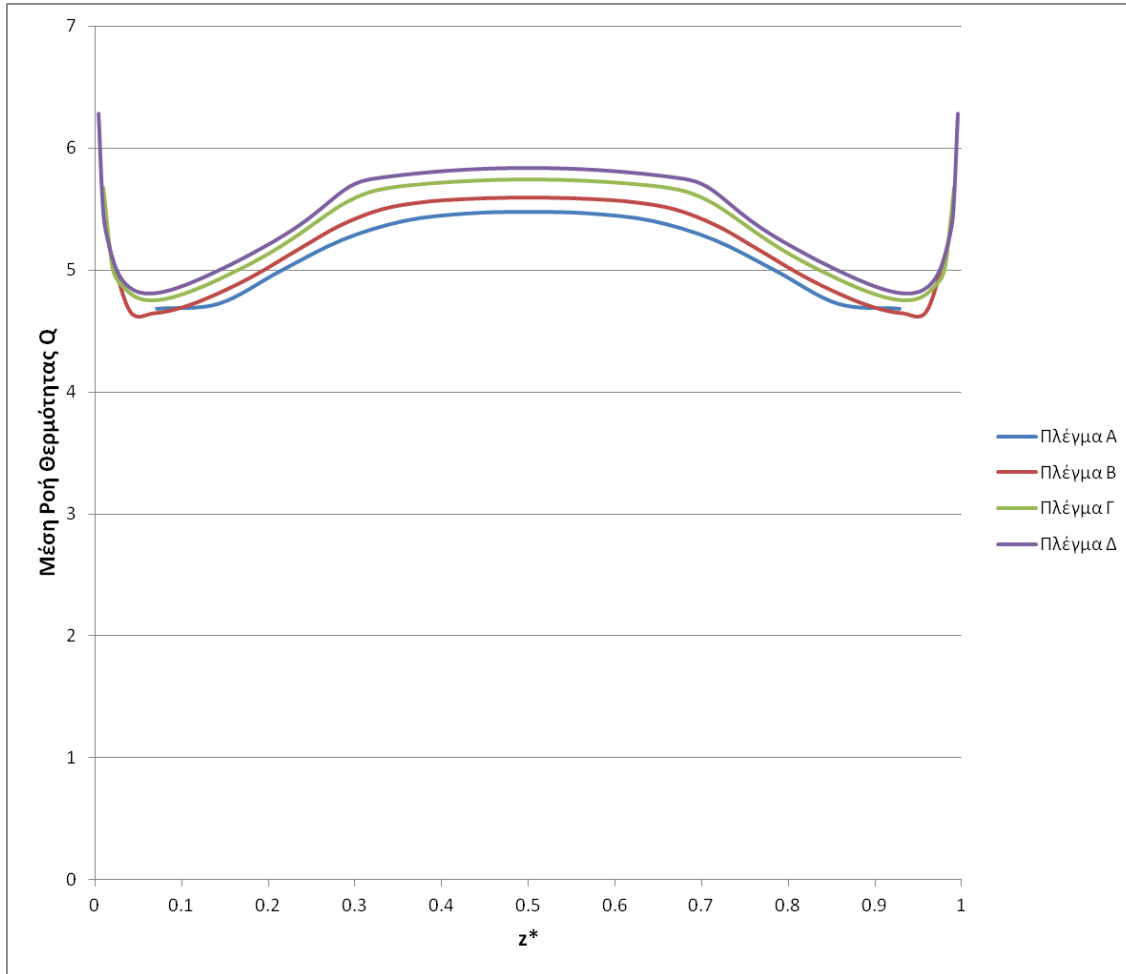


Εικόνα 4. 25 – Ρύθμιση Μοντέλου Ακτινοβολίας στο Fluent

Ανάλυση αποτελεσμάτων

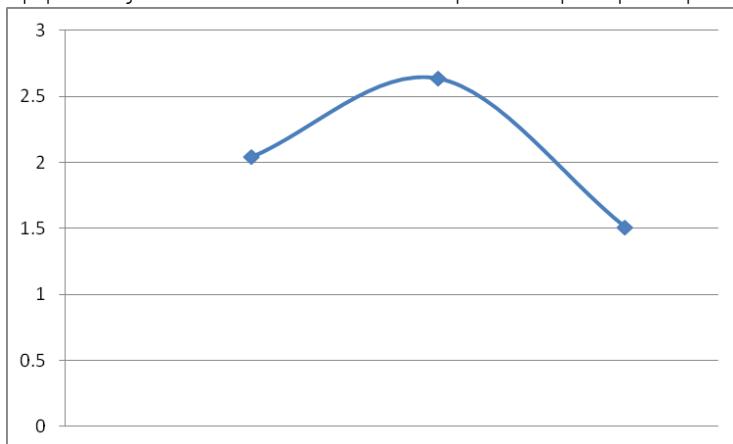
Η περίπτωση της ενσωμάτωσης της ακτινοβολίας ως φαινόμενο στην προσομοίωσή δημιουργεί κάποιες ιδιαιτερότητες. Ο αναλυτικός υπολογισμός της ροής θερμότητας λόγω ακτινοβολίας είναι δύσκολο να υλοποιηθεί λόγω πολυπλοκότητας, έτσι μελετήθηκαν δύο τρόποι εξαγωγής αποτελεσμάτων και υιοθετήθηκε αυτός που προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στην ανεξαρτησία πλέγματος.

Ο πρώτος τρόπος είναι, η χρήση του εργαλείου του ANSYS Workbench για την εξαγωγή των δεδομένων της συνολικής ροής θερμότητας (Total Heat Flux) από το θερμό τοίχωμα. Όμοια με προηγουμένως, θα πρέπει να γίνει ομαδοποίησή τους κατά z και εύρεση της μέσης τιμής κάθε ομάδας. Έτσι προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα



Εικόνα 4. 26 – Διάγραμμα Μέσης Ροής Θερμότητας-Εξαγωγή με CFD-Post

Εδώ παρατηρείται ότι, παρότι οι διαφορές των τιμών ανάμεσα στα πλέγματα A, B και Γ είναι κοντά στην περιοχή του 2,5%, δεν υπάρχει μείωση από το ένα στο άλλο, όπως θα ήταν λογικό λόγω της πύκνωσης του πλέγματος. Αντίθετα από το πλέγμα Γ στο πλέγμα Δ εμφανίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό η σύγκλιση που αναμένεται.



Εικόνα 4. 27 – Επί % μέγιστη διαφορά στις τιμές ανάμεσα στα πλέγματα

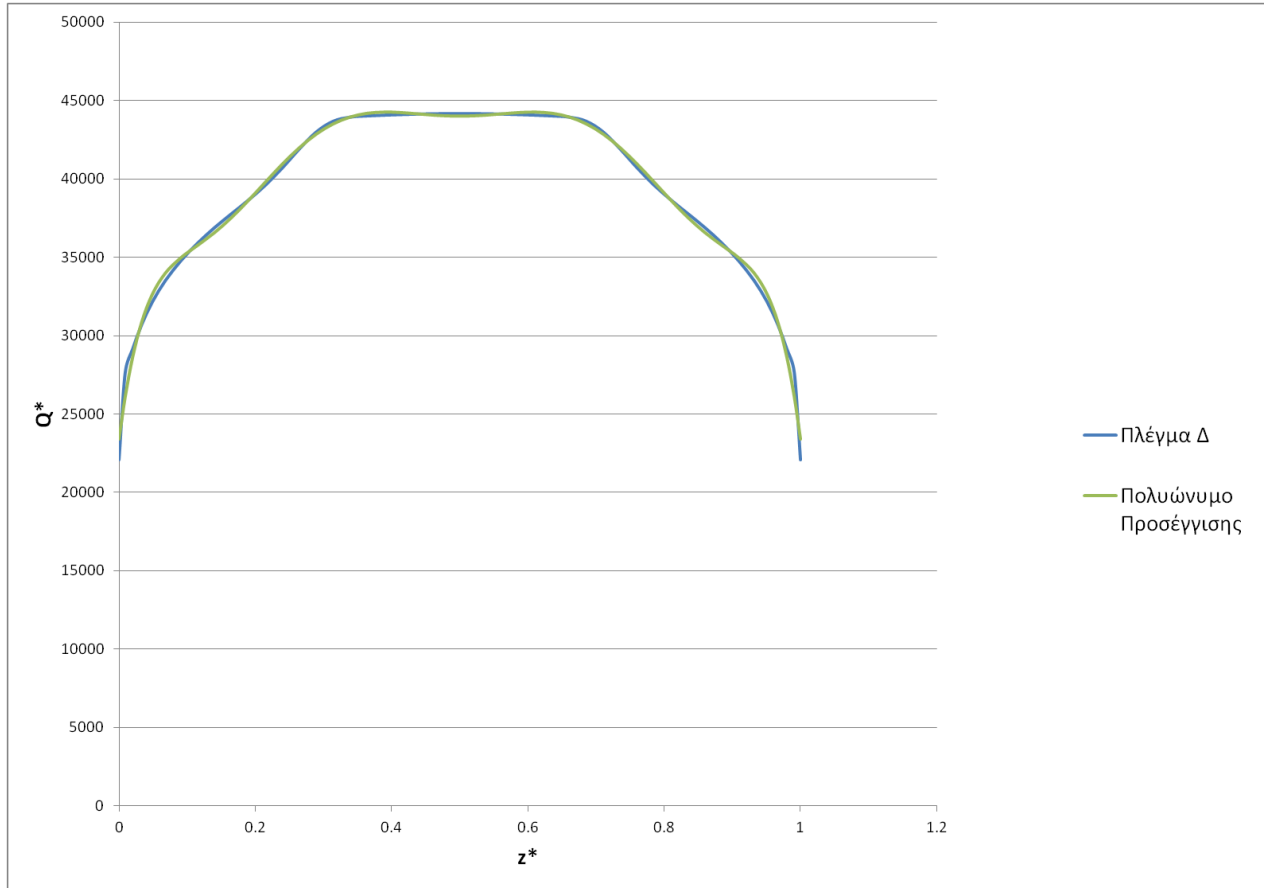
Ο δεύτερος τρόπος είναι η χειροκίνητη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω για την εύρεση της αδιαστατοποιημένης μέσης ροής θερμότητας λόγω συναγωγής και η πρόσθεση σε αυτή, εξαχθέντων αποτελεσμάτων που αφορούν τη ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας μιας και $Q^* = Q_c^* + Q_r^*$. Το πρόβλημα που εμφανίζεται σε αυτή την περίπτωση είναι το εξής.

Η μέση ροή θερμότητας λόγω συναγωγής, κατά τη διεύθυνση του z , βρίσκεται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπολογίζοντας τη ροή θερμότητας για κάθε κόμβο στην πρώτη επιφάνεια μετά το θερμό τοίχωμα, ομαδοποιώντας τους κόμβους με κοινό z και εξάγοντας τη μέση τιμή του Q για κάθε ομάδα κόμβων ξεχωριστά. Η μέση ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας βρίσκεται, εξάγοντας μέσω της χρήσης του CFD-Post τις τιμές για το θερμό τοίχωμα. Ωστόσο οι κόμβοι στο θερμό τοίχωμα δεν έχουν αντιστοιχία συντεταγμένων με αυτούς της πρώτης επιφάνειας μετά το τοίχωμα κι έτσι λόγω υψηλής αοριστίας, η πρόσθεση μεγεθών για δύο κοντινούς κόμβους καθίσταται αδύνατη. Γι' αυτό το λόγο, κατά τον υπολογισμό με αυτό τον τρόπο στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων και προσεγγίστηκαν αριθμητικά τα μεγέθη της ροής θερμότητας μέσω ακτινοβολίας σε επιλεγμένες συντεταγμένες (κοινές με της πρώτης επιφάνειας μετά το τοίχωμα).

Για την υλοποίηση των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε κώδικας σε Fortran όπου εισάχθηκαν, η καμπύλη της ροής θερμότητας λόγω ακτινοβολίας, οι συντεταγμένες των θέσεων όπου αναζητούνταν η προσέγγιση, καθώς και ο βαθμός του πολυωνύμου προσέγγισης.

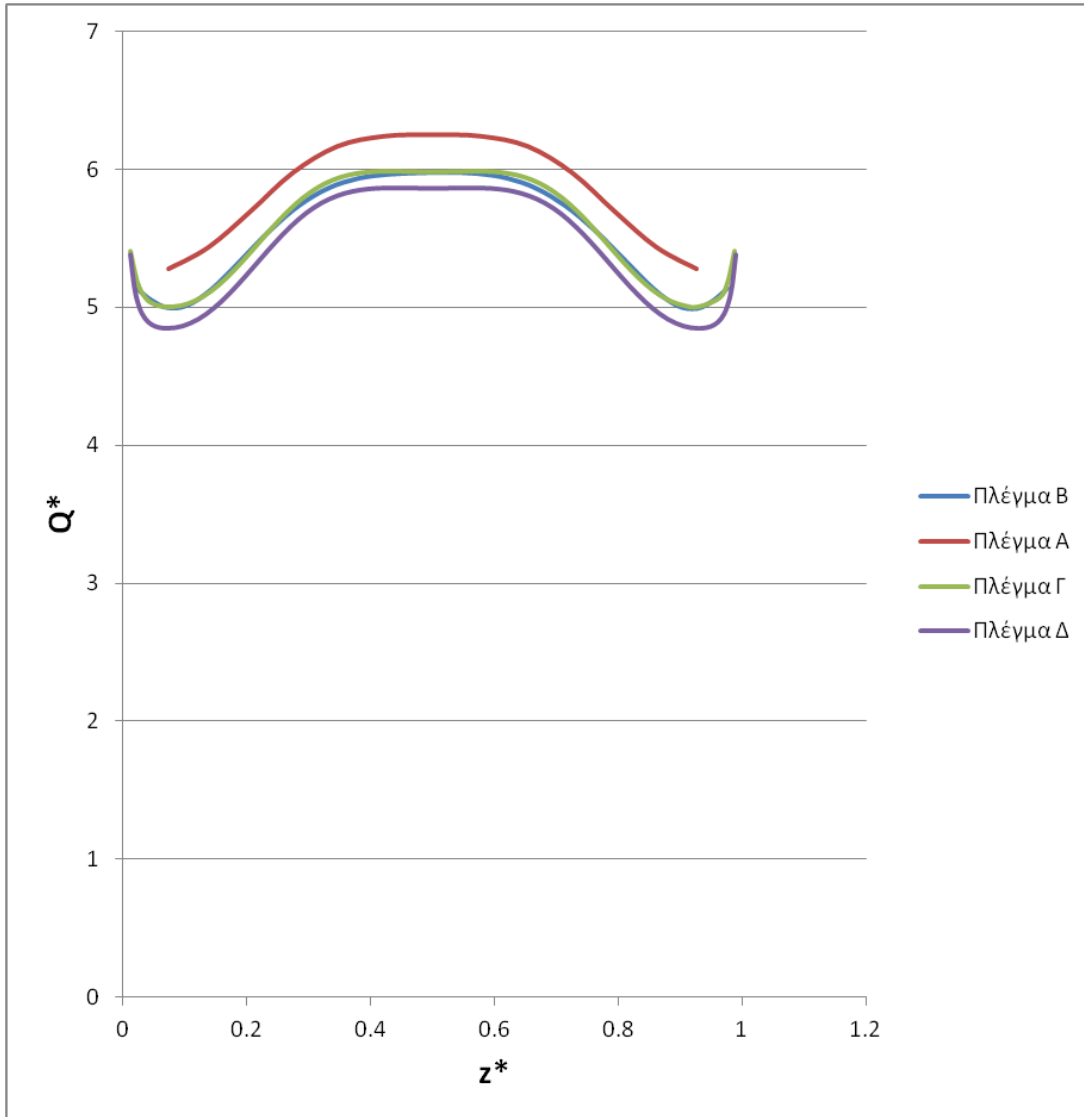
Ο τρόπος αυτός υπολογισμού σε σχέση με τον προηγούμενο έχει το μειονέκτημα ότι περιέχει πολλούς χειροκίνητους υπολογισμούς και αριθμητικές προσεγγίσεις άρα και εμπεριέχεται ο κίνδυνος σφάλματος ή χαμηλής ακρίβειας. Ήδη στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται ότι στην περιοχή για z^* γύρω από το 0.5, η καμπύλη του πολυωνύμου παίρνει τιμές ελαφρώς μικρότερες από την πραγματικότητα.

Ωστόσο είναι δυνατόν να γίνει φανερή η συνεισφορά κάθε τύπου ροής θερμότητας στη συνολική μιας και υπολογίζονται διακριτά η μία από την άλλη.



Εικόνα 4. 28 – Μέση Ροή Θερμότητας λόγω συναγωγής, προσέγγιση με πολυώνυμο

Ακολουθεί το διάγραμμα της συνολικής μέσης ροής θερμότητας από το θερμό τοίχωμα όπως προέκυψε με τον υπολογισμό που αναλύθηκε παραπάνω. Από την επισκόπησή του παρατηρούμε ότι η προσέγγιση των καμπυλών ανάμεσα στα πλέγματα Α, Β και Γ είναι ικανοποιητική σε βαθμό που το Πλέγμα Β και το Πλέγμα Γ είναι σχεδόν ταυτόσημα. Το πυκνότερο όλων Πλέγμα Δ εμφανίζει μεγαλύτερη διαφορά από το Πλέγμα Γ απ' ό,τι το Πλέγμα Γ σε σχέση με το πλέγμα Β, παραμένοντας όμως μέσα σε αποδεκτά όρια. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί όπως είπαμε προηγουμένως, από την προσεγγιστική λογική που έχουν οι υπολογισμοί που γίνονται με αποτέλεσμα να αφήνεται ένα περιθώριο σφάλματος σε αυτούς. Σφάλμα το οποίο επηρεάζει ελαφρώς τις τιμές σε όλα τα πλέγματα, είτε αυξητικά είτε μειωτικά. Ειδικά στα τρία τελευταία οι διαφορές είναι πολύ μικρές ανάμεσά τους κι έτσι η ελάχιστη σφαλματική ενίσχυση του ενός έναντι του άλλου γίνεται αμέσως ορατή.



Εικόνα 4. 29- Διάγραμμα Μέσης Ροής Θερμότητας-Εξαγωγή με χειροκίνητο τρόπο

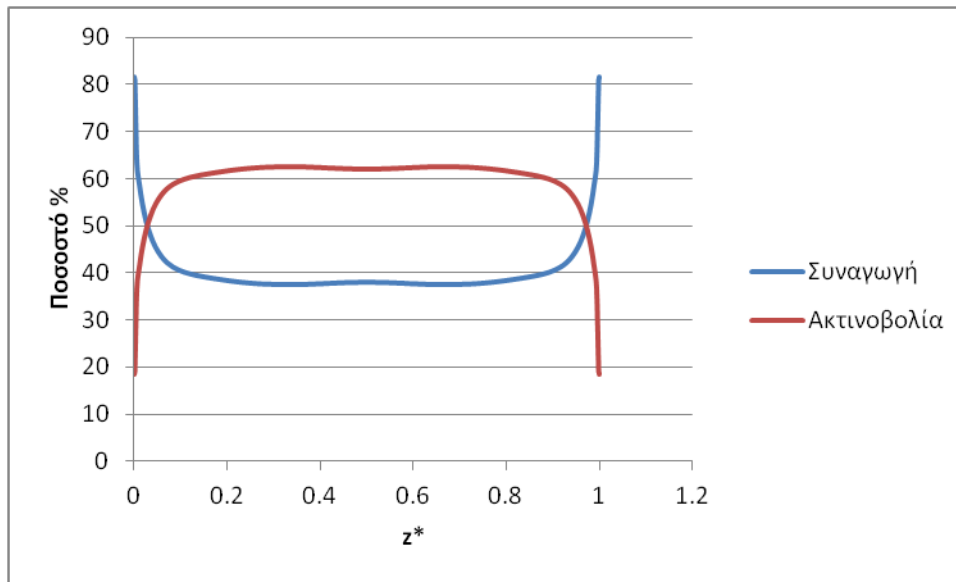
Στη συνέχεια παρατίθενται τα ποσοστά συμμετοχής της θερμότητας λόγω ακτινοβολίας και αυτής λόγω συναγωγής στη συνολική ροή για το πλέγμα Δ. Παραθέτουμε επίσης τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τη μελέτη των Colomer κα.

Table 3
Hot wall average heat flux

Ra	With radiation			Without radiation	
	Q^*	Q_r^*	Q_c^*	Q^*	Fusegi and Min Hyun [1]
10^3	4.596	3.162	1.434	1.055	1.085
10^4	5.295	3.233	2.062	2.030	2.100
10^5	7.368	3.385	3.983	4.334	4.361
10^6	11.670	3.568	8.102	8.862	8.770

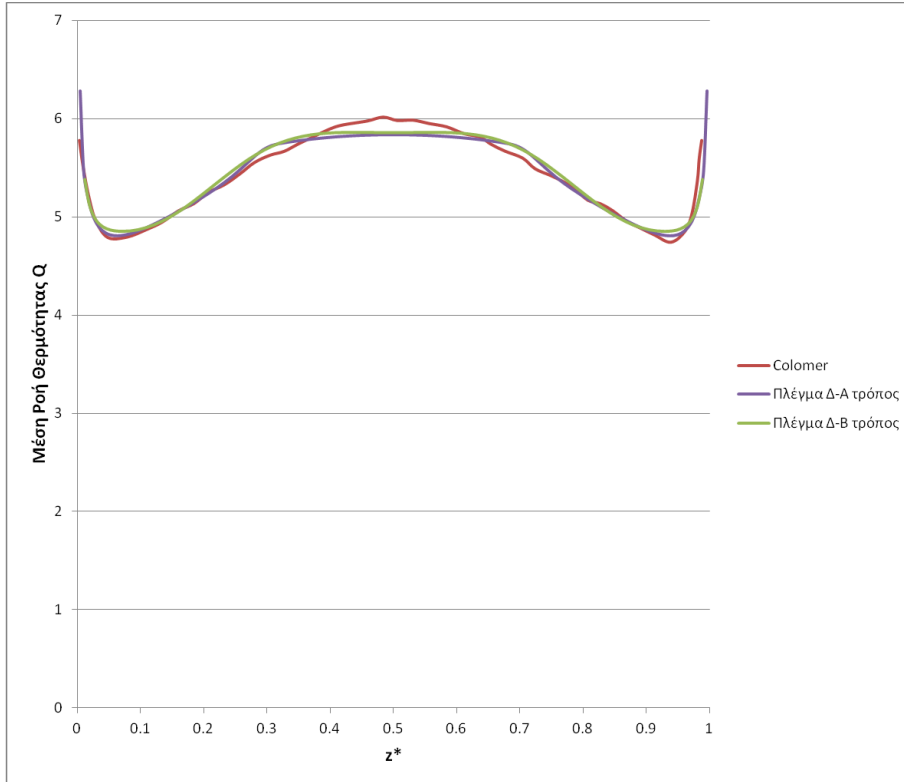
Q_r^* and Q_c^* are the radiation and convection contribution to the total heat flux. $H = 0.043$, $T_0 = 15$, $\tau = 0$ and $Pr = 0.71$.

Εικόνα 4. 30 – Συμμετοχή Μέσης Ροής Θερμότητας λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας στην ολική-Colomer et al. (2004)



Εικόνα 4. 31- % συμμετοχή Μέσης Ροής Θερμότητας λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας στην ολική

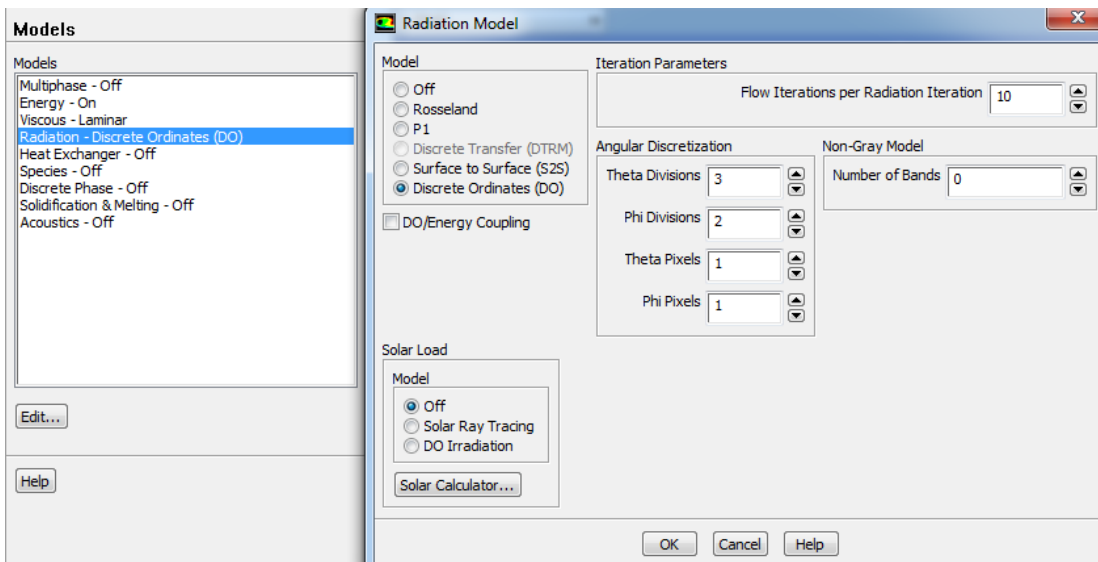
Για αριθμό Rayleigh 10^4 , η μελέτη των Colomer κα. δίνει ποσοστό συμμετοχής για την ακτινοβολία 3.233/5.295 ή 61% περίπου, πολύ κοντά στα αποτελέσματα που πήραμε και εμείς από τη μελέτη μας. Τέλος αν δεχτούμε ότι επιτυγχάνεται ανεξαρτησία πλέγματος στο πλέγμα Δ παρατίθενται η σύγκριση των αποτελεσμάτων μας, όπως προέκυψαν με τους δύο τρόπους υπολογισμού με αυτά του με αυτά του Colomer όπου παρατηρείται ικανοποιητική προσέγγιση.



Εικόνα 4. 32- Σύγκριση αποτελεσμάτων με Colomer et al. (2004)

Γωνιακή Διακριτοποίηση

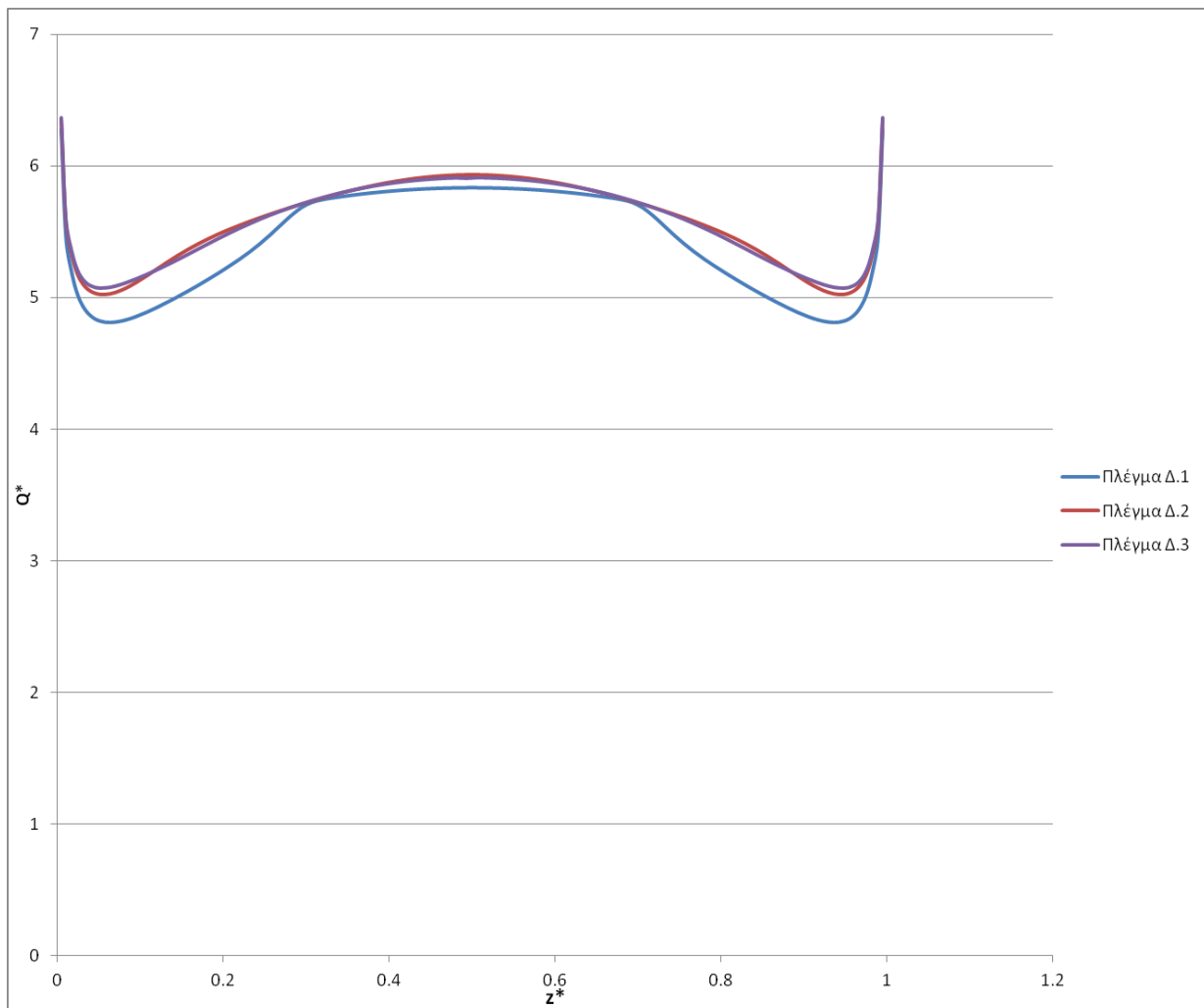
Ένα κομμάτι που δεν αναφέρεται στη μελέτη των Colomer κα., είναι αυτό της γωνιακής διακριτοποίησης. Για να την υλοποιήσουμε, αλλάζουμε τις γωνίες ϕ και θ κατά την ενεργοποίηση του μοντέλου ακτινοβολίας, αυξάνοντας τον αριθμό τους μέχρι να πάρουμε ανεξαρτησία αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4. 33- Ρύθμιση Γωνιακής Διακριτοποίησης

Για το Πλέγμα Δ επιλέχθηκαν τρία ζεύγη γωνιών (θ, φ) τα $(3, 2)$, $(6, 4)$, $(8, 4)$ και εκτελέστηκε ξανά η προσομοίωση. Τα πλέγματα ονοματίστηκαν ως Πλέγμα $\Delta.1$, Πλέγμα $\Delta.2$ και Πλέγμα $\Delta.3$ αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν φαίνονται παρακάτω. Παρατηρούμε ότι η διακριτοποίηση έχει σαν αποτέλεσμα να ομαλοποιηθεί η μορφή της καμπύλης, ιδιαίτερα εκατέρωθεν του μέσου της απόστασης z όπου προηγουμένως εμφανιζόταν μια αλλαγή στην κυρτότητά της. Είναι φανερό επίσης ότι λαμβάνουμε ανεξαρτησία γωνιών στο πλέγμα $\Delta.2$.



Εικόνα 4. 34- Διάγραμμα Μέσης Ροής Θερμότητας για διαφορετικό ζεύγος αριθμών γωνιών φ και θ

Προηγουμένως αναλύθηκε η διαμόρφωση της γεωμετρίας, η πλεγματοποίηση και η κατάστρωση της προσομοίωσης στο υπολογιστικό πακέτο ANSYS FLUENT. Από τη μελέτη πλέγματος που έγινε προέκυψαν τρεις πιθανές διατάξεις. Συνεπώς, πριν παρουσιαστούν τα τελικά αποτελέσματα, κρίνεται απαραίτητο να αναλυθεί ποια διάταξη πλέγματος επιλέχθηκε τελικά. Η ανάλυση αυτή θα ακολουθήσει στο κεφάλαιο της παρουσίασης των αποτελεσμάτων ως εισαγωγική σε αυτό.

Κεφάλαιο 5^ο

Εφαρμογή Μεθοδολογίας στη Σήραγγα

Έχοντας αναφέρει τη διαδικασία που θα ακολουθηθεί για τη μελέτη του φαινομένου μέσα από τις βασικές εξισώσεις και τις βασικές εφαρμογές του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν, στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί το υπολογιστικό μοντέλο και η μεθοδολογία της έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι παράμετροι του ANSYS FLUENT που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη μελέτη του φαινομένου πυρκαγιάς σε σήραγγα και στη συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επίλυση των εξισώσεων μέσω του συγκεκριμένου προγράμματος.

5.1 Αριθμητική Προσομοίωση

Η μελέτη έγινε πάνω σε μια σήραγγα μήκους 130 μέτρων (m) με πλάτος 5,4 m και ύψος 2,4 m. Η επιλογή αυτών των διαστάσεων βασίστηκε στην έρευνα των Gao κα (2004) και Fletcher κα (1994) προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των μοντέλων τύρβης k-ε (παρούσα μελέτη και μελέτη Fletcher κα., 1994) και LES (μελέτη Gao κα., 2004), αλλά και μεταξύ των μοντέλων ακτινοβολίας DOM-Discrete Ordinates Method (παρούσα μελέτη) και DTM-Discrete Transfer Method (Fletcher κα, 1994). Ο εξαερισμός της σήραγγας φτάνει μέχρι τα 2 m/s ανάλογα με την περίπτωση, μέσω δύο ανεμιστήρων που έχουν τοποθετηθεί στην έξοδο της σήραγγας. Η εστία της φωτιάς τοποθετείται κάποια μέτρα μετά την είσοδο της σήραγγας και το καύσιμο που καίγεται είναι υγρό οκτάνιο.

Η ρεαλιστική προσομοίωση μιας εστίας φωτιάς είναι πάρα πολύ σύνθετη, καθώς τα φαινόμενα της καύσης, της ακτινοβολίας και της τύρβης πρέπει να ληφθούν υπόψη. Έτσι, οι Gao κα. (2004) στη μελέτη τους θεωρούν τη φωτιά σαν μια πηγή θερμότητας (VHS-Volumetric Heat Source) χωρίς χημικές αντιδράσεις. Για την απλοποίηση των υπολογισμών οι Gao κα. θεωρούν την εστία της φωτιάς σαν πηγή θερμότητας με εμβαδόν βάσης $A=0.89 \text{ m}^2$ και ύψος $h=0.33 \text{ m}$. Η επιλογή του συγκεκριμένου ύψους έγινε έπειτα από κάποια τεστ προσομοίωσης. Η συνολική θερμότητα θεωρείται ότι απελευθερώνεται ομοιόμορφα από όλη την πηγή, ενώ τα τείχη λαμβάνονται ως αδιαβατικά.

Η μελέτη γίνεται για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις (**Case a, b, c**), στις οποίες αλλάζει η τιμή της ταχύτητας εξαερισμού, το ποσό απελευθέρωσης θερμότητας και καυσίμου.

Το συνολικό ποσό απελευθέρωσης θερμότητας \dot{Q} είναι σταθερό για την εκάστοτε περίπτωση εξαερισμού και δίνεται από τον τύπο:

$$\dot{Q} = q_m A \dot{m},$$

όπου q_m η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, που για το οκτάνιο είναι $q_m = 44.4 \text{ MJ/kg}$ (Fletcher κα, 1994),

A είναι το εμβαδόν της εστίας της φωτιάς και δίνεται από τον τύπο $A = \pi D^2 / 4$

και τέλος \dot{m} [$\text{kgs}^{-1}\text{m}^{-2}$] ο ρυθμός απελευθέρωσης του καυσίμου που δίνεται από τον Πίνακα 4.1 ανάλογα με την περίπτωση εξαερισμού.

Case	Ρυθμός Καυσίμου [$\text{kgs}^{-1}\text{m}^{-2}$]	Απελευθέρωσης	Ταχύτητα Εξαερισμού [m/s]
a	0.070		0.50
b	0.065		0.85
c	0.058		2.00

Έτσι, έχοντας όλα τα αριθμητικά δεδομένα μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας \dot{Q} , η τιμή του οποίο για κάθε περίπτωση παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2. Στον ίδιο πίνακα υπολογίζεται το ποσό απελευθέρωσης θερμότητας ανά κυβικό μέτρο \dot{Q}/V , που προκύπτει διαιρώντας το \dot{Q} με τον όγκο της εστίας φωτιάς $V = A \cdot h$.

Case	\dot{Q} [MW]	\dot{Q}/V [MW/m ³]
a	2.76612	9.4181818
b	2.56854	8.7454545
c	2.291928	7.80363636

5.2 Μελέτη Πλέγματος

Βασικό ρόλο στην ομαλή επίλυση προβλημάτων υπολογιστικής ρευστομηχανικής είτε με τη χρήση εμπορικών πακέτων (FLUENT) όπως στην παρούσα εργασία, είτε με τη χρήση ιδίου κώδικα, παίζει η σωστή διαμέριση ή πλεγματοποίηση της γεωμετρίας που μελετάται.

Γενικά, ένα πλέγμα υψηλής ποιότητας προσφέρει τα παρακάτω:

- Ταχύ ρυθμό σύγκλισης, που σημαίνει την άφιξη σε αποδεκτή λύση με μικρό χρονικό κόστος.
- Ακρίβεια λύσης, που σημαίνει ότι όλα τα φαινόμενα στην περίπτωση που μελετάται έχουν ληφθεί υπόψη και συνεπώς η λύση είναι αξιόπιστη.
- Μικρό σταθμισμένο υπολογιστικό κόστος. Για να επιτευχθεί ακρίβεια απαιτείται συνήθως πλέγμα με υψηλό αριθμό κελιών ανά μονάδα όγκου, κάτι που σημαίνει, υψηλό υπολογιστικό κόστος. Ωστόσο, το βέλτιστο πλέγμα καταφέρνει να επιτύχει τη δυνατόν καλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα σε σχέση με άλλα πλέγματα ίδιου μεγέθους. Συνεπώς, το σταθμισμένο υπολογιστικό κόστος είναι μικρό. (Wikipedia και εγώ)

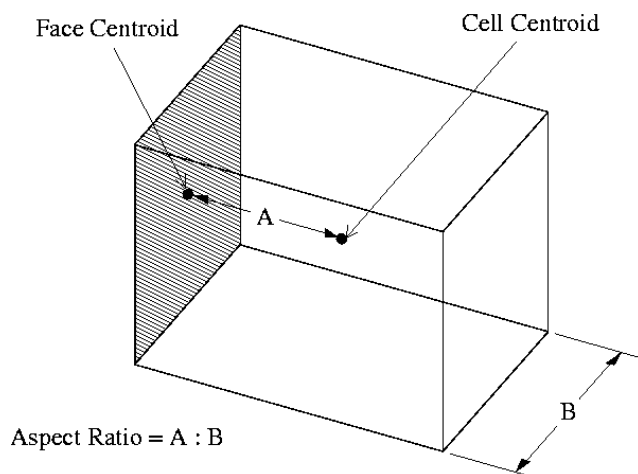
Τα κριτήρια για την ποιότητα του πλέγματος είναι κατά κύριο λόγο δύο

- Αντικειμενικά κριτήρια αξιολόγησης που αφορούν την μορφή της γεωμετρίας του στοιχειώδους όγκου.
- Υποκειμενικά κριτήρια, τα οποία θέτει ο ίδιος ο ερευνητής κατά την κατάστρωση του πλέγματος και υπηρετούν τις ιδιαίτερες συνθήκες της εκάστοτε μελέτης.

5.2.1 Κριτήρια Αξιολόγησης Πλέγματος

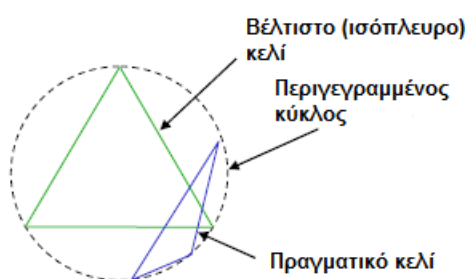
Για την ποιότητα του πλέγματος βασικά κριτήρια είναι τα εξής:

- Αναλογία διαστάσεων (aspect ratio)
Η αναλογία διαστάσεων σε ένα κελί του πλέγματος, είναι η μέγιστη απόσταση μιας όψης του από το κέντρο του, προς την ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε δυο κόμβους του.



Εικόνα 5. 1 – Aspect Ratio

- Λοξότητα όγκου (skewness)
Λοξότητα όγκου καλείται η σύγκριση του όγκου που περικλείεται από κάθε κελί του πλέγματος, σε σχέση με τον όγκο βέλτιστου κελιού που δύναται να αντικαταστήσει το πραγματικό.



Εικόνα 5. 2 - Skewness

Το βέλτιστο αυτό κελί ορίζεται ως εξής:

Κελί του οποίου οι πλευρές αποτελούνται από ισογώνια (equiangular) στοιχεία, ισόπλευρα τρίγωνα (στην περίπτωση χρήσης τετραέδρων) ή ορθογώνια παραλληλόγραμμα (στην περίπτωση χρήσης εξαέδρων).

Η λοξότητα επομένως ορίζεται ως

$$\text{λοξότητα} = \max\left(\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e}\right)$$

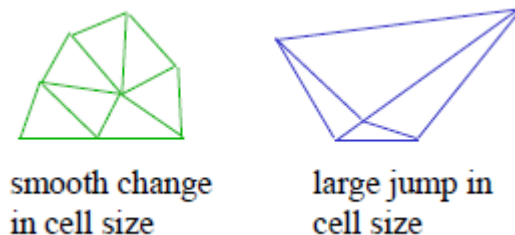
όπου

θ_{\max} = η μεγαλύτερη γωνία της πλευράς ή του κελιού

θ_{\min} = η μικρότερη γωνία της πλευράς ή του κελιού

θ_e = η γωνία του ισογώνιου (βέλτιστου) στοιχείου

- Ομαλότητα (smoothness)
Η μεταβολή μεγέθους από κελί σε κελί πρέπει να είναι το δυνατόν ομαλή

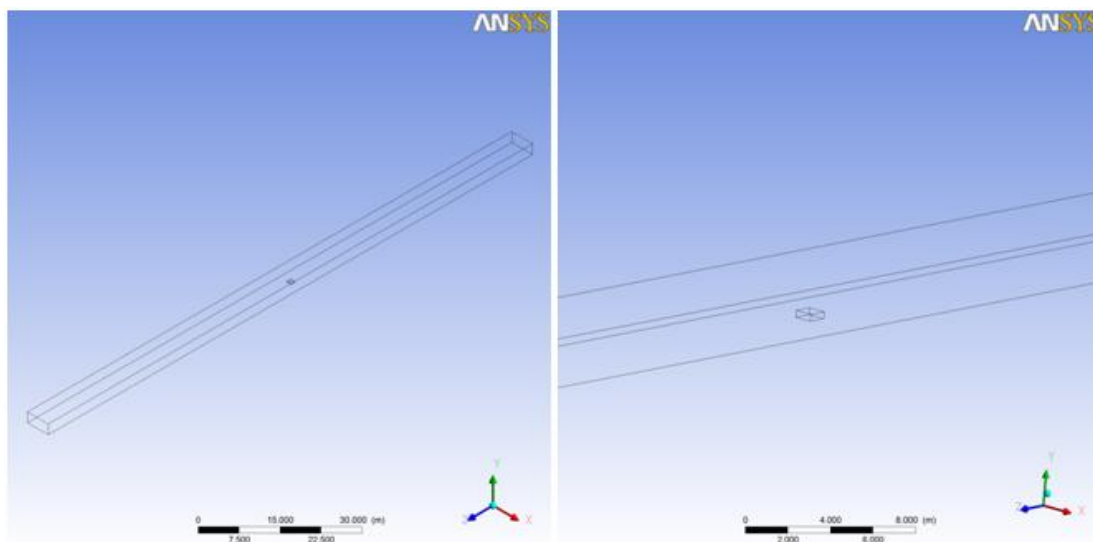


Εικόνα 5. 3 - Smoothness

Σε κάθε μελέτη περίπτωσης (case study) εκτός από κριτήρια όπως τα παραπάνω που αφορούν την μορφολογική ποιότητα των κελιών του πλέγματος, τίθενται και άλλα κριτήρια ως προς τη μακροσκοπική μεταβολή της πυκνότητας του πλέγματος, τα οποία υπηρετούν ιδιαιτερότητες του προβλήματος που μελετάται.

Στη συγκεκριμένη έρευνα έπρεπε να ληφθούν υπόψη τα εξής:

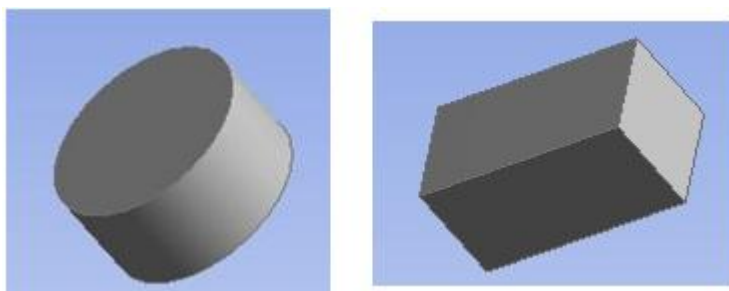
- Το πρόβλημα αφορά την προσομοίωση πυρκαγιάς σε σήραγγα. Αυτό σημαίνει ότι εμφανίζονται μεταβολές στη θερμοκρασία και κατά συνέπεια και σε άλλα καταστατικά μεγέθη μέσα στη σήραγγα. Συνεπώς, το πλέγμα πρέπει να εμφανίζει μεταβολή στην πυκνότητά του ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια της λύσης.
- Η πλεγματοποίηση πρέπει να μπορεί να ανταπεξέλθει ιδιαίτερα στο σημείο εκδήλωσης της πυρκαγιάς όπου η μεταβολή τέτοιων μεγεθών είναι οξεία.
- Η εστία της φωτιάς προσομοιώνεται ως πηγή θερμότητας που καταλαμβάνει όγκο 0.2937m^3 , σε σήραγγα συνολικού όγκου 1684m^3 . Δηλαδή απαιτείται αρκετά πυκνό πλέγμα σε χώρο που καταλαμβάνει το 0.017% του συνολικά μελετούμενου. Η αραίωσή του, συνεπώς, από κει και έπειτα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε και να διατηρείται η ομαλότητά (smoothness) του αλλά ταυτόχρονα να διατηρείται σε ανεκτά επίπεδα το μέγεθός του για να περιοριστεί στο βέλτιστο βαθμό το υπολογιστικό κόστος.
- Το πρόβλημα αφορά τρισδιάστατη προσομοίωση όπου η πηγή θερμότητας είναι όγκος που περιβάλλεται από τον όγκο της υπόλοιπης σήραγγας. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να μελετηθεί η σκοπιμότητα πύκνωσης και στις τρεις διαστάσεις.



Εικόνα 5. 4 – Γεωμετρία της σήραγγας όπως εξάγεται από το DesignModeler

Με βάση τα παραπάνω διεξήχθη μια διερεύνηση για την εύρεση του βέλτιστου πλέγματος του οποίου η μορφή επηρεάζει και τη διαμόρφωση της γεωμετρίας. Παρακάτω παρουσιάζεται η διερεύνηση αυτή καθώς και η υλοποίησή της μέσα από τα προγράμματά του ANSYS WORKBENCH για το σχεδιασμό της Γεωμετρίας (DesignModeler) και για την Πλεγματοποίηση (Meshing)

Η επιλογή να προσομοιωθεί η πυρκαγιά ως πηγή θερμότητας (volumetric heat source) επιβάλλει το σχεδιασμό της ως ξεχωριστής γεωμετρίας. Έχοντας σαν δεδομένα το εμβαδό βάσης και το ύψος έχουμε να επιλέξουμε μεταξύ δύο πιθανών γεωμετριών, αυτή του κυλίνδρου και του παραλληλεπίπεδου.



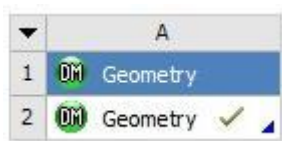
Εικόνα 5. 5 – Πιθανές γεωμετρίες για την εστία της φωτιάς

Από τη στιγμή που η σήραγγα είναι ορθογωνικής διατομής επιλέγεται το δεύτερο μιας και επιτυγχάνεται πιο εύκολα η ομαλότητα του πλέγματος.

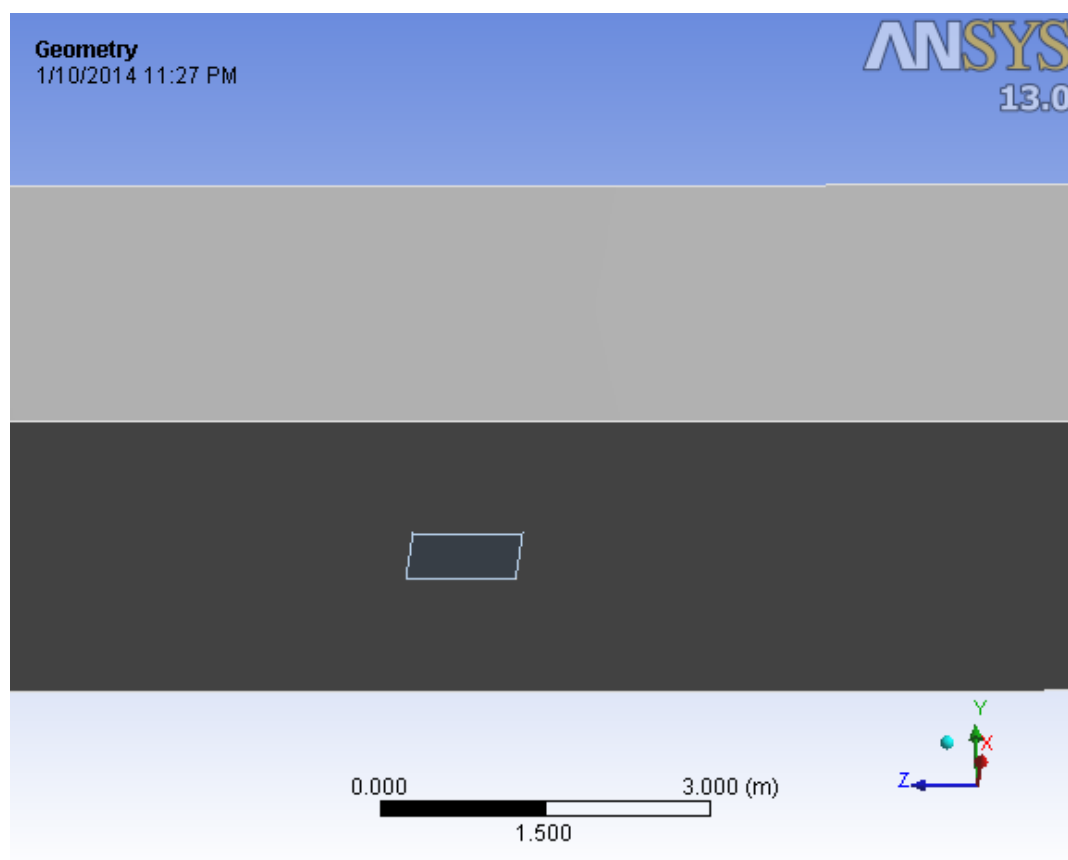
5.2.2 Διερεύνηση Πλεγμάτων

Πλέγμα 0

Διαμόρφωση Γεωμετρίας



Η πρώτη πιθανή διάταξη που μελετήθηκε περιλαμβάνει τη δημιουργία δύο γεωμετριών, της πηγής θερμότητας και της υπόλοιπης σήραγγας και πλεγματοποίηση κάθε μίας ξεχωριστά.



Εικόνα 5. 6 – Γεωμετρία στο Πλέγμα 0

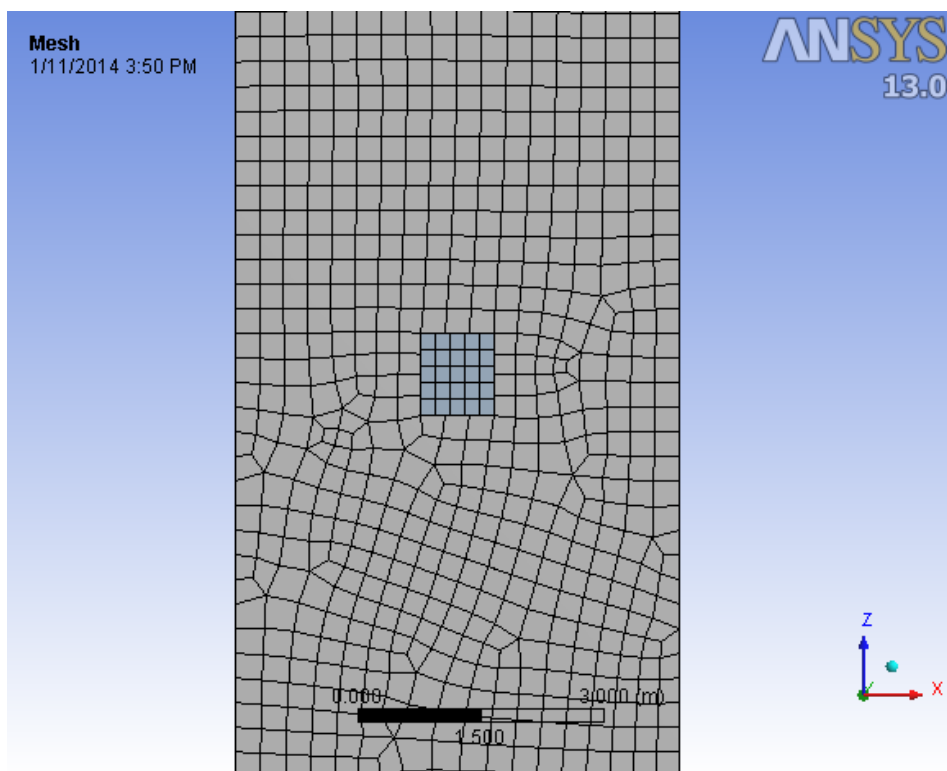
Η προσπάθεια δημιουργίας δομημένου πλέγματος απορρίπτει εξ' αρχής την περίπτωση της κατασκευής της γεωμετρίας και' αυτό τον τρόπο. Το γεγονός ότι η εστία φωτιάς έχει διατομή μικρότερη από τη σήραγγα καθιστά αδύνατη την διαμόρφωση πυκνότερου πλέγματος με τα εργαλεία του ANSYS Meshing σε αυτή, και ταυτόχρονα την διατήρησή του ως δομημένου στο σύνολο της γεωμετρίας. Ακόμη η πύκνωση που γίνεται αφορά μόνο την πηγή θερμότητας και μια πολύ μικρή περιοχή γύρω της κάτι που δεν ευνοεί καθόλου την αξιοπιστία και την ακρίβεια της λύσης.

Πλέγμα Α

Η διαδικασία της δημιουργίας πλέγματος η οποία θα αναλυθεί παρακάτω, περιλαμβάνει τον ορισμό του μεγέθους του στοιχειώδους όγκου (element size). Ο ορισμός όγκου και όχι ξεχωριστών διαστάσεων για κάθε κελί, δίνει την ευχέρεια στο πρόγραμμα να τις διαμορφώσει με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται δομημένο το πλέγμα.

Αν, για παράδειγμα, σε κομμάτι της σήραγγας με διατομή ίση με αυτή της σήραγγας, επιλέξουμε μικρότερο element size απ' ότι στην υπόλοιπη γεωμετρία, το πρόγραμμα μικραίνει τη μία διάσταση του κελιού κατά τη φορά του μήκους της σήραγγας χωρίς να πειράζει τις άλλες δύο, προκειμένου να μη δημιουργούνται στοιχεία με ελεύθερους κόμβους οι οποίοι δυσχεραίνουν τον υπολογισμό.

Στην προηγούμενη περίπτωση που εξετάστηκε, η ύπαρξη δύο γεωμετριών όπου η μία ενθυλάκωνε την άλλη, εμπόδιζε την πύκνωση κατ' αυτόν τον τρόπο και επέβαλλε την μεταβολή και των τριών διαστάσεων όπου σε συνδυασμό με την αποφυγή δημιουργίας ελεύθερων κόμβων, δημιουργούσε μια περιοχή χαμηλούς ποιότητας πλέγματος γύρω από την πηγή θερμότητας.



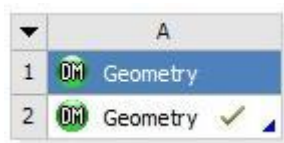
Εικόνα 5.7 – Ανωμαλίες που προκύπτουν από την πλεγματοποίηση (Πλέγμα 0)

Ο τρόπος για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό συνεπώς είναι, η υπόλοιπη σήραγγα πέραν την πηγής θερμότητας, να χωριστεί σε επιμέρους γεωμετρίες έτσι ώστε να μην

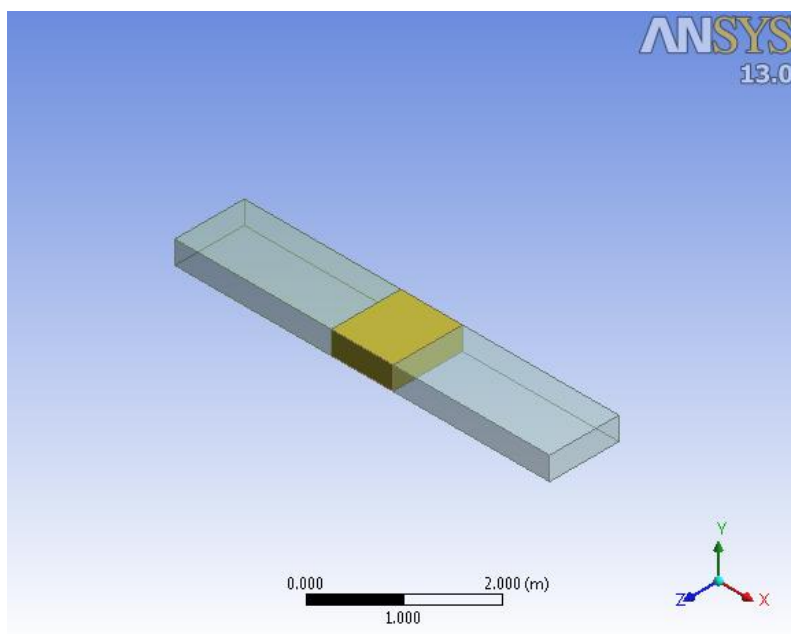
ενθυλακώνεται η πηγή και να επιτρέπεται η πύκνωση κατά τη μία διάσταση όπως εξηγήθηκε παραπάνω.

Συμπερασματικά η δεύτερη περίπτωση που ερευνήθηκε αφορά γεωμετρία που κατασκευάζεται με αυτό τον τρόπο.

Διαμόρφωση Γεωμετρίας

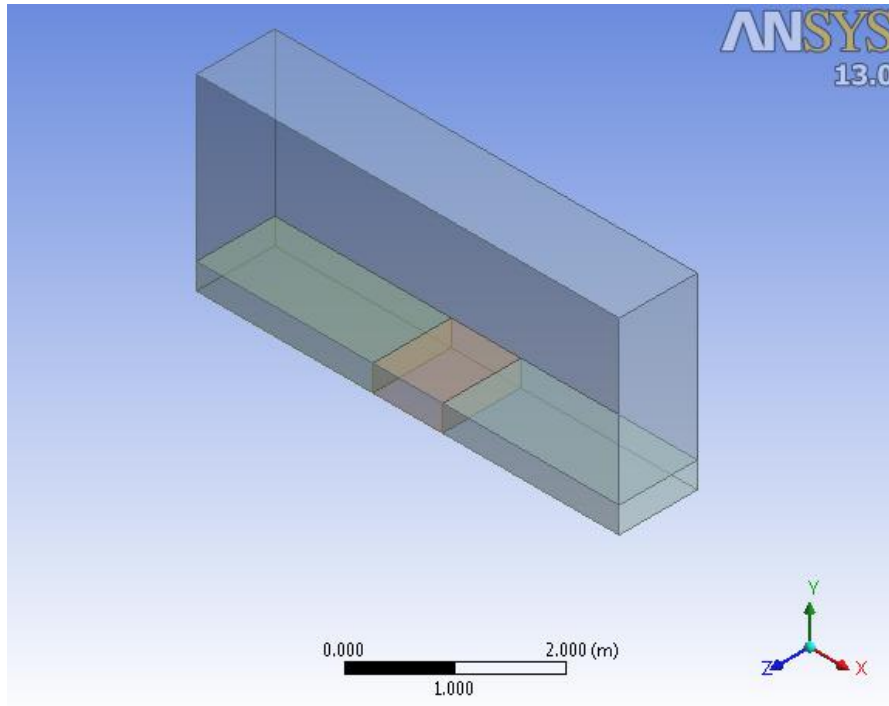


- Αρχικά σχεδιάζουμε ένα παραλληλεπίπεδο με τις διαστάσεις της φωτιάς σε απόσταση 59.5 m από την αρχή των αξόνων κατά τον άξονα z. Στη συνέχεια, σχεδιάζουμε δύο παραλληλόγραμμα, τα οποία θα εφάπτονται εκατέρωθεν με τη γεωμετρία της φωτιάς ενώ παράλληλα και τα τρία μαζί θα δίνουν το πλάτος της σήραγγας, δηλαδή 5.4 m.



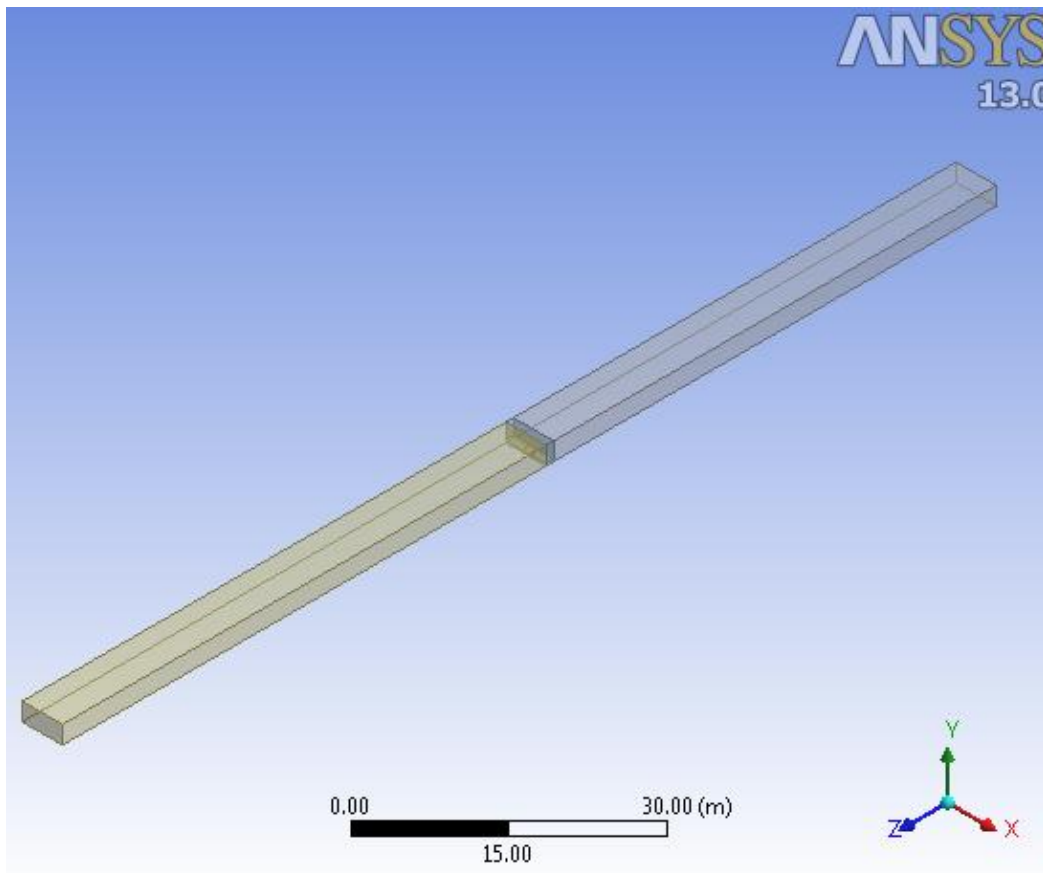
Εικόνα 5. 8 – Διαμόρφωση της Γεωμετρίας για το Πλέγμα A, βήμα 1^ο

- Το επόμενο βήμα είναι να προσθέσουμε άλλο ένα παραλληλόγραμμο, το οποίο θα εφάπτεται με τις άνω πλευρές των τριών προηγούμενων και θα δίνει το συνολικό ύψος της σήραγγας.



Εικόνα 5. 9 - Διαμόρφωση της Γεωμετρίας για το Πλέγμα Α, βήμα 2^ο

- Τέλος σχεδιάζουμε δύο παραλληλόγραμμα εκατέρωθεν των ήδη σχεδιασμένων για να πάρουμε τη συνολική σήραγγα



Εικόνα 5. 10- Διαμόρφωση της Γεωμετρίας για το Πλέγμα Α, βήμα 3^ο

Διαμόρφωση Πλέγματος



Στη μελέτη τους, οι Gao κα. (2004) εξετάζουν ένα τμήμα 90 m από τα συνολικά 130 της σήραγγας, ενώ το πλέγμα τους από τη μια άκρη ως την άλλη αποτελείται από 108416 κελιά, χρησιμοποιώντας και αυτοί με τη σειρά τους μεγαλύτερη πύκνωση στην περιοχή της φωτιάς. Η πηγή θερμότητας διακριτοποιείται σε 8 x 8 x 3 κελιά γεωμετρίας κύβου ακμής 0.11 m.

- Ενημερώνουμε το ANSYS Meshing με τη γεωμετρία που σχεδιάσαμε ενώνοντας τα κουτιά του Geometry και του Mesh στην πλατφόρμα του Workbench.
- Επιλέγουμε μέθοδο διαμόρφωσης πλέγματος. Βασική στόχευση στην πλεγματοποίηση που πραγματοποιείται είναι το πλέγμα να είναι δομημένο και να αποτελείται κατά κύριο λόγο από εξάεδρα. Αυτό γίνεται για λόγους υπολογιστικού κόστους και συγκρισιμότητας αποτελεσμάτων με αυτών του Gao μιας και αυτός χρησιμοποιεί παρεμφερές πλέγμα. Το ANSYS μας δίνει τις ακόλουθες επιλογές

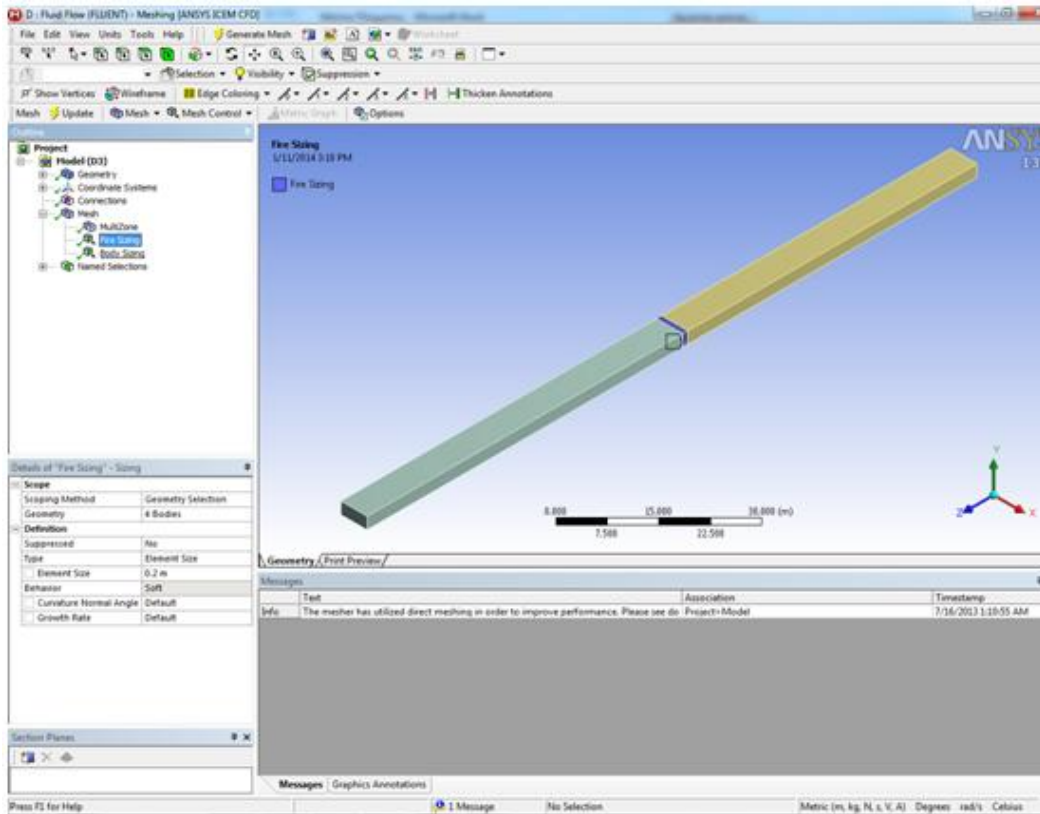
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	6 Bodies
[-] Definition	
Suppressed	No
Method	MultiZone
Mapped Mesh Type	Automatic
Free Mesh Type	Hex Dominant
Element Midside Nodes	Sweep
Src/Trg Selection	MultiZone
Source	Program Controlled

Εικόνα 5. 11

Από αυτές επιλέγουμε τη «MultiZone» και όχι την «Hex Dominant» μιας και θέλουμε μεγαλύτερη ευελιξία λόγω της ύπαρξης πολλών διακριτών γεωμετριών.

- Επιλέγουμε Μέγεθος Στοιχείου (Element Size). Σ' αυτό το σημείο ορίζεται το πόσο πυκνό θα γίνει το πλέγμα μας και ποια μορφή μακροσκοπικά θα έχει η πύκνωση.

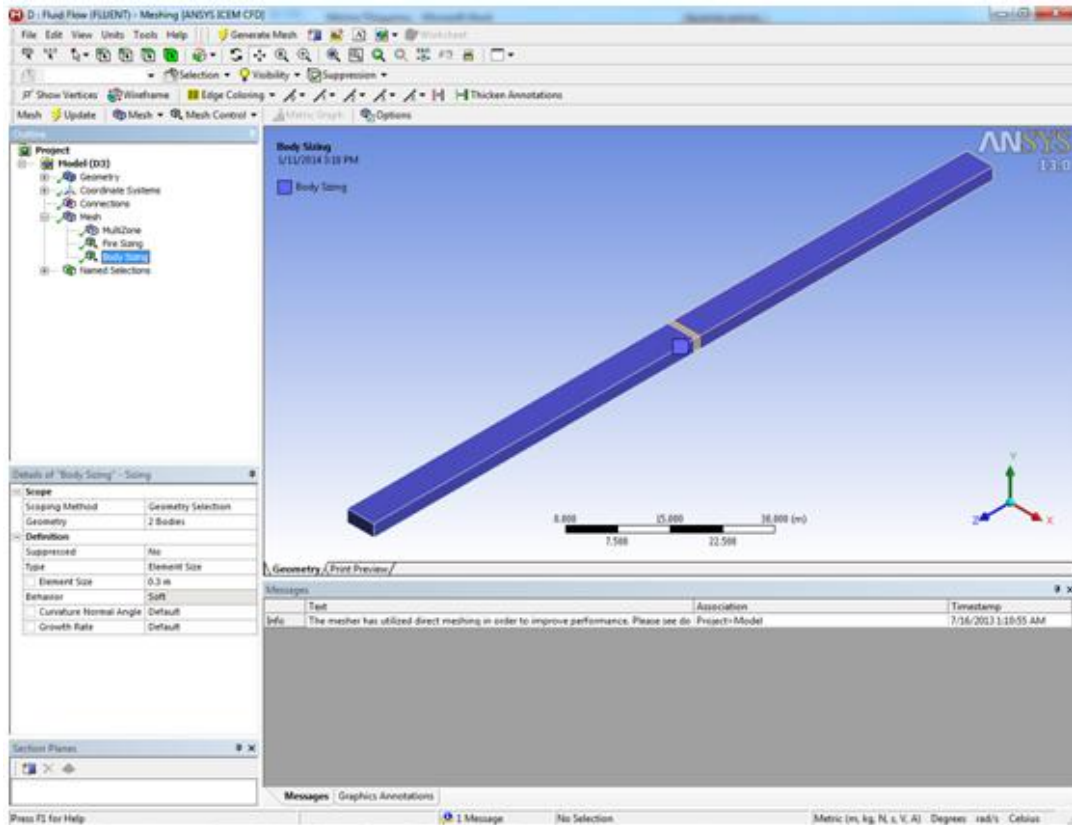
- ο Η πηγή θερμότητας και οι περιβάλλουσες γεωμετρίες της σήραγγας πλην των δύο μεγάλων παραλληλεπιπέδων, θα έχουν ενιαίο μέγεθος στοιχείου. Ρυθμίζεται αν επιλέξουμε τις γεωμετρίες και εν συνεχεία εισάγουμε το «body sizing».



Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	0.2 m
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default

Εικόνα 5. 12 – Ρύθμισεις για τα μεγέθη στοιχείων στην πλεγματοποίηση, περιοχή γύρω από την εστία

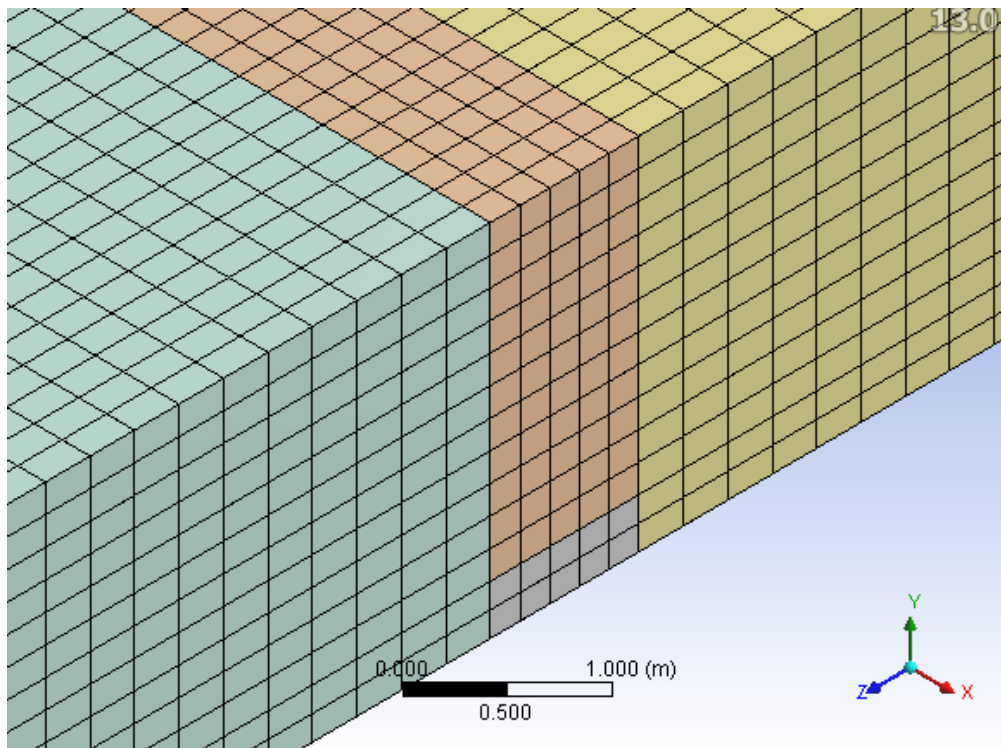
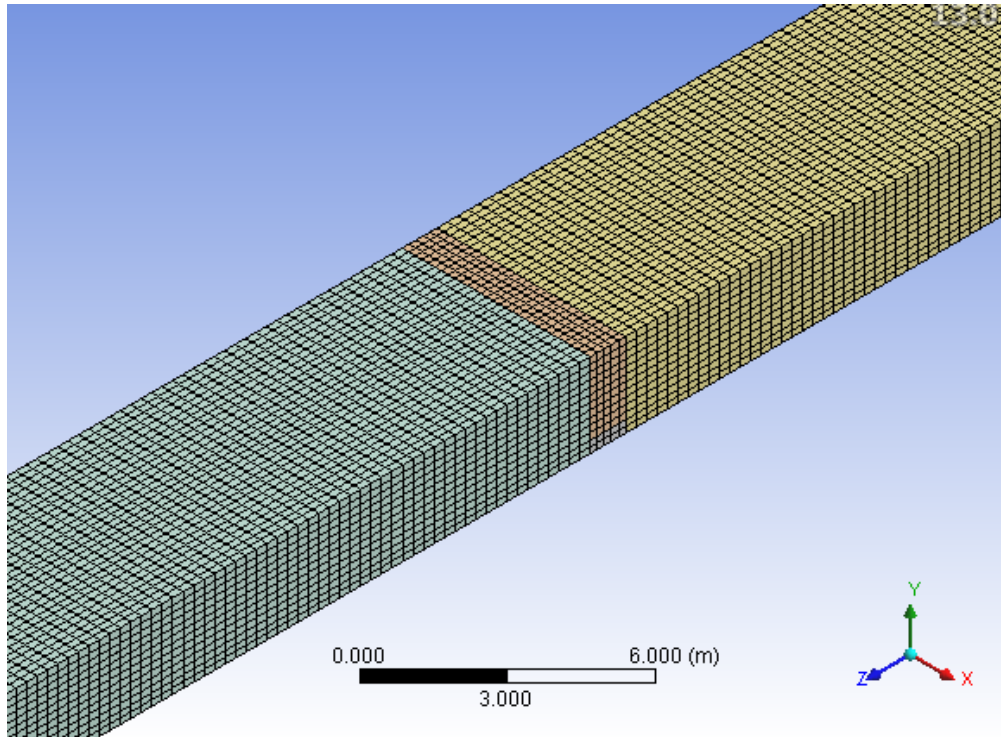
- ο Τα δύο παραλληλεπίπεδα θα έχουν μεγαλύτερο μέγεθος στοιχείου από τα υπόλοιπα για να πετύχουμε τη σχετική πύκνωση κοντά στην εστία φωτιάς. Το επιλέγω μιάμιση φορά μεγαλύτερο από αυτό της περιοχής ενδιαφέροντος.



[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Bodies
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	0.3 m
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default

Εικόνα 5. 13 - Ρύθμισεις για τα μεγέθη στοιχείων στην πλεγματοποίηση, περιοχή ένθεν και ένθεν της εστίας.

Έτσι προκύπτει η τελική διάταξη πλέγματος



Εικόνα 5. 14 – Τελική Διάταξη πλέγματος A και λεπτομέρεια πυκνώσης αυτού

Στη παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τρία πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας από αυτή τη διάταξη που ονομάστηκαν πλέγματα A.1, A.2 και A.3 με τα κάτωθι στοιχεία.

	Element size (m)		
	Πλέγμα A.1	Πλέγμα A.2	Πλέγμα A.3
Γεωμετρίες εισόδου-εξόδου	0.3	0.2	0.1875
Γεωμετρία περιοχής ενδιαφέροντος	0.2	0.15	0.125

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	177240
<input type="checkbox"/> Elements	158717
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.797751347392327
<input type="checkbox"/> Max	0.997438035375774
<input type="checkbox"/> Average	0.849018817538243
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	2.32036926224248E-02

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	394524
<input type="checkbox"/> Elements	362406
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.763915183348543
<input type="checkbox"/> Max	0.999137706323541
<input type="checkbox"/> Average	0.854291294747702
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	4.30500893972818E-02

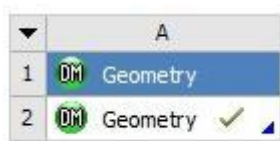
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	665238
<input type="checkbox"/> Elements	619160
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.819347833341503
<input type="checkbox"/> Max	0.998656890417382
<input type="checkbox"/> Average	0.862496078347037
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	1.98309369203456E-02

Εικόνα 5. 15 – Στοιχεία Ποιότητας για τρεις διαφορετικές πυκνώσεις στο Πλέγμα A

Πλέγμα B

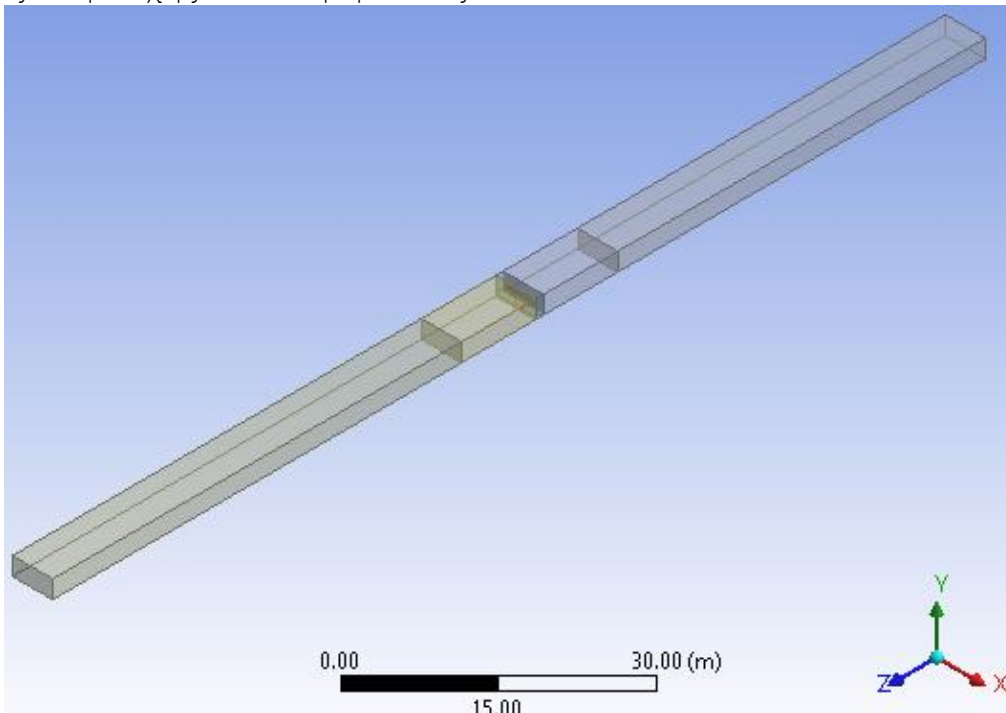
Στην προηγούμενη περίπτωση, η πυκνώση έγινε στην πηγή θερμότητας, και στο κομμάτι της σήραγγας γύρω από αυτή με μήκος όσο το μήκος της. Ωστόσο το γεγονός ότι στο πρόβλημα υπάρχει και ροή αέρα σημαίνει ότι η φλόγα έχει κλίση και συνεπώς ίσως να είναι προτιμότερο η περιοχή αυτή ενδιαφέροντος-η περιοχή δηλαδή που εμφανίζεται μεγαλύτερη πυκνότητα πλέγματος σε σχέση με την υπόλοιπη σήραγγα-να πρέπει να επεκταθεί.

Διαμόρφωση Γεωμετρίας

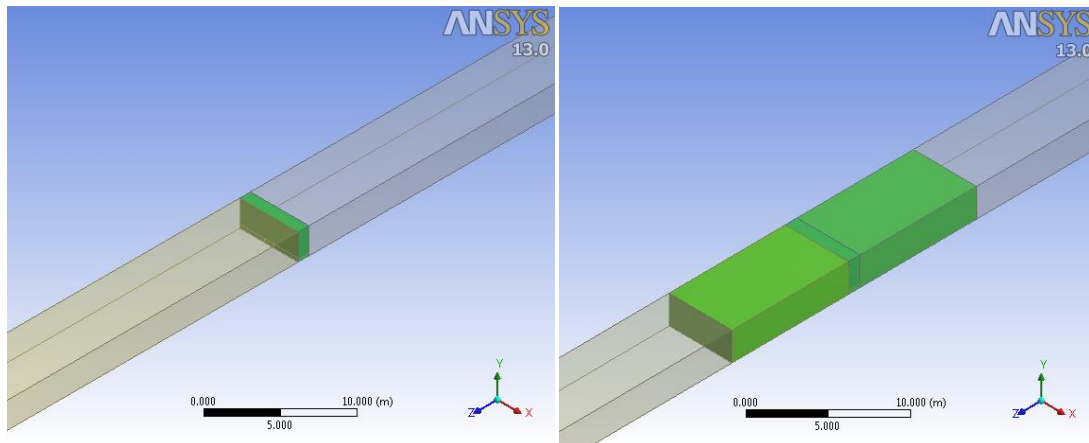


Τα βήματα που ακολουθούνται για αυτή την περίπτωση είναι παρόμοια με την προηγούμενη, μόνο που στην προηγούμενη περιοχή ενδιαφέροντος προστίθενται δύο ακόμα

παραλληλεπίπεδα διαστάσεων 10 x 5.4 x 2.4. Η γεωμετρία συμπληρώνεται με δύο ακόμα παραλληλεπίπεδα εκατέρωθεν της νέας περιοχής ενδιαφέροντος.



Εικόνα 5. 16 – Γεωμετρία για το Πλέγμα Β



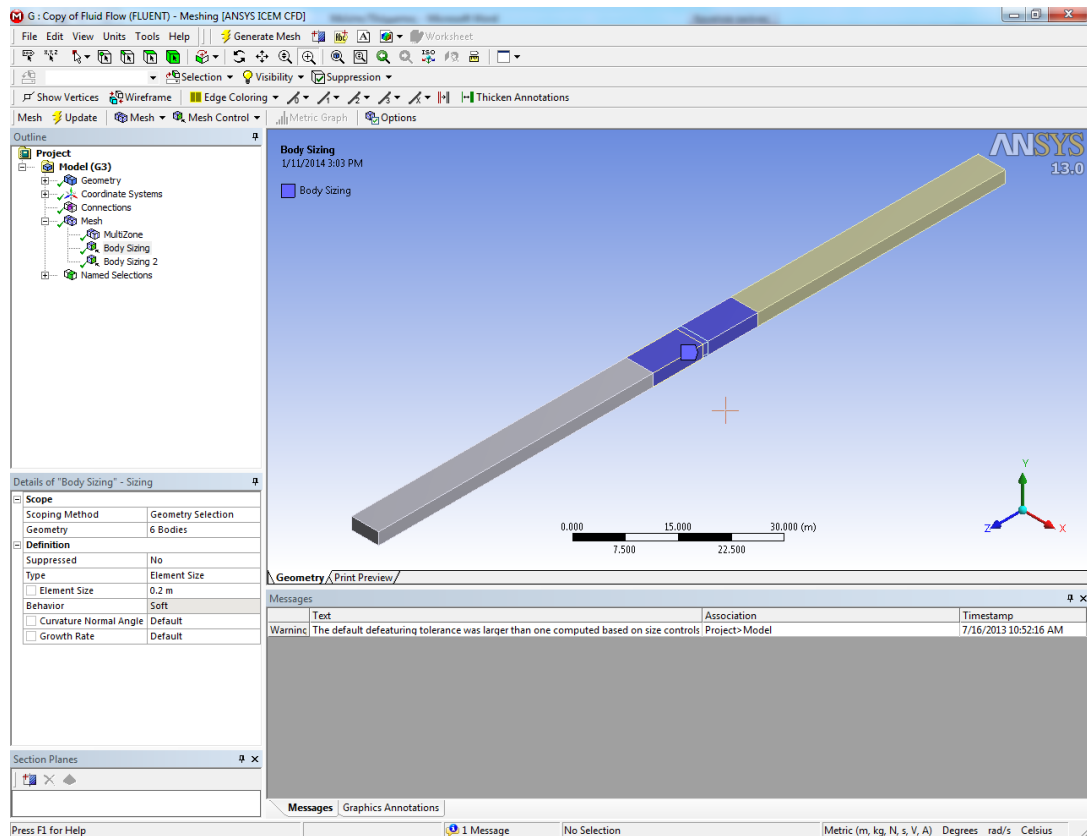
Εικόνα 5. 17 – Σύγκριση μεγέθους περιοχής γύρω από τη φωτιά ανάμεσα σε πλέγμα Α (αριστερά) και Πλέγμα Β (δεξιά)

Διαμόρφωση Πλέγματος

K	
1	Mesh
2	Geometry ✓
3	Mesh ✓

Η διαμόρφωση του πλέγματος γίνεται με παρόμοιο τρόπο με πριν μόνο που πλέον επιλέγουμε το μικρότερο element size για την επαυξημένη περιοχή ενδιαφέροντος. Έτσι έχουμε:

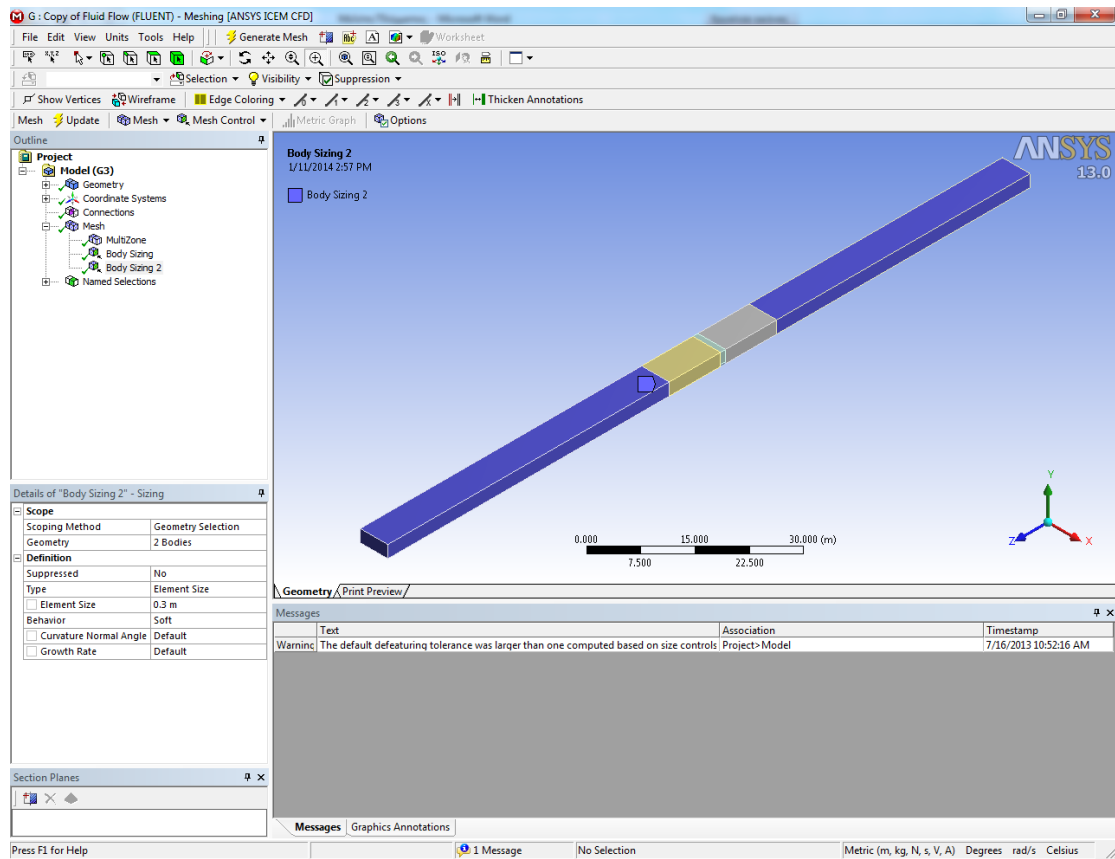
- Επιλέγουμε element size για τη νέα περιοχή ενδιαφέροντος, επιλέγοντάς την και εισάγοντας την εντολή «body sizing».



Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	6 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	0.2 m
Behavior	
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default

Εικόνα 5. 18 - Ρύθμισεις για τα μεγέθη στοιχείων στην πλεγματοποίηση, περιοχή γύρω από την εστία

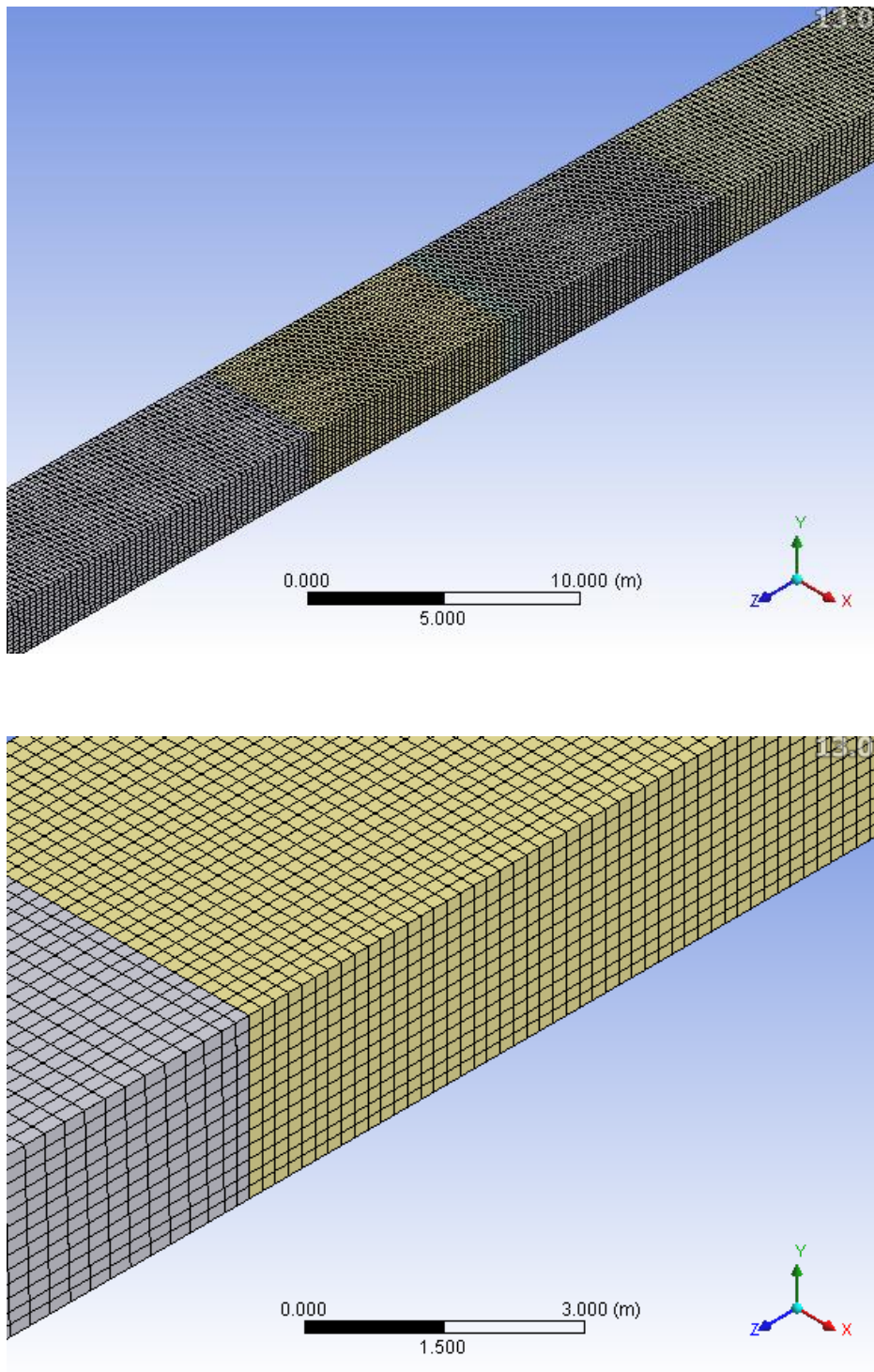
- Δίνουμε element size και για τις υπόλοιπες γεωμετρίες



Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	0.3 m
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default

Εικόνα 5. 19 - Ρύθμισεις για τα μεγέθη στοιχείων στην πλεγματοποίηση, περιοχή ένθεν και ένθεν της εστίας

Έτσι προκύπτει η τελική διάταξη πλέγματος



Εικόνα 5. 20 - Τελική Διάταξη πλέγματος B και λεπτομέρεια πύκνωσης αυτού

Γι' αυτή τη διάταξη δημιουργούμε τρία πλέγματα τα οποία ονομάζουμε πλέγματα B.1, B.2, B.3. Τα «element size» για τα τρία αυτά πλέγματα είναι τα ίδια με τα πλέγματα της διάταξης A μόνο που το γεγονός ότι έχουμε μεγαλύτερη περιοχή ενδιαφέροντος διαφοροποιεί τα στοιχεία αυτών σε

σχέση με τα προηγούμενα. Έτσι τα χαρακτηριστικά τους είναι τα εξής

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	189840
<input type="checkbox"/> Elements	170027
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.787753620962659
<input type="checkbox"/> Max	0.99996965471595
<input type="checkbox"/> Average	0.87667949213063
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	6.84579456360577E-02

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	426816
<input type="checkbox"/> Elements	392122
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.761171445512288
<input type="checkbox"/> Max	0.999954297141343
<input type="checkbox"/> Average	0.884658604896792
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	6.96931163218403E-02

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	718536
<input type="checkbox"/> Elements	668840
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.81836268823866
<input type="checkbox"/> Max	0.999666261971061
<input type="checkbox"/> Average	0.892627122310711
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	5.91582855549243E-02

Εικόνα 5. 21 - Στοιχεία Ποιότητας για τρεις διαφορετικές πυκνώσεις στο Πλέγμα Β

Πλέγμα Γ

Μια εντελώς διαφορετική θεώρηση η οποία πρέπει να μελετηθεί αφορά την προσπάθεια πυκνώσης του πλέγματος και στις τρεις διαστάσεις και όχι μόνο κατά μήκος της σήραγγας, χωρίς όμως την αλλοίωση του δομημένου πλέγματος. Αυτό μπορεί να γίνει αν αντί για μέγεθος στοιχειώδους όγκου (element size) δίνουμε αριθμό διαμερίσεων (number of divisions), κατά μήκος, καθ' ύψος και κατά πλάτος της σήραγγας.

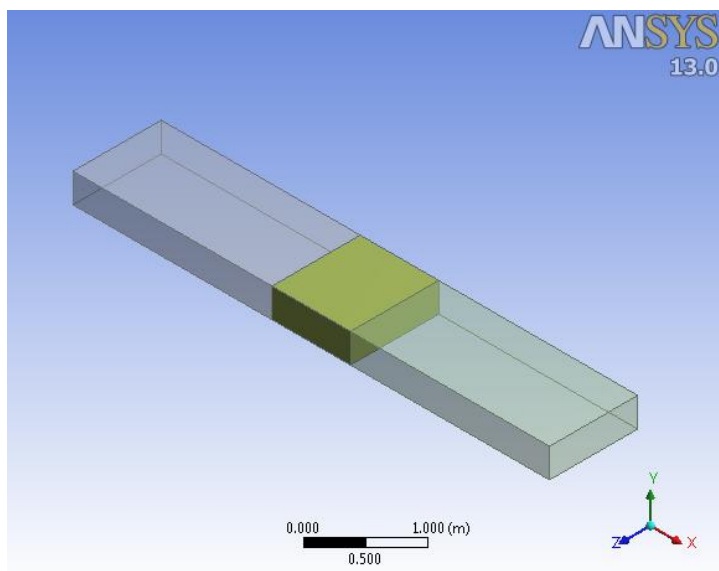
Για να γίνει αυτό πρέπει να αλλάξει η μέθοδος πλεγματοποίησης μιας και η «MultiZone» που χρησιμοποιήσαμε δεν υποστηρίζει μια τέτοια λειτουργία, αλλά και να αλλάξει η διαμόρφωση της γεωμετρίας.

Διαμόρφωση Γεωμετρίας

Για να επιτευχθεί η παραπάνω στόχευση πρέπει η γεωμετρία μας να διαχωριστεί περαιτέρω σε επιμέρους γεωμετρίες. Για λόγους πλήρους κατανόησης της νέας διάταξης θα επαναλάβουμε την διαμόρφωση της γεωμετρίας από την αρχή.

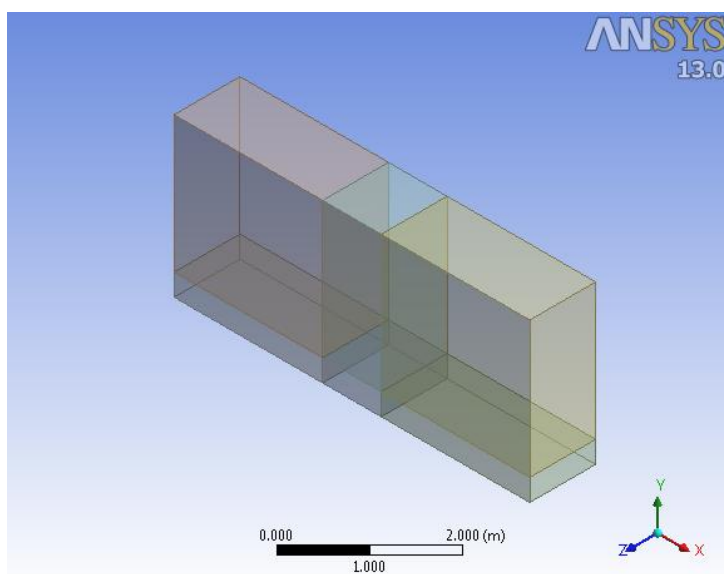
Έτσι έχουμε

- Αρχικά σχεδιάζουμε ένα παραλληλεπίπεδο με τις διαστάσεις της φωτιάς σε απόσταση 59.5 m από την αρχή των αξόνων κατά τον άξονα z. Στη συνέχεια, σχεδιάζουμε δύο παραλληλόγραμμα, τα οποία θα εφάπτονται εκατέρωθεν με τη γεωμετρία της φωτιάς ενώ παράλληλα και τα τρία μαζί θα δίνουν το πλάτος της σήραγγας, δηλαδή 5.4 m.



Εικόνα 5. 22 - Διαμόρφωση της Γεωμετρίας για το Πλέγμα Γ, βήμα 1^ο

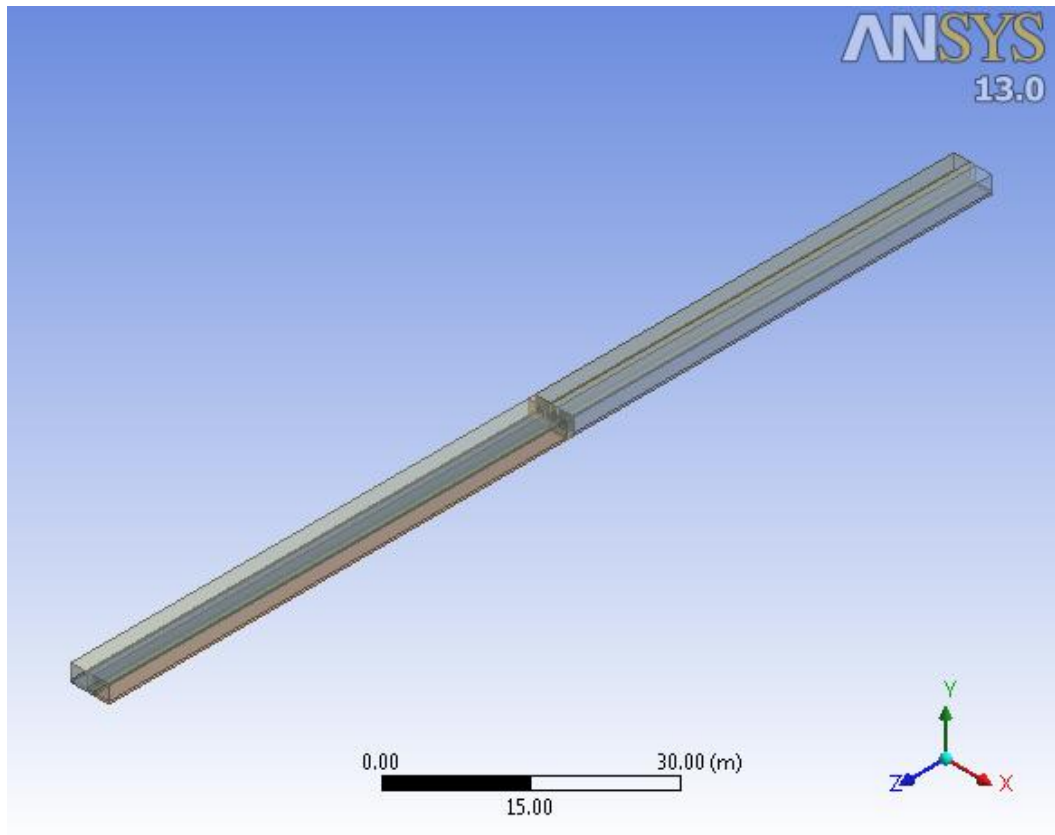
- Πάνω από ήδη σχεδιασθέν παραλληλεπίπεδο, σχεδιάζουμε ακόμη ένα έτσι ώστε να συμπληρωθούν οι διαστάσεις της διατομής της σήραγγας



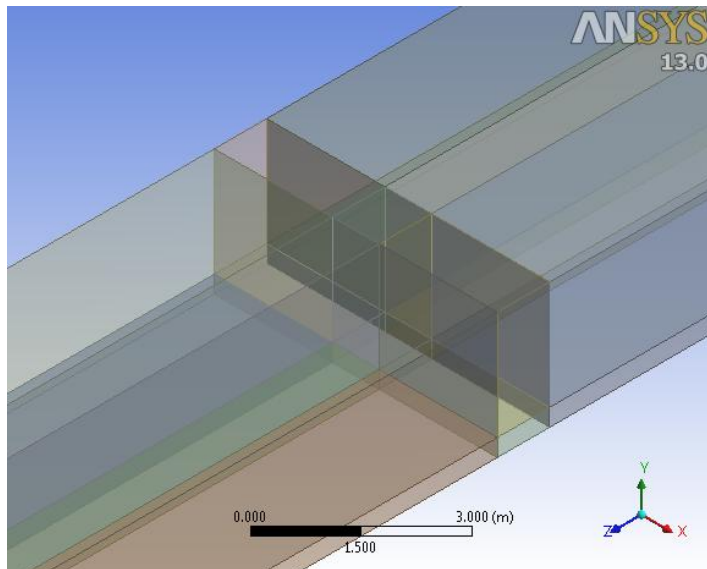
Εικόνα 5. 23 - Διαμόρφωση της Γεωμετρίας για το Πλέγμα Γ, βήμα 2^ο

- Δημιουργούμε παραλληλεπίπεδα εκατέρωθεν της ήδη σχεδιασθείσας γεωμετρίας, τα ίδια σε αριθμό και

διαστάσεις (πλάτος και ύψος) με αυτά που ήδη σχεδιάσαμε, δίνοντας τους όμως κατάλληλο μήκος έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η σήραγγα



Εικόνα 5. 24 - Διαμόρφωση της Γεωμετρίας για το Πλέγμα Γ, βήμα 3^ο



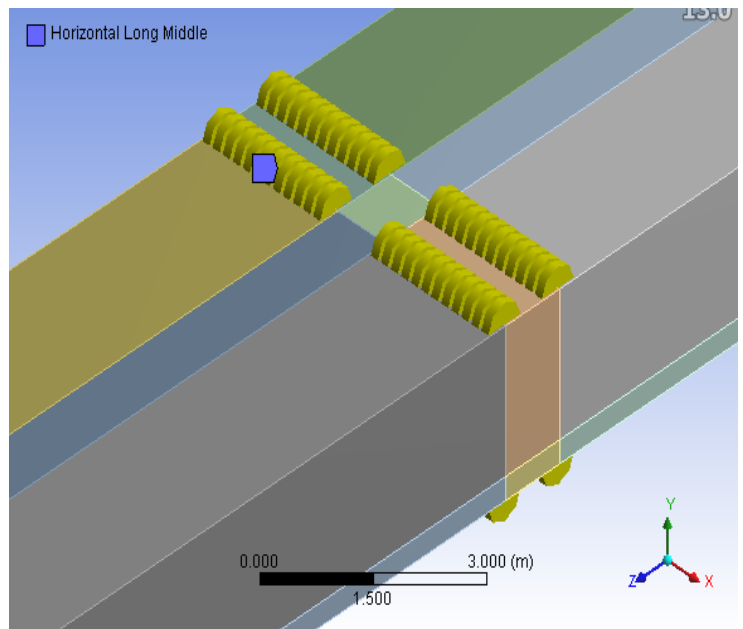
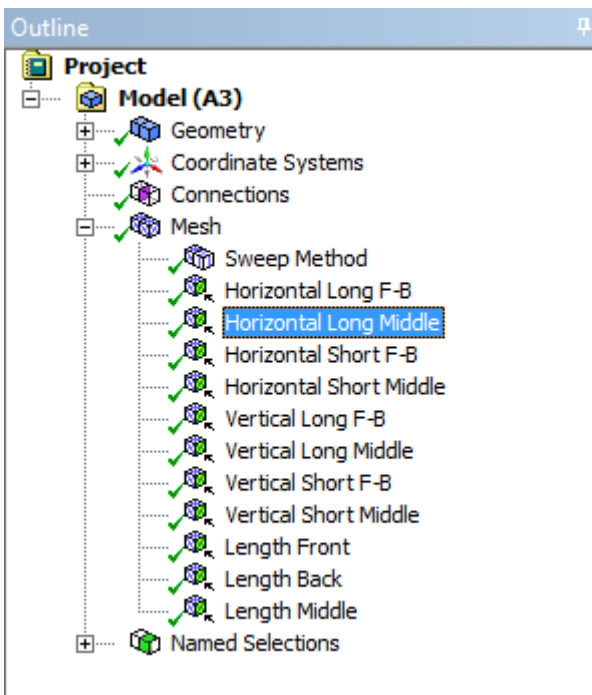
Εικόνα 5. 25 – Λεπτομέρεια Περιοχής γύρω από την εστία

Διαμόρφωση Πλέγματος



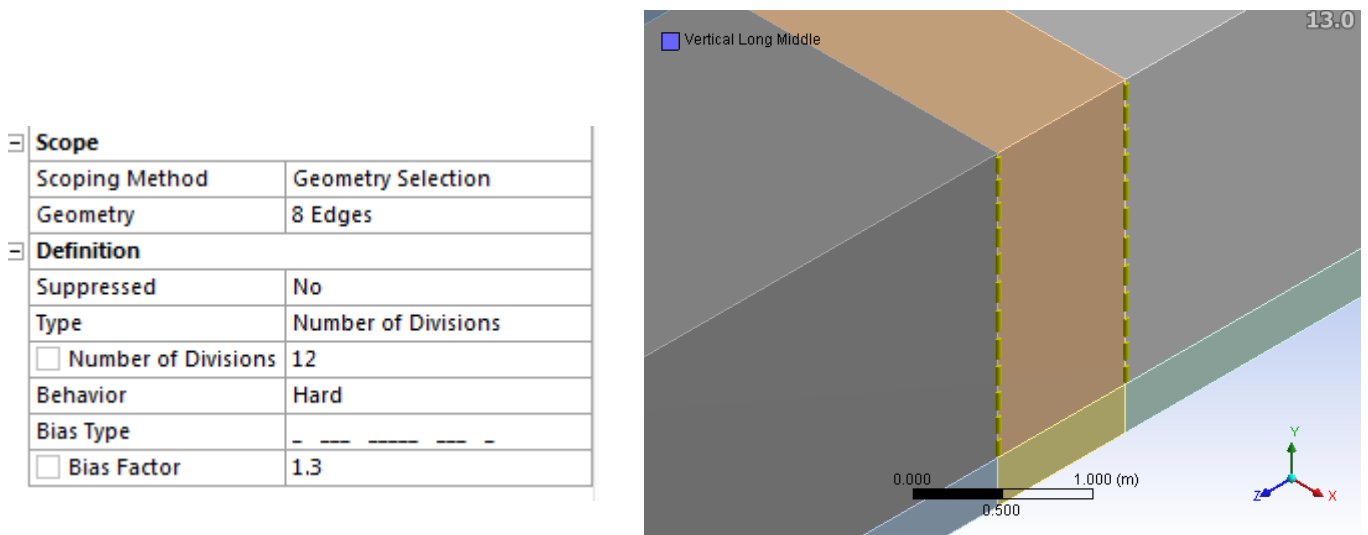
Η διαμόρφωση του πλέγματος ακολουθεί τα εξής βήματα

- Ενημερώνουμε το ANSYS Meshing με τη γεωμετρία που σχεδιάσαμε ενώνοντας τα κουτιά του Geometry και του Mesh στην πλατφόρμα του Workbench
- Επιλέγουμε μέθοδο διαμόρφωσης πλέγματος. Για να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο του ορισμού αριθμού διαμερίσεων (number of divisions) σε κάθε ακμή των επιμέρους γεωμετριών, επιλέγεται η μέθοδος «Sweep». Η μέθοδος αυτή ικανοποιεί και τις αρχικές προϋποθέσεις που τέθηκαν, δηλαδή το πλέγμα να είναι δομημένο και να αποτελείται από εξάεδρα.
- Ορίζουμε τις διαμερίσεις σε όλες τις ακμές των γεωμετριών, επιλέγοντάς τις και εισάγοντας την εντολή «edge sizing».



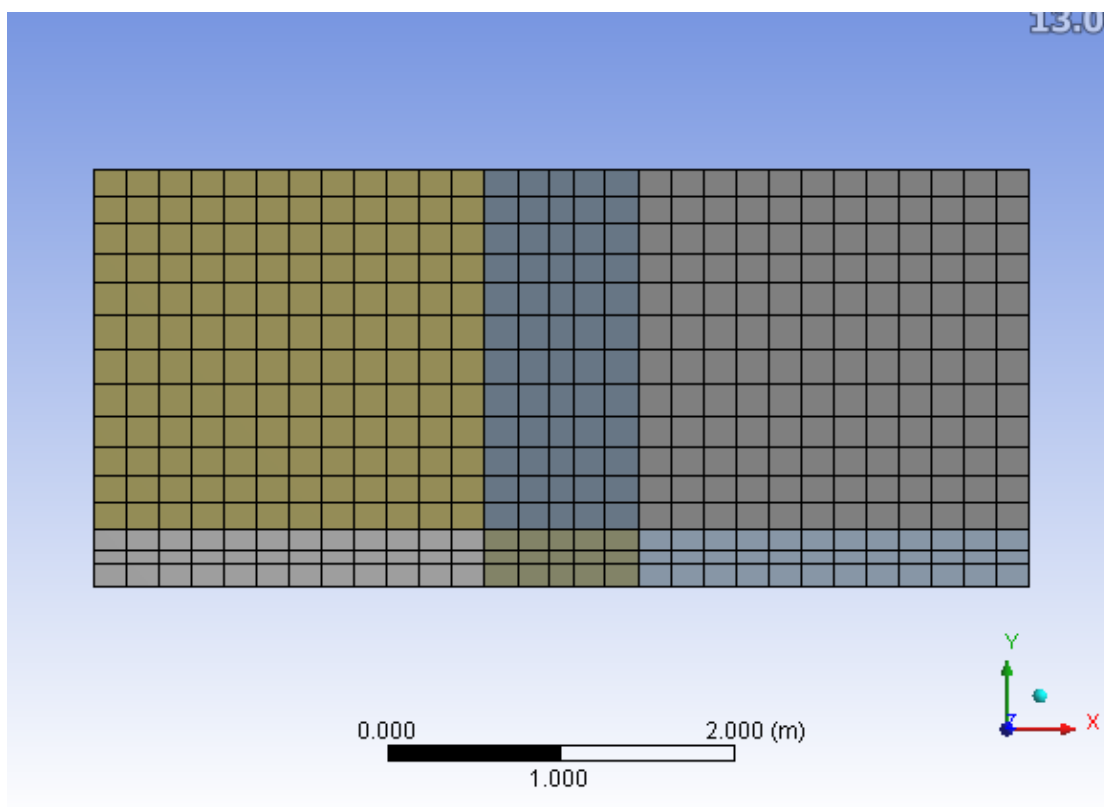
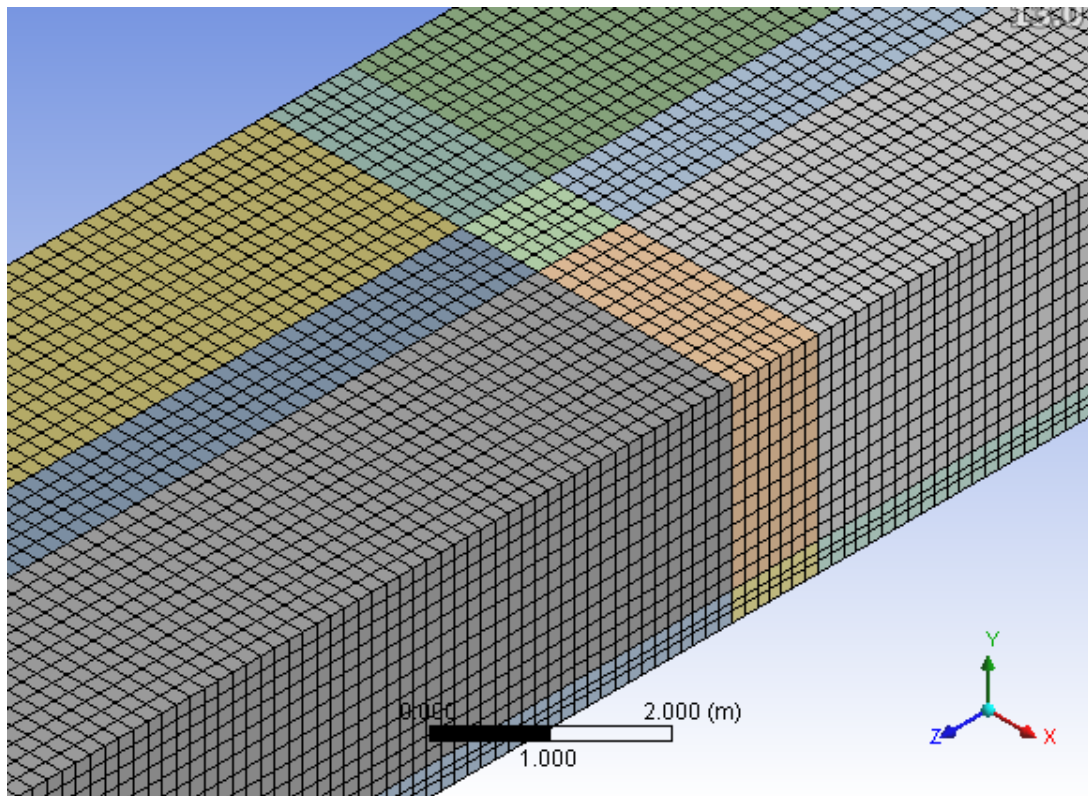
Εικόνα 5. 26 – Πύκνωση στη μία διάσταση (κατά τον άξονα x) με εφαρμογή της επιλογής «Edge Sizing»

- Μεταβάλλουμε την πυκνότητα των στοιχείων στις διαμερίσεις ανάλογα με τις ανάγκες της μελέτης. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα με αυτή τη μέθοδο δεν επιλέγουμε μόνο τον αριθμό των διαμερίσεων αλλά και τη μορφή πύκνωσης που παρουσιάζουν. Αυτό γίνεται παρεμβαίνοντας στην εντολή «Bias Type» και «Bias Factor».



Εικόνα 5. 27 - Πύκνωση στη μία διάσταση (κατά τον άξονα y) με εφαρμογή της επιλογής «Edge Sizing»

- Έτσι προκύπτει η τελική διαμόρφωση πλέγματος



Εικόνα 5. 28 – Τελική Διάταξη πλέγματος Γ και λεπτομέρεια πύκνωσης αυτού

Από αυτή δημιουργήθηκαν τρία πλέγματα τα Γ.1, Γ.2, Γ.3 με τα κάτωθι στοιχεία.

	Αριθμός διαμερίσεων			Bias Type-Bias Factor
	Πλέγμα Γ.1	Πλέγμα Γ.2	Πλέγμα Γ.3	
Κατά άξονα x				
Μέγιστη ακμή	12	15	16	
Ελάχιστη ακμή	5	8	8	----- 1.3
Κατά άξονα y				
Μέγιστη ακμή	12	15	20	- --- ----- - 1.3
Ελάχιστη ακμή	3	4	5	----- - - - - 1.5
Κατά άξονα z				
Μέγιστη ακμή	300	400	500	----- - - - - 2
Μέση ακμή	280	380	480	----- - - - - 2
Ελάχιστη ακμή	7	10	13	----- - - - - 1.2

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	282240
<input type="checkbox"/> Elements	255345
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.528639207934186
<input type="checkbox"/> Max	0.99995747258952
<input type="checkbox"/> Average	0.917937183747952
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	8.42600659320785E-02

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	616980
<input type="checkbox"/> Elements	570380
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.499021494099415
<input type="checkbox"/> Max	0.999908569769303
<input type="checkbox"/> Average	0.916608464716302
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	8.60428385177718E-02

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	1059604
<input type="checkbox"/> Elements	993000
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.549844811831876
<input type="checkbox"/> Max	0.999995918024814
<input type="checkbox"/> Average	0.893375990365776
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	8.25627360316795E-02

Εικόνα 5. 29 - Στοιχεία Ποιότητας για τρεις διαφορετικές πυκνώσεις στο Πλέγμα Γ

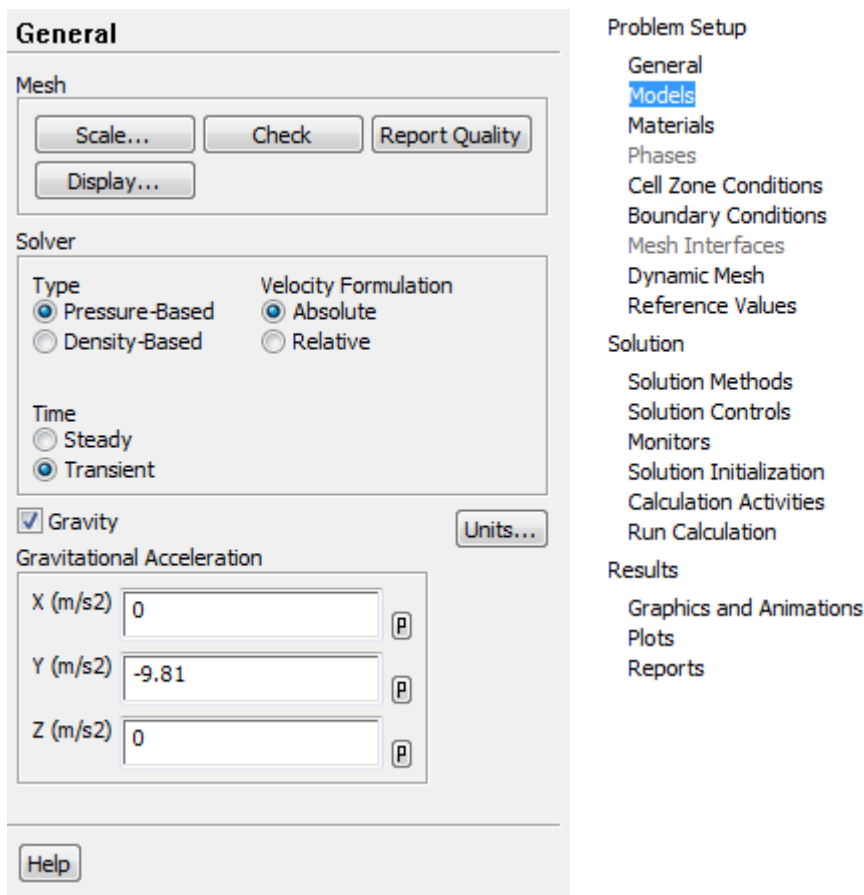
5.2.3 Διαμόρφωση Περίπτωσης στο FLUENT

Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή της κατάστρωσης του προβλήματος με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου FLUENT.

Ανοίγουμε το αντίστοιχο παράθυρο στην πλατφόρμα του Workbench και το ενώνουμε με αυτά των Geometry και Mesh έτσι ώστε να εισαχθούν οι σωστές παράμετροι για την επίλυση του προβλήματος.



Ανοίγοντας το παράθυρο του Fluent εμφανίζεται μια στήλη από επιλογές, στις οποίες αλλάζοντας τις ρυθμίσεις και θέτοντας τιμές συγκεκριμενοποιούμε τις οριακές συνθήκες, το μοντέλο τύρβης και άλλες σημαντικές παραμέτρους που θα οδηγήσουν στην αριθμητική επίλυση.

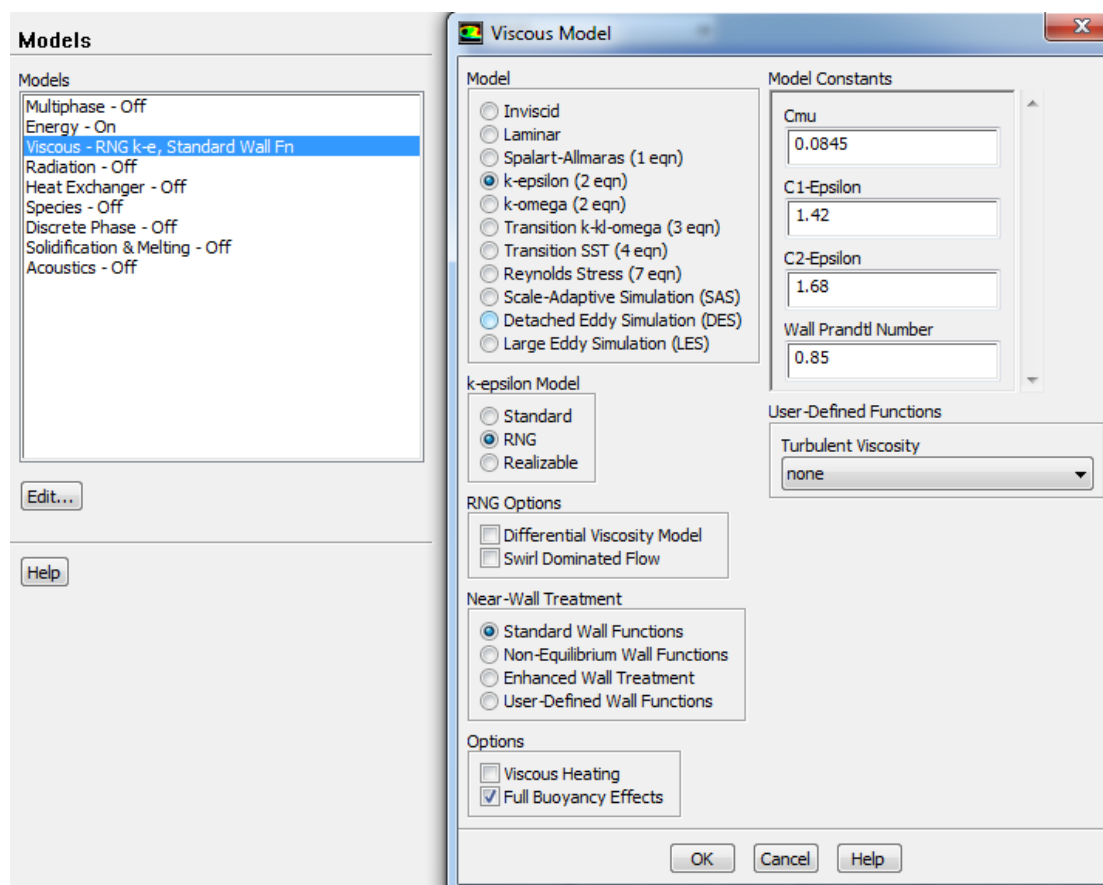


Εικόνα 5. 30 – Ενεργοποίηση Βαρύτητας στο Fluent

• Στην επιλογή «General» του Problem Setup εισάγουμε την επιτάχυνση της βαρύτητας, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ στον άξονα Y όπως είναι σχεδιασμένη η σήραγγα στη γεωμετρία μας

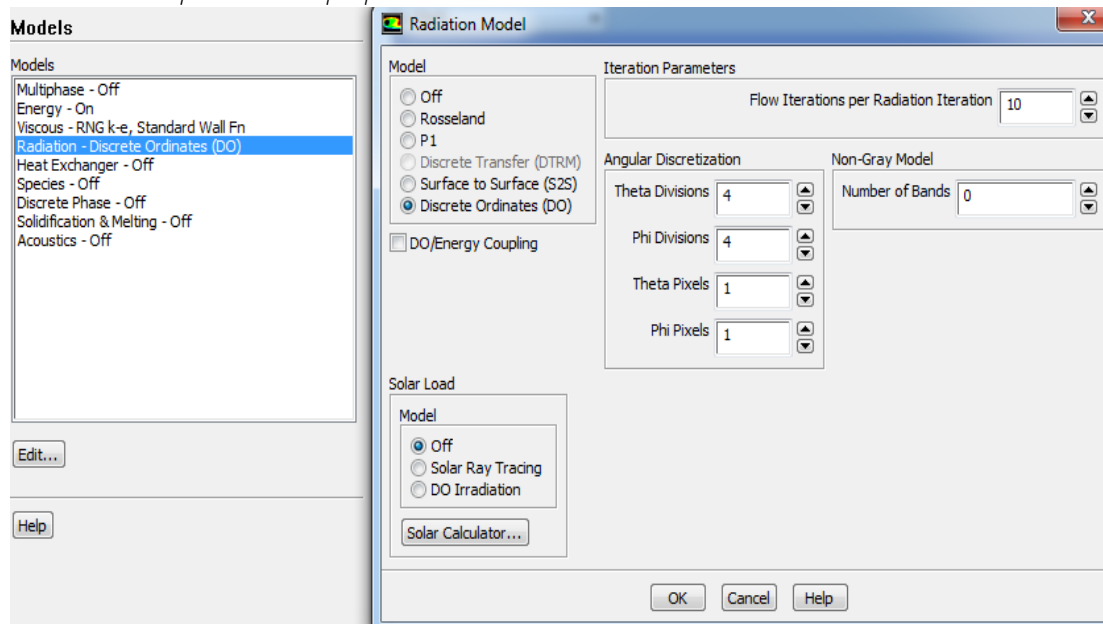
βάζοντας αρνητικό πρόσημο, λόγω αντίθετης κατεύθυνσης. Η ενεργοποίηση της βαρύτητας είναι απαραίτητη σε ροές με μεγάλες μεταβολές στην πυκνότητά λόγω θερμοκρασίας, που προκαλούν ανωστική ροή (buoyant flow). Επίσης, επιλέγουμε αν το Fluent θα υπολογίσει τη μόνιμη κατάσταση ή σε κάποιο συγκεκριμένο χρονικό σημείο. Εξετάζουμε το φαινόμενο σε διάφορα χρονικά σημεία γι' αυτό επιλέγουμε να υπολογίσουμε το φαινόμενο με την transient μέθοδο.

- Στη συνέχεια, πατώντας στην επιλογή «Models» ενεργοποιούμε την εξίσωση ενέργειας και επιλέγουμε μοντέλο τύρβης. Από τη λίστα μοντέλων τύρβης ενεργοποιούμε το μοντέλο «RNG k-epsilon». Η αρχική μας πρόθεση ήταν η χρήση του μοντέλου «realizable k-epsilon», αλλά μετά από μελέτη που θα αναλυθεί παρακάτω επιλέχθηκε η RNG μέθοδος. Τέλος, έχοντας εισάγει την επιτάχυνση της βαρύτητας εμφανίζεται η επιλογή «Full Buoyancy Effects» την οποία και ενεργοποιούμε ώστε να φανεί στα αποτελέσματα η ανωστική ροή.



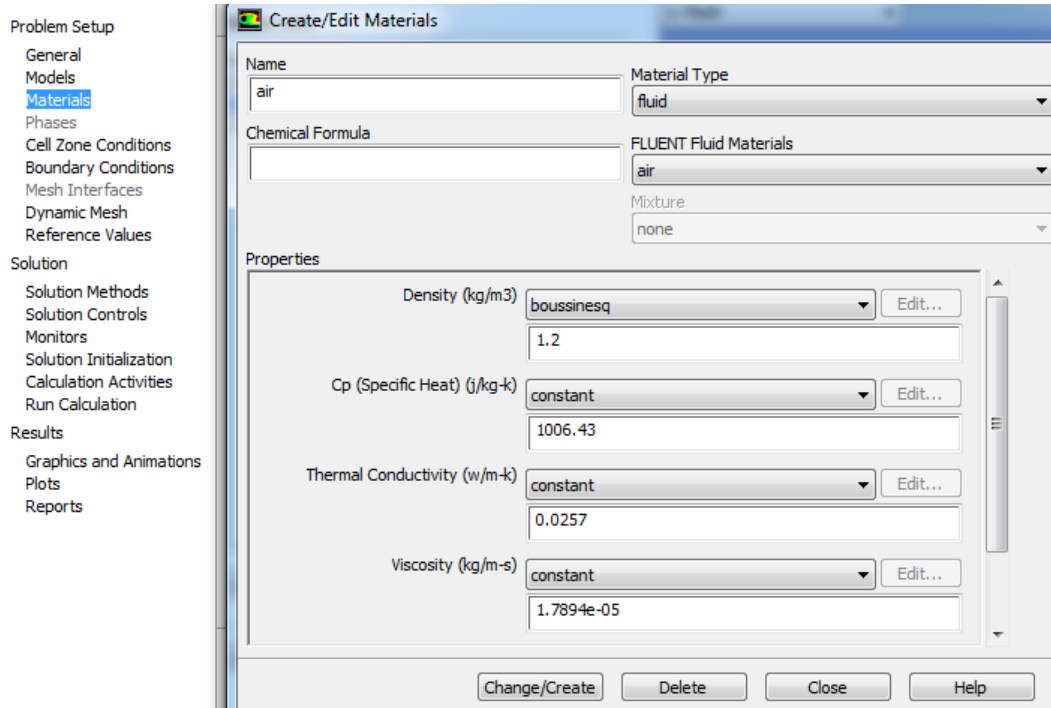
Εικόνα 5. 31 – Ενεργοποίηση μοντέλων τύρβης

Για την περίπτωση της πρόσθεσης της επίδρασης της ακτινοβολίας πρέπει να ενεργοποιηθεί και το κατάλληλο μοντέλο από την επιλογή *Radiation*. Ενεργοποιούμε συνεπώς τη μέθοδο *DOM* όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο στην επισκόπηση της μελέτης των Colomer κα., (2004). Εδώ μεταβάλλουμε και τον αριθμό των γωνιών ϕ και θ , κάτι που γίνεται για την εύρεση ανεξαρτησίας πλέγματος ως προς τη γωνιακή διακριτοποίηση.



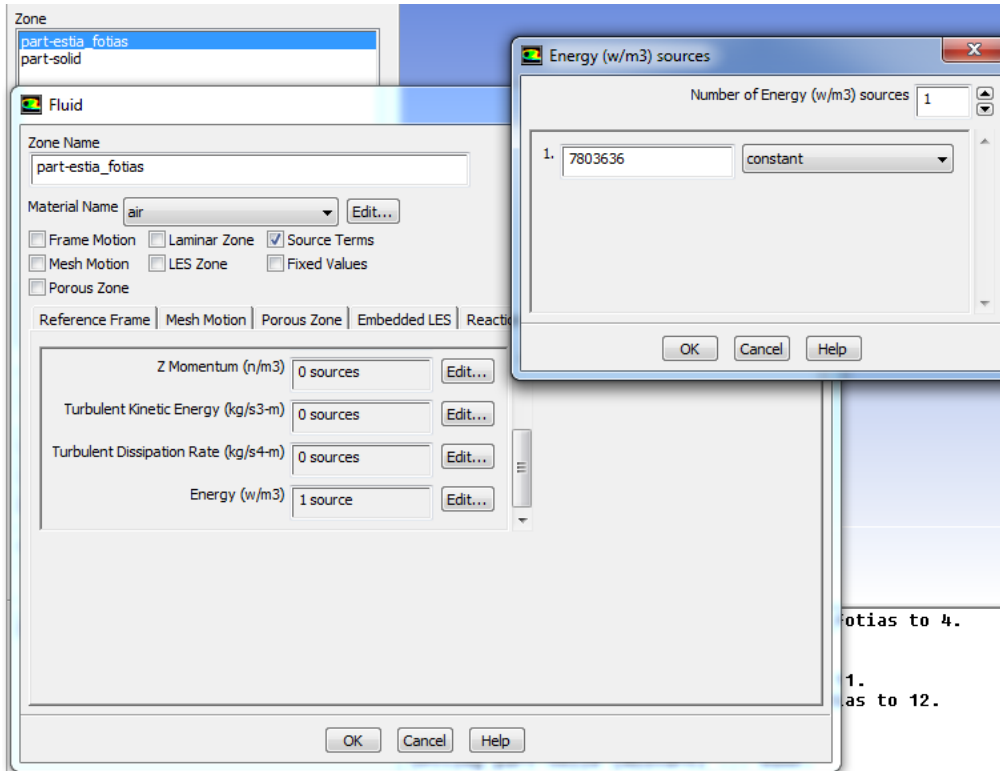
Εικόνα 5. 32 – Ενεργοποίηση μοντέλων ακτινοβολίας

Όπως αναφέρεται στην μελέτη των Ravnik κα., (2008) η ροή αερίων μπορεί να προσομοιωθεί με Boussinesq approximation. Τα υπόλοιπα μεγέθη (C_p , θερμική αγωγιμότητα, συνεκτικότητα και ο συντελεστής θερμικής διαστολής) είναι δεδομένα από τις ιδιότητες του αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



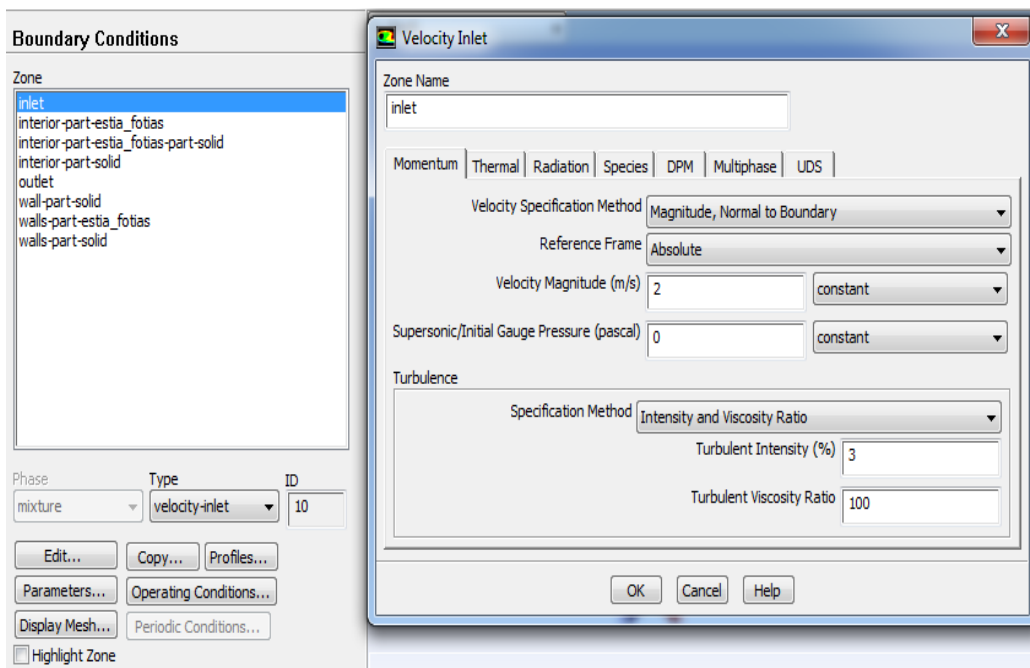
Εικόνα 5. 33 – Ρύθμιση Ιδιοτήτων εργαζόμενου μέσου

- Στη συνέχεια, θα δώσουμε τιμή στην πηγή θερμότητας ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία: Ανοίγοντας την επιλογή «Cell Zone Conditions» και επιλέγοντας το κομμάτι της πηγής θερμότητας (Part Fire) ενεργοποιούμε την επιλογή «Source Terms», ορίζουμε 1 πηγή θερμότητας και της δίνουμε σταθερή τιμή ανάλογα με την περίπτωση που μελετάμε.



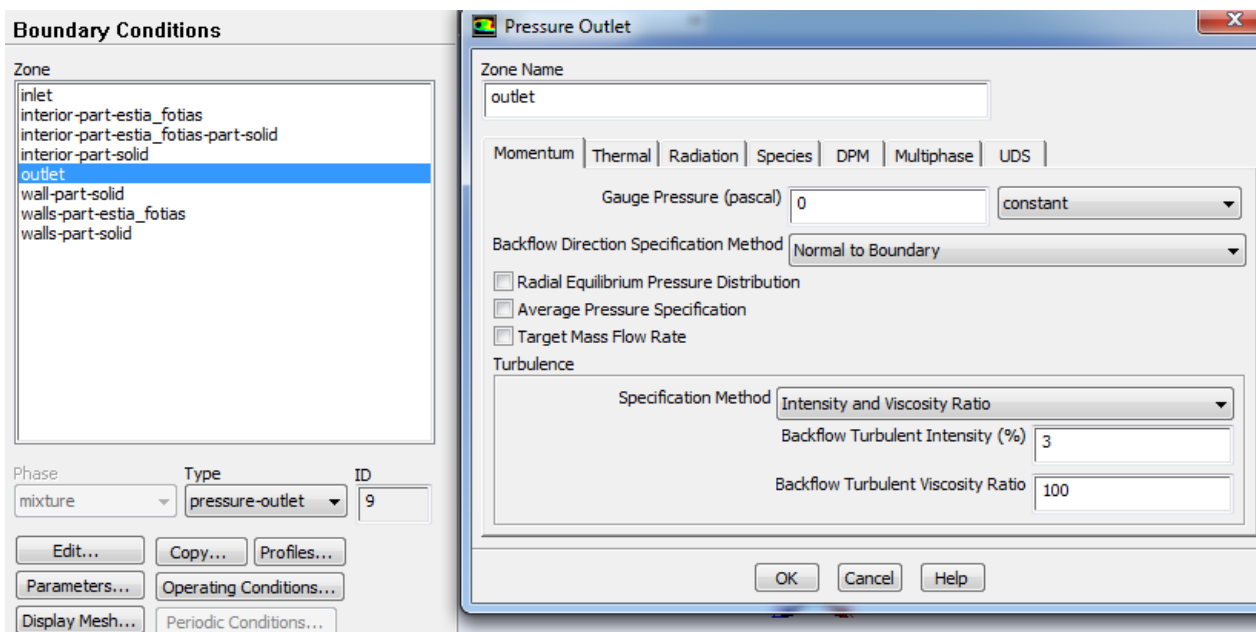
Εικόνα 5. 34 – Ενεργοποίηση πηγής θερμότητας και ρύθμιση του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας

- Στο επόμενο βήμα θα ορίσουμε τις οριακές συνθήκες (Boundary Conditions) του προβλήματος. Στις οριακές συνθήκες πρέπει να δώσουμε δεδομένα για όλα τα όρια του υπολογιστικού πεδίου.



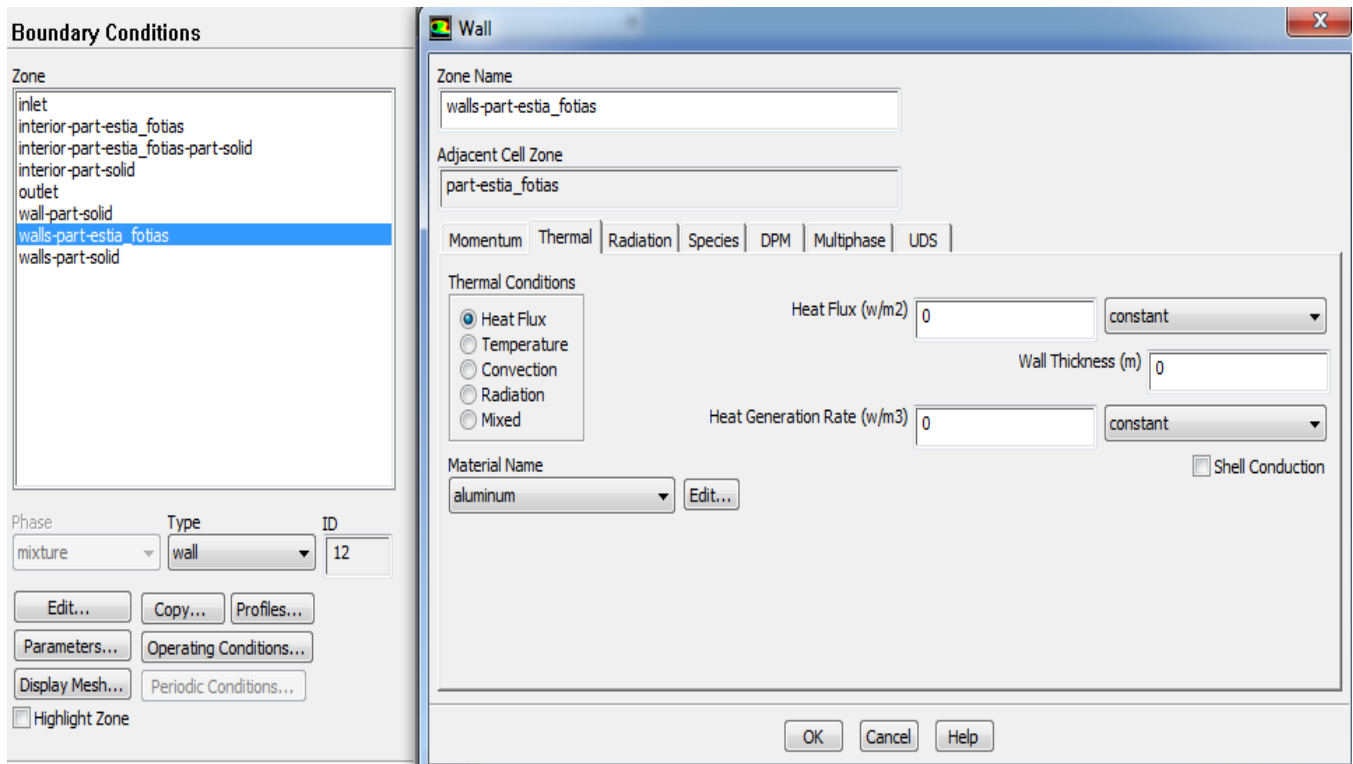
Εικόνα 5. 35 – Ρύθμιση οριακών συνθηκών για την είσοδο

- ο Για την είσοδο επιλέγουμε το «Velocity Inlet». Εισάγουμε δηλαδή ένα προφίλ ταχύτητας, όπου στην περίπτωσή μας, προσομοιώνει την παρουσία των ανεμιστήρων. Στην μελέτη των Gao κα. (2004) οι ανεμιστήρες βρίσκονται στην έξοδο, αλλά μιας και στο FLUENT δεν υπάρχει επιλογή «Velocity Outlet», αλλάζουμε το σύνορο αυτής της οριακής συνθήκης. Αφού ορίσουμε, επομένως το είδος της οριακής συνθήκης, έπειτα την επεξεργαζόμαστε με την επιλογή «Edit», βάζοντας τις κατάλληλες τιμές για την ταχύτητα (velocity magnitude) και στοιχεία της τύρβης (turbulent intensity, turbulent viscosity ratio). Για τα τελευταία οι τιμές βρίσκονται με μία χειροκίνητη επαναληπτική μέθοδο. Εισάγουμε, δηλαδή τυπικές τιμές γι' αυτά, τρέχουμε την προσομοίωση και μετά αλλάζουμε τις αρχικές τιμές σύμφωνα με τα αποτελέσματά μας.
- ο Στην έξοδο ενεργοποιούμε την επιλογή «Pressure Outlet». Επειδή από τη μελέτη των Gao κα. (2004) δεν προκύπτει πληροφορία για την πίεση στην ορίζουμε τη σχετική στατική πίεση ίση με την ατμοσφαιρική (δηλαδή «Gauge Pressure» [pascal] ίση με το μηδέν), διότι υποθέτουμε ότι η έξοδος της σήραγγας επικοινωνεί άμεσα με τον εξωτερικό αέρα.



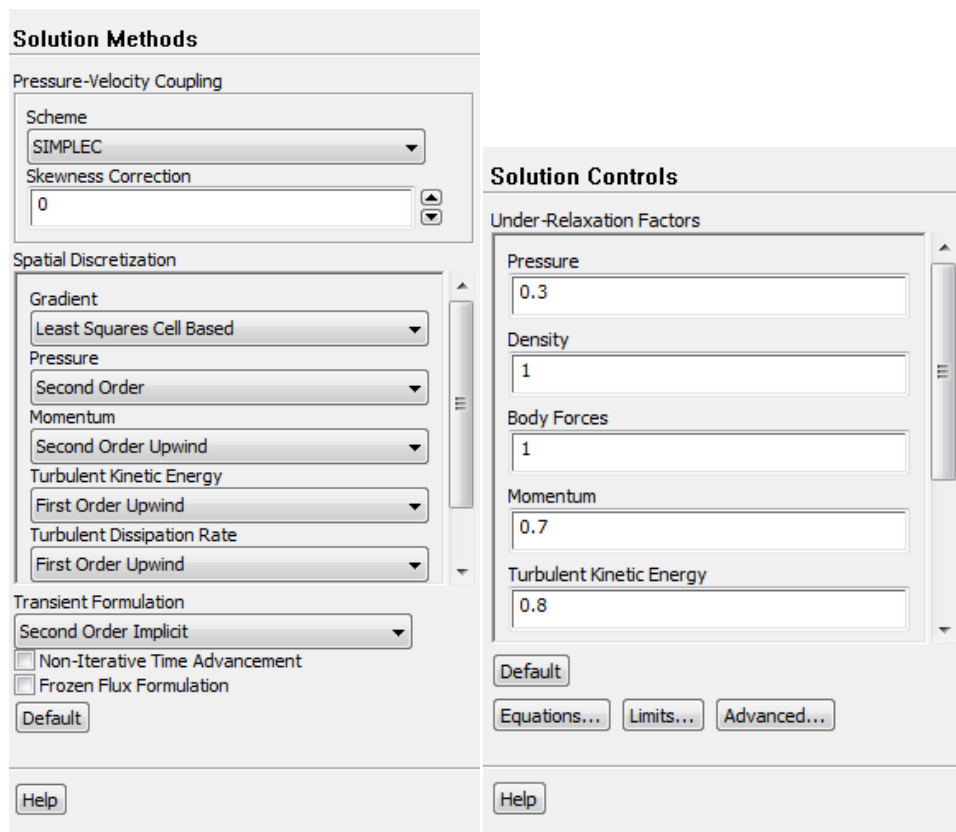
Εικόνα 5. 36 – Ρύθμιση οριακών συνθηκών για την έξοδο

- ο Θεωρούμε όλα τα τοιχώματα αδιαβατικά, επειδή η μετάδοση θερμότητας μέσω αυτών είναι αμελητέα συγκριτικά με αυτή της φωτιάς (Heat Flux=0)

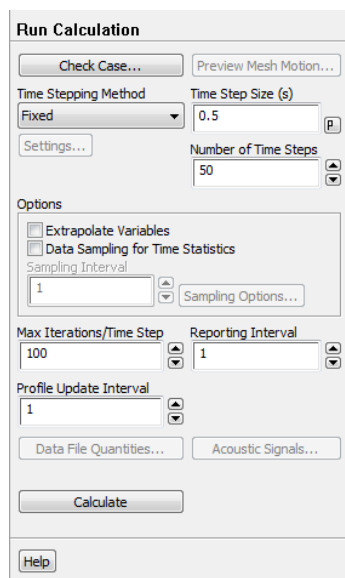


Εικόνα 5. 37 – Ρύθμιση αδιαβατικών τοιχωμάτων

- Ακολουθεί ο ορισμός των σχημάτων διακριτοποίησης και των συντελεστών υποχαλάρωσης. Όσον αφορά το πρώτο, ανοίγουμε την επιλογή «Solution Methods» και επιλέγουμε σε όλα το σχήμα «Second Order Upwind» γιατί δίνει την κατάλληλη ακρίβεια στο μεταβατικό φαινόμενο, εκτός από τα μεγέθη της Τυρβώδους Κινητικής Ενέργειας και του Τυρβώδους Ρυθμού Διάχυσης Ενέργειας, για λόγους περιορισμού του υπολογιστικού κόστους. Οι συντελεστές υποχαλάρωσης που ρυθμίζονται με την επιλογή «Solution Controls» μείνανε με τις αρχικές ρυθμίσεις καθώς γενικά χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπίζεται ο «υπολογιστικός θόρυβος» πράγμα το οποίο δεν συναντήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη.



Εικόνα 5. 38 – Προσδιορισμός συντελεστών υποχαλάρωσης

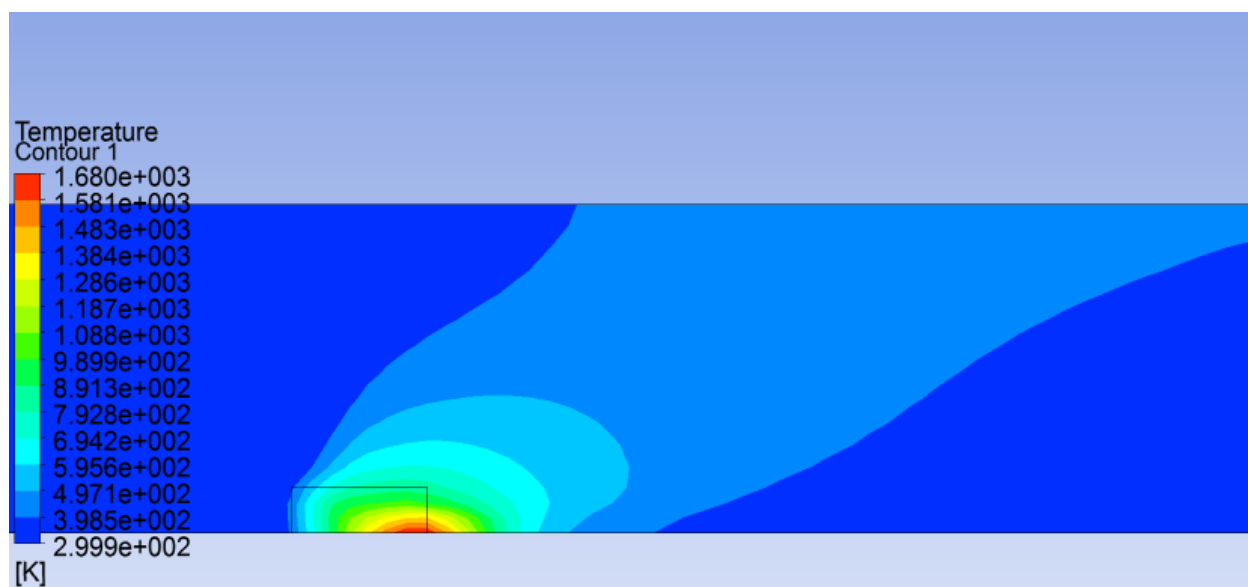


Εικόνα 5. 39 – Ορισμός χρονικού βήματος και αριθμού επαναλήψεως υπολογισμών

• Τέλος, από τη στιγμή που τρέχουμε το φαινόμενο όχι στη μόνιμη κατάσταση, αλλά και το μεταβατικό μέρος θέλοντας να εξαγάγουμε προφίλ θερμοκρασιών και ταχυτήτων για συγκεκριμένες χρονιές στιγμές πρέπει να καθορίσουμε το χρονικό βήμα, των αριθμό των επαναλήψεων ανά βήμα καθώς και τις συνολικές επαναλήψεις. Όλα αυτά ρυθμίζονται από την επιλογή «Run Calculation» .

5.2.4 Ειδικές Ρυθμίσεις Μοντέλου Τύρβης k-ε

Η μελέτη των Gao et al. (2004) χρησιμοποιεί δύο μοντέλα τύρβης, το LES και το realizable k-ε. Στην παρούσα έρευνα επιλέχθηκε κατ' αρχάς το δεύτερο για την εκτέλεση των υπολογισμών. Τα προφίλ θερμοκρασίας που εξάχθηκαν παρουσίασαν μια ιδιόμορφη συμπεριφορά. Παρά το γεγονός ότι στην πηγή θερμότητας παράγονταν πολύ υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 2000K αυτές δεν διαχέονταν με τον προσδοκώμενο τρόπο στο χώρο, αντίθετα ενθυλακώονταν σε μια περιοχή πολύ κοντά στην πηγή.

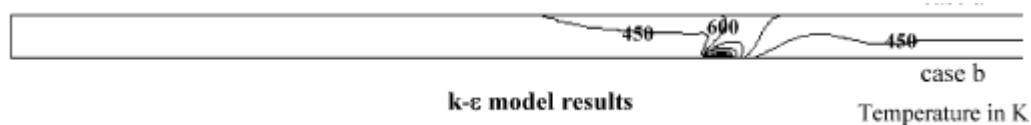


Εικόνα 5. 40 – Προσομοίωση της φωτιάς (πρόβλημα ενθυλάκωσης)



Εικόνα 5. 41 - Προσομοίωση της φωτιάς (πρόβλημα ενθυλάκωσης)

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στην μελέτη των Gao et al (2008)

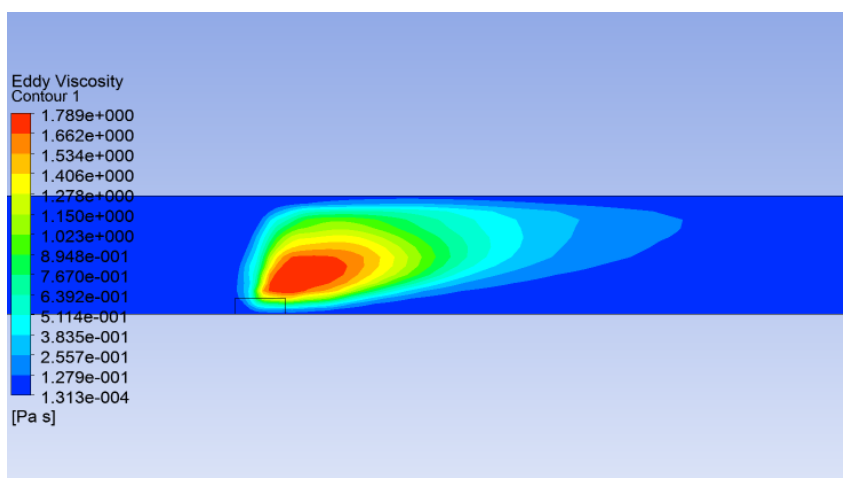


Εικόνα 5. 42 – Προσομοίωση της φωτιάς Gao et al. (2004)

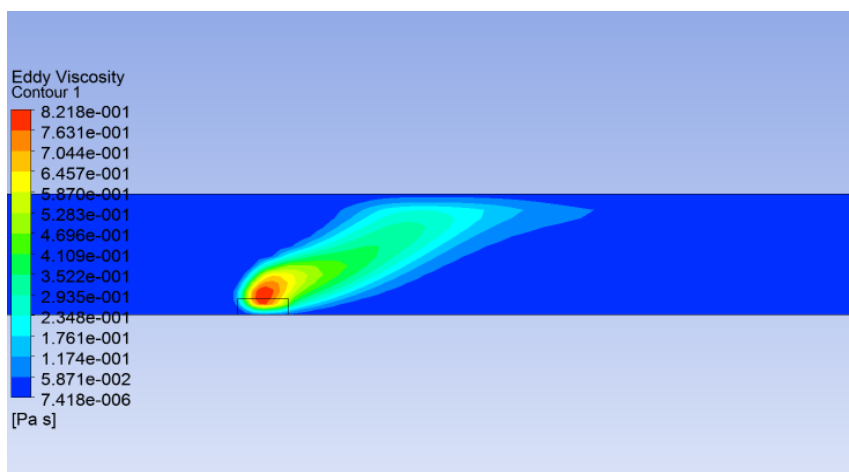
Παρατηρούμε επίσης ότι κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης εμφανίζεται μήνυμα για πολύ υψηλές τιμές του λόγου τυρβώδους μ_t προς δυναμική συνεκτικότητα μ (turbulent viscosity ratio). Όταν ο όρος αυτός είναι πολύ μεγάλος, ένα στοιχείο ρευστού δέχεται πιο εύκολα μεταφορά ορμής σε διεύθυνση παράλληλη προς αυτήν της κύριας ροής, παρά σε διεύθυνση κάθετη προς αυτή. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι οριζόντιες συνιστώσες των ταχυτήτων (ταχύτητες u) είναι πολύ μεγαλύτερες από τις κάθετες (ταχύτητες v). Η επίδραση των ανωστικών ροών στην τύρβη έχουμε δει από το θεωρητικό μέρος ότι ελέγχονται από έναν όρο τον $C_{3e} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right|$

Για $u \gg v$, ο όρος αυτός είναι πολύ μικρός κι έτσι η επίδραση των ανωστικών ροών γίνεται αμελητέα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα ακολουθήθηκαν δύο φάσεις.

- Αλλάξαμε το μοντέλο τύρβης από realizable σε RNG που είναι πιο κατάλληλο για την προσομοίωση ροών όπου εμφανίζονται ταχύτατες παραμορφώσεις (rapidly strained flows). Η διαφορά στο μέγεθος των τιμών του μ_t και στη διάχυσή τους είναι φανερή

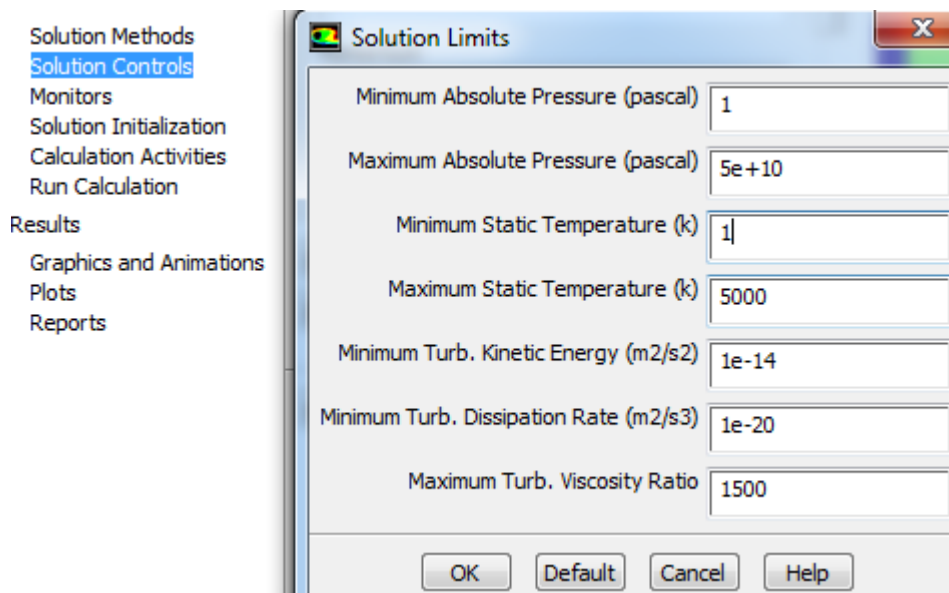


Εικόνα 5. 43 – Μέγεθος λόγου τυρβώδους προς κινηματική συνεκτικότητα στο realizable k-ε model



Εικόνα 5. 44 - Μέγεθος λόγου τυρβώδους προς κινηματική συνεκτικότητα στο RNG k-e model

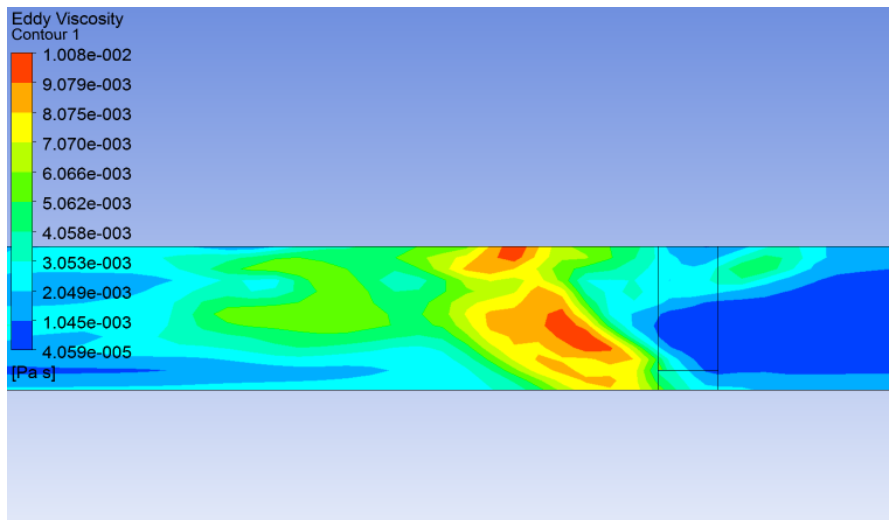
- Περιορίσαμε περαιτέρω την τιμή του λόγου τυρβώδους προς δυναμική συνεκτικότητα, θέτοντας ένα limit στο Fluent. Αυτό έγινε επιλέγοντας από την καρτέλα «General» το «Solution Controls» και εν συνεχεία το «Limits» όπου ορίσαμε άνω φράγμα στην τιμή του μ_t . Μ' αυτό τον τρόπο ουσιαστικά ελέγχεται η διαφορά ανάμεσα σε οριζόντιες και κάθετες συνιστώσες της ταχύτητας κι έτσι λαμβάνονται υπόψη οι ανωστικές ροές στην διάχυση των μεταβολών στα μεγέθη.



Εικόνα 5. 45 – Ορισμός ορίων για την επίλυση

Η τιμή που επιλέχθηκε ως όριο ορίστηκε ως εξής. Υλοποιήθηκε μια προσομοίωση της εξεταζόμενης περίπτωσης με χρήση του μοντέλου LES, του οποίου η χρήση από τους Gao et al. δε δημιούργησε τα ανωτέρω

προβλήματα και εξήχθη η τιμή για το μ_t/μ . Έτσι το όριο τέθηκε στο 1500.



Εικόνα 5. 46 – Σχηματισμός και μέγεθος λόγου τυρβώδους προς κινηματική συνεκτικότητα στο LES model

Κεφάλαιο 6°

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την μελέτη της κίνησης του καπνού εντός αεριζόμενης σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς υπό την επίδραση του φαινομένου της συναγωγής θερμότητας αλλά και της σύζευξης επίδρασης συναγωγής και ακτινοβολίας.

Προηγουμένως αναλύθηκε η διαμόρφωση της γεωμετρίας, η πλεγματοποίηση και η κατάστρωση της προσομοίωσης στο υπολογιστικό πακέτο ANSYS FLUENT. Από τη μελέτη πλέγματος που έγινε προέκυψαν τρεις πιθανές διατάξεις, ενώ επιλέχθηκε το μοντέλο τύρβης RNG k-ε, αντί για το realizable k-ε. Συνεπώς, πριν παρουσιαστούν τα τελικά αποτελέσματα, κρίνεται απαραίτητο να αναλυθεί ποια διάταξη πλέγματος επιλέχθηκε από τις τρεις για την μελέτη μας.

6.1 Εκλογή Πλέγματος

Η μελέτη των Gao et al (2004). που αφορά την περίπτωση της επίδρασης μόνο της συναγωγής θερμότητας, έγινε για τρεις διαφορετικές ταχύτητες εξαερισμού σήραγγας (cases a, b, c) 0.5m/s, 0.85m/s, 2m/s αντίστοιχα.

Όταν χρησιμοποιείται μοντέλο k-ε για την τρίτη περίπτωση εξαερισμού (case c) των 2m/s, υπάρχει σύγκλιση στη μελέτη μόνιμης κατάστασης. Αντίθετα για τις δύο πρώτες περιπτώσεις (cases a, b) των 0.5m/s και 0.85m/s αντίστοιχα, εμφανίζεται μεγάλη οπισθορόη που κάνει την σύγκλιση πολύ δύσκολη. Σ' αυτή την περίπτωση, χρειάζεται να επιλεχθούν οι κατάλληλοι συντελεστές υποχαλάρωσης για να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος [Gao et al. (2004)].

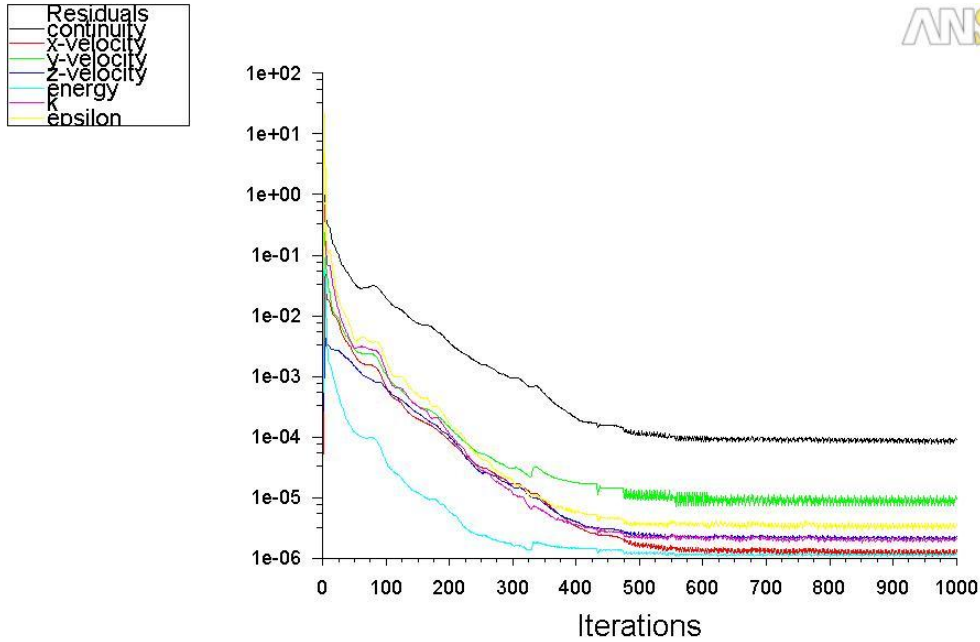
Γενικά, σε μια προσομοίωση μπορεί να εμφανιστεί πρόβλημα σύγκλισης σε αποδεκτή λύση, δηλαδή οι καμπύλες residuals να μην πέφτουν κάτω από αποδεκτά όρια. Αντίθετα, παρατηρείται, αυτές να εμφανίζουν ταλαντωτική συμπεριφορά. Τέτοιο φαινόμενο εμφανίστηκε στην παρούσα εργασία ιδιαίτερα έντονα όσον αφορά τις δύο πρώτες περιπτώσεις μελέτης (case a, b). Για να αντιμετωπιστεί κάτι τέτοιο, όπως ανέφεραν και οι Gao et al. (2004), πρέπει να μεταβληθούν οι συντελεστές υποχαλάρωσης. Κατά τη διερεύνηση για την εκλογή πλέγματος όμως κάτι τέτοιο δεν έγινε, καθώς η πρόθεσή μας και κριτήριο επιλεξιμότητας του τελικού πλέγματος ήταν το πόσο καλά αυτό ανταπεξέρχεται στις δυσμενείς αυτές περιπτώσεις, χωρίς τεχνητές παρεμβάσεις που διευκολύνουν τη σύγκλιση.

Συνεπώς προσομοιώθηκαν οι περιπτώσεις ταχύτητας εξαερισμού 0.85m/s και 2m/s στη μόνιμη κατάσταση και εξάχθηκαν οι καμπύλες

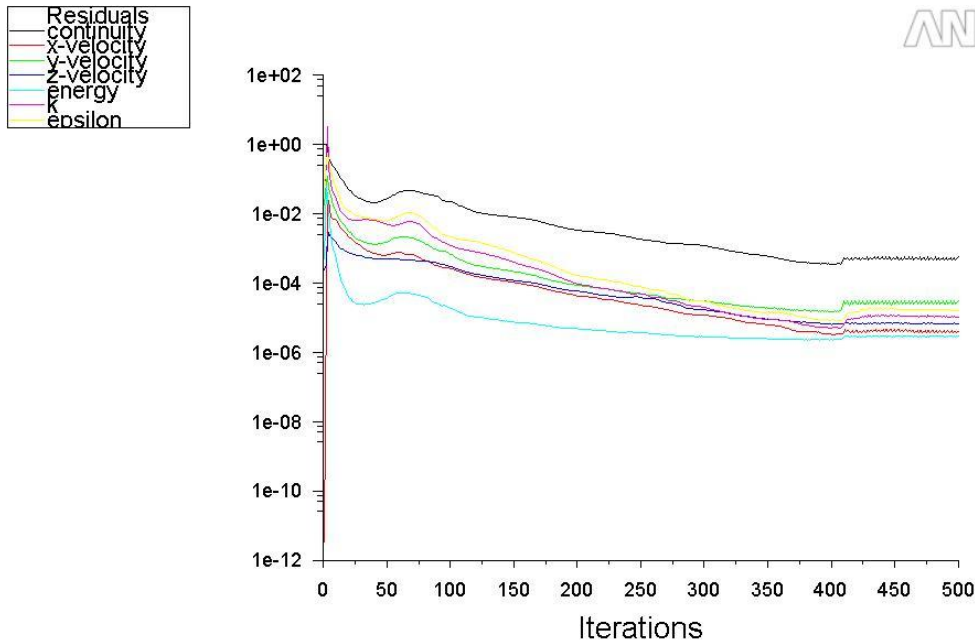
residuals, για τις τρεις διατάξεις πλέγματος, με δύο διαφορετικές πυκνώσεις η κάθε μια τους.

CASE C

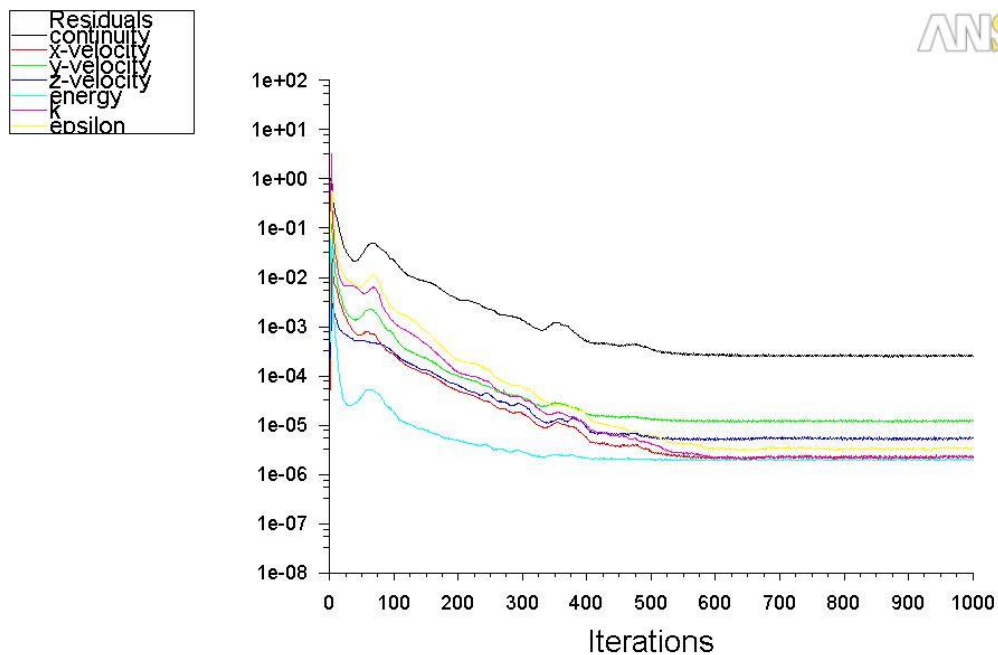
Καμπύλες Residuals



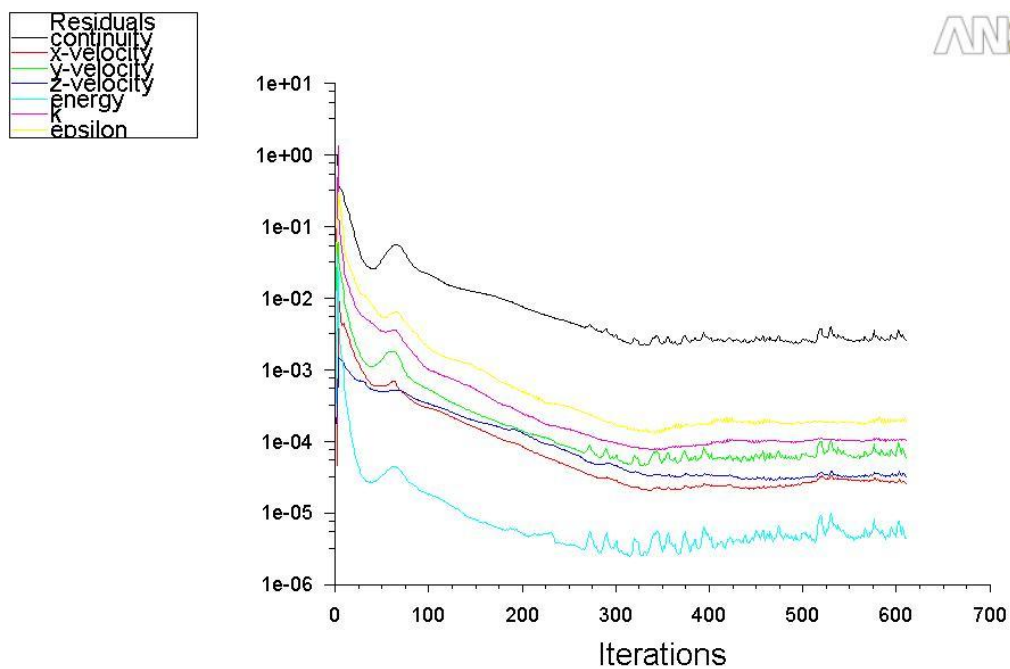
Εικόνα 6.1 - Πλέγμα A.1



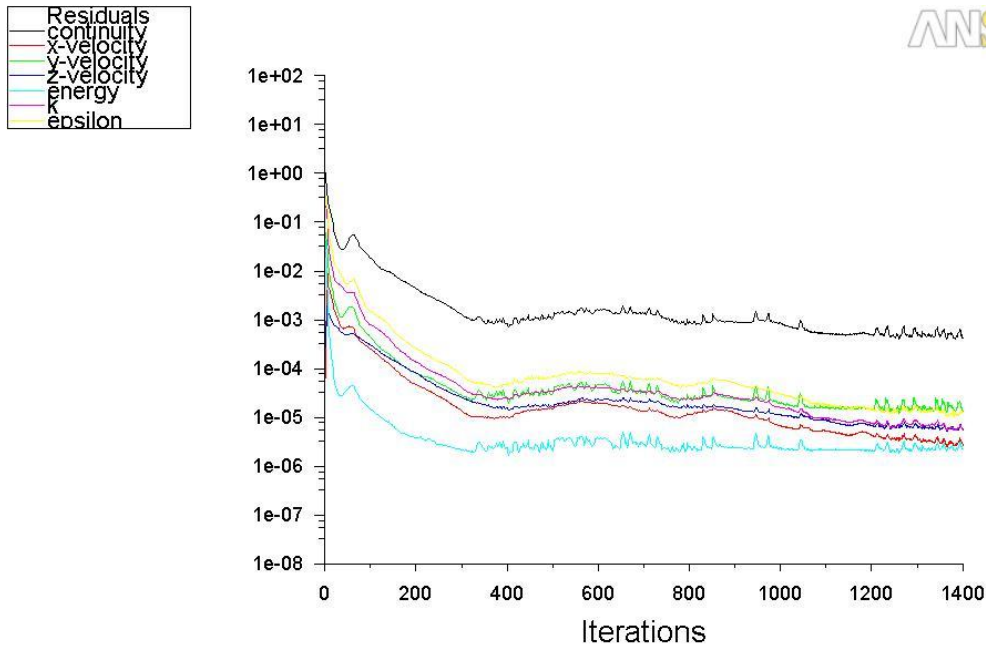
Εικόνα 6.2 - Πλέγμα A.2



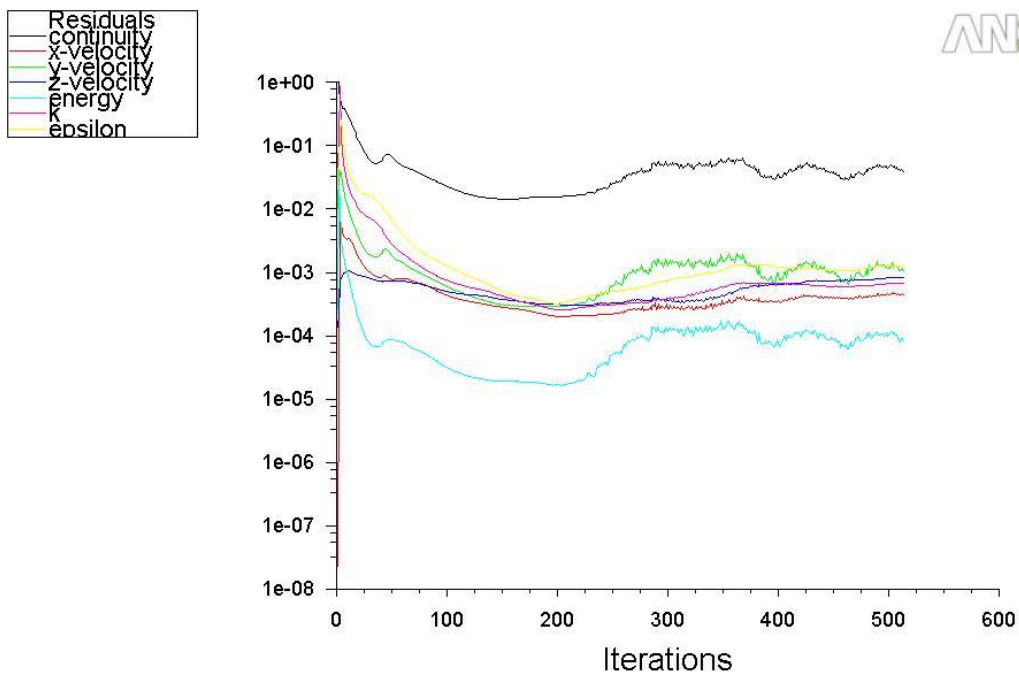
Εικόνα 6. 3 - Πλέγμα Β.1



Εικόνα 6. 4 - Πλέγμα Β.2



Εικόνα 6. 5 – Πλέγμα Γ.1



Εικόνα 6. 6 - Πλέγμα Γ.2

Από την case c εξάγουμε τα εξής:

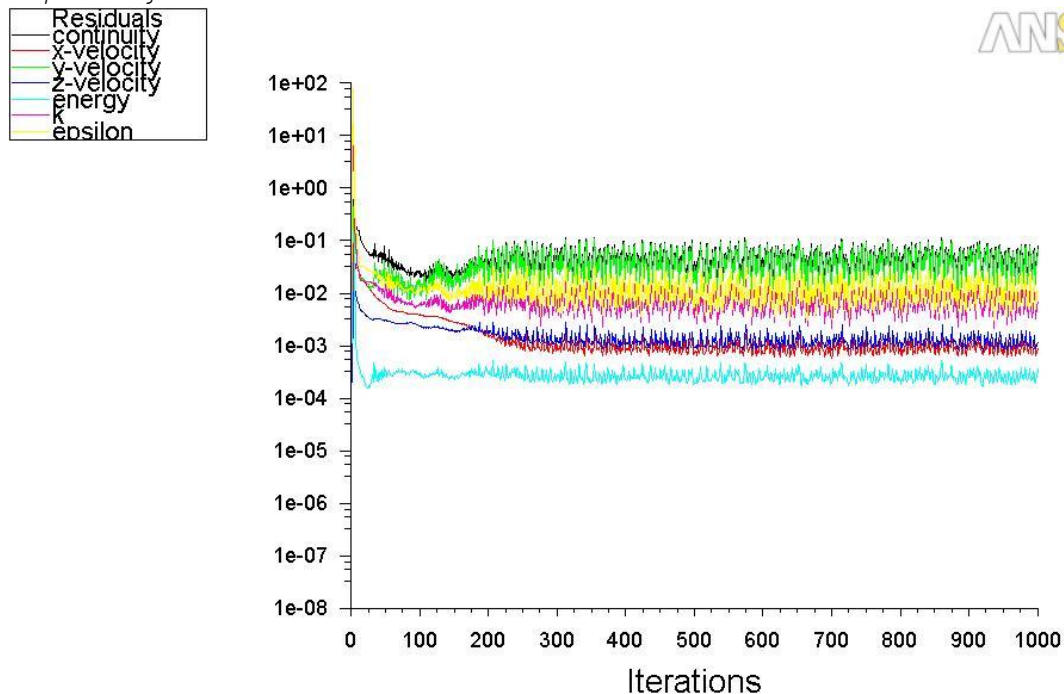
- Για φαινόμενα με οξείες μεταβολές των συνθηκών, όπως αυτό που μελετάται, η σύγκλιση σε λύση, η πτώση δηλαδή των

residuals καμπυλών κάτω από αποδεκτά όρια είναι πολύ δύσκολη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, λόγω της μεγάλης διαφοράς των μεγεθών που μελετούνται, από κόμβο σε κόμβο, οι τιμές που εξάγονται για τον ένα και χρησιμοποιούνται ως αφετηρία για τον επόμενο απέχουν από τις πραγματικές τιμές αυτού. Κάτι τέτοιο καθιστά τη διαδικασία του υπολογισμού χρονοβόρα και τη σύγκλιση πολλές φορές αμφίβολη.

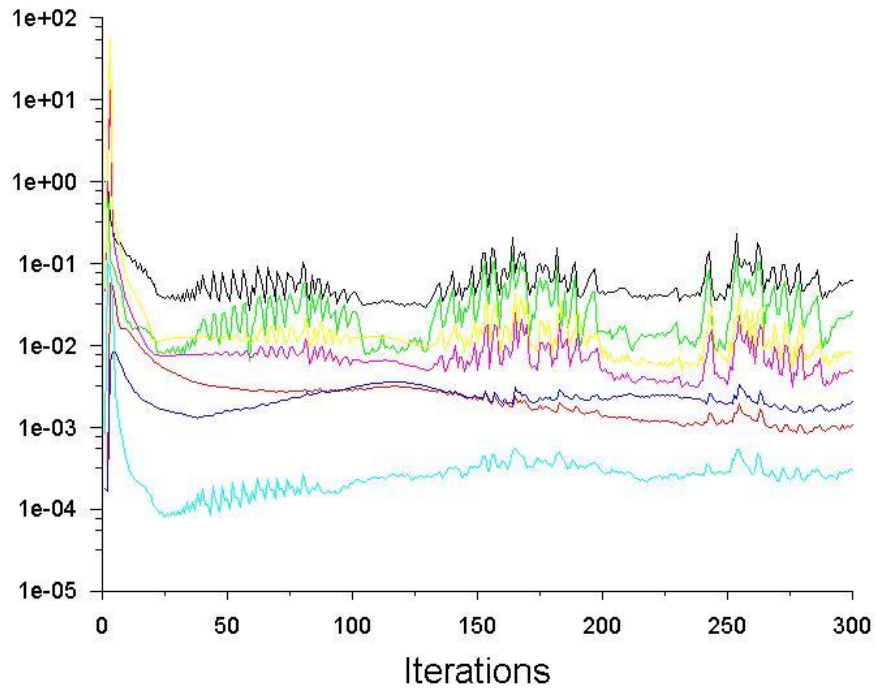
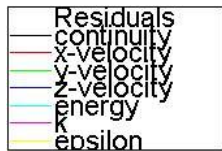
- Το γεγονός ότι μεγάλες μεταβολές στα μεγέθη δεν απαντώνται κοιτώντας μόνο την τοπολογία του προβλήματος μακροσκοπικά, αλλά και σε επίπεδο πεπερασμένων όγκων, οδηγεί και στο φαινόμενο που βλέπουμε ότι πύκνωση του πλέγματος δεν οδηγεί σε ευκολότερη σύγκλιση της διαδικασίας παρά μόνο σε ακριβέστερα αποτελέσματα.
- Τα πλέγματα A και B δείχνουν να ανταπεξέρχονται καλύτερα στην μελέτη αυτής της περίπτωσης με ταχύτερη σύγκλιση.
- Όπως θα δούμε και παρακάτω, σε αντίθεση με τους Gao et al., στην μελέτη αυτή με τη χρήση του RNG k-ε μοντέλου τύρβης για την case c, παράγεται οπισθοροή του καπνού προς την είσοδο. Αυτό δυσχεραίνει σε κάποιο βαθμό τη σύγκλιση η οποία δε μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την αλλαγή των συντελεστών υποχαλάρωσης.

CASE B

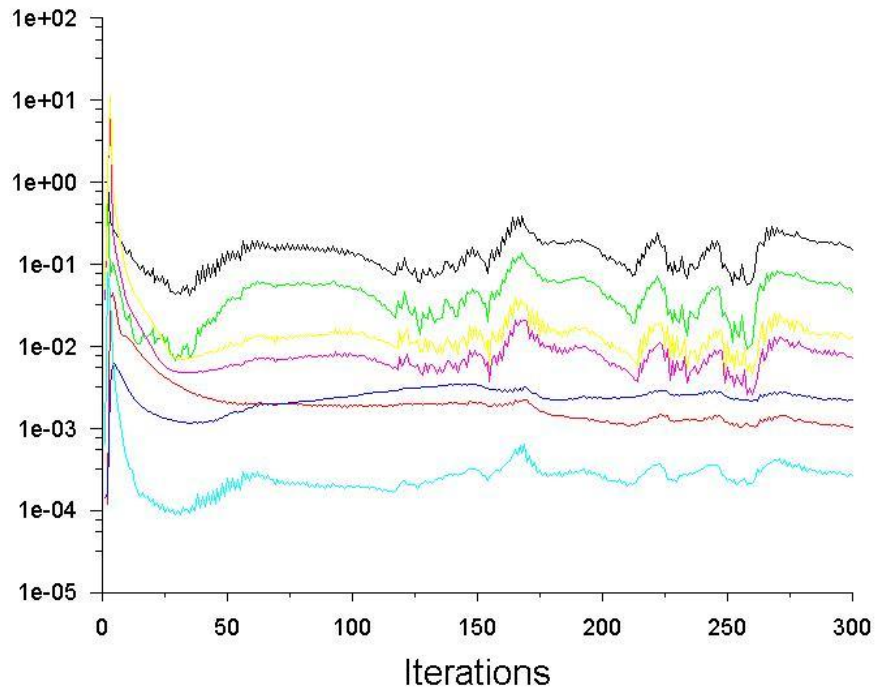
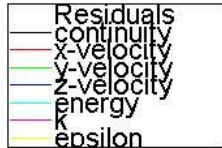
Καμπύλες Residuals



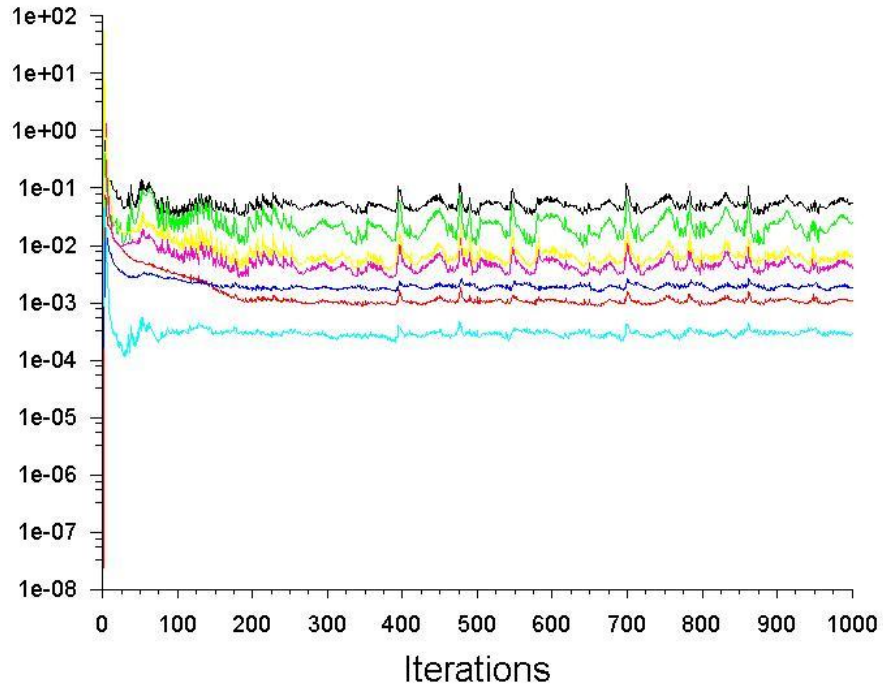
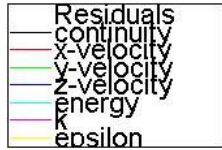
Εικόνα 6.7 - Πλέγμα B.1



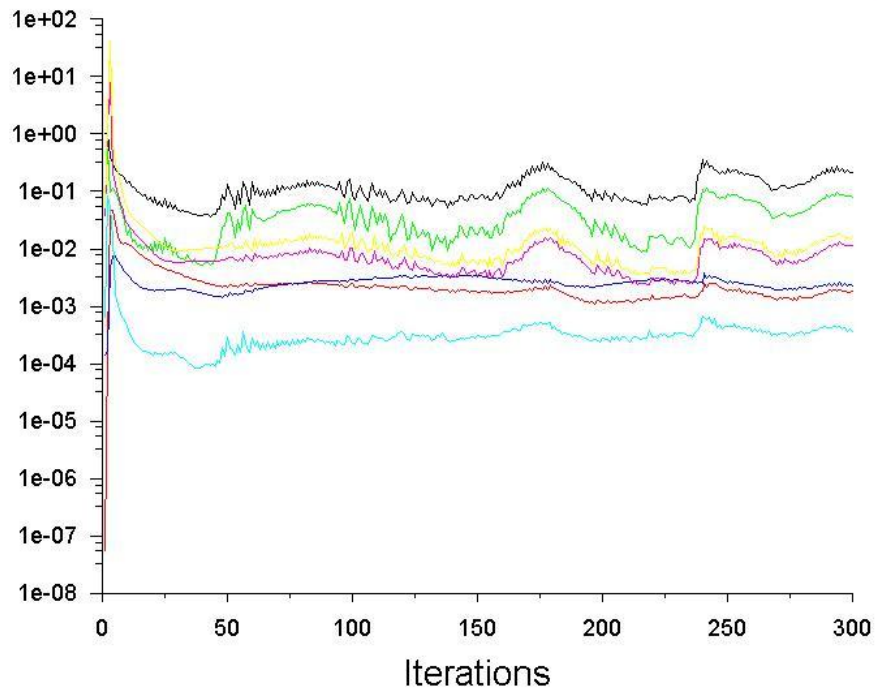
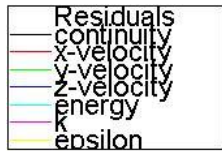
Εικόνα 6. 8 - Πλέγμα B.2



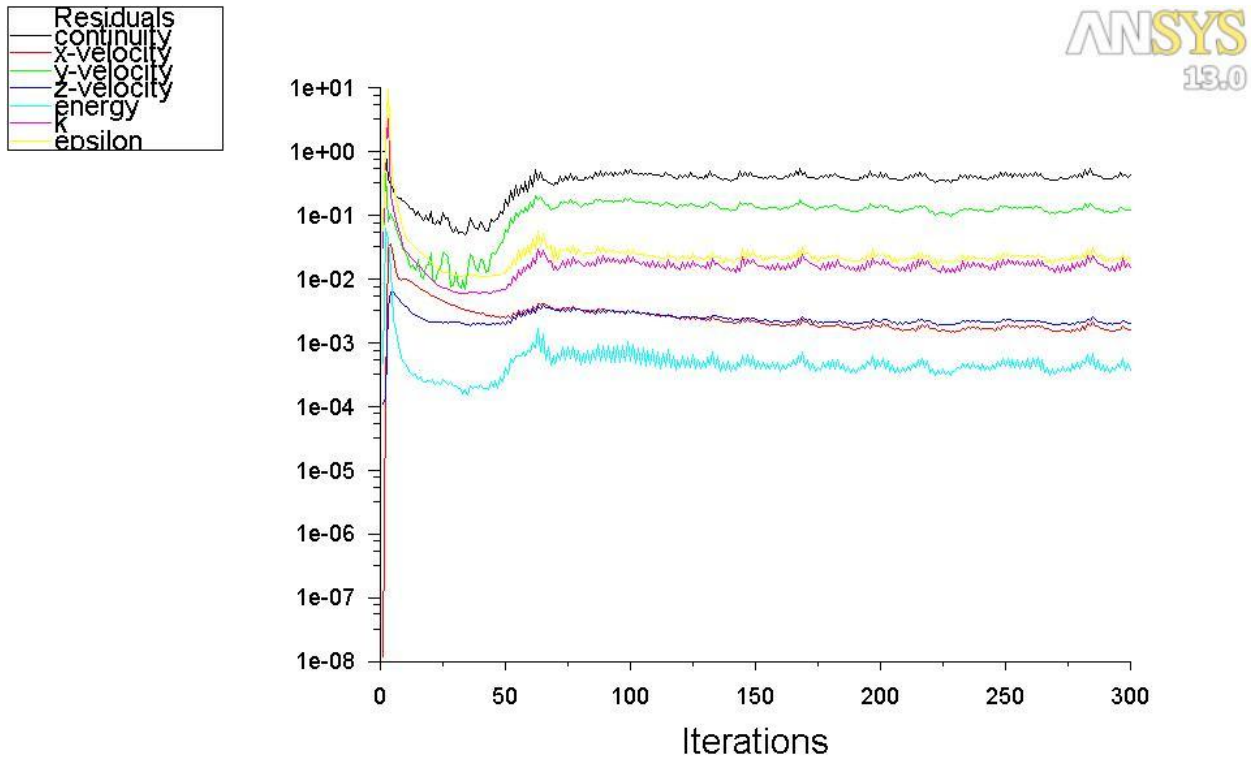
Εικόνα 6. 9 - Πλέγμα B.3



Εικόνα 6. 10 - Πλέγμα Γ.1



Εικόνα 6. 11 - Πλέγμα Γ.2



Εικόνα 6. 12 - Πλέγμα Γ.3

Από την case b εξάγουμε τα εξής:

- Η σύγκλιση είναι πιο δύσκολη από ότι στην case c, κάτι που αναφέρεται και από τους Gao et al., συνεπώς το αναμέναμε. Η τροποποίηση των συντελεστών υποχαλάρωσης είναι απαραίτητη για την άφιξη σε λύση στην μόνιμη κατάσταση.
- Τα πλέγματα Β και Γ φαίνεται να ανταπεξέρχονται καλύτερα στις ιδιαιτερότητες της περίπτωσης αυτής, κάτι που αναμένεται μιας και η στοχευμένη πύκνωση που έχουν σε μεγάλες περιοχές ενδιαφέροντος, τους δίνουν αυτή την ευχέρεια.
- Το Πλέγμα Γ φαίνεται το βέλτιστο για τη μελέτη της περίπτωσης αυτής μιας και απορροφά τις ταλαντωτικές συμπεριφορές με τον καλύτερο τρόπο.
- Το Πλέγμα Β παρότι δεν είναι βέλτιστο δείχνει μια αρκετά καλή συμπεριφορά στη μελέτη αυτής της δυσμενούς περίπτωσης. Η προοδευτική πύκνωσή του περιορίζει τις έντονες ταλαντωτικές συμπεριφορές παρότι είναι αναγκαία η μεταβολή των συντελεστών υποχαλάρωσης για την άφιξη σε λύση.

Συγκεντρωτικά, από τη μελέτη αυτών των δύο περιπτώσεων, μιας με χαμηλή και μιας με υψηλή ταχύτητα εξαερισμού, εκλέγουμε το

Πλέγμα Β για την εκτέλεση των προσομοιώσεων μιας και εμφανίζει την καλύτερη σταθμισμένη συμπεριφορά από τα υπόλοιπα.

6.2 Παρουσίαση-Ανάλυση Αποτελεσμάτων

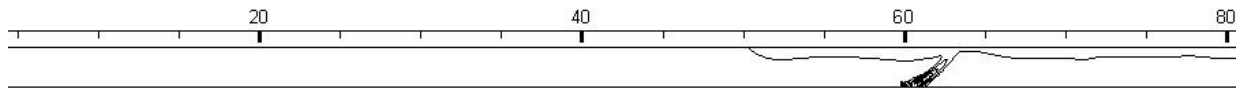
Χρησιμοποιώντας το πλέγμα που εκλέχθηκε από την παραπάνω μελέτη προχωρούμε στην εξαγωγή και παρουσίαση των αποτελεσμάτων και σύγκρισή τους με

- Gao et al. 2004, για την περίπτωση μελέτης χωρίς χρήση μοντέλου ακτινοβολίας
- Fletcher et al. 1994, για την περίπτωση μελέτης με χρήση μοντέλου ακτινοβολίας DO.

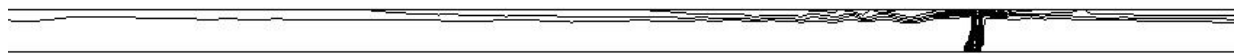
6.2.1 Περίπτωση 1^η-Μελέτη χωρίς χρήση μοντέλου ακτινοβολίας

Η μελέτη έγινε όπως αναφέρθηκε παραπάνω για τρεις διαφορετικές ταχύτητες εξαερισμού (0.5 m/s-case a, 0.85m/s-case b, 2m/s-case c) και παρουσιάζονται τα προφίλ της οπισθοροής στις τρεις περιπτώσεις μελέτης.

Οπισθοροές (Backflows)



Εικόνα 6. 13 - Οπισθοροή για case c



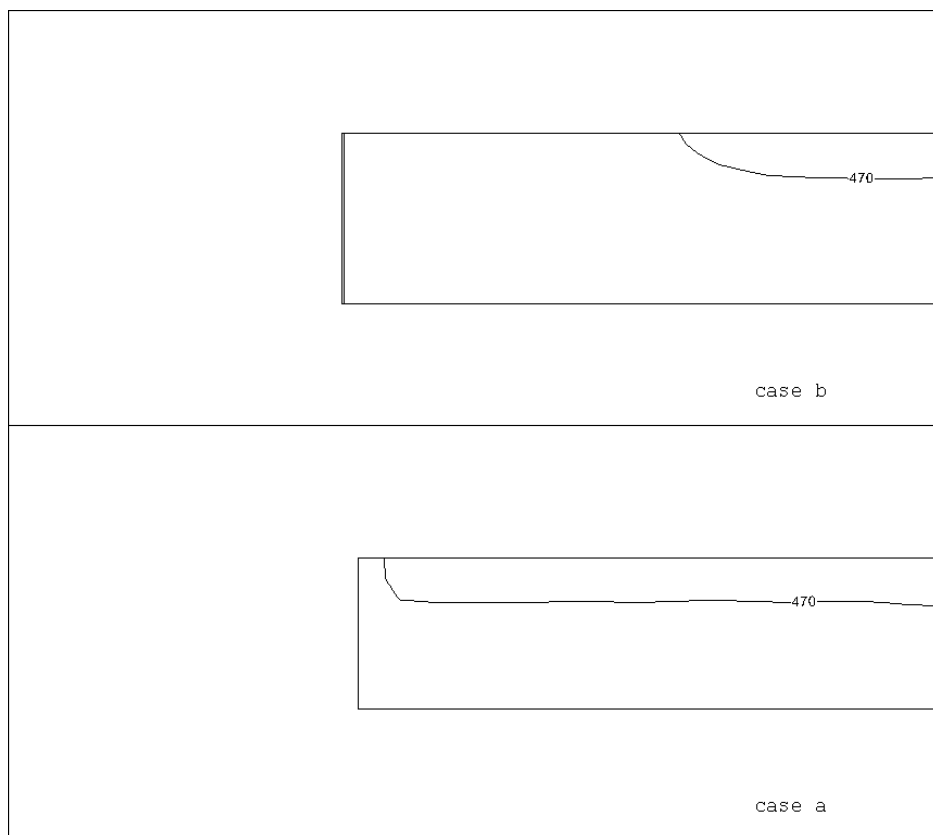
Εικόνα 6. 14 - Οπισθοροή για case b



Εικόνα 6. 15 - Οπισθοροή για case a

Τα σχήματα δείχνουν σαφέστατα αυτό που είναι αναμενόμενο. Αυξανόμενης της ταχύτητας εξαερισμού, μειώνεται η οπισθοροή που προκύπτει, κάτι που είναι και ζητούμενο στον έλεγχο της διασποράς του καπνού, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι με ταχύτητα εξαερισμού 2 m/s (case c) προκύπτει οπισθοροή περίπου 10 μέτρων, ενώ για τις άλλες δύο περιπτώσεις αυτή φτάνει στην πύλη εισόδου της σήραγγας. Κάτι τέτοιο συμφωνεί με τη μελέτη των Gao et al. (2004) με τη διαφορά ότι εκεί στην case c δεν εμφανίζεται καθόλου οπισθοροή. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται στη μελέτη μας (k-e) σε σχέση με αυτό του Gao (LES). Μάλιστα, εφόσον το φαινόμενο, όπως έχουμε δει, είναι δύσκολο στη σύγκλιση, κριτήριο για την άφιξη σε μόνιμη κατάσταση στις περιπτώσεις εξαερισμού 0.5 και 0.85 m/s (cases b, c) είναι να φτάσει η οπισθοροή στην είσοδο.

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί, από άποψη υπολογιστικού κόστους, είναι το εξής. Στις δυσμενείς περιπτώσεις αναμένουμε την προσέγγιση της οπισθοροής στην είσοδο της σήραγγας για να σταματήσουμε τη μελέτη της μεταβατικής (transient) κατάστασης. Κάτι τέτοιο είναι θεωρητικά πιο εύκολο για την case a (ταχύτητα 0.5 m/s). Πράγματι, όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα εξαερισμού, τόσο πιο εύκολα αναπτύσσεται ροή προς την αντίθετη κατεύθυνση. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα στον ίδιο χρόνο εξέλιξης του φαινομένου ($t=105s$ στο παράδειγμα), γίνεται σαφώς αντιληπτή η γρηγορότερη προσέγγιση της οπισθοροής στην είσοδο για την case a. Ωστόσο, η μικρότερη ταχύτητα εξαερισμού καθιστά ταυτόχρονα και πιο χρονοβόρα τη διαδικασία σύγκλισης για κάθε χρονικό βήμα ξεχωριστά. Έτσι μπορεί ο υπολογισμός στην case a να χρειάζεται λιγότερα χρονικά βήματα για να μεταβεί στη μόνιμη κατάσταση, αλλά να απαιτείται αθροιστικά μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος, καθιστώντας την τη δυσμενέστερη περίπτωση.



Εικόνα 6. 16 - Εξέλιξη της οπισθοροής για $t=105s$

Μορφή της φλόγας (flame shape)

Αμέσως μετά παρουσιάζεται η μορφή της φλόγας για τις τρεις περιπτώσεις μελέτης και η σύγκρισή τους με την μορφή που εξάγεται από τη μελέτη των Gao et al. (2004).

Αυτό που παρατηρείται είναι

Για την εστία φωτιάς

- Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη μελέτη μας έχει καλή προσέγγιση με αυτή του Gao και φτάνει περί τους 1800°C .

Για την περιοχή πάνω από την εστία φωτιάς

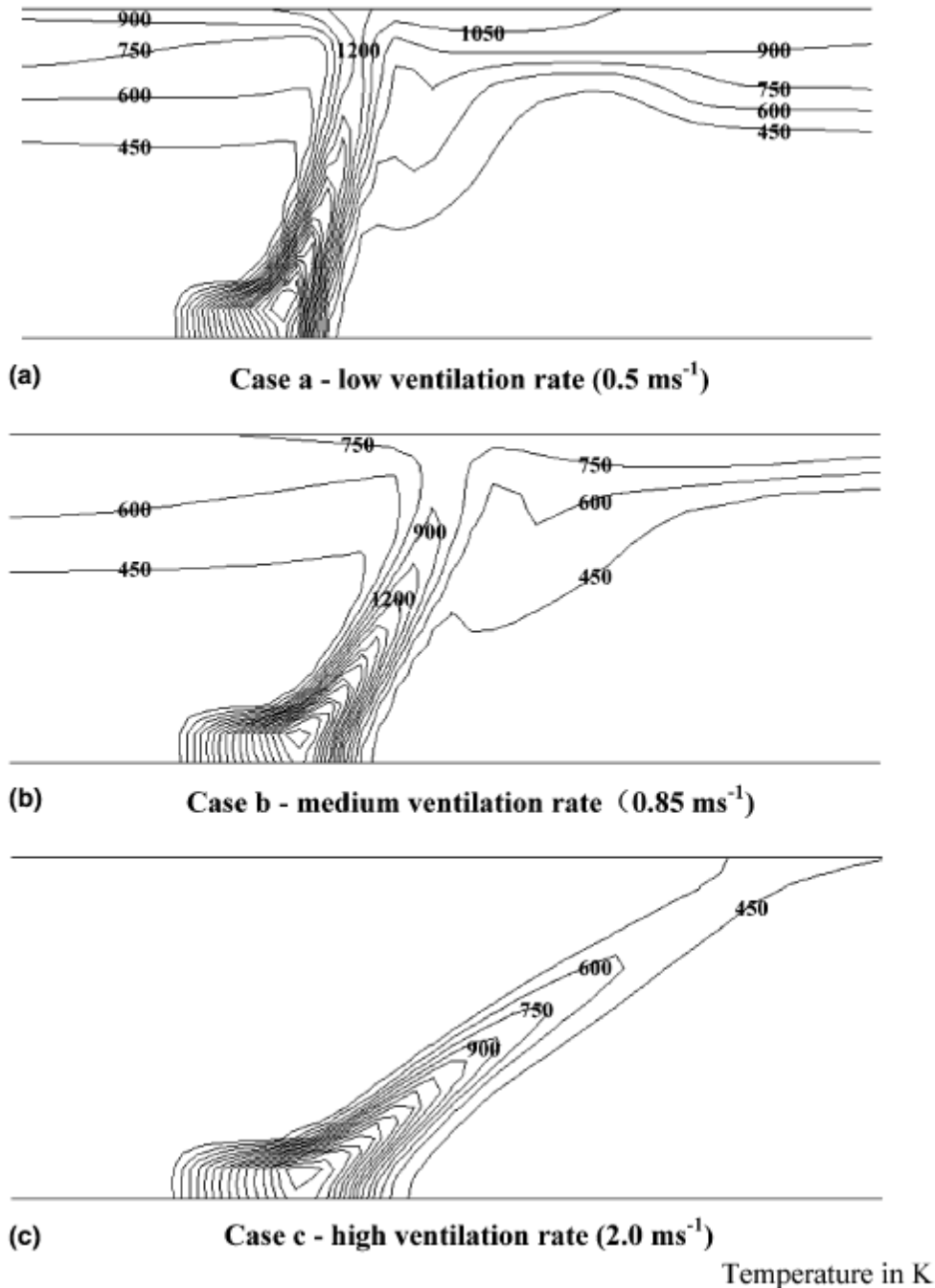
- Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται πάνω από την εστία στην μελέτη μας είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτή του Gao.

Για την περιοχή ένθεν και ένθεν της εστίας της φωτιάς

- η ύπαρξη οπισθοροής, και άρα διασπορά ισοθερμοκρασιακών καμπυλών σε μεγαλύτερο εύρος, στην case c για τη μελέτη μας, σε αντίθεση με την μελέτη του Gao όπου δεν παρατηρείται οπισθοροή.
- η καλή ταύτιση της διασποράς ισοθερμοκρασιακών των cases b και c για τη μελέτη μας σε σχέση με την μελέτη του Gao.
- η μικρότερη διαφορά στην κλίση της φλόγας ανάμεσα σε case b και case c στη μελέτη μας σε σχέση με αυτή του Gao.

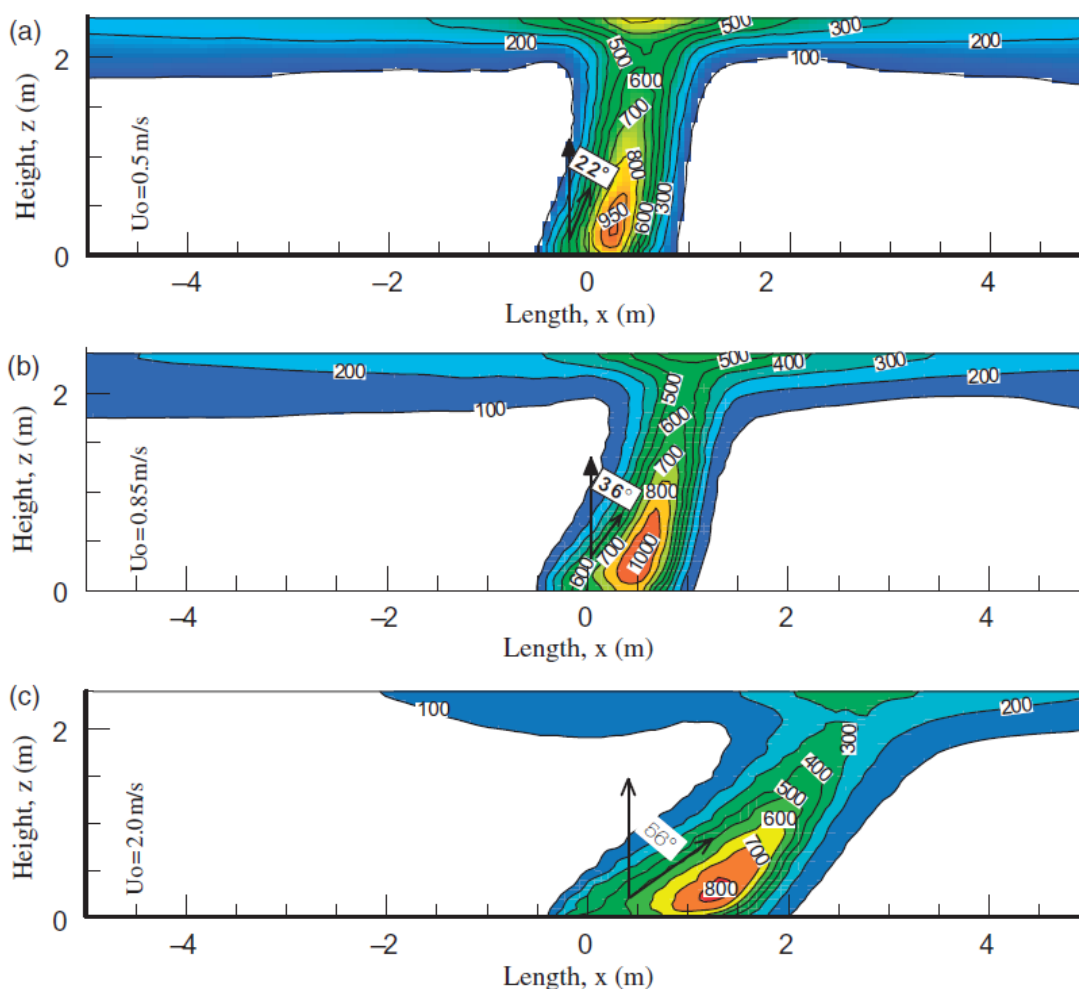


Εικόνα 6. 17 - Μορφή της φλόγας (flame shape)



Εικόνα 6. 18 - Μορφή της Φλόγας (flame shape) Gao et al. (2004)

Σαν τελικό συμπέρασμα θα μπορούσαμε να πούμε ότι η μελέτη με το υπολογιστικό πακέτο Fluent παρουσιάζει αρκετά καλή ταύτιση στην διαμήκη διασπορά της θερμοκρασίας σε σχέση με αυτή του Gao, ενώ η εγκάρσια διασπορά είναι μεγαλύτερη στη μελέτη μας. Παρακάτω παρουσιάζεται η μορφή της φλόγας από την μελέτη των Miloua et al. (2011) όπου η κλίση της προσεγγίζει καλύτερα τα δικά μας αποτελέσματα.

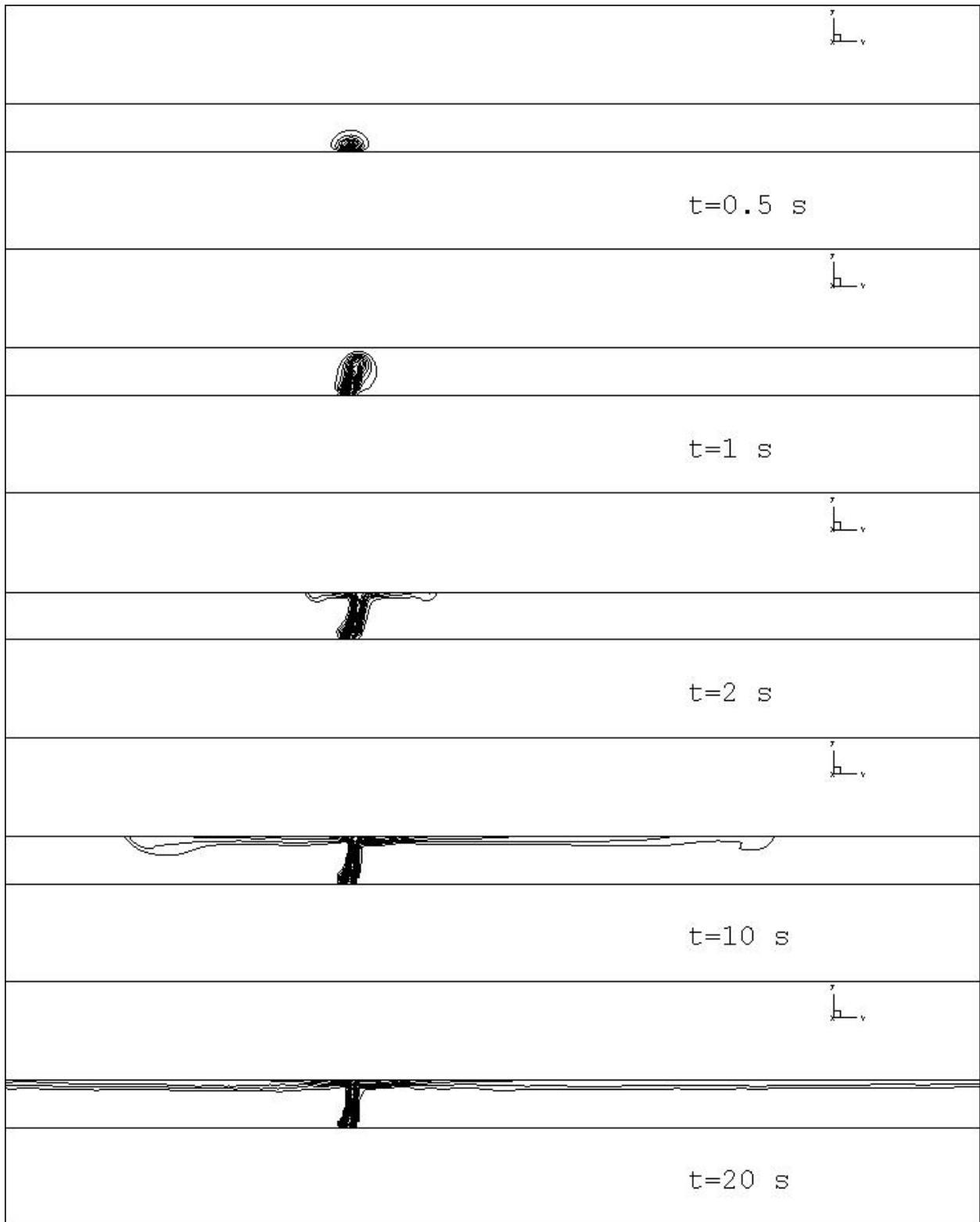


Εικόνα 6. 19 - Μορφή της φλόγας (flame shape) Miloua et al. (2011)

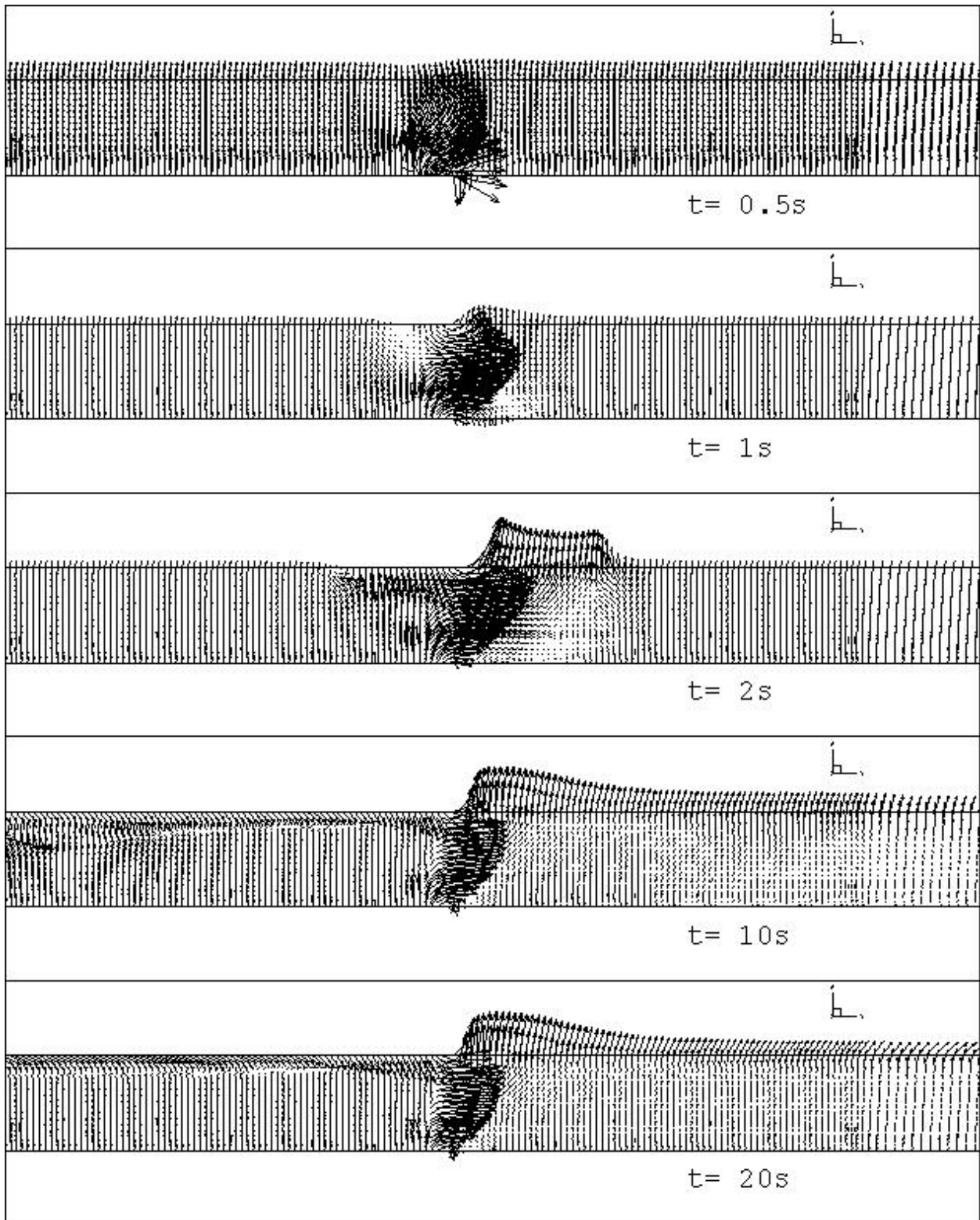
Ακολούθως παρουσιάζεται η μεταβατική κατάσταση του φαινομένου που μελετάται ως προς τις ισοθερμοκρασιακές καμπύλες και τα διανύσματα της ταχύτητας για $t=0.5, 1, 2, 10$ και $20s$ πρώτα για την case b και σύγκρισή της με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Gao και στη συνέχεια παράθεση των υπόλοιπων περιπτώσεων μελέτης.

Προφίλ Θερμοκρασιών και Ταχυτήτων στη Μεταβατική Κατάσταση (Transient Temperature and Transient Velocity) για την case b.

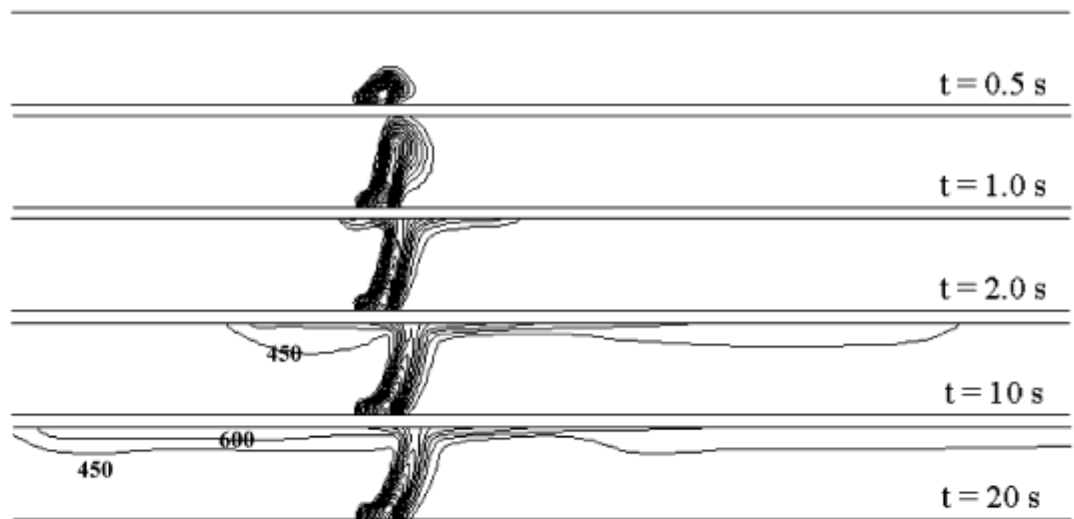
Παρακάτω γίνεται φανερό η παρόμοια εξέλιξη του φαινομένου ανάμεσα στην μελέτη του Gao και τη δική μας. Ο θερμός αέρας αναπτύσσεται στο σωστό ύψος για τις ίδιες χρονικές στιγμές και παρά τη μεγαλύτερη εγκάρσια διασπορά του στη μελέτη μας, όπως παρατηρήθηκε παραπάνω, η διαμήκης φαίνεται να είναι παραπλήσια ανάμεσα στις δύο μελέτες.



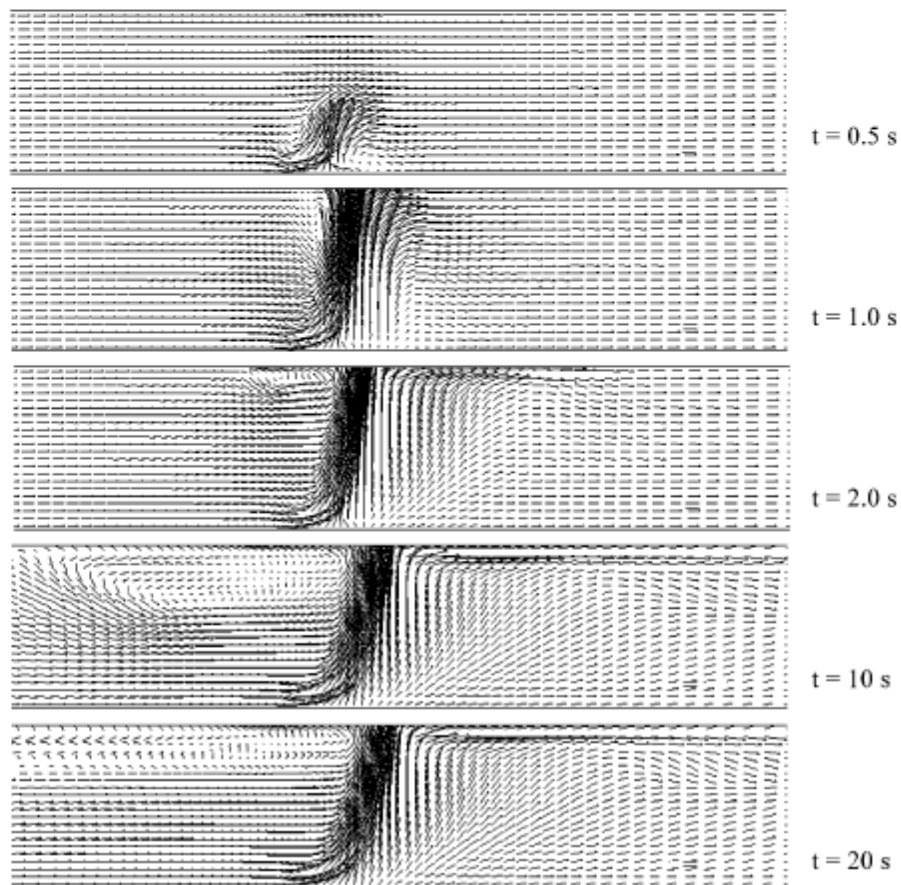
Εικόνα 6. 20 - Προφίλ Θερμοκρασιών για case b



Εικόνα 6. 21 - Προφίλ Ταχυτήτων για case b



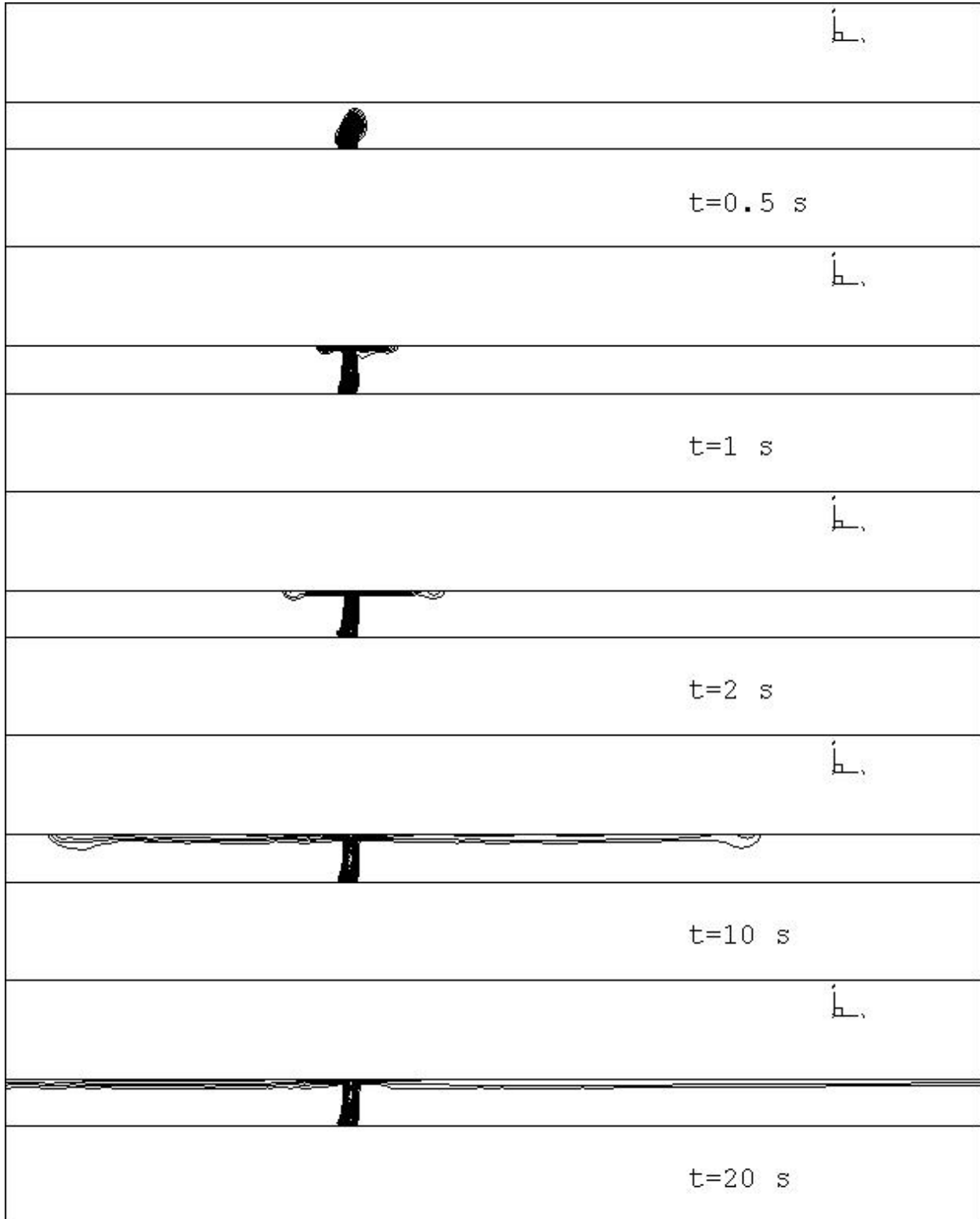
(a) **Transient temperature** Temperature in K



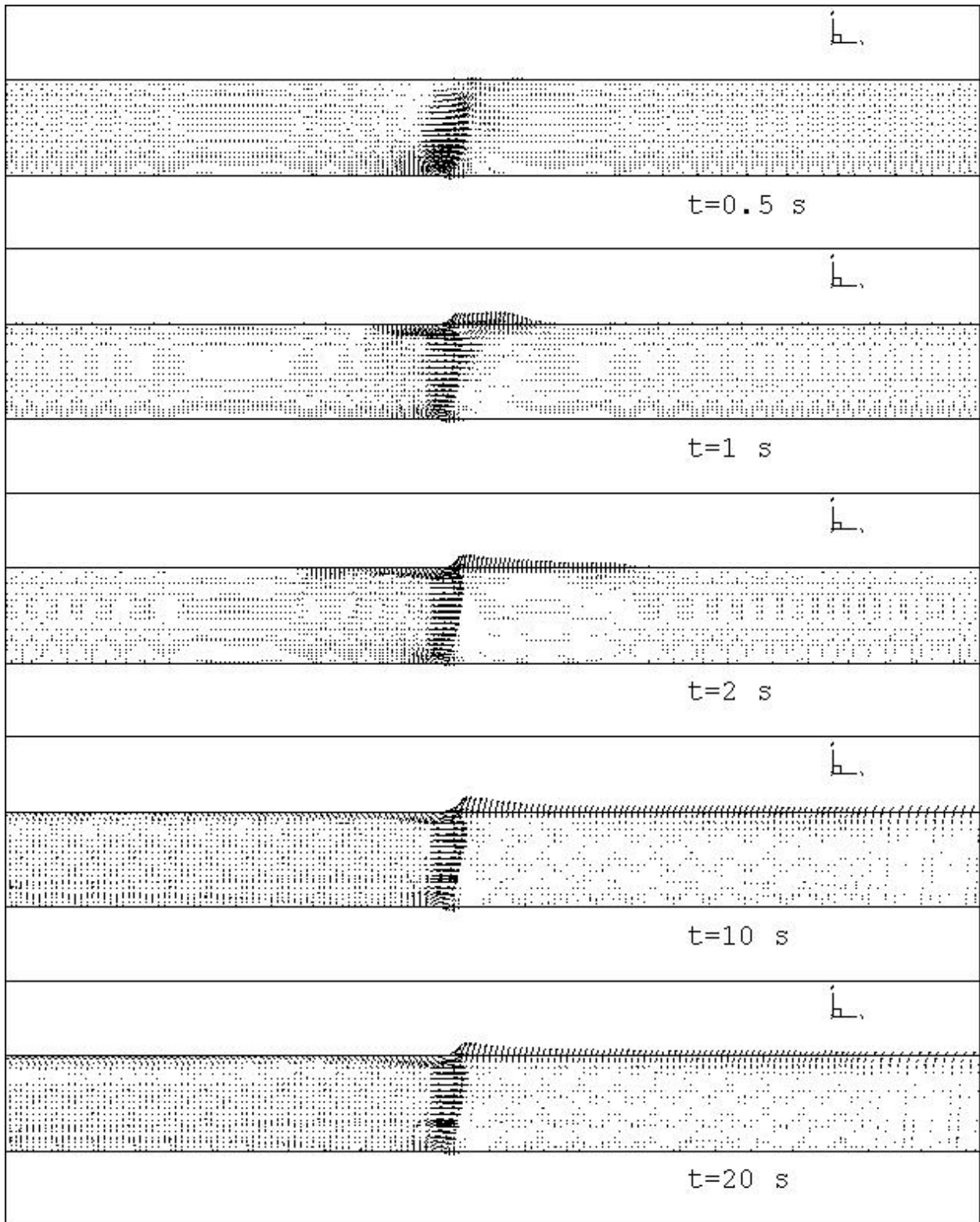
(b) **Transient velocity vectors**

Εικόνα 6. 22 - Προφίλ Θερμοκρασιών και Ταχυτήτων για case b Gao et al. (2004)

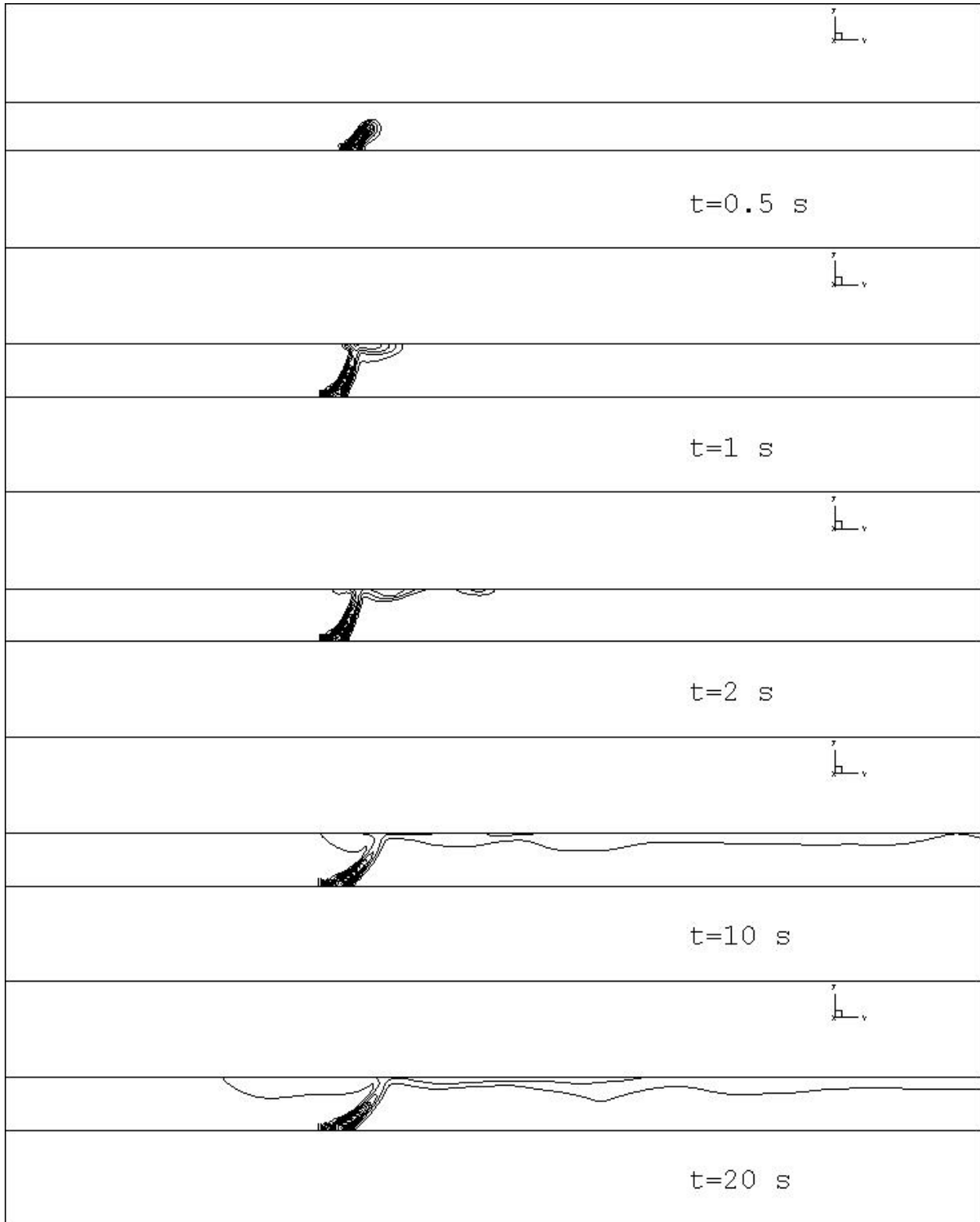
Στη συνέχεια παρατίθενται τα ίδια προφίλ για τις cases a και b



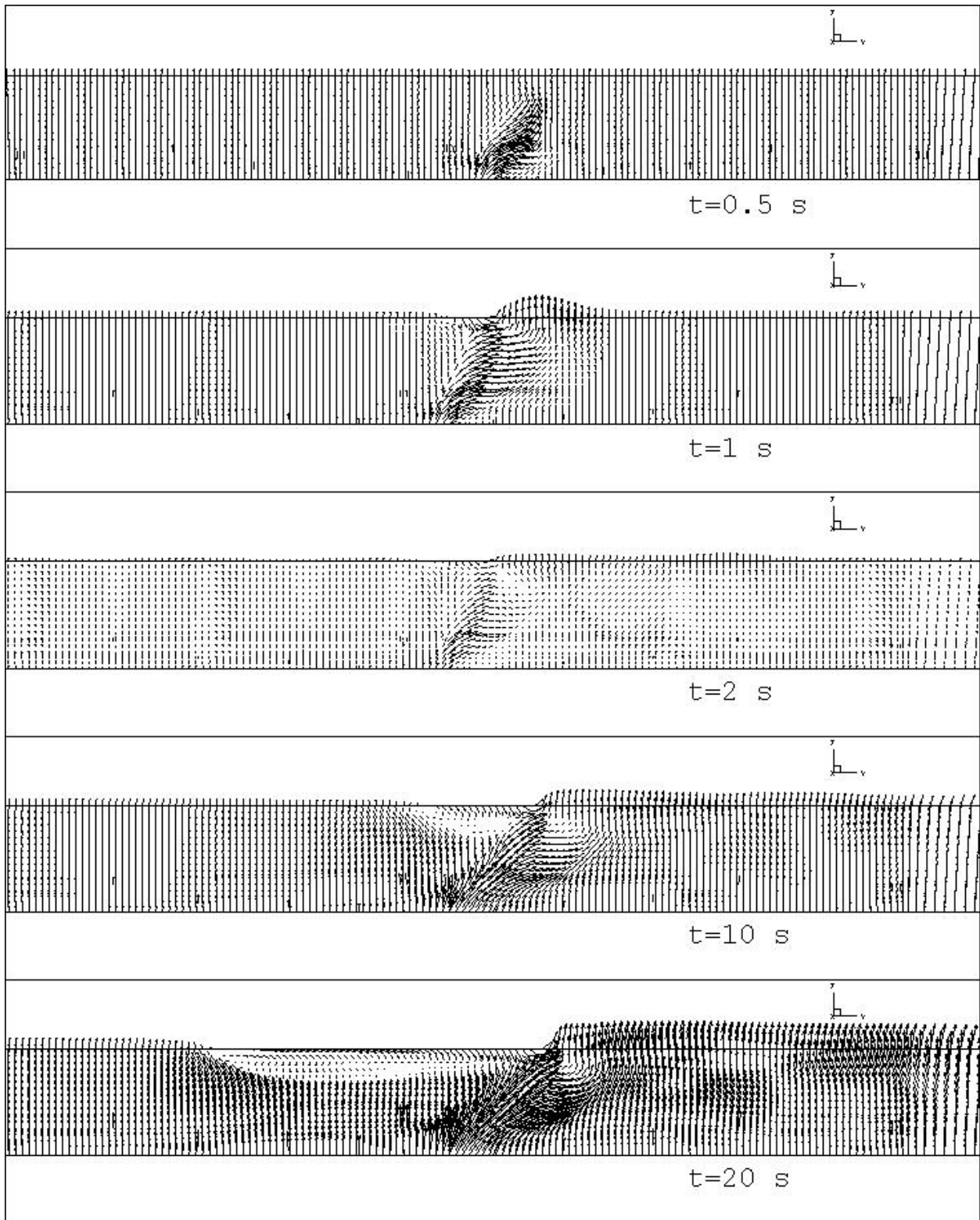
Εικόνα 6.10- Προφίλ Θερμοκρασιών για case a



Εικόνα 6.11- Προφίλ Ταχυτήτων για case a



Εικόνα 6.12 - Προφίλ Θερμοκρασιών για case c



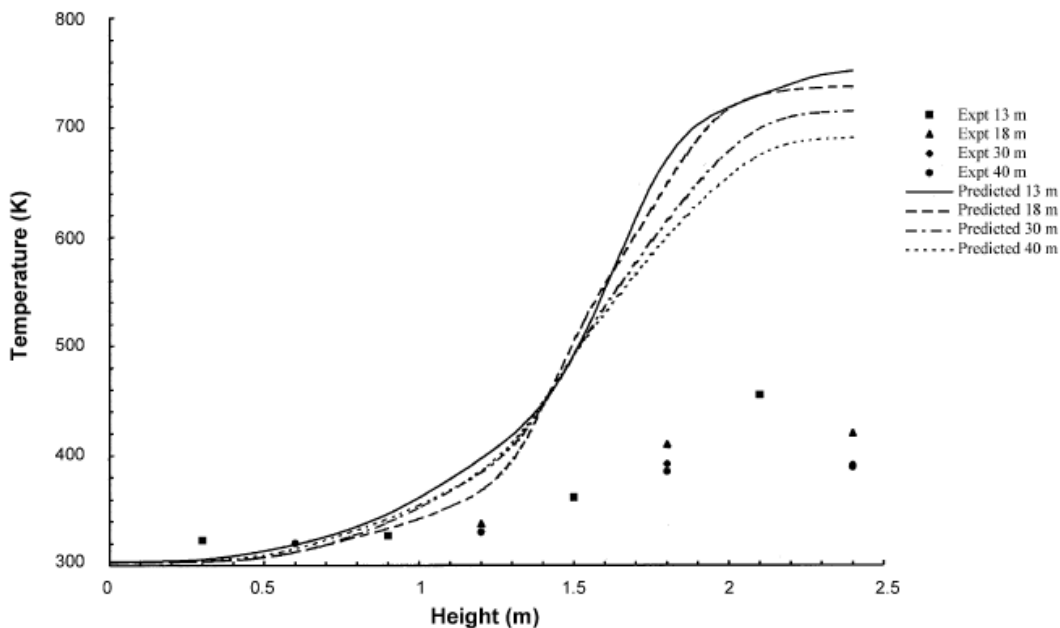
Εικόνα 6.13 - Προφίλ Ταχυτήτων για case a

Εγκάρσιο Προφίλ Θερμοκρασίας για απόσταση 18m από τη φωτιά, κατά την πορεία της φωτιάς.

Ακολουθούν διαγράμματα θερμοκρασιών για μια γραμμή η οποία αν ολοκληρωθεί στο συνολικό μήκος της σήραγγας, δίνει το διάμηκες επίπεδο που διατρέχει τη σήραγγα και περνά από το μέσον της διατομής της. Η απόσταση της γραμμής αυτής είναι 18m από τη φωτιά, κατά την πορεία της φωτιάς.

Αρχικά δίνεται το προφίλ που εξήχθη από τη μελέτη των Gao et al. (2004) για γραμμές σε αποστάσεις 13,18,30 και 40 m καθώς και τα πειραματικά δεδομένα γι' αυτές.

Η μελέτη γίνεται για την case b, δηλαδή για ταχύτητα εξαερισμού 0.85 m/s.

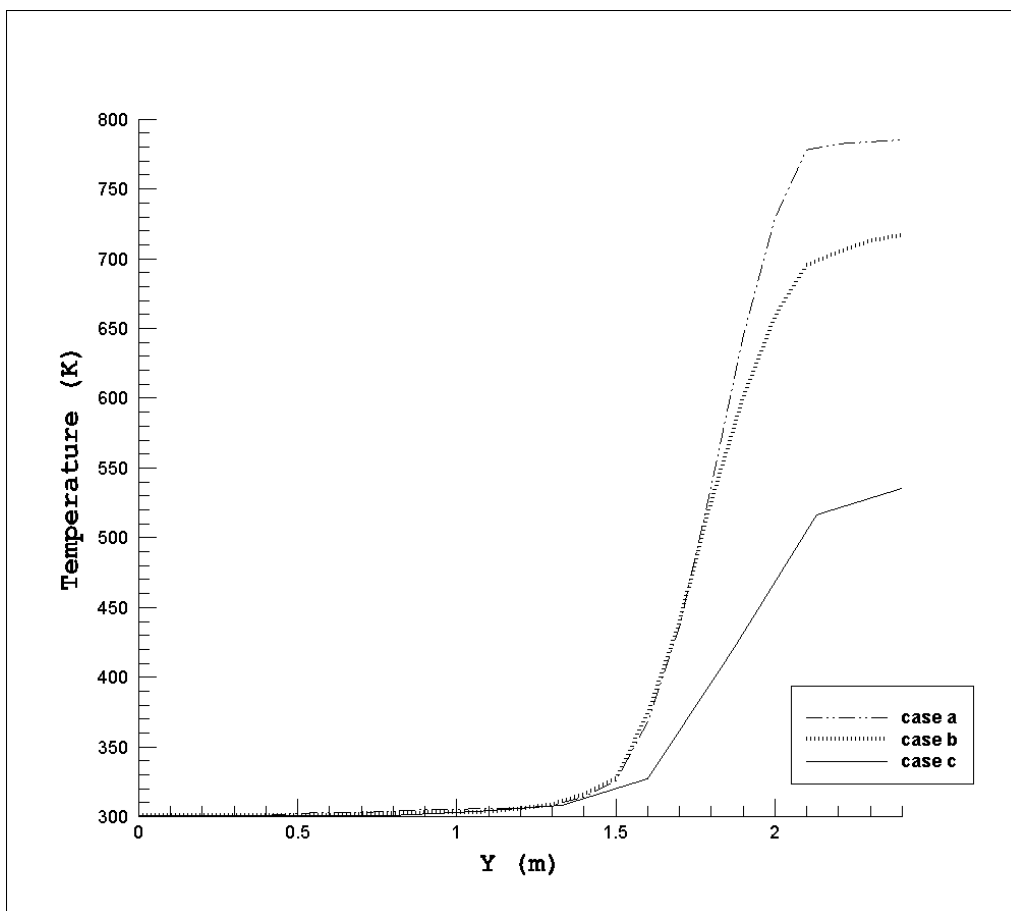


Εικόνα 6. 23 - Προφίλ Θερμοκρασιών σε διάφορες θέσεις-case b Gao et al. (2004)

Από εδώ παρατηρούνται τα εξής:

- Η υπολογιστική προσομοίωση δίνει ανώτερες τιμές για τη θερμοκρασία, περίπου 60-85% υψηλότερες, ανάλογα την περίπτωση, σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα.
- Όλες οι καμπύλες, συγκλίνουν στο ίδιο σημείο για $y \approx 1.5m$, το οποίο είναι και σημείο καμψής καθώς παρατηρείται αλλαγή στην κυρτότητα της καμπύλης.

Το αντίστοιχο διάγραμμα μόνο για απόσταση 18m από τη φωτιά για τις τρεις περιπτώσεις μελέτης φαίνεται παρακάτω.



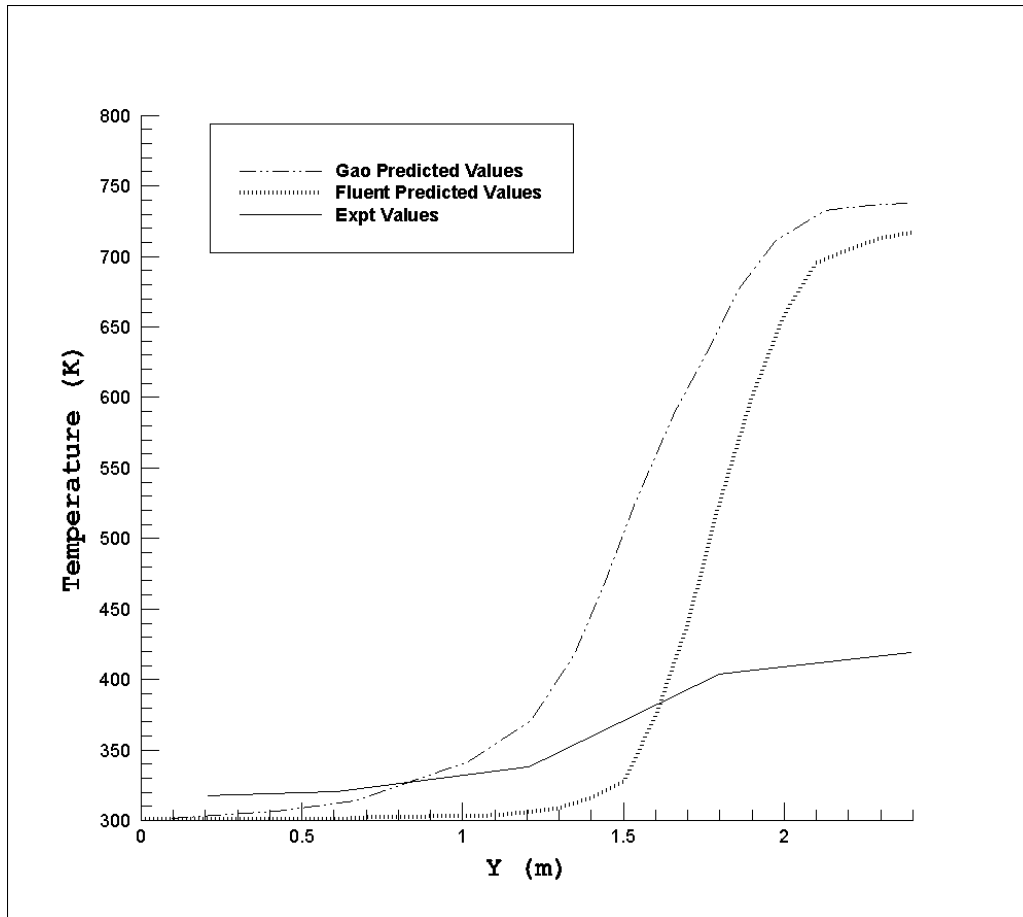
Εικόνα 6. 24 - Θερμοκρασιακά προφίλ για τις τρεις περιπτώσεις μελέτης (case a,b,c) με χρήση ANSYS Fluent.

Εδώ σημειώνουμε τα εξής

- Όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα εξαερισμού τόσο πιο μικρή θερμοκρασία αναπτύσσεται, κάτι που αναμένεται, καθώς εξάγεται πιο γρήγορα ο θερμός αέρας, μη δίνοντας χρόνο έτσι για τη διάδραση του με τον περιβάλλοντα αέρα στη σήραγγα.
- Από τα συνολικά 2.4m ύψους της σήραγγας, στα πρώτα 1.5m η θερμοκρασία αυξάνεται πολύ λίγο, κάτι που αναμένεται καθώς ο καπνός, προσομοιασμένος ως πολύ θερμός αέρας, έχει μικρή πυκνότητα και άρα διακινείται στα ανώτερα στρώματα αέρα της σήραγγας. Με αυτά έρχεται σε άμεση επαφή και εμφανίζονται έντονα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας. Άλλωστε η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή ακολουθεί την κατεύθυνση της ταχύτητας του θερμού αέρα. Τα κατωτέρα στρώματα αέρα, ως αποτέλεσμα, θερμαίνονται σε ελάχιστο βαθμό.
- Τα φαινόμενα αυτά, εμφανίζουν έντονο αποσβενόμενο χαρακτήρα, από στρώμα αέρα σε στρώμα αέρα, με αποτέλεσμα της μεγάλες κλίσεις στις καμπύλες που εξάχθηκαν.
- Και στις τρεις περιπτώσεις μελέτης, μέχρι ένα προκαθορισμένο ύψος παρατηρείται μια περίπου όμοια συμπεριφορά των καμπυλών. Το ίδιο είχε παρατηρηθεί και στο

διάγραμμα των Gao et al. (2004) που παρουσιάστηκε παραπάνω, με τη διαφορά ότι εκεί οι διαφορετικές καμπύλες εκεί αφορούσαν διαφορετικές αποστάσεις από τη φωτιά στην ίδια περίπτωση μελέτης, ενώ εδώ αφορούν διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης.

Ακολουθεί το διάγραμμα συγκριτικής παρουσίασης των προφίλ θερμοκρασιών για την case b, ανάμεσα στους Gao et al., στα πειραματικά δεδομένα και στη δική μας μελέτη



Εικόνα 6.25 - Σύγκριση προφίλ θερμοκρασιών σε απόσταση 18m από τη φωτιά για την case b

Εξάγονται τα εξής:

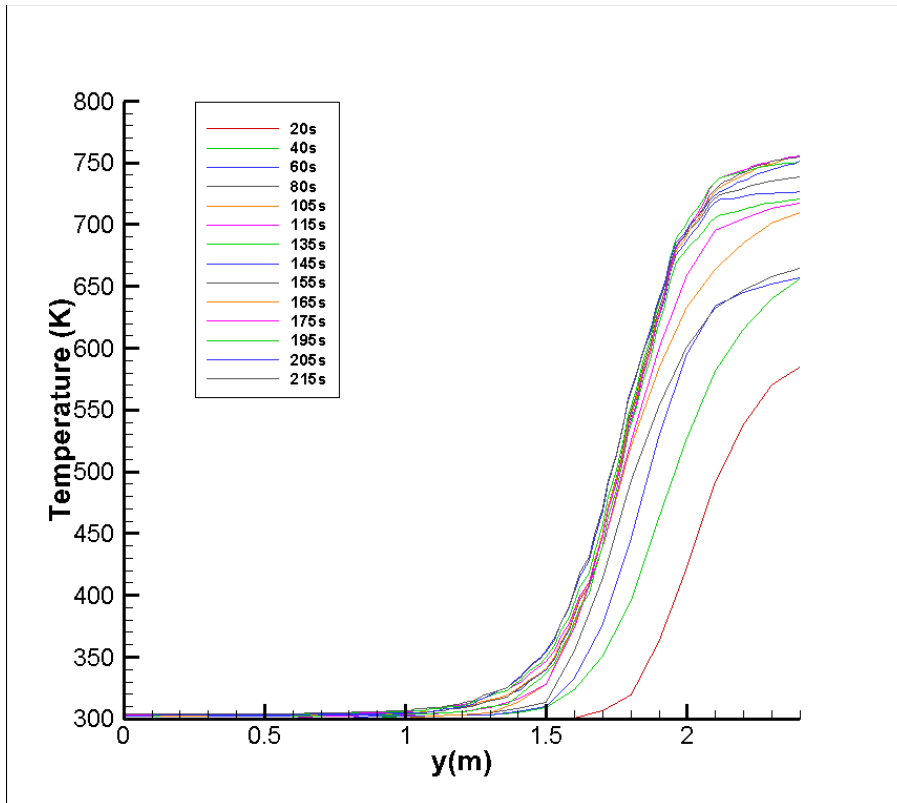
- Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με ANSYS FLUENT, και αυτά των Gao et al. (2004) παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Αλλαγή κυρτότητας της καμπύλης συνοδευόμενη από μεγάλες κλίσεις αυτής στη νέα κυρτότητα, με αποτέλεσμα πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες στα ανώτερα στρώματα αέρα της σήραγγας σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα.
- Το σημείο καμψής της καμπύλης των Gao et al. (2004) είναι μετατοπισμένο πιο αριστερά αυτού της δικής μας μελέτης και ευρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, μέχρι γ

περίπου 1.5m, η καμπύλη της μελέτης μας ευρίσκεται κάτω αυτής των πειραματικών αποτελεσμάτων και δίνει θερμοκρασίες περίπου 7% χαμηλότερες, σε αντίθεση με την καμπύλη των Gao et al. που τέμνει αυτή των πειραματικών για y περίπου 0.75m. Για $y=1.5m$ η καμπύλη των Gao εμφανίζει ήδη 60% μεγαλύτερες τιμές αυτής των πειραματικών αποτελεσμάτων.

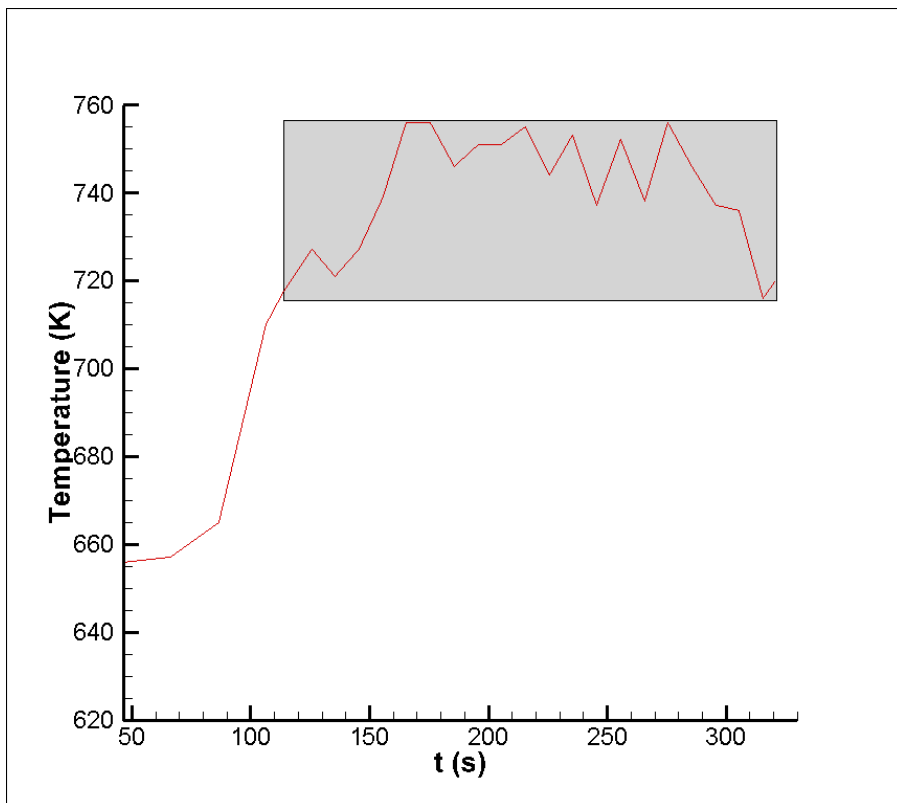
Συνεπώς μπορούμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα των Gao et al. (2004) με τη χρήση μοντέλου τύρβης LES δίνουν μια καμπύλη πιο όμαλη χωρίς έντονες εξακοντίσεις τιμών. Ωστόσο, η προϊούσα καμπύλη της δικής μας μελέτης, παρακολουθεί το φαινόμενο με πιο μεγάλη εγγύτητα στα πειραματικά δεδομένα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Το φαινόμενο όπως έχει αναλυθεί και παραπάνω είναι πολύ δύσκολο στη σύγκλιση. Ειδικά για τις δυσμενείς περιπτώσεις μελέτης (cases a and b) κριτήριο για τη μετάβαση στη μόνιμη κατάσταση εκλέχθηκε η άφιξη της οπισθοροής στην είσοδο και η μονιμοποίηση της μορφής του θερμοκρασιακού προφίλ στο επίπεδο που μελετάται και όχι η σύγκλιση των residuals. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται στη μελέτη μας για $t > 120s$.

Αυτό που αναμένεται από τη στιγμή που περάσει το φαινόμενο στη μόνιμη κατάσταση, είναι τα θερμοκρασιακά προφίλ που εξάγονται να μην έχουν σημαντικές διαφορές. Όντως η μορφή των καμπυλών είναι αυτή που περιγράψαμε παραπάνω. Ωστόσο, αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι οι τιμές της θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας δεν μένουν σταθερές αλλά μεταβάλλονται μέσα σε ένα εύρος 40K ή τάξης περίπου 5% επί της θερμοκρασίας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα δύο διαγράμματα που επαληθεύουν τα λεγόμενά μας. Το πρώτο περιέχει τα θερμοκρασιακά προφίλ στην γραμμή μελέτης για τις διάφορες χρονικές στιγμές εξέλιξης του φαινομένου, ενώ στο δεύτερο φαίνονται οι μεταβολές στη μέγιστη θερμοκρασία που αναφέρθηκαν. Τέλος άξια παρατήρησης που εξάγεται από τα διαγράμματα είναι η ύπαρξη τοπικού μέγιστου στα θερμοκρασιακά προφίλ για $t=40$ μέχρι 80s. Πράγματι οι καμπύλες αυτών των χρονικών στιγμών συγκλίνουν σε θερμοκρασία περίπου 650K ήτοι 13,3% χαμηλότερη από την τελική, και θα μπορούσαν πολύ εύκολα να ξεγελάσουν τον ερευνητή στο να θεωρήσει ότι έχει περάσει στη μόνιμη κατάσταση. Η μη μονιμοποίηση της μορφής της οπισθοροής για αυτό το χρονικό διάστημα απέτρεψε αυτό τον κίνδυνο στην παρούσα μελέτη, ωστόσο φαίνεται ξεκάθαρα ότι για φαινόμενα με δυσκολίες στη σύγκλιση είναι απαραίτητη η μελέτη του μεταβατικού φαινομένου για μακρό χρονικό διάστημα.



Εικόνα 6. 26 – Προφίλ Θερμοκρασίας στη γραμμή μελέτης για διάφορες χρονικές στιγμές



Εικόνα 6. 27 – Μεταβολές στη θερμοκρασία για ένα σημείο της γραμμής μελέτης

6.2.2 Περίπτωση 2^η-Μελέτη με χρήση μοντέλου ακτινοβολίας DO

Ακολουθεί η μελέτη του φαινομένου με τη χρήση μοντέλου ακτινοβολίας DO. Η ενσωμάτωση αυτού του μοντέλου προκαλεί μεγάλη αύξηση του υπολογιστικού κόστους για τη μελέτη των ίδιων περιπτώσεων. Για το λόγο αυτό μελετήθηκαν οι περιπτώσεις cases b, c που είναι οι λιγότερο δυσμενείς και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε σύγκριση με αυτά των Fletcher et al (1994)

Μόνιμη Κατάσταση



Εικόνα 6. 28 - Μόνιμη κατάσταση για την case b

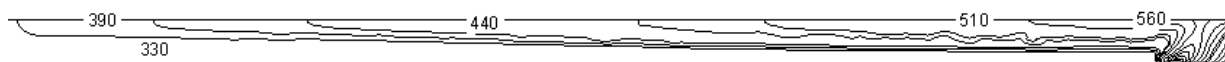


Εικόνα 6. 29 – Μόνιμη κατάσταση για την case c

Κρίνεται χρήσιμο, επισκοπικά μόνο, να δοθεί μια εικόνα της διασποράς του καπνού στη μόνιμη κατάσταση. Όπως θα δούμε οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες από αυτές που εξάχθηκαν στη μελέτη άνευ ακτινοβολίας, ωστόσο φαίνεται η διασπορά του θερμού αέρα σε μεγαλύτερο ποσοστό του χώρου σε σχέση με προηγούμενως. Αυτό γίνεται ακριβώς διότι, με την προσθήκη ακτινοβολίας ως μοντέλου μεταφοράς της θερμότητας, γίνεται πιο εύκολη η απευθείας μεταφορά αυτής και σε κατώτερα στρώματα αέρα που στην προηγούμενη περίπτωση, λόγω της αποσβενούμενης φύσης της μεταφοράς με συναγωγή από στρώμα σε στρώμα έμεναν ανεπηρέαστα. Ακόμη λόγω της ενσωμάτωσης της εξίσωσης της ακτινοβολίας, έχουμε μεταφορά θερμότητας και από τα τοιχώματα της σήραγγας, η οποία προκαλεί περαιτέρω άνωση.

Οπισθοροές

Ακολουθεί η παράθεση των οπισθοροών όπως εξάχθηκαν από τη μελέτη μας και σύγκριση αυτών με αυτές των Fletcher et al. (1994). Η οπισθοροή και στις δύο περιπτώσεις φτάνει λίγο πριν την είσοδο, ενώ στην πειραματική μελέτη έφτανε στην είσοδο, με τον θερμό αέρα να διασπείρεται σε ελαφρά μεγαλύτερο εύρος στην περίπτωση της δικής μας μελέτης.



Εικόνα 6. 30— Οπισθοροή για case b



Εικόνα 6. 31 – Οπισθοροή για case b –Fletcher et al 1994

Μορφή της φλόγας (*flame shape*)

Αμέσως μετά παρουσιάζεται η μορφή της φλόγας για τις δύο περιπτώσεις μελέτης και η σύγκρισή τους με την μορφή που εξάγεται από τη μελέτη των Fletcher et al. (1994).

Αυτό που παρατηρείται είναι

Για την εστία φωτιάς

- Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη μελέτη μας φτάνει περί τους 1600K ενώ στη μελέτη των Fletcher et al. υπολογίζεται στους 1800K.

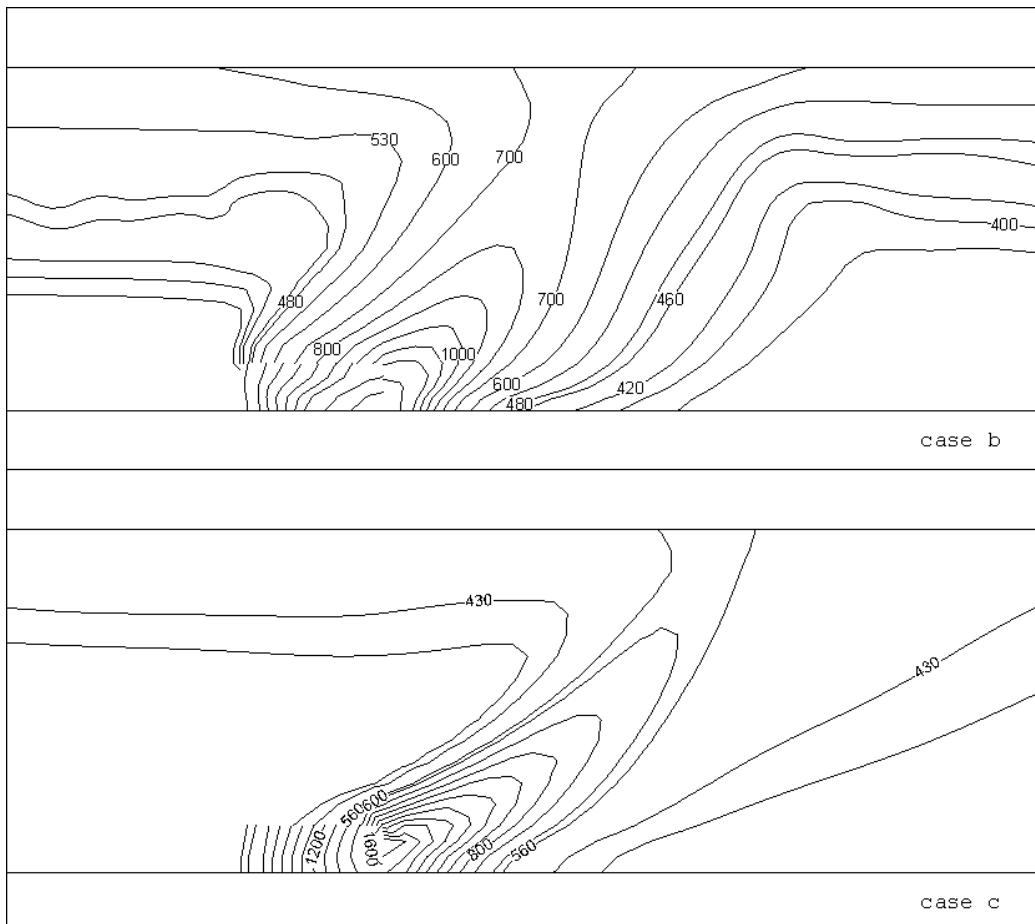
Για την περιοχή πάνω από την εστία φωτιάς

- Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται πάνω από την εστία στην μελέτη μας είναι μικρότερες σε σχέση με αυτή του Fletcher,

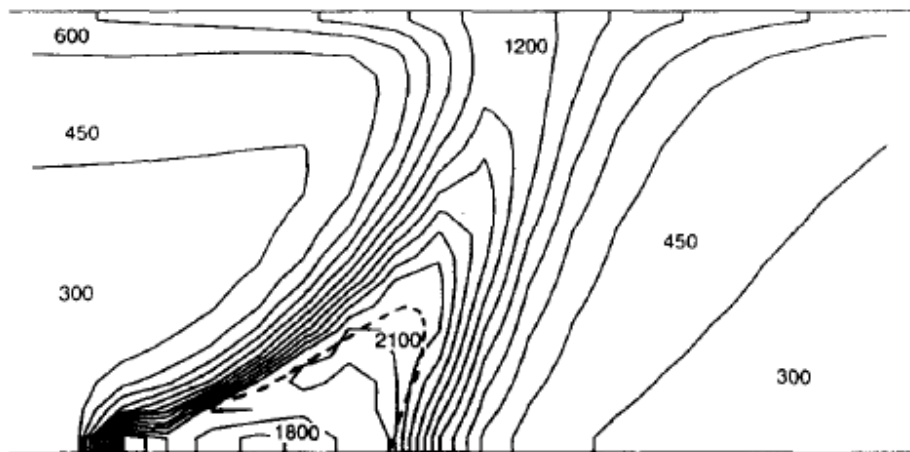
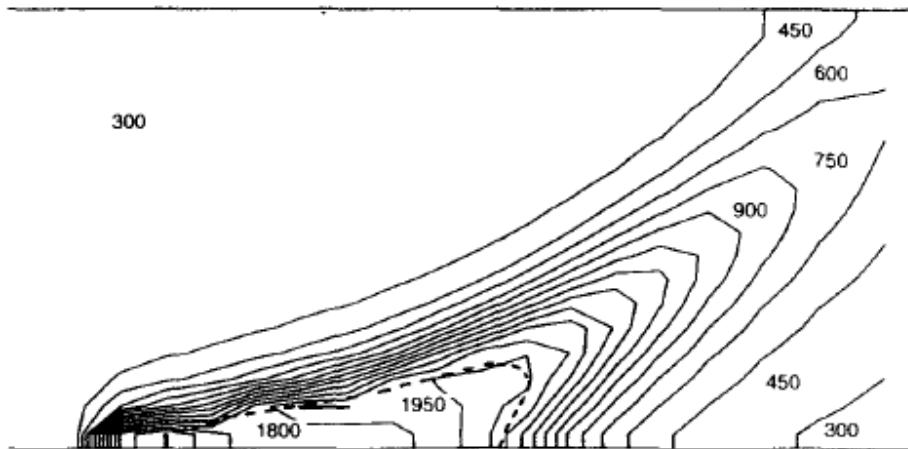
ως απόρροια της μικρότερης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην εστία της φωτιάς.

Για την περιοχή ένθεν και ένθεν της εστίας της φωτιάς

- η ύπαρξη μεγαλύτερης οπισθοροής, και άρα διασπορά ισοθερμοκρασιακών καμπυλών σε μεγαλύτερο εύρος, στην case b για τη μελέτη μας, σε αντίθεση με την μελέτη του Fletcher.
- η ύπαρξη μικρής οπισθοροής για την case c στην παρούσα μελέτη σε αντίθεση με αυτή των Fletcher όπου δεν παρουσιάζεται οπισθοροή. Παρόμοια συμπεριφορά για την case c παρατηρήθηκε και στην περίπτωση μελέτης χωρίς ακτινοβολία.
- η καλή ταύτιση στις κλίσεις της φλόγας για τις δύο περιπτώσεις ανάμεσα στη παρούσα μελέτη και σε αυτή των Fletcher et al. (1994).



Εικόνα 6. 32 – Μορφή της φλόγας

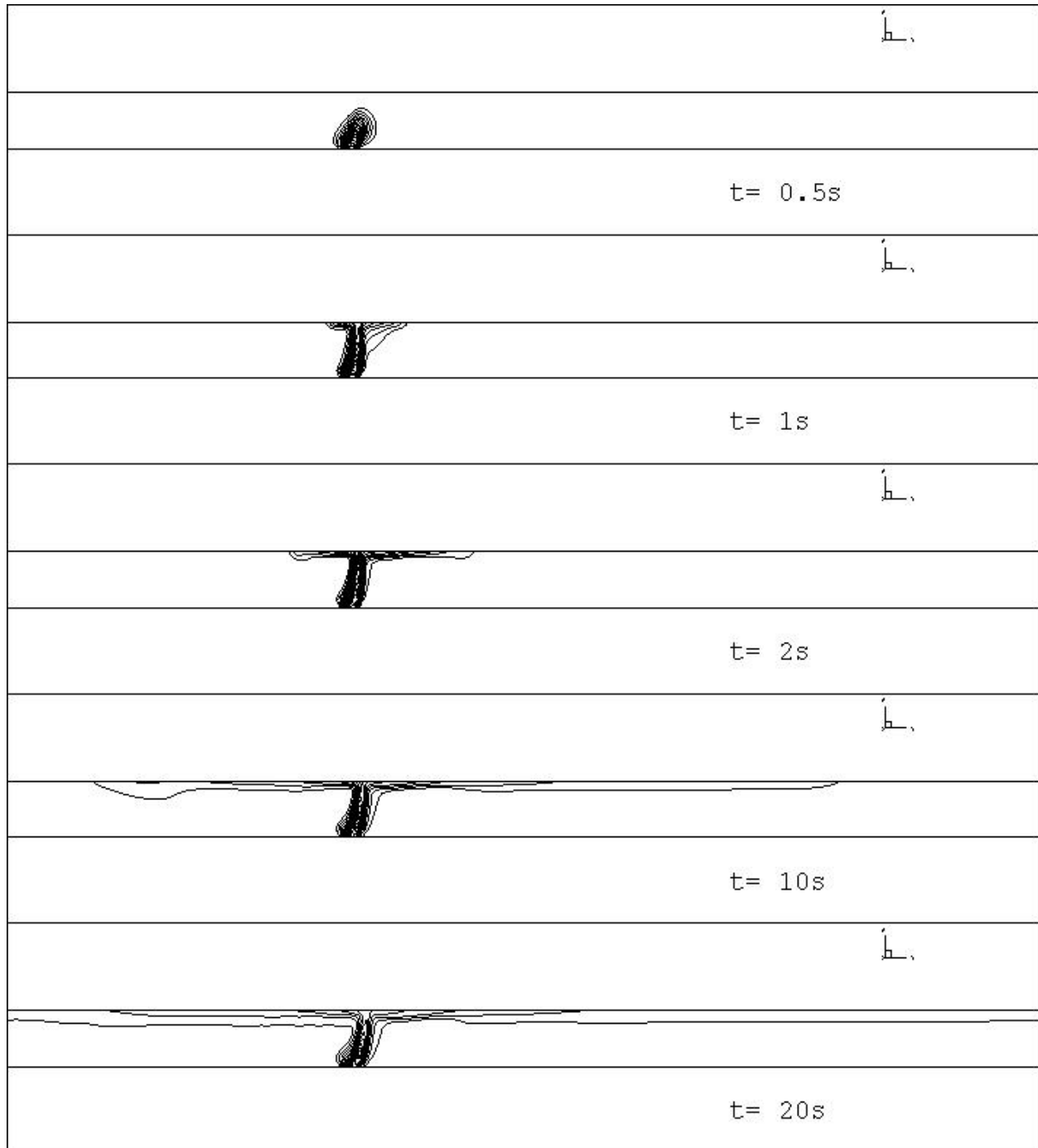
(b) Mid ventilation rate (flow speed of 0.85 m s^{-1}).(c) High ventilation rate (flow speed of 2.0 m s^{-1}).

Εικόνα 6. 33 – Μορφή της φλόγας Fletcher et al. (1994)

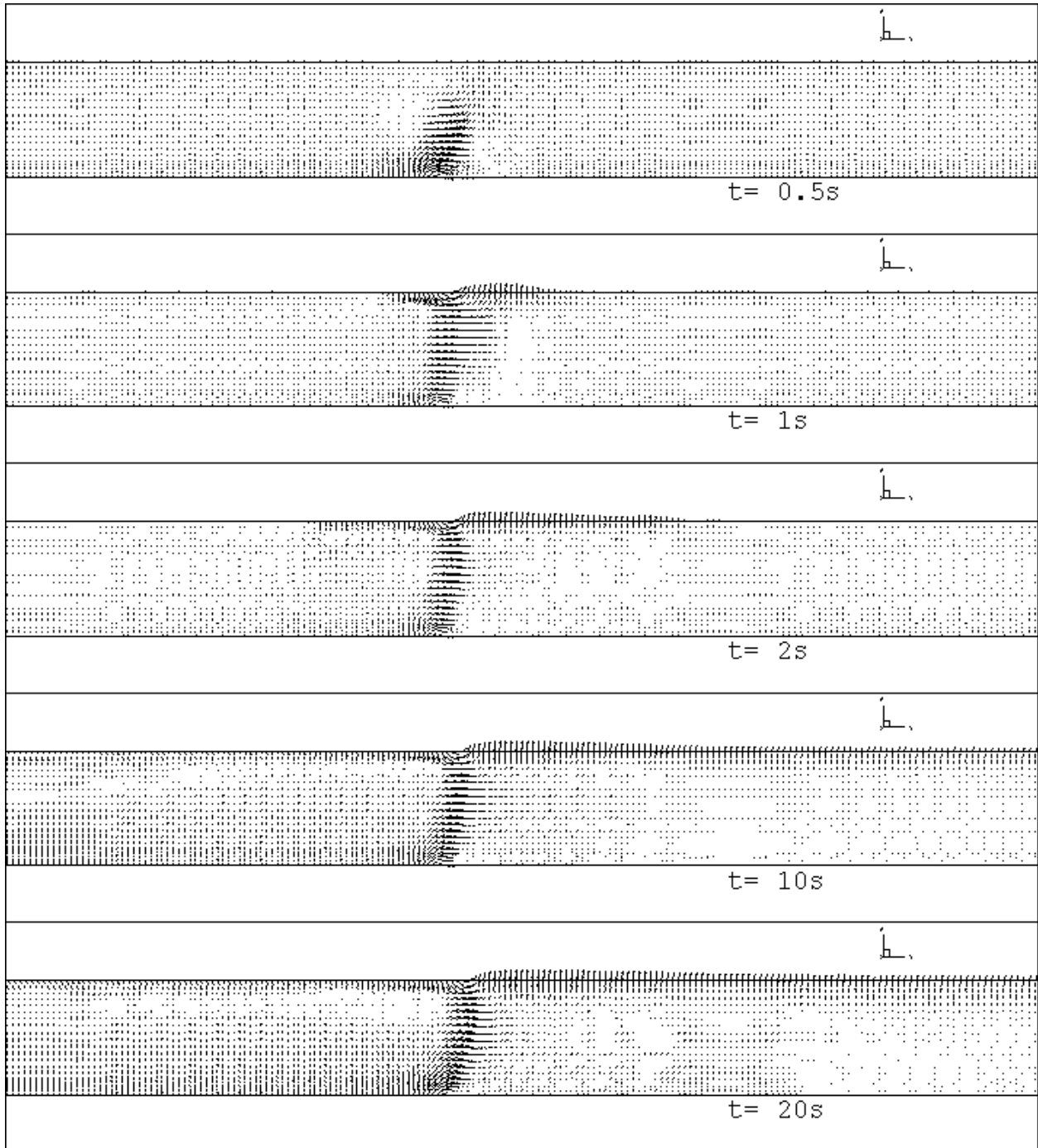
Προφίλ Θερμοκρασιών και Ταχυτήτων στη Μεταβατική Κατάσταση (Transient Temperature and Transient Velocity) για τις case b,c.

Παρατίθενται τα προφίλ που εξάχθηκαν κατά τη μελέτη του μεταβατικού φαινομένου και παρατηρούμε ότι στη μορφή τουλάχιστον δεν διαφέρουν πολύ από αυτά της μελέτης που έγινε χωρίς χρήση μοντέλου ακτινοβολίας. Πρέπει να ληφθεί υπόψη όμως, ότι μέχρι τα 20s όπως παρουσιάζεται παρακάτω το φαινόμενο, βρίσκεται ακόμη σε πλήρη εξέλιξη και δεν έχει φτάσει σε καμία περίπτωση κοντά στη μόνιμη κατάσταση, στην οποία εμφανίζονται σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις μελέτες με και χωρίς ακτινοβολία, ως προς τη

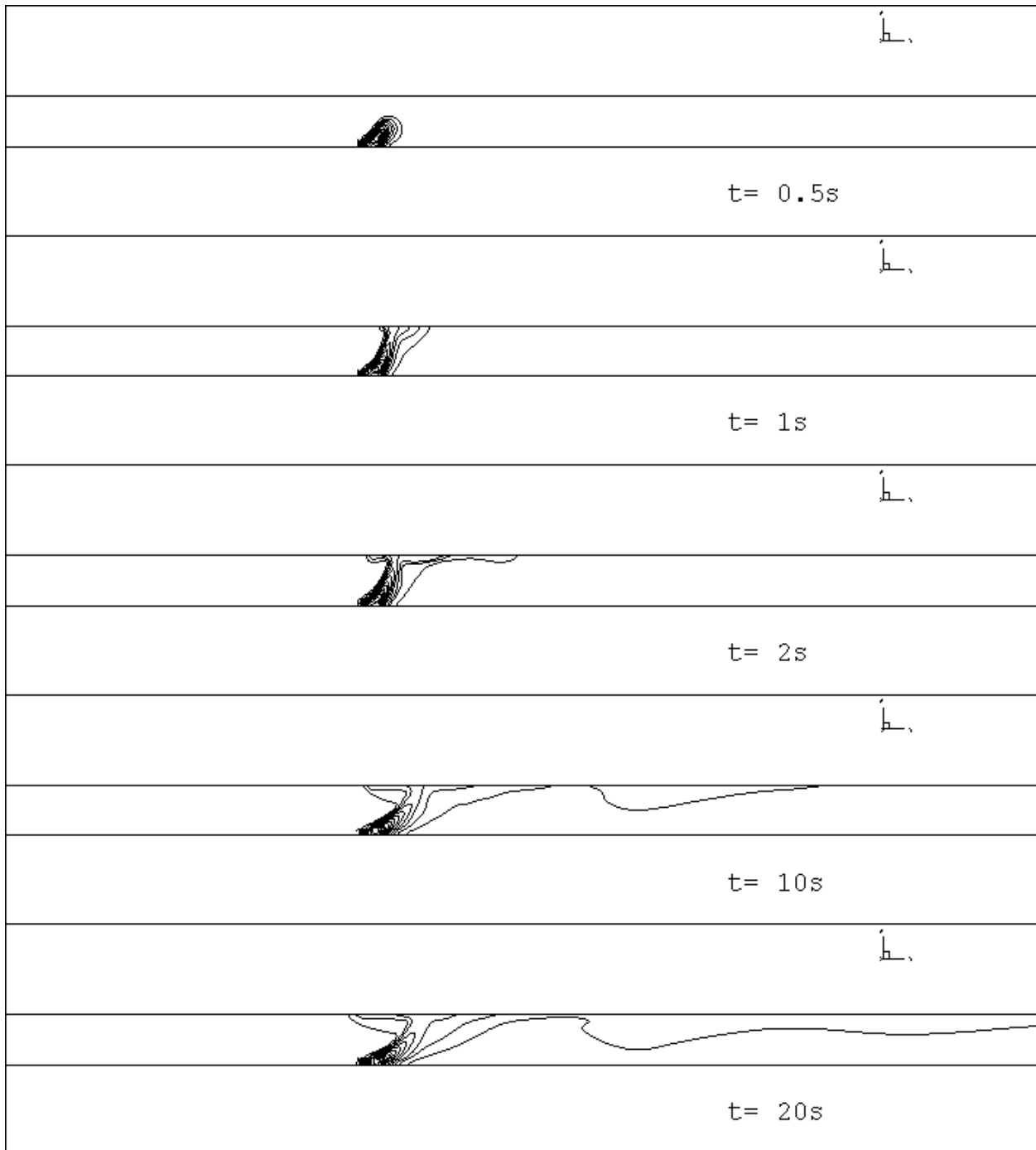
διασπορά του θερμού αέρα (κυρίως στην case b) όπως αναφέρθηκαν παραπάνω.



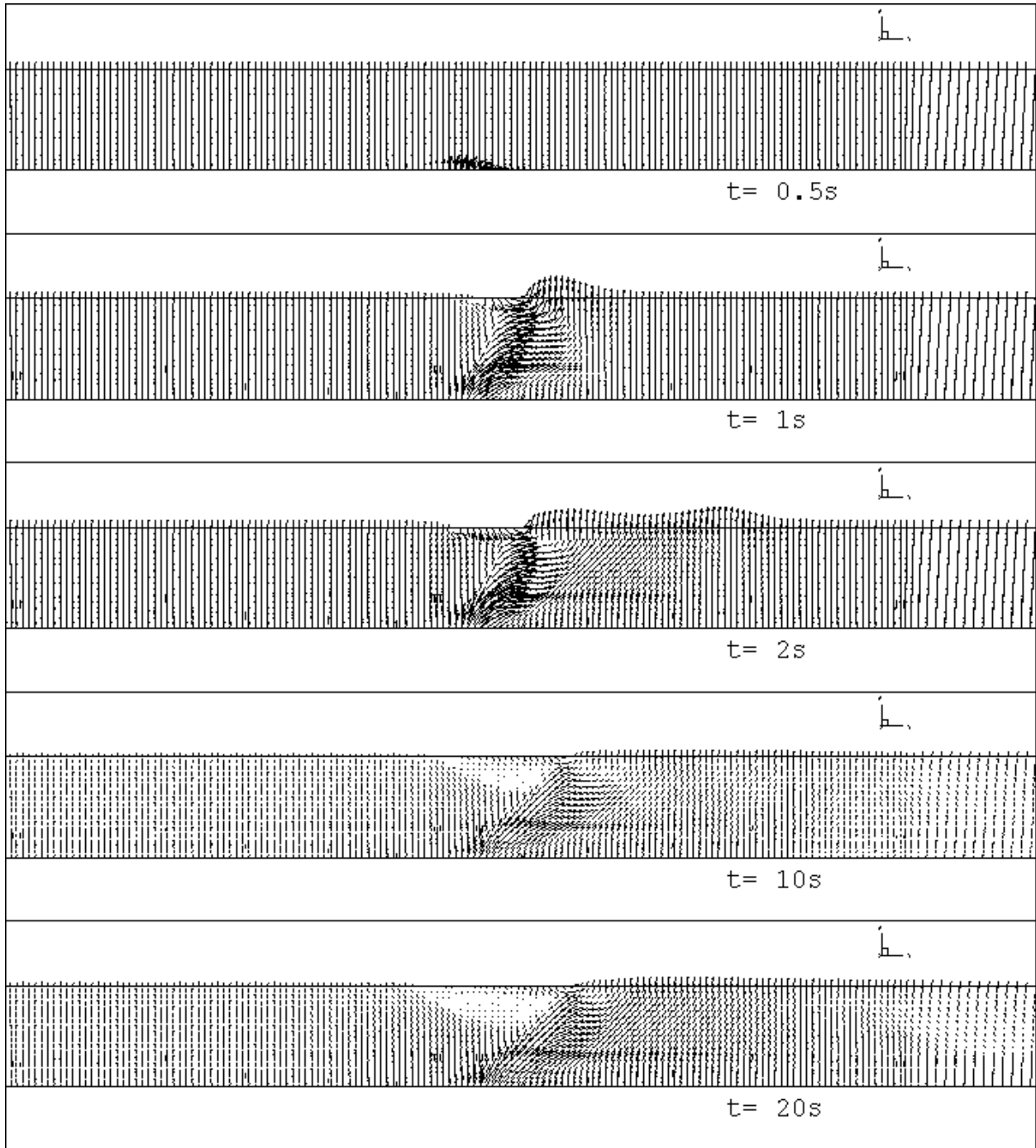
Εικόνα 6. 34 - Προφίλ. Θερμοκρασιών για case b



Εικόνα 6. 35 – Προφίλ Ταχυτήτων για case b



Εικόνα 6. 36 - Προφίλ Θερμοκρασιών για case c

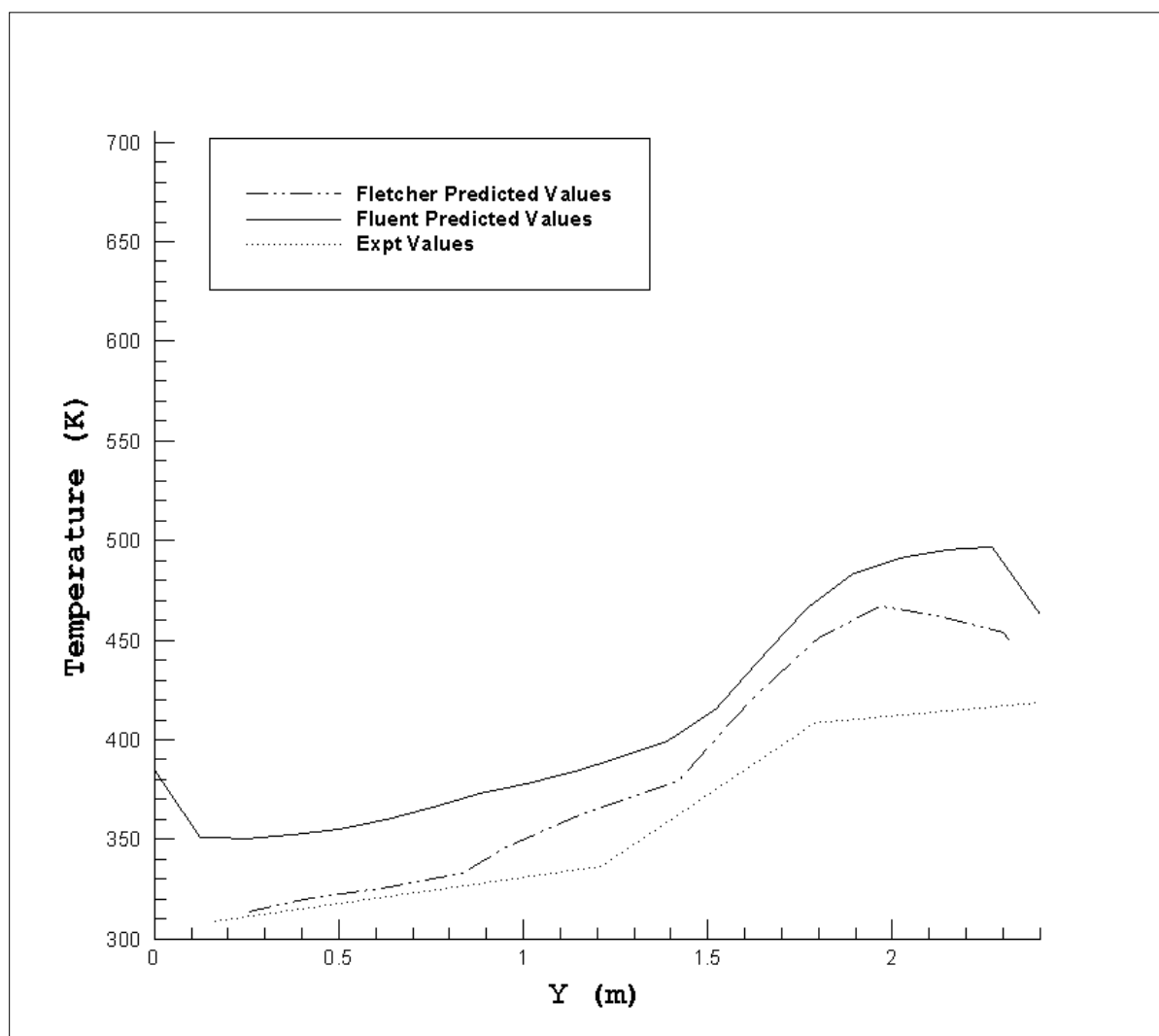


Εικόνα 6. 37 – Προφίλ Ταχυτήτων για case c

Εγκάρσιο Προφίλ Θερμοκρασίας για απόσταση 18m από τη φωτιά, κατά την πορεία της φωτιάς.

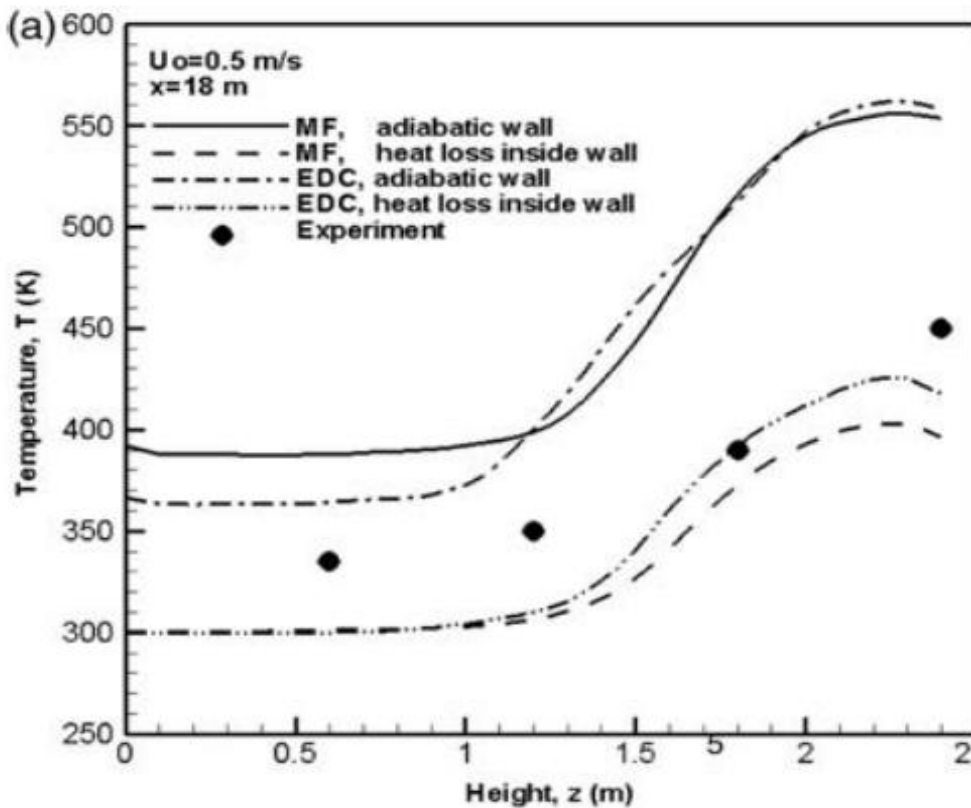
Ακολουθούν διαγράμματα θερμοκρασιών για μια γραμμή η οποία αν ολοκληρωθεί στο συνολικό μήκος της σήραγγας, δίνει το διάμηκες επίπεδο που διατρέχει τη σήραγγα και περνά από το μέσον της διατομής της. Η απόσταση της γραμμής αυτής είναι 18m από τη φωτιά, κατά την πορεία της φωτιάς.

Πρώτα παρατίθεται συγκριτικό διάγραμμα για την case b, που περιέχει τα αποτελέσματα της μελέτης μας, αυτά του Fletcher και τα πειραματικά.



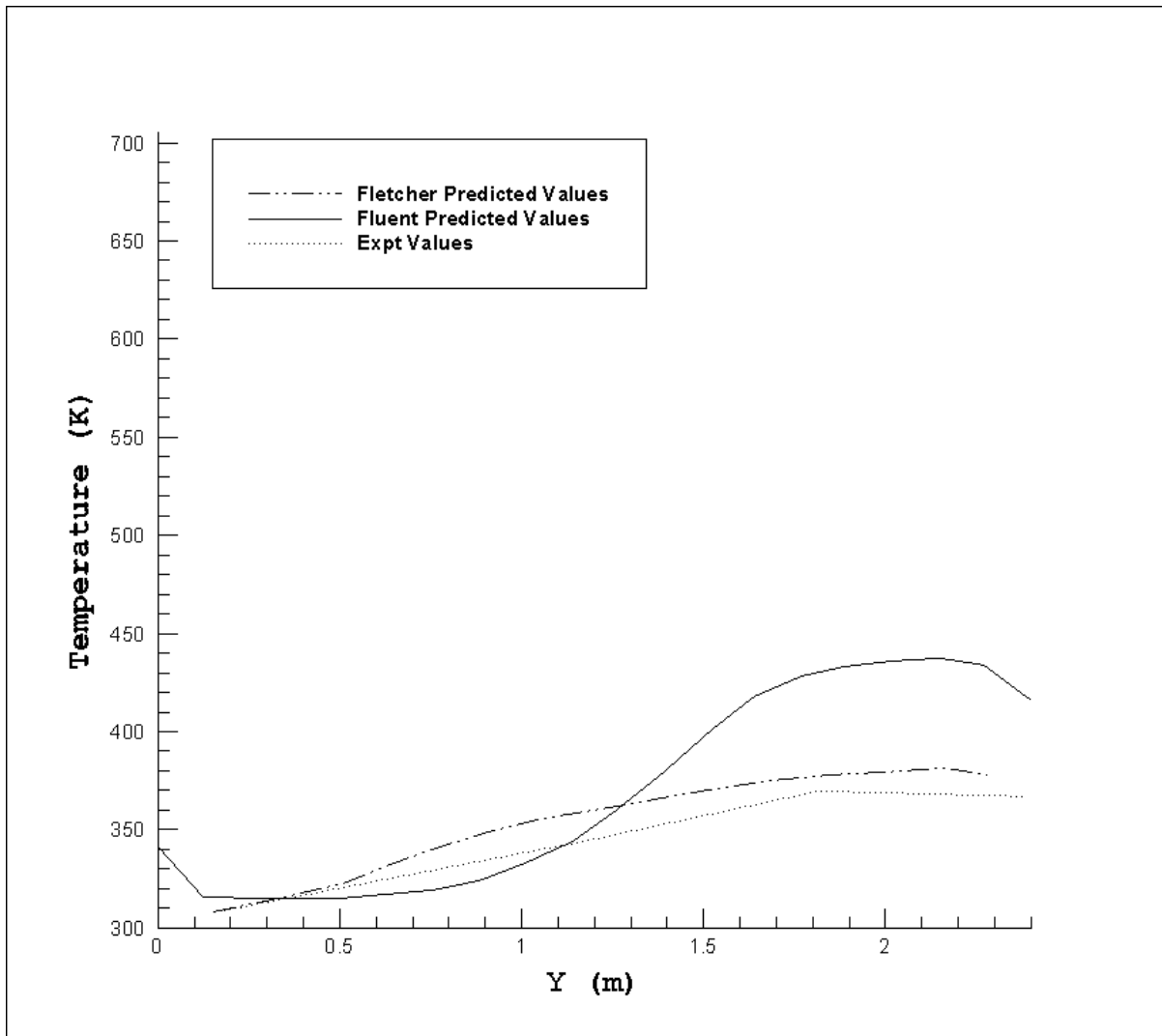
Εικόνα 6. 38 – Θερμοκρασιακά προφίλ για τη γραμμή μελέτης- case b

Οι καμπύλες παρουσιάζουν μια παρόμοια μορφή, αν και στην καμπύλη της δικής μας μελέτης εμφανίζονται ελαφρά αυξημένες τιμές σε σχέση με την καμπύλη του Fletcher. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι χρησιμοποιείται διαφορετικό μοντέλο ακτινοβολίας στις δύο μελέτες, επιπλέον στη μελέτη του Fletcher δεν θεωρείται απλοποιητικά ο θερμός αέρας ως καπνός, αλλά εισάγονται μοντέλα για την καύση και παραγωγή μίγματος αέρα-καυσίμου, και κυρίως από το γεγονός ότι θεωρούμε τα τοιχώματα (και το δάπεδο) της σήραγγας αδιαβατικά. Στην περίπτωση που τα θεωρούσαμε αγωγίμα, μέρος της θερμότητας που τώρα συγκεντρώνεται πάνω από αυτά, θα διέφευγε διαμέσου τους, μειώνοντας έτσι την εξαγόμενη θερμοκρασία στο παραπάνω προφίλ. Μια μελέτη για την επίδραση της εκλογής των τοιχωμάτων έχει γίνει από τους Miloua et. al (2011). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 6. 39-Θερμοκρασιακά Προφίλ για αδιαβατικά και αγωγή τοιχώματα αντίστοιχα (Miloua et. al, 2011)

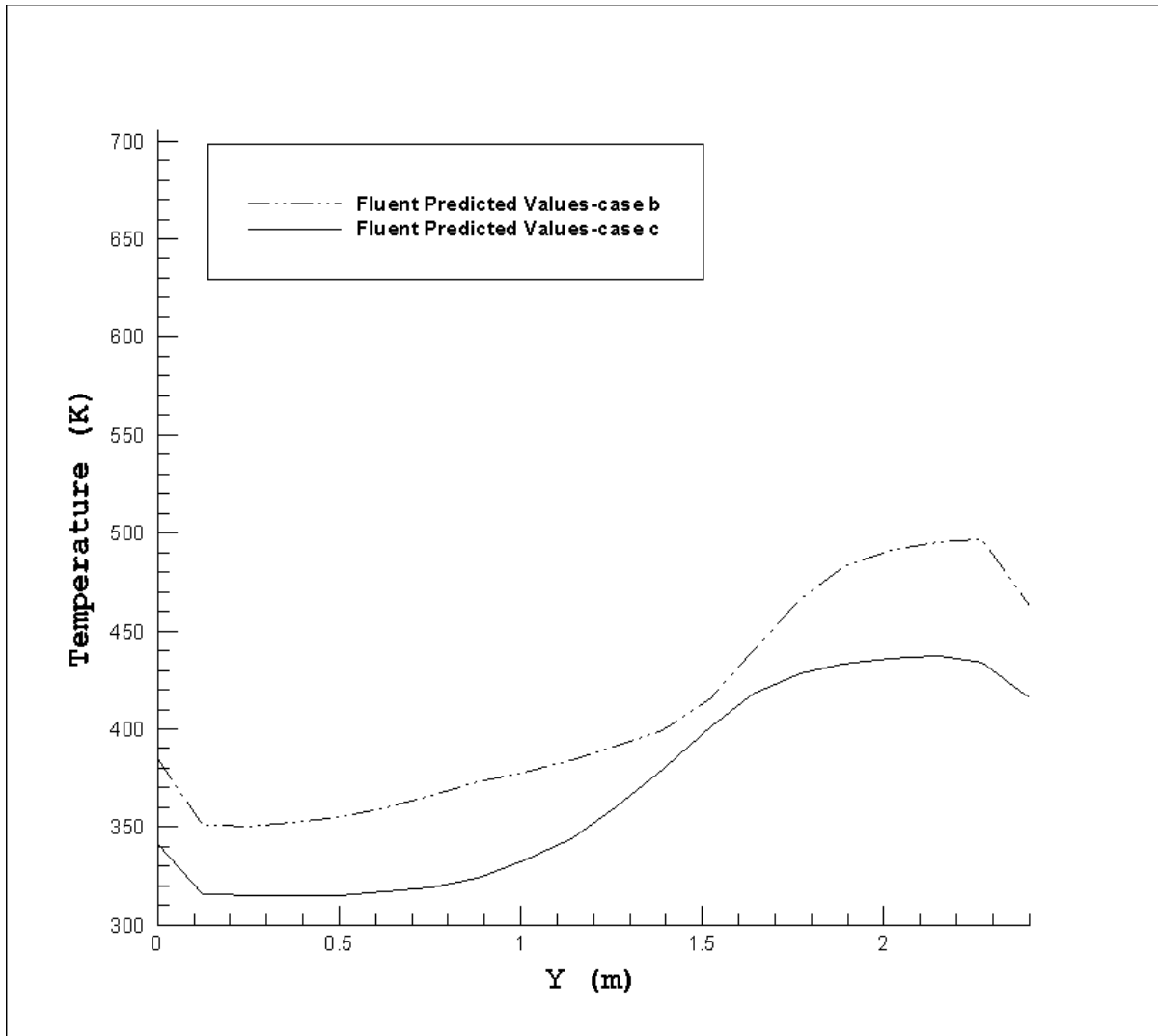
Στη συνέχεια παρατίθεται το ίδιο διάγραμμα για την case c.



Εικόνα 6. 40 - Θερμοκρασιακά προφίλ για τη γραμμή μελέτης- case c

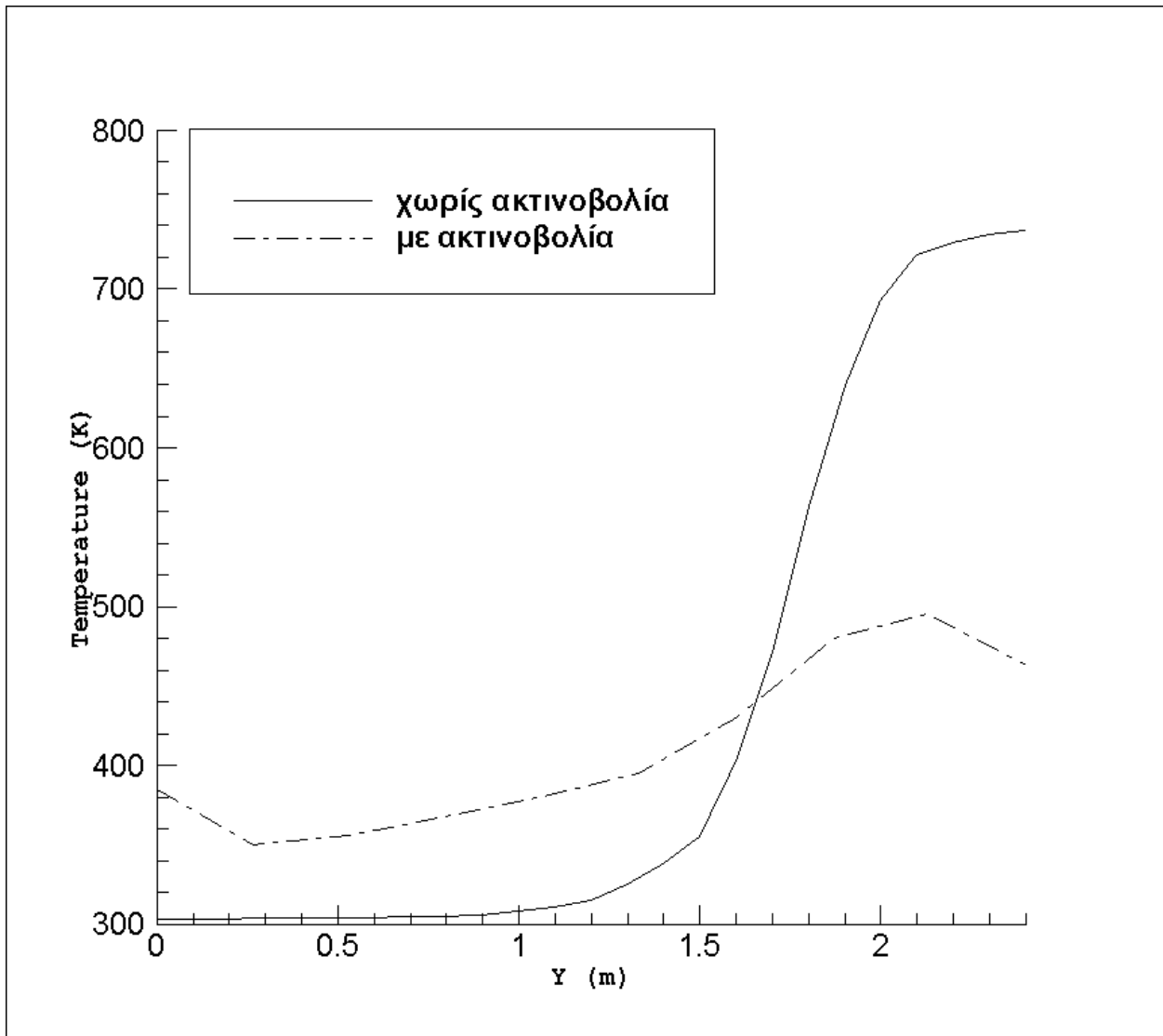
Εδώ παρατηρείται μία μεγαλύτερη απόκλιση ανάμεσα στα αποτελέσματα του Fletcher και της παρούσας μελέτης. Συγκεκριμένα, η καμπύλη που εξάγεται, στην περίπτωσή μας, διατηρεί την ημιτονοειδή μορφή σε αντίθεση με αυτή του Fletcher που είναι σχεδόν γραμμική. Εκλογή αγωγίμων τοιχωμάτων, θα βοηθούσε στην περαιτέρω σύγκλιση των αποτελεσμάτων, όπως είπαμε και παραπάνω.

Τέλος παρατίθενται δύο διαγράμματα. Το ένα είναι μια σύγκριση των καμπυλών των case b και case c που εξάχθηκαν από τη μελέτη μας και δείχνει αυτό που είναι αναμενόμενο, ότι για την περίπτωση με μεγαλύτερη ταχύτητα εξαερισμού έχουμε μικρότερες προιούσες θερμοκρασίες.



Εικόνα 6. 41 – Σύγκριση θερμοκρασιακών προφίλ cases b,c

Το επόμενο διάγραμμα είναι μια σύγκριση των θερμοκρασιακών προφίλ στη γραμμή μελέτης για τις περιπτώσεις με και χωρίς ακτινοβολία. Εδώ φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται όταν εφαρμόζεται μοντέλο ακτινοβολίας, είναι αρκετά μικρότερες, της τάξης του 40% σε σχέση με αυτές για προσομοίωση μόνο με το μοντέλο συναγωγής θερμότητας. Αυτό δείχνει ξεκάθαρα ότι η θερμότητα διασπείρεται σε μεγαλύτερο χωρικό εύρος στη σήραγγα, λόγω της συμμετοχής της ακτινοβολίας, και δε συγκεντρώνεται στα ανώτερα στρώματα αυτής όπως συμβαίνει στην πρώτη περίπτωση. Θα μπορούσαμε λοιπόν, απλοποιητικά, αντί να εισάγουμε εξισώσεις μεταφοράς ακτινοβολίας, στην προσομοίωσή μας, να μειώσουμε τον ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας \dot{Q} κατά ένα ποσοστό. Πειράματα καταδεικνύουν ότι αυτό το ποσοστό κυμαίνεται ανάμεσα σε 20-40% (Kozic et al. 2009).



Εικόνα 6. 42 – Σύγκριση των θερμοκρασιακών προφίλ στη γραμμή μελέτης για τα μοντέλα με και χωρίς ακτινοβολία.

Κεφάλαιο 7°

Συμπεράσματα – Επίλογος

7.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας ήταν η υπολογιστική μελέτη της κίνησης καπνού σε αεριζόμενη σήραγγα σε περίπτωση πυρκαγιάς. Για την επίτευξη αυτού του βασικού σκοπού προσομοιώθηκε πρώτα μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από θερμό σε ψυχρό τοίχωμα μέσα σε κύβο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, συγκρίθηκαν με αυτά των Ravnik et al. (2008). Στη συνέχεια εκτελέστηκε η ίδια προσομοίωση ενσωματώνοντας και μοντέλο ακτινοβολίας DO. Τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν, συγκρίθηκαν με αυτά της μελέτης των Colomer et al. (2004). Τέλος εκτελέστηκε η βασική προσομοίωση στη σήραγγα ενσωματώνοντας πρώτα μόνο φαινόμενα συναγωγής θερμότητας και εν συνεχεία και φαινόμενα ακτινοβολίας. Στην πρώτη περίπτωση επιλέχθηκε μοντέλο τύρβης RNG k-ε και η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε με αυτά των Gao et al. (2004) οι οποίοι είχαν επιλέξει μοντέλο τύρβης LES. Για την περίπτωση της ενσωμάτωσης της επίδρασης της ακτινοβολίας, επιλέχθηκε μοντέλο ακτινοβολίας DO, και τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν, συγκρίθηκαν με αυτά των Fletcher et al. (1994) οι οποίοι χρησιμοποίησαν μοντέλο ακτινοβολίας DTM.

7.2 Σύνοψη της Έρευνας

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

- Για φαινόμενα με ήπιες μεταβολές μεγεθών (θερμοκρασία, πίεση) όπου δεν παρατηρείται τυρβώδης ροή οι υπολογιστικές προσομοιώσεις παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ακρίβεια.
- Είναι καλό τα διαγράμματα που εξάγει μια μελέτη και δίνονται προς σύγκριση σε άλλες μελέτες, να αφορούν θεμελιώδη μεγέθη (πχ θερμοκρασία) και όχι μόνο παράγωγα μεγέθη (πχ ροή θερμότητας). Μικρά σφάλματα στον υπολογισμό παράγωγων μεγεθών μπορεί να έχουν επίπτωση στα τελικά αποτελέσματα κι έτσι παρότι υπάρχει σύγκλιση στα θεμελιώδη μεγέθη ο ερευνητής να θεωρεί τα αποτελέσματά του μη αποδεκτά.
- Πολύ μεγάλη σημασία στην επιτυχή προσομοίωση ενός φαινομένου έχει η σωστή πλεγματοποίηση. Συνεπώς για φαινόμενα με δυσκολίες στη σύγκλιση πρέπει να προηγείται της προσομοίωσης, μελέτη και εύρεση του βέλτιστου πλέγματος.
- Φαινόμενα με οξείες μεταβολές μεγεθών, όπως πχ η πυρκαγιά σε ένα πολύ μικρό χώρο, καθιστά πολύ δύσκολο στο υπολογιστικό πρόγραμμα να τα

προσομοιάσει με ακρίβεια. Η διαδικασία της υπολογιστικής μελέτης, δείχνει αδυναμία σύγκλισης με αποτέλεσμα να ακολουθηθούν συγκεκριμένα βήματα για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Αυτά είναι

- ο Αλλαγή των συντελεστών υποχαλάρωσης
 - ο Μελέτη Μεταβατικής Κατάστασης
 - ο Ειδικά για την περίπτωσή μας απεδείχθη ότι χρειάζονταν ειδικές ρυθμίσεις για την τυρβώδη συνεκτικότητα για να εξαχθούν σωστά αποτελέσματα με το εμπορικό υπολογιστικό πακέτο ANSYS Fluent.
- Σε δυσμενείς περιπτώσεις μελέτης, αντί για τη σύγκλιση της υπολογιστικής ανάλυσης, κριτήριο για την μετάβαση στη μόνιμη κατάσταση ορίστηκε η άφιξη της οπισθοροής στην είσοδο και η μονιμοποίηση του προφίλ της.
 - Εφαρμόζοντας όλα τα παραπάνω, τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν για τη βασική προσομοίωση της φωτιάς σε σήραγγα για φαινόμενα μόνο συναγωγής θερμότητας, εμφάνισαν καλή σύγκλιση με αυτά του Gao et al. (2004). Μικρές διαφορές που διαπιστώθηκαν μπορούν να εξηγηθούν από τα διαφορετικά μοντέλα τύρβης που χρησιμοποιήθηκαν και τις διαφορετικές οριακές συνθήκες. Ενώ οι αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα εξηγούνται από εγγενή μειονεκτήματα που παρουσιάζει η εφαρμογή της Boussinesq approximation.
 - Άξιο παρατήρησης είναι ότι στην οροφή της σήραγγας όπως διαπιστώθηκε, στη μόνιμη κατάσταση η θερμοκρασία δεν παραμένει σταθερή αλλά εμφανίζει μία διακύμανση της τάξης του 5%.
 - Με την ενσωμάτωση του μοντέλου ακτινοβολίας, παρατηρήθηκε καλή σύγκλιση των αποτελεσμάτων με αυτά των Fletcher et al. στα προφίλ των οπισθοροών και στη μορφή της φλόγας. Τα διαγράμματα θερμοκρασιών σε μια γραμμή μελέτης εμφάνισαν καλή σύγκλιση με κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις, απότοκο του διαφορετικού μοντέλου ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε στις δύο περιπτώσεις, αλλά και της θεώρησης των τοιχωμάτων μας ως αδιαβατικά.
 - Ενδιαφέρον τέλος παρουσιάζει η σύγκριση της μελέτης, με και χωρίς ακτινοβολία. Η ενσωμάτωση ακτινοβολίας σημαίνει
 - ο μεγαλύτερη εγκάρσια διασπορά του θερμού αέρα.
 - ο άρα και μικρότερες μέγιστες θερμοκρασίες στη γραμμή μελέτης σε σχέση με αυτές που προέκυπταν χωρίς την ενσωμάτωση της ακτινοβολίας.

7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η μελέτη μας, κατάφερε παρά το ότι υπάρχουν μεγάλες δυσκολίες, ιδιαίτερα με τη χρήση εμπορικού υπολογιστικού πακέτου να βγάλει αρκετά καλά αποτελέσματα. Έτσι μπορεί να βρει εφαρμογή σε πλήθος περιπτώσεων.

- Σε μελέτες όπου υπάρχουν πιο πολύπλοκες διατομές για τη σήραγγα, ημικυλινδρικές, τραπεζοειδείς και σύνθετες και όχι ορθογωνική όπως στην περίπτωση μας.
- Σε μελέτες με διαφορετικά και πιο σύνθετα συστήματα εξαερισμού, και άρα διαφορετικές οριακές συνθήκες
- Σε μελέτες με διαφορετικά μοντέλα ακτινοβολίας στο ίδιο υπολογιστικό πακέτο, για την εξαγωγή με μεγαλύτερη αξιοπιστία των διαφοροποιήσεων από μοντέλο σε μοντέλο.

Παλαιότερα το υπολογιστικό κόστος ήταν ένα βασικό εμπόδιο για την εκτέλεση τέτοιων προσομοιώσεων. Τα πλέγματα που εκλέγονταν ήταν αραιά και η μελέτη στη μεταβατική κατάσταση γινόταν για μικρά χρονικά διαστήματα εξέλιξης. Η εκλογή γωνιών φ και θ για την ακτινοβολία ήταν πολλαπλάσια επιβαρυντική. Όσο η υπολογιστική ισχύς αυξάνεται, πιο πολύπλοκα μοντέλα και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, μπορούν να ερευνηθούν, μετατρέποντας σιγά σιγά τις υπολογιστικές προσομοιώσεις από ένα επισκοπικό εργαλείο, σε πραγματική εναλλακτική των πειραματικών για φαινόμενα που εξ αντικειμένου είναι πολύ δύσκολο να μελετηθούν επί του πρακτέου.

Βιβλιογραφία

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1997. 'ASHRAE Handbook-HVAC Applications'
2. ANSYS, 2011. <http://www.ansys.com>
3. Baum, H.R., Ezekoye, O.A., McGrattan, K.B., Rehm, R.G., 1994. 'Mathematical modeling and computer simulation of fire phenomena'. Theoretical and Computational Fluid Dynamics 6, 125-139.
4. Beard, A., Carvel, R. 2005. 'The handbook of tunnel fire safety', Thomas Telford Publishing'
5. Bickel, J. O., Kuesel, T. R., King, E. H., 1996. 'Tunnel Engineering Handbook', Tunnel Ventilation, pp 384-438
6. Chui, E.H., Raithby, G.D., 1993. 'Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method', Numerical Heat Transfer, Part B, 23, 269-288
7. Colomer G., Costa M., Consul R., Oliva A., 2004. 'Three-dimensional numerical simulation of convection and radiation in a differentially heated cavity using the discrete ordinates method' Int. J. of Heat and Mass Transfer 47, 257-269
8. Fletcher D.F., Kent J.H., Apte V.B., Green A.R., 1994. 'Numerical Simulations of Smoke Movement from a pool fire in a ventilated tunnel', Fire Safety Journal 23, 305-325
9. Fluent, 2010. 'Fluent 13 User's Guide', Fluent Inc
10. Gao P.Z., Liu S.L., Chow W.K., Fong N.K., 2004. 'Large eddy simulations for studying tunnel smoke ventilation', Tunnelling and Underground Space Technology 19, 577-586
11. Kassemi M., Naranghi M. H. N., 1993. 'Analysis of radiation-natural convection interactions in 1 -g and low-g environments using the discrete exchange factor method', Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 17, pp.4141-4149
12. Kozic M., 2009. 'Influence of Thermal Boundary Conditions in a Numerical Simulation of a Small-Scale Tunnel Fire' Scientific Technical Review, Vol. LIX, No. 2, 18-23
13. Kunsch, J. P., 1999. 'Critical velocity and range of a pre-gas plume in a ventilated tunnel', Atmospheric Environment, Vol. 33, pp. 13-24
14. Kunsch, J. P., 2005. 'Modelling of tunnel fires and experimental validation', PAMM · Proc. Appl. Math. Mech. Vol. 5, pp. 677-678
15. Launder, B. E., Spalding, D. B., 1972. 'Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press', London England
16. Levy, S. S., Sandzimir, J. R. Harvey, N. A., Rosenbluth, E. M., 1999. 'CFD Model for Transverse Ventilation Systems', Proceedings of the First International Conference on Tunnel Fires and One Day Seminar on Escape from Tunnels, pp. 223-233, 5-7 May 1999, Lyon, France
17. Li, J. S. M., Chow, W. K., 2003. 'Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety Systems', Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18 pp. 435-452
18. Lin, Z., Chow, T. T., Tsang, C. F., Fong, K. F., Chan L. S., Shum, W. S., 2008. 'Effect of Ventilation System on Smoke and

- Fire Spread in a Public Transport Interchange', Fire Technology, Vol. 44, pp. 463-479
19. Liu, Y, Apte, V., 2004. 'Evaluation of PHOENICS CFD Fire Model against Room Corner Fire Experiments' Proceedings of the International PHOENICS user conference, May 2004, Melbourne, Australia
 20. Liu, Y., Liu, X., Paroz, B., 2006. 'CFD-Aided Tenability Assessment of Railway Tunnel Train Fire Scenarios', The International Journal of Ventilation, Vol. 5, No 2, pp 205-217
 21. McGrattan, K.B., Rehm, R.G., Baum, H.R., 1994. 'Fire-driven flows in enclosures'. Journal of Computational Physics 110, 285-291.
 22. McGrattan, K.B., Baum, H.R., Rehm, R.G., 1996. Numerical simulation of smoke plumes from large oil fires. Atmospheric Environment 30 (24), 4125-4136.
 23. Miloua H., Azzi A., Wang H. Y., 201. 'Evaluation of different numerical approaches for a ventilated tunnel fire', Journal of Fire Sciences, 1-27
 24. Murthy. J. Y., Mathur, S. R., 1998. "A Finite Volume Method For Radiative Heat Transfer Using Unstructured Meshes", AIAA-98-0860
 25. Raithby, G. D., Chui, E. H., 1990, "A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media". J. Heat Transfer 112, 415-423
 26. Ravnik J., Skerget L., Zunic Z., 2008. 'Velocity-vorticity formulation for 3D natural convection in an inclined enclosure by BEM', Int. J. of Heat and Mass Transfer 51, 4517-4527
 27. Yakhot, V., Orszag, S. A., 1986. "Renormalization Group Analysis of Turbulence I Basic Theory", Journal of Scientific Computing, 1(1) 1-51
 28. Αλεβίζος, Ν. 2011. 'Υπολογιστική Μελέτη της Κίνησης Καπνού κατά την Εκδήλωση Πυρκαγιάς σε Αεριζόμενη Σήραγγα', Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ
 29. Κουρκούμπας, Δ. Σ., 2008., 'Εξαερισμός Οδικών Σηράγγων και Σχετικά Μοντέλα Πυρκαγιών- Εφαρμογή στη Σήραγγα του Αγ. Ηλία', Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ
 30. Καβουλάκος, Ν. Β., 1999. 'Αερισμός και λοιπά Η/Μ συστήματα οδικών σηράγγων Εγνατίας οδού', Διημερίδα Οι Σήραγγες της Εγνατίας Οδού, "ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε." & Ε.Ε.Σ.Υ.Ε, Ιωάννινα, 15-16/10/99
 31. Μερεντίτης, Β., Ζήλιας, Θ., Κόσσυφας, Χ., Καραχάλιου, Π., Αλεξόπουλος, Κ. 2004. 'Σχέδιο οδηγιών συντάξεως μελετών, τεύχος σηράγγων έργα Η/Μ και φωτισμού υπαιθρίων οδικών σηράγγων'
 32. Συγγελάκης, Μ. 2013. 'Υπολογιστική Προσομοίωση Φωτιάς σε Διαμέρισμα υπό συνθήκες Εξαναγκασμένου Αερισμού', Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ

Συγγράμματα

33. Μαθιουλάκης, Δ. Σ., Αναγνωστόπουλος, Ι. Σ., Τουζόπουλος, Δ. Γ., 2005. 'Βιομηχανική Ρευστομηχανική', Εκδόσεις ΕΜΠ

34. Μαθιουλάκης, Δ. Σ. , 2006. 'Μηχανική των Ρευστών II (Σημειώσεις)', Εκδόσεις ΕΜΠ
35. Μπεργελές, Γ., 2006. 'Υπολογιστική Ρευστομηχανική', Εκδόσεις Συμεών
36. Τσαγγάρης, Σ., 2005. 'Μηχανική των Ρευστών', Εκδόσεις Συμεών
37. Φούντη Μ., Χουνιάλας Δ., 2003. 'Μεταφορά Θερμότητας II', Εκδόσεις ΕΜΠ