



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

Υπολογιστική Μελέτη της Κίνησης Καπνού κατά την Εκδήλωση
Πυρκαγιάς σε Αεριζόμενη Σήραγγα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεόδωρος Δ. Αλεβίζος

Επιβλέπων : Τσαγγάρης Σωκράτης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2010-2011 στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής του Τομέα Ρευστών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη της κίνησης καπνού σε αεριζόμενη σήραγγα κατά την περίπτωση πυρκαγιάς, με προσομοίωση μέσω του υπολογιστικού προγράμματος ANSYS FLUENT. Η μελέτη προϋποθέτει ευρύ φάσμα γνώσεων στη Μηχανική των Ρευστών, Βιομηχανική Ρευστομηχανική και Υπολογιστική Ρευστομηχανική και απαιτεί ανασκόπηση σε υπάρχουσες μελέτες στη βιβλιογραφία σχετικά με τον εξαερισμό σήραγγας υπό κανονικές συνθήκες και σε συνδυασμό με πυρκαγιά.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής Δρ. Σωκράτης Τσαγγάρης, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την εμπιστοσύνη και πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας αλλά και τη δυνατότητα που μου έδωσε να εξειδικευτώ σε ένα τόσο απαιτητικό και ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κωνσταντίνο Στόκο, υποψήφιο διδάκτορα ο οποίος είχε αναλάβει την επιτήρηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, για την πολύτιμη υποστήριξη που μου παρείχε και την αρωγή του στην εξοικείωση μου με το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS FLUENT.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Δημήτρη Παππά της SimTec Software and Services Ltd, πιστοποιημένου αντιπροσώπου της Ansys Inc. στη Νοτιοανατολική Ευρώπη, για τις συμβουλές του πάνω στο υπολογιστικό κομμάτι της μελέτης.

Περίληψη

Στη σημερινή εποχή, οι οδικές σήραγγες αποτελούν σημαντικά και απαραίτητα έργα οδικής υποδομής, καθώς διευκολύνουν τις ανθρώπινες μετακινήσεις και συμβάλλουν στην οικονομική και λειτουργική ανάπτυξη μιας χώρας. Οι κανόνες ασφαλείας αποτελούν το πιο σημαντικό κομμάτι ενός τέτοιου εγχειρήματος καθώς χρησιμοποιούνται από χιλιάδες ανθρώπους καθημερινά. Ως εκ τούτου, το φαινόμενο της πυρκαγιάς σε σήραγγες μεταφορών απαιτεί λεπτομερή μελέτη καθώς μπορεί να επιφέρει τεράστιες επιπτώσεις, όπως ανθρώπινες απώλειες αλλά και οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις.

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει το φαινόμενο εξαερισμού οδικής σήραγγας κατά την εκδήλωση πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα, το βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη της κίνησης καπνού κατά την έκτακτη περίπτωση εκδήλωσης φωτιάς σε κάποιο σημείο σήραγγας οδικής κυκλοφορίας. Η μελέτη του συγκεκριμένου φαινομένου προϋποθέτει έρευνα στην ευρεία βιβλιογραφία, στην οποία ερευνητές μελετούν το φαινόμενο πυρκαγιάς σε διάφορες περιπτώσεις σήραγγων και σε διάφορα μοντέλα και συνθήκες. Για την επίτευξη του βασικού σκοπού της συγκεκριμένης εργασίας μελετάται ο εξαερισμός οδικής σήραγγας σε περίπτωση φωτιάς μέσω προσομοίωσης σε υπολογιστικό πρόγραμμα. Στο πλαίσιο αυτό, υλοποιείται προσομοίωση του εξαερισμού σήραγγας με εστία φωτιάς σε κάποιο σημείο αυτής μέσω του υπολογιστικού προγράμματος Fluent του ANSYS. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μελέτη του φαινομένου συγκρίνονται με αντίστοιχη μελέτη περίπτωσης πυρκαγιάς σε σήραγγα σε διαφορετικό μοντέλο τύρβης.

Λέξεις Κλειδιά: Εξαερισμός, Σήραγγα, Εστία, Πυρκαγιά, Καπνός, Τύρβη, Υπολογιστικό Πλέγμα, Γεωμετρία, Fluent, ANSYS.

Abstract

In modern times the tunnels of transport constitute a very important and essential part of road infrastructure, as they facilitate human transportations and contribute to the economic and functional growth of a country. The rules of safety are of paramount importance of such projects as thousands of people are making use of tunnels daily. As a result, the phenomenon of fire occurrence in tunnels of transports requires a study in depth, as it is associated with enormous consequences, such as human losses but also economic and social consequences.

In the present thesis the phenomenon of ventilation of road tunnel in case of fire is studied in depth. More precisely, the objective of the present thesis is the study of the flow air at the case of fire within a tunnel of road traffic. For the study of the specific phenomenon a review in depth is essential in the wide literature, in which researchers are studying the phenomenon of fire in various cases of tunnels and in various models and conditions. In order to achieve the objective of the particular thesis the ventilation of a road tunnel is studied for the case of pool fire through simulation in computational program. In this context, the occurrence of pool fire within the road tunnel is simulated by the computational program Fluent of ANSYS. The results from the study of phenomenon are discussed and compared with a corresponding study of fire case in tunnel under a different model of turbulence.

Keywords: Ventilation, Tunnel, Pool, Fire, Smoke, Turbulence, Mesh, Geometry, Fluent, ANSYS.

Πίνακας Περιεχομένων

Λίστα Εικόνων	vi
Λίστα Πινάκων.....	ix
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός της Διπλωματικής.....	2
1.2 Δομή της Διπλωματικής	3
1.2.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	3
1.2.2 Μαθηματικό Υπόβαθρο.....	3
1.2.3 Υπολογιστικό Μοντέλο και Μεθοδολογία.....	3
1.2.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	4
1.2.5 Συμπεράσματα και Επίλογος.....	4
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	6
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Νομοθετικό Πλαίσιο.....	7
2.3 Μελέτη Ατυχημάτων	9
2.4 Συστήματα Εξαερισμού.....	11
2.4.1 Φυσικός Εξαερισμός	12
2.4.2 Διαμήκης Εξαερισμός	13
2.4.3 Ημιεγκάρσιος Εξαερισμός.....	15
2.4.4 Εγκάρσιος Εξαερισμός	16
2.4.5 Επιλογή Τύπου Συστήματος Εξαερισμού	18
2.5 Επίδραση της Πυρκαγιάς Ανάλογα με το Σύστημα Εξαερισμού.....	19
2.6 Μελέτες και Σχεδιασμός Εξαερισμού Σήραγγας για την Περίπτωση Πυρκαγιάς	20
2.7 Πλεονεκτήματα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής.....	22
2.8 Ερευνητικές και Αριθμητικές Μελέτες	23
2.8.1 Προσομοίωση LES για τη Μελέτη Καπνού σε Αεριζόμενη Σήραγγα.....	24
2.8.2 Μοντέλο Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD) για Αντίθετη Ροή Καπνού.....	25
2.8.3 Εκτίμηση Απόδοσης Συστημάτων Ασφαλείας σε Σήραγγες με Εξαερισμό	26
2.8.4 Έλεγχος Καπνού σε Σήραγγες με Διαμήκη Εξαερισμό	29

2.8.5	Εκτίμηση Μοντέλου PHOENICS CFD σε Περίπτωση Πυρκαγιάς	30
2.8.6	Μοντέλο CFD Πυρκαγιάς σε Σήραγγα	31
2.8.7	Πρόβλεψη Παραγώγων Αιθάλης και CO σε Σήραγγα με Εξαερισμού.....	33
Κεφάλαιο 3: Μαθηματικό Υπόβαθρο.....		35
3.1	Μαθηματικό Μοντέλο	36
3.1.1	Θεμελιώδεις Εξισώσεις	36
3.1.2	Μοντέλα Τύρβης	39
3.2	Υπολογιστικό Πρόγραμμα ANSYS FLUENT	42
3.2.1	Εισαγωγή στο ANSYS FLUENT	43
3.2.2	Εφαρμογές του ANSYS FLUENT	44
Κεφάλαιο 4: Υπολογιστικό Μοντέλο και Μεθοδολογία		48
4.1	Αριθμητική Προσομοίωση	49
4.2	Αριθμητική Προσομοίωση στο ANSYS FLUENT	51
4.2.1	Γεωμετρία (DesignModeler)	51
4.2.2	Διαμόρφωση Πλέγματος (Meshing).....	56
4.2.3	Πρόγραμμα Επίλυσης Εξισώσεων (Fluent)	62
4.2.4	Αποτελέσματα (CFD Post).....	69
Κεφάλαιο 5: Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....		70
5.1	Στιγμαία Πεδία Θερμοκρασίας και Ταχύτητας	72
5.2	Σχήμα της Φλόγας και Κίνηση του Ζεστού Αέρα στη Μόνιμη Κατάσταση	81
5.3	Αντίθετη Ροή του Ζεστού Αέρα (Backflow).....	83
5.4	Συμπεριφορά της Ροής στην Περιοχή της Φωτιάς.....	84
5.5	Κατανομή Θερμοκρασίας στη Σήραγγα.....	86
5.6	Πηγή θερμότητας σε ανοιχτό περιβάλλον.....	88
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα & Επίλογος.....		92
6.1	Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας	93
6.2	Σύνοψη της Έρευνας	93
6.3	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	94
Βιβλιογραφία.....		95
Συγγράμματα.....		101

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1 Πλάνο της Διπλωματικής.....	5
Εικόνα 2.1 Η πυρκαγιά στη σήραγγα Mont Blanc.....	10
Εικόνα 2.2 Διαμόρφωση διαμήκους εξαερισμού.....	13
Εικόνα 2.3 Διαμήκης αερισμός με ωστικού τύπου ανεμιστήρες.....	15
Εικόνα 2.4 Διαμήκης αερισμός με Κεντρικό Βοηθητικό αγωγό.....	15
Εικόνα 2.5 Ημιεγκάρσιος αερισμός με αγωγούς στην Οροφή.....	16
Εικόνα 2.6 Εγκάρσιος αερισμός με αγωγούς στην οροφή.....	17
Εικόνα 3.1 Στοιχειώδης όγκος ρευστού.....	37
Εικόνα 3.2 Πλατφόρμα ANSYS Workbench.....	44
Εικόνα 3.3 Γεωμετρία Αεροσκάφους με ANSYS DesignModeler.....	45
Εικόνα 3.4 Ένα σύνθετο πλέγμα με ANSYS Meshing.....	46
Εικόνα 4.1 Γεωμετρία και διαστάσεις της σήραγγας.....	49
Εικόνα 4.2 Πηγή θερμότητας σε (α) γεωμετρία κυλίνδρου και (β) γεωμετρία παραλληλεπίπεδου.....	52
Εικόνα 4.3 Γεωμετρία σήραγγας-φωτιάς με δύο παραλληλεπίπεδα.....	52
Εικόνα 4.4 Γεωμετρία- Βήμα 1.....	53
Εικόνα 4.5 Γεωμετρία- Βήμα 2.....	54
Εικόνα 4.6 Γεωμετρία- Βήμα 3.....	54
Εικόνα 4.7 Γεωμετρία- Βήμα 4.....	55
Εικόνα 4.8 Ενσωμάτωση οκτώ παραλληλεπίπεδων σε μια γεωμετρία.....	55
Εικόνα 4.9 Πλέγμα 1-Αραιό.....	57
Εικόνα 4.10 Πλέγμα 2 και τελικό.....	57
Εικόνα 4.11 Πλέγμα 3-Πυκνό.....	57
Εικόνα 4.12 Διαμόρφωση πλέγματος- Βήμα 1.....	58
Εικόνα 4.13 Διαμόρφωση πλέγματος- Βήμα 2.....	59
Εικόνα 4.14 Διαμόρφωση πλέγματος- Βήμα 3.....	60
Εικόνα 4.15 Διαμόρφωση πλέγματος- Βήμα 3.....	60
Εικόνα 4.16 Διαμόρφωση πλέγματος-Βήμα 3. Εγκάρσια τομή στην περιοχή της πηγής θερμότητας.....	61

Εικόνα 4.17 Διαμόρφωση πλέγματος-Βήμα 3. Κάτοψη στην περιοχή της πηγής θερμότητας	61
Εικόνα 4.18 Στοιχεία ποιότητας πλέγματος	62
Εικόνα 4.19 Problem Setup- General	63
Εικόνα 4.20 Problem Setup- Models	64
Εικόνα 4.21 Problem Setup- Materials	65
Εικόνα 4.22 Problem Setup- Cell Zone Conditions	65
Εικόνα 4.23 Boundary Conditions Outlet	66
Εικόνα 4.24 Boundary Conditions Inlet	67
Εικόνα 4.25 Boundary Conditions Walls	67
Εικόνα 4.26 Σχήματα διακριτοποίησης	68
Εικόνα 4.27 Συντελεστές υποχαλάρωσης	68
Εικόνα 4.28 Εκκίνηση Υπολογισμών	69
Εικόνα 5.1 Θερμοκρασιακά πεδία σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές- Case c	73
Εικόνα 5.2 Πεδία ταχύτητας σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές- Case c	75
Εικόνα 5.3 Σύγκριση θερμοκρασιακών πεδίων μοντέλων τύρβης k-ε και LES αντίστοιχα- Case b	76
Εικόνα 5.4 Σύγκριση πεδίων ταχύτητας μοντέλων τύρβης k-ε και LES αντίστοιχα- Case b.	78
Εικόνα 5.5 Θερμοκρασιακά πεδία σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές- Case a	79
Εικόνα 5.6 Πεδία ταχύτητας σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές- Case a	80
Εικόνα 5.7 Σχηματισμοί φλόγας υπολογισμένοι για τις τρεις περιπτώσεις από k-ε και LES αντίστοιχα	82
Εικόνα 5.8 Αποτελέσματα LES από μελέτη των Gao κα. (2004)	84
Εικόνα 5.9 Αποτελέσματα k-ε από μελέτη των Gao κα. (2004)	84
Εικόνα 5.10 Αντίθετη ροή του ζεστού αέρα	84
Εικόνα 5.11 Κατανομή ταχύτητας στη σήραγγα για την Case b- Αποτελέσματα k-ε	85
Εικόνα 5.12 Κατανομή ταχύτητας στη σήραγγα για την Case b- Αποτελέσματα LES	85
Εικόνα 5.13 Κατανομή της θερμοκρασίας [K] 20 m μετά τη φωτιά (Case b) για (α) k-ε και (β) LES	86
Εικόνα 5.14 Τιμές της θερμοκρασίας ανά ύψος σε διάφορες αποστάσεις από τη φωτιά (k-ε)	87
Εικόνα 5.15 Τιμές της θερμοκρασίας ανά ύψος σε διάφορες αποστάσεις από τη φωτιά (LES)	87
Εικόνα 5.16 Υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς	88

Εικόνα 5.17 Πεδία ταχύτητας για τη μόνιμη κατάσταση.....	89
Εικόνα 5.18 Πεδία θερμοκρασίας στη μόνιμη κατάσταση	89
Εικόνα 5.19 Τιμές θερμοκρασίας ανά ύψος για αποτελέσματα k-ε.....	90
Εικόνα 5.20 Τιμές θερμοκρασίας ανά ύψος για αποτελέσματα LES και πειραματικά αποτελέσματα.....	91

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1 Παραδείγματα μεγαλύτερων ατυχημάτων σε σήραγγα.....	11
Πίνακας 4.1 Τιμές \dot{m} και ταχύτητας εξαερισμού για τις τρεις περιπτώσεις μελέτης	50
Πίνακας 4.2 Τιμές \dot{Q} και \dot{Q}/V για τις τρεις περιπτώσεις μελέτης	51
Πίνακας 5.1 Απόκλιση στις τιμές θερμοκρασίας [K] με μοντέλο LES και k-ε.....	83

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει το φαινόμενο εξαερισμού οδικής σήραγγας σε περίπτωση φωτιάς σε σημείο αυτής. Σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει στον αναγνώστη το βασικό αντικείμενο έρευνας της παρούσας διπλωματικής με θέμα «Υπολογιστική Μελέτη της Κίνησης Καπνού κατά την Εκδήλωση Πυρκαγιάς σε Αεριζόμενη Σήραγγα» και να αναλύσει τη βασική δομή της διπλωματικής για την επίτευξη του βασικού αυτού σκοπού.

1.1 Σκοπός της Διπλωματικής

Οι οδικές σήραγγες αποτελούν σημαντικά έργα οδικής υποδομής, ιδιαίτερα στην Ελλάδα όπου η υλοποίηση μεγάλων αναπτυξιακών έργων έχει οδηγήσει στην αύξηση του αριθμού οδικών σηράγγων τις τελευταίες δεκαετίες. Το φαινόμενο της πυρκαγιάς σε σήραγγες μπορεί να επιφέρει τεράστιες συνέπειες, όπως ανθρώπινες απώλειες αλλά και οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Έτσι, η μελέτη του φαινομένου κρίνεται απαραίτητη, ιδιαίτερα με χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων που επιτρέπουν τη διαμόρφωση διαφόρων μοντέλων συμπεριφοράς ρευστών.

Το βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη του εξαερισμού κατά την έκτακτη περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς σε σήραγγα οδικής κυκλοφορίας. Η μελέτη του συγκεκριμένου φαινομένου προϋποθέτει έρευνα στην ευρεία βιβλιογραφία, στην οποία μελετάται το φαινόμενο πυρκαγιάς σε διάφορες περιπτώσεις σηράγγων και σε διάφορα μοντέλα. Για την επίτευξη του βασικού σκοπού της συγκεκριμένης εργασίας μελετάται ο εξαερισμός οδικής σήραγγας σε περίπτωση φωτιάς μέσω προσομοίωσης στο υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS FLUENT και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μελέτη του φαινομένου συγκρίνονται με αντίστοιχη μελέτη περίπτωσης πυρκαγιάς σε σήραγγα σε διαφορετικό μοντέλο τύρβης.

1.2 Δομή της Διπλωματικής

Προκειμένου να μελετηθεί το φαινόμενο σε βάθος και να γίνει κατανοητό στον αναγνώστη, είναι σημαντικό να παρουσιαστεί, στο κεφάλαιο αυτό, η δομή, η οποία αναδεικνύει τη σειρά διαδικασιών που ακολουθήθηκαν για τη συγκεκριμένη μελέτη.

1.2.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Προκειμένου να μελετηθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα σε βάθος, είναι απαραίτητη η ανασκόπηση μελετών στην υπάρχουσα βιβλιογραφία με σκοπό να παρουσιαστούν τα διάφορα μοντέλα και περιπτώσεις και τα βασικά τους αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, στο δεύτερο κεφάλαιο «Βιβλιογραφική Ανασκόπηση», γίνεται εκτενής ανασκόπηση των μελετών στον εξαερισμό σήραγγας και την περίπτωση πυρκαγιάς σε αεριζόμενη σήραγγα. Έτσι, εξετάζεται η αναγκαιότητα μελέτης του φαινομένου, μέσα από την ισχύουσα νομοθεσία και τα μεγαλύτερα ατυχήματα σε σήραγγες, τις διάφορες περιπτώσεις εξαερισμού οδικών σηράγγων, τη χρήση Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD) για τη μελέτη του φαινομένου και τις υπάρχουσες ερευνητικές μελέτες σχετικά με τα διάφορα μοντέλα.

1.2.2 Μαθηματικό Υπόβαθρο

Στη συνέχεια, στο τρίτο κεφάλαιο «Μαθηματικό Υπόβαθρο», η παρούσα μελέτη παρουσιάζει το μαθηματικό μοντέλο που θα ακολουθηθεί στη συγκεκριμένη έρευνα. Πιο συγκεκριμένα, στο μαθηματικό μοντέλο περιγράφονται αρχικά οι θεμελιώδεις εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής και αναλύονται οι συνθήκες μελέτης του φαινομένου. Στη συνέχεια περιγράφεται το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS FLUENT και οι βασικές εφαρμογές του που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του φαινομένου, προκειμένου να αναλυθεί η μεθοδολογία επίλυσης στο επόμενο κεφάλαιο.

1.2.3 Υπολογιστικό Μοντέλο και Μεθοδολογία

Στο τέταρτο κεφάλαιο «Υπολογιστικό Μοντέλο και Μεθοδολογία» παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία προσομοίωσης μέσω του υπολογιστικού προγράμματος ANSYS FLUENT και οι παράμετροι του που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη μελέτη του φαινομένου

πυρκαγιάς σε σήραγγα. Έτσι, αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επίλυση των εξισώσεων μέσω του συγκεκριμένου προγράμματος προκειμένου να παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο τα αποτελέσματα της έρευνας.

1.2.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Στο πέμπτο 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 κίνησης του αέρα και της διακύμανσης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της σήραγγας κατά την περίπτωση φωτιάς. Τέλος, τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίνονται με αυτά αντίστοιχης έρευνας σε διαφορετικό μοντέλο τύρβης.

1.2.5 Συμπεράσματα και Επίλογος

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο «Συμπεράσματα και Επίλογος» τα συμπεράσματα και αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται και σχολιάζονται, προσφέροντας έτσι στον αναγνώστη μια ολοκληρωμένη και σφαιρική εικόνα της παρούσας έρευνας και των σημαντικότερων ευρημάτων που προέκυψαν.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το πλάνο που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής.



Εικόνα 1.1 Πλάνο της Διπλωματικής

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο το φαινόμενο πυρκαγιάς σε σήραγγα θα εξετασθεί μέσα από ανασκόπηση στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, προκειμένου να παρουσιασθεί η σημαντικότητα μελέτης του φαινομένου μέσα από τις υπάρχουσες έρευνες, μελέτες και ευρήματα. Πιο συγκεκριμένα, η εκδήλωση πυρκαγιάς σε αεριζόμενες σήραγγες, που αποτελούν ένα κλειστό χώρο είναι ένα από τα μεγαλύτερα ατυχήματα, καθώς μπορεί να επιφέρει τεράστιες συνέπειες, όπως ανθρώπινες απώλειες αλλά και σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις από την απώλεια λειτουργικότητας της σήραγγας.

Οι οδικές σήραγγες αποτελούν σημαντικά έργα οδικής υποδομής που συμβάλλουν στην οικονομική ανάπτυξη και στην επικοινωνία των περιοχών. Τα τελευταία χρόνια, η υλοποίηση μεγάλων αναπτυξιακών έργων στην Ελλάδα έχει οδηγήσει στην αύξηση του αριθμού οδικών σηράγγων. Μέχρι το 1999, η πιο γνωστή σήραγγα της Ελλάδος ήταν αυτή του Αρτεμισίου (σήραγγα μονού κλάδου, αμφίδρομης κυκλοφορίας), ενώ από το 1999 κι έπειτα, μεγάλες οδικές σήραγγες όπως στην Αττική Οδό, στην Εγνατία Οδό και στον ΠΑΘΕ έχουν αυξήσει σημαντικά τον αριθμό των εν λειτουργία σηράγγων (Σαραμούρτσης, 2005), θέτοντας έτσι το ζήτημα της ασφάλειας και μέτρων σε σήραγγες σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Ως εκ τούτου, τίθεται έντονα πλέον και στην Ελλάδα το θέμα της ασφάλειας των οδικών σηράγγων, που αποτελεί εδώ και χρόνια ζήτημα διεθνούς προβληματισμού.

2.2 Νομοθετικό Πλαίσιο

Τα τελευταία χρόνια το ζήτημα της λειτουργίας και ασφάλειας σηράγγων έχει απασχολήσει πολλά αρμόδια όργανα και οργανισμούς στην Ευρώπη αλλά και υπηρεσίες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Ως εκ τούτου, προωθείται η χρηματοδότηση αρκετών έργων έρευνας και

Τεχνολογικής Ανάπτυξης για την αντιμετώπιση σχετικών ζητημάτων, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται θέματα ομογενοποίησης των προδιαγραφών σχεδιασμού των σηράγγων, του καθορισμού του ελάχιστου εξοπλισμού ανάλογα με το είδος και τις συνθήκες λειτουργίας της σήραγγας, της προτυποποίησης, της σήμανσης και σηματοδότησης καθώς και του τρόπου οργάνωσης διαχείρισης των σηράγγων αλλά και του ελέγχου της ασφάλειάς τους. Ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα είναι η συνύπαρξη νέων και παλαιών σηράγγων που έχουν σχεδιασθεί και κατασκευασθεί με διαφορετικά πρότυπα όσον αφορά στο δόμημα αλλά και στον εξοπλισμό τους (Παπαϊωάννου & Γεωργίου, 2005).

Η σημαντικότητα του ζητήματος και η σωστή διαχείριση που απαιτεί, οδήγησε στη θέσπιση της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2004/54/EK σχετικά με την Ασφάλεια των Σηράγγων από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο στα πλαίσια της Πολιτικής της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2004/54/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου, της 29^{ης} Απριλίου 2004 καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις ασφαλείας για τις σήραγγες του διευρωπαϊκού οδικού δικτύου.

Η Οδηγία ισχύει για όλες τις σήραγγες του διευρωπαϊκού οδικού δικτύου μήκους άνω των 500 μέτρων, είτε αυτές λειτουργούν, είτε βρίσκονται υπό κατασκευή ή στο στάδιο της μελέτης και το αντικείμενό της, σύμφωνα με το Άρθρο 1, είναι (EUR-Lex, 2004):

«η διασφάλιση στοιχειώδους επιπέδου ασφαλείας για τους χρήστες των σηράγγων του διευρωπαϊκού οδικού δικτύου με την πρόληψη των κρίσιμων συμβάντων που ενδέχεται να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές, το περιβάλλον και τις εγκαταστάσεις της σήραγγας, καθώς και με την προστασία στην περίπτωση ατυχημάτων».

Η Οδηγία 2004/54/EK ορίζει στα άρθρα 3 (Παράρτημα I) τα μέτρα ασφαλείας και με το άρθρο 13 ορίζει ότι τα διάφορα εναλλακτικά μέτρα ασφαλείας θα πρέπει να αξιολογούνται και να υιοθετούνται εφόσον η αποτελεσματικότητά τους είναι ισοδύναμη ή καλύτερη από τα ελάχιστα απαιτούμενα και αυτό να αποδεικνύεται με μεθόδους ανάλυσης κινδύνου. Μεταξύ άλλων, προβλέπονται υποχρεωτικές έξοδοι κινδύνου, σχεδιασμός του συστήματος αερισμού για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και του καπνού, και επαρκής αντοχή των κατασκευών της σήραγγας στη φωτιά.

Η Ελληνική Κυβέρνηση, ανταποκρινόμενη στη Ευρωπαϊκή Οδηγία 2004/54/EK, εξέδωσε το Π.Δ. υπ' αριθμόν 230 που δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ 264Α/2007 και εφαρμόζεται:

«σε όλες τις σήραγγες της Ελληνικής Επικράτειας που ανήκουν στο διευρωπαϊκό οδικό δίκτυο και έχουν μήκος άνω των 500 μέτρων, είτε αυτές λειτουργούν, είτε βρίσκονται σε στάδιο μελέτης ή και κατασκευής και αποσκοπεί να διασφαλίσει στους χρήστες των σηράγγων στοιχειώδες επίπεδο ασφάλειας, προλαμβάνοντας κρίσιμα συμβάντα που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές, το περιβάλλον και τις εγκαταστάσεις της σήραγγας και επιπλέον να παράσχει προστασία σε περίπτωση που συμβεί ατύχημα» (Ε.Τ., 2011).

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσιοποίησε τις βέλτιστες πρακτικές και μια κοινή και εναρμονισμένη μεθοδολογία ανάλυσης κινδύνου στα κράτη μέλη και μέχρι το 2019 περισσότερα από 1300 χιλιόμετρα οδικών σηράγγων θα έχουν αναβαθμιστεί για να πληρούν τις υψηλότερες προδιαγραφές ασφάλειας (European Commission, 2011).

2.3 Μελέτη Ατυχημάτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, το φαινόμενο της πυρκαγιάς σε σήραγγες αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα ατυχήματα, καθώς λόγω του κλειστού χώρου των σηράγγων μπορεί να επιφέρει τεράστιες επιπτώσεις, με σημαντικότερη επίπτωση τις ανθρώπινες απώλειες. Η ασφαλής λειτουργία των οδικών σηράγγων καθώς και η διαχείριση έκτακτης ανάγκης και τα μέτρα ασφάλειας που απαιτούνται αποτελεί ζήτημα διεθνούς προβληματισμού αλλά και πρωτοβουλιών εξαιτίας των τραγικών ατυχημάτων σε σήραγγες από πρόκληση πυρκαγιάς.



Εικόνα 2.1 Η πυρκαγιά στη σήραγγα Mont Blanc

Πηγή: Kumar (2004)

Μερικά από τα σοβαρότερα παραδείγματα ατυχημάτων σε σήραγγες της Ευρώπης, γνωστά διεθνώς είναι:

- Σήραγγα της Μάγχης (Channel Tunnel) μήκους 50,5 km (Αγγλία-Γαλλία), 2008
- Σήραγγα Mont Blanc μήκους 11,6 km (Γαλλία-Ιταλία), 1999
- Σήραγγα Tauern μήκους 6,4 km (Αυστρία), 1999
- St Gotthard μήκους 16,3 km (Ελβετία), 2001
- Frejus μήκους 12,9 km (Γαλλία-Ιταλία, 2 θανόντες), 2005

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται αναλυτικά τα μεγαλύτερα ατυχήματα από πυρκαγιά σε σήραγγα και ο αριθμός των τραυματιών και ανθρώπινων απωλειών καθώς και οι σημαντικότερες οικονομικές και λειτουργικές επιπτώσεις που επέφεραν.

Σήραγγα	Θανόντες/ Τραυματίες	Οικονομικές Απώλειες	Χρόνος Επισκευής	Καταστροφή Σκυροδέματος
Μάγλης	30 τραυματίες	250 εκ. €	>1 έτη	35 cm
Mont Blanc	39 νεκροί 34 τραυματίες	450 εκ. €	3 έτη	40 cm
Tauern	12 νεκροί 49 τραυματίες	30 εκ. €		35 cm
St. Gotthard	11 νεκροί	-	2 μήνες	35 cm

Πίνακας 2.1 Παραδείγματα μεγαλύτερων ατυχημάτων σε σήραγγα

Πηγή: Beard & Carvel (2005)

2.4 Συστήματα Εξαερισμού

Τα συστήματα αερισμού πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να εξασφαλίζουν τα εξής (Καβουλάκος, 1999):

Σε συνήθη λειτουργία:

- Να μην προκαλούνται βλάβες στους χρήστες της σήραγγας και το προσωπικό συντήρησης τους από τους ρυπαντές της ατμόσφαιρας στο εσωτερικό της, λαμβανομένου υπόψη του απαιτούμενου χρόνου παραμονής στη σήραγγα κάτω από όλες τις συνθήκες κυκλοφορίας
- Να διασφαλίζεται από την καλή ορατότητα η απαιτούμενη απόσταση πέδησης.
- Να μην προκαλείται μόλυνση του περιβάλλοντος στην περιοχή της σήραγγας.

Σε κατάσταση πυρκαγιάς πρέπει να διασφαλίζονται με σειρά προτεραιότητας:

- Η διατήρηση σε καλή κατάσταση των οδών διαφυγής για διάσωση των ανθρώπων από τη σήραγγα, μέσω οδών διαφυγής άνευ καπνού.
- Η διατήρηση ασφαλών συνθηκών για το προσωπικό διασώσεως.
- Ο περιορισμός των ζημιών (σε πρόσωπα, σε οχήματα και στον φέροντα οργανισμό της σήραγγας).

Το σύστημα εξαερισμού που εγκαθίσταται σε μια σήραγγα πρέπει να εξασφαλίζει ένα ασφαλές περιβάλλον και υπό κατάσταση έκτακτης ανάγκης και υπό κανονικές συνθήκες. Έτσι, είναι σημαντικό για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου να μελετηθούν τα διάφορα συστήματα εξαερισμού σε σήραγγες μεταφορών. Οι τρόποι αερισμού των οδικών σηράγγων διακρίνονται σε ορισμένες κατηγορίες. Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι συστημάτων εξαερισμού που εφαρμόζονται στις σήραγγες μεταφορών. Οι βασικές περιπτώσεις διακρίνονται στα συστήματα με φυσικό αερισμό, με διαμήκη αερισμό, εγκάρσιο αερισμό και ημιεγκάρσιο αερισμό.

2.4.1 Φυσικός Εξαερισμός

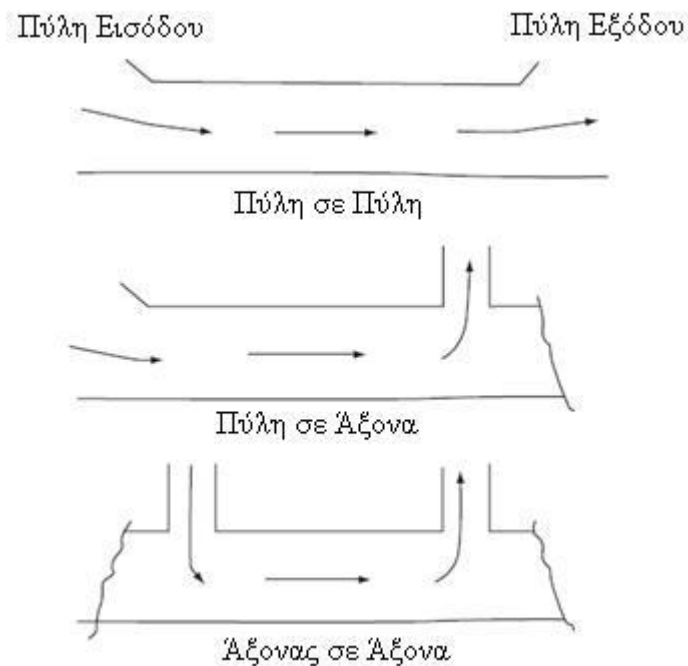
Οι οδικές σήραγγες με φυσικό αερισμό βασίζονται κυρίως στις μετεωρολογικές συνθήκες. Οι βασικές μετεωρολογικές συνθήκες που επηρεάζουν τη σήραγγα είναι η διαφορά πίεσης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου της σήραγγας, η οποία δημιουργείται από την υψομετρική τους διαφορά, οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος και ο αέρας. Παρόλα αυτά, σε κανέναν από αυτούς τους παράγοντες δε μπορούμε να βασιστούμε για ασφαλή συμπεράσματα. Έτσι, μία απρόσμενη αλλαγή στην κατεύθυνση του ανέμου ή στην ταχύτητά του μπορεί να αναιρέσει στιγμιαία όλους αυτούς τους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου σε μερική έκταση και την επίδραση του φαινομένου του εμβόλου (piston effect). Το φαινόμενο αυτό συναντάται όταν ένα όχημα εισερχόμενο στη σήραγγα εξαναγκάζει τον αέρα γύρω του να κινηθεί προς συγκεκριμένη κατεύθυνση περιοριζόμενος από τα τείχη της σήραγγας και ονομάστηκε έτσι από την παρόμοια κίνηση ενός εμβόλου μέσα σε μια μηχανή. Συνεπώς, κανένας από τους φυσικούς παράγοντες που ορίζονται παραπάνω δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη σε μία κατάσταση εκτάκτου ανάγκης στο σύστημα εξαερισμού της οδικής σήραγγας, όπως στην περίπτωση πυρκαγιάς στη σήραγγα. Αυτό αποτελεί και το βασικό μειονέκτημα στις σήραγγες φυσικού αερισμού, αφού σε περίπτωση πυρκαγιάς δεν υπάρχει η δυνατότητα ταχείας απομάκρυνσης του καπνού.

Η ροή του αέρα στις σήραγγες φυσικού αερισμού μπορεί να είναι είτε από πύλη σε πύλη είτε με μία ενδιάμεση έξοδο του αέρα. Στην πρώτη κατηγορία, τα συστήματα από πύλη σε πύλη (portal-to-portal) λειτουργούν με κυκλοφορία οχημάτων προς μία κατεύθυνση, η οποία παράγει μία θετική ροή αέρα. Η ταχύτητα του αέρα κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου είναι ομοιόμορφη (σταθερή) και η συγκέντρωση μόλυνσης αυξάνεται κατά μήκος της σήραγγας με

το μέγιστο να εμφανίζεται στην πύλη εξόδου. Εφόσον συμβούν αντίθετες μετεωρολογικές συνθήκες η ταχύτητα του αέρα μειώνεται, ενώ η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) αυξάνεται. Εάν τώρα η κυκλοφορία των οχημάτων γίνεται και προς τις δύο κατευθύνσεις τότε αυτό έχει ως αποτέλεσμα περαιτέρω μειώσεις στην ροή του αέρα.

2.4.2 Διαμήκης Εξαερισμός

Στο διαμήκη εξαερισμό, η ροή αέρος είναι διαμήκης στη σήραγγα και κινεί ουσιαστικά τους ρύπους ή/και τα θερμά αέρια μαζί με τον εισερχόμενο καθαρό αέρα και παρέχει τον καθαρό αέρα στην αρχή της σήραγγας ή του τμήματος σήραγγας και απαλλάσσει το θερμό ή μολυσμένο αέρα στην πύλη της σήραγγας ή στο τέλος του τμήματος της (Beard & Carvel, 2005). Η διαμόρφωση του διαμήκη εξαερισμού μπορεί να είναι είτε από πύλη σε πύλη (portal-to-portal), πύλη σε άξονα (portal-to-shaft) είτε από άξονα σε άξονα (shaft-to-shaft) όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2. Ο αέρας που εισάγεται στη σήραγγα είναι σε περιβαλλοντικές συνθήκες και προσκρούεται με ρυπαντικούς παράγοντες και θερμά αέρια από τα οχήματα που κινούνται μέσα στη σήραγγα. Η διαμήκης ροή αέρα εφαρμόζεται συχνότερα στην μεταφορά (μετρό) και στις σιδηροδρομικές σήραγγες.

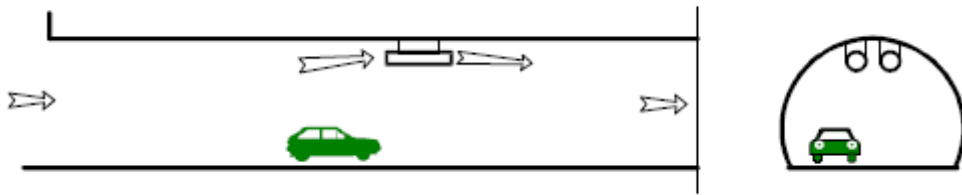


Εικόνα 2.2 Διαμόρφωση διαμήκους εξαερισμού

Πηγή: Beard & Carvel (2005)

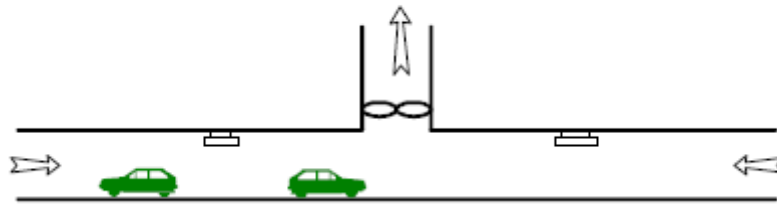
Η αρχή λειτουργίας αυτού του συστήματος είναι η δημιουργία ρεύματος αέρα κατά μήκος της σήραγγας είτε από φυσικό ρεύμα αέρα είτε με χρήση ανεμιστήρων. Το σύστημα πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις (Καβουλάκος, 1999):

- Η μέγιστη διαμήκης ταχύτητα του αέρα δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 10m/sec, λαμβανομένης υπόψη της συμβολής σε αυτή της κίνησης των οχημάτων και της επίδρασης μετεωρολογικών συνθηκών.
- Η μέγιστη απόσταση διαφυγής προσώπων από μια επικίνδυνη περιοχή θα πρέπει να είναι 350÷450 m.
- Οι ανεμιστήρες θα πρέπει να είναι αναστρέψιμης ροής, και στην περίπτωση πυρκαγιάς θα πρέπει να μπορούν να εξασφαλίσουν ταχύτητα αέρα τουλάχιστον 3 m/s.
- Οι χρησιμοποιούμενοι αξονικοί ανεμιστήρες ωστικού τύπου (jet fans) θα πρέπει να βρίσκονται διανεμημένοι κατά μήκος της σήραγγας, έτσι ώστε να αυξάνεται η αξιοπιστία τους, να ελαχιστοποιούνται οι στροβιλισμοί του αέρα σε περίπτωση πυρκαγιάς και να μειώνεται η πιθανότητα απώλειας σημαντικού ποσοστού της ικανότητας αερισμού λόγω καταστροφής ανεμιστήρων από τη φωτιά.
- Για να μειωθούν οι εκροές από τα στόμια της σήραγγας, αν απαιτείται, μπορούν να προβλεφθούν κατάλληλοι βοηθητικοί αγωγοί με ανεμιστήρες.



Εικόνα 2.3 Διαμήκης αερισμός με ωστικού τύπου ανεμιστήρες

Πηγή: Καβουλάκος (1999)



Εικόνα 2.4 Διαμήκης αερισμός με Κεντρικό Βοηθητικό αγωγό

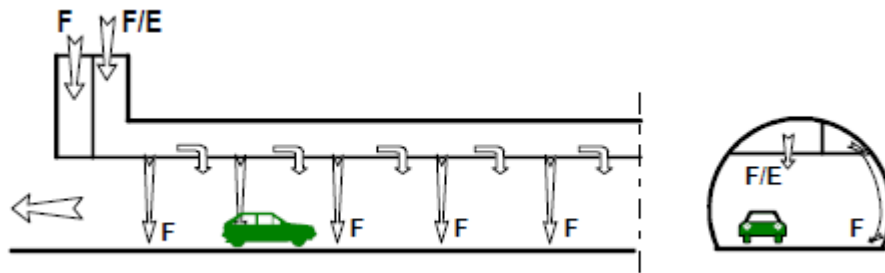
Πηγή: Καβουλάκος (1999)

2.4.3 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 ημιεγκαρσίου αερισμού, νωπός αέρας εισάγεται κατά μήκος της σήραγγας και ο ακάθαρτος 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 2.5 Ημιαυτόματος αερισμός με αγωγούς στην Οροφή

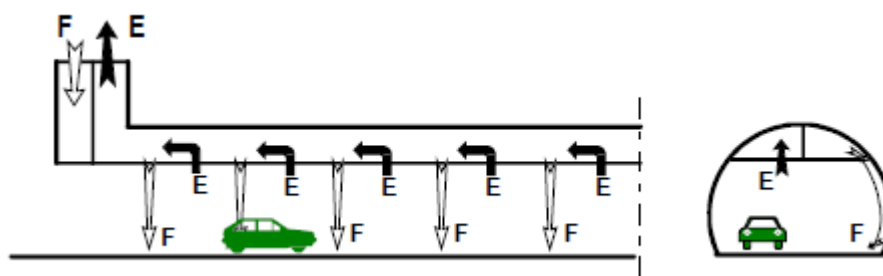
Πηγή: Καβουλάκος (1999)

2.4.4 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 ημιαγκάρσιο (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):

- Η μέγιστη ταχύτητα του αέρα δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 10 m/s μέσα στη σήραγγα.
- Το σύστημα αερισμού θα πρέπει να είναι αναστρέψιμης ροής για την περίπτωση πυρκαγιάς και ικανό να εξαγάγει 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 στομιών απαγωγής αέρα θα είναι 100 m, ενώ η μέγιστη απόσταση μεταξύ στομιών εισαγωγής θα είναι 50 m.
- Η στεγανότητα των κλειστών στομιών νωπού αέρα και των στομιών απαγωγής είναι αναγκαία για να εξασφαλίζεται αποτελεσματική απαγωγή καπνού



Εικόνα 2.6 Εγκάρσιος αερισμός με αγωγούς στην οροφή

Πηγή: Καβουλάκος (1999)

2.4.5 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 τεχνοοικονομικά 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 εγκάρσιου ή συνδυασμού συστημάτων, μπορεί να υποβληθεί προς έγκριση μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις και με απόλυτη τεκμηρίωση της τεχνοοικονομικής 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 τεχνοοικονομικής 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 ακινητοποίησης 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 επιβάτες 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: πρώτον, να υπάρχει ανεξάρτητο σύστημα απαγωγής καπνού με φρέατα εκκαπνισμού εξοπλισμένα με ανεμιστήρες απαγωγής το πολύ ανά 800 m και δεύτερον, 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.

2.5 Επίδραση της Πυρκαγιάς Ανάλογα με το Σύστημα Εξαερισμού

Το σύστημα εξαερισμού που εγκαθίσταται σε μια σήραγγα πρέπει να εξασφαλίζει ένα ασφαλές περιβάλλον και υπό κατάσταση έκτακτης ανάγκης και υπό κανονικές συνθήκες. Η μετακίνηση καπνού πρέπει ελέγχεται σε ένα περιστατικό πυρκαγιάς. Το σχέδιο των συστημάτων εξαερισμού για τις οδικές σήραγγες εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως το αναμενόμενο σχέδιο πυρκαγιάς και το επιθυμητό ύψος καθαρού καπνού. Υπό κανονικές

συνθήκες, το σχέδιο συστήματος εξαερισμού σήραγγων στοχεύει να αποτρέψει τη συσσώρευση των εκπομπών από το όχημα σε επικίνδυνα επίπεδα. Για το λόγο αυτό, ο καθαρός αέρας που εισάγεται στη σήραγγα θα αναμιγνύεται με τις εκπομπές του οχήματος. Ο μολυσμένος αέρας θα αποβληθεί συνεπώς από το σύστημα εξαερισμού της σήραγγας. Ο όγκος του καθαρού αέρα που απαιτείται, η πυκνότητα κυκλοφορίας και το μήκος της σήραγγας είναι οι παράμετροι σχεδιασμού υπό κανονικές συνθήκες.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα συνήθη μηχανικά συστήματα εξαερισμού εγκατεστημένα σε οδικές σήραγγες είναι φυσικά, διαμήκη, ημιεγκάρσια, εγκάρσια και μερικώς εγκάρσια συστήματα εξαερισμού. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές και συνδυασμοί συστημάτων, όπως ο συνδυασμός διαμήκους και ημιεγκάρσιου συστήματος. Ένα διάμηκες σύστημα εξαερισμού σχεδιάζεται για να παρασύρει τον καπνό από την περιοχή της πυρκαγιάς στην πύλη εξόδου σε περίπτωση πυρκαγιάς. Αυτό το σύστημα είναι πολύ αποτελεσματικό για κυκλοφορία μιας κατεύθυνσης. Άνθρωποι και οχήματα κατάντη της πυρκαγιάς θεωρείται ότι έχουν αρκετό χρόνο για να εκκενώσουν την περιοχή και να μην παγιδευτούν μέσα στη σήραγγα. Αυτό πρέπει να υποστηρίζεται και από καλή διαχείριση πυρασφάλειας. Η εγκατάσταση γραμμικού συστήματος ανίχνευσης θερμότητας ως συσκευή εντοπισμού μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό των θέσεων με ανώμαλη αύξηση θερμοκρασίας. Επίσης, οι διασταυρώσεις μεταξύ των σήραγγων μπορεί να ελαχιστοποιήσουν την πιθανότητα εγκλωβισμού επιβατών μέσα στον καπνό (Li & Chow, 2003).

2.6 Μελέτες και Σχεδιασμός Εξαερισμού Σήραγγας για την Περίπτωση Πυρκαγιάς

Στις διάφορες αναλυτικές και πειραματικές έρευνες, υπάρχουν πολλά υπολογιστικά προγράμματα που μελετούν τον εξαερισμό σήραγγας και την περίπτωση πυρκαγιάς, στα οποία οι μορφές και τα μεγέθη των σήραγγων ποικίλουν αρκετά. Λόγω της έλλειψης γεωμετρικής ομοιότητας μεταξύ των διάφορων μελετών, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από ανόμοια γεωμετρία.

Κατά το σχεδιασμό έκτακτης περίπτωσης πυρκαγιάς ή καπνού, η βασική έγνοια είναι η διατήρηση μιας γραμμής εκκένωσης χωρίς καπνό και θερμά αέρια (Hwang & Edwards, 2001). Ο σχεδιασμός πρέπει να εστιάσει στον καθορισμό του εξαερισμού που απαιτείται για

τη διατήρηση αυτής της διαδρομής. Ο κίνδυνος από τυχαίες πυρκαγιές καθώς επίσης και από την επακόλουθη μετακίνηση του καπνού εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από αυτά τα εφαρμοσμένα ρεύματα εξαερισμού.

Οι διέξοδοι σηράγγων ή οι έξοδοι κινδύνου συνδέονται συνήθως με τις οδικές σήραγγες με κυκλοφορία μιας κατεύθυνσης. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, θεωρείται συνήθως ότι η κυκλοφορία μπροστά από την πυρκαγιά θα προχωρήσει στην πύλη εξόδου ενώ η κυκλοφορία πίσω από την πυρκαγιά θα σταματήσει. Το σύστημα εξαερισμού θα χρησιμοποιηθεί για να εξαναγκάσει τον καπνό και τα θερμά αέρια στην κατεύθυνση της κενής σήραγγας και να παρέχει καθαρό και ασφαλές περιβάλλον όπισθεν της πυρκαγιάς στους ανθρώπους που εκκενώνουν και τους πυροσβέστες. Εάν η ικανότητα εξαερισμού είναι ικανοποιητική, όλος ο θερμός αέρας και καπνός θα ρέουν προς την κάτω κατεύθυνση. Εάν ο εξαερισμός είναι αδύναμος, τα ανώτερα στρώματα του θερμού αέρα και του καπνού μπορούν να ρέουν στην αντίθετη κατεύθυνση προκαλώντας το φαινόμενο επιστροφής καπνού (*backlayering*). Το περιστατικό αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες συμπεριλαμβανομένης και της έντασης της πυρκαγιάς, της κλίσης και της γεωμετρίας της σήραγγας και της ταχύτητας του αέρα εξαερισμού που πλησιάζει την πυρκαγιά. Η δυνατότητα του συστήματος εξαερισμού να αποτρέψει το φαινόμενο επιστροφής καπνού είναι το τρέχον πρότυπο της βιομηχανίας για τη μέτρηση της επάρκειας ενός συστήματος σχετικά με τον έλεγχο καπνού (Tripathi κα., 2003).

Η καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς πυρκαγιάς σε σήραγγες θα βοηθούσε τις αρχές των σηράγγων να παρέχουν καλύτερη διαχείριση πυρασφάλειας. Η χρήση πρότυπων πειραμάτων προσομοίωσης ήταν πολύ συνηθισμένη στο παρελθόν, με βασικό κανόνα τη διατήρηση των σχετικών παραμέτρων προσομοίωσης. Σήμερα, η Υπολογιστική Ρευστομηχανική (CFD- Computational Fluid Dynamics) είναι ένα πρακτικό εργαλείο στη μηχανική πυρόσβεσης, ενώ το περιβάλλον πυρκαγιάς συμπεριλαμβανομένης και της ταχύτητας αέρα, της θερμοκρασίας και της πίεσης στη σήραγγα μπορεί να προβλεφθεί (Li & Chow, 2003).

Τα αριθμητικά μοντέλα βασισμένα στο CFD γίνονται γνωστά και δημοφιλή ως εργαλεία πρόβλεψης στο ζήτημα της πυρασφάλειας για την περιγραφή της διάδοσης πυρκαγιάς και της διασποράς των προϊόντων της πυρκαγιάς. Χρησιμοποιούνται κυρίως για να αξιολογήσουν

την αποτελεσματικότητα των εναλλακτικών στρατηγικών εξαερισμού και για να αξιολογήσουν τον αντίκτυπο της πυρκαγιάς στην ποιότητα της ατμόσφαιρας σε περίπτωση πρόκλησης πυρκαγιάς σε σήραγγα (Tripathi κα., 2003).

Ένα υπολογιστικό μοντέλο CFD που προορίζεται για τη χρήση προσομοίωσης πυρκαγιάς σε σήραγγες πρέπει να είναι ικανό να διαχειρίζεται διαφορετικούς τύπους διατομών σηράγγων, συστημάτων εξαερισμού, τύρβης, ροή αέρος από την κυκλοφορία στη σήραγγα, διάδοσης της θερμικής ροής (και εκ μεταφοράς και της ακτινοβολίας) και προϊόντων της πυρκαγιάς κ.λπ. (Tripathi κα., 2003).

Πιο συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί πως η ανάλυση CFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει έναν συσχετισμό μεταξύ του μήκους αντίθετης ροής του καπνού και του εξαερισμού σηράγγων. Ο επακόλουθος συσχετισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει οδηγίες για τα μέτρα διαχείρισης ελέγχου καπνού. Παραδείγματος χάριν, οι συσχετισμοί δείχνουν ότι πρέπει να διατηρηθεί το επικρατούν ρεύμα εξαερισμού ανάλογο προς το ένα τρίτο της δύναμης της έντασης πυρκαγιάς για να παρέχει μια διαδρομή εκκένωσης από την εστία πυρκαγιάς καθαρή από καπνούς και καυτά αέρια. Αυτό είναι ένα παράδειγμα για το πώς το μοντέλο CFD υιοθετημένο σωστά και ερμηνευμένο προσεκτικά, μπορεί να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο σχεδιασμού για την προστασία από πυρκαγιά σε σήραγγα (Hwang & Edwards, 2001).

2.7 Πλεονεκτήματα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική έχει διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες επιστημονικές μεθόδους, ιδιαίτερα όταν συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα. Μερικά από τα πλεονεκτήματα είναι (Hart, 2005):

Δυνατότητα αναπαραγωγής: δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία μεταβλητή έξω από τον έλεγχο του πειράματος, το μοντέλο θα παράγει τα ίδια αποτελέσματα κάθε φορά που τρέχει.

Παραμετροποίηση: μόλις ένα μοντέλο είναι έτοιμο, είναι βασικό να αλλάξει μια τιμή και να ξανατρέξει. Πολλοί κώδικες CFD διαθέτουν την επιλογή να ξανατρέχουν την περίπτωση (batch) χωρίς την επέμβαση του χρήστη. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί, παραδείγματος

χάριν, για την απόκτηση αποτελεσμάτων μιας σειράς ποσοστών εξαερισμού ή για την τελειοποίηση της τιμής ορισμένων παραμέτρων.

Οικονομικά οφέλη: μια αριθμητική μελέτη απαιτεί πολύ λίγα σχετικά με τον εξοπλισμό, χώρο και χρόνο εργασίας. Αν και η ίδια η διαδικασία μοντελοποίησης είναι μικρότερη απ' ό τι σε πραγματικό χρόνο για τις περισσότερες ροές, η δυνατότητα να τρέχουν τα πειράματα το ένα μετά το άλλο χωρίς διακοπή, σημαίνει ότι ο γενικός χρόνος για μια μελέτη μειώνεται, οδηγώντας έτσι σε οικονομικά πλεονεκτήματα. (πχ μειωμένος χρόνος στην αγορά, κλπ.) Επίσης, τα φυσικά πειράματα μπορεί να έχουν «κόστος» από την άποψη περιβαλλοντικής επίδρασης και συνθηκών υγιεινής και ασφάλειας, οι οποίες δεν ισχύουν για μια αριθμητική προσομοίωση.

Ευελιξία: ένα μοντέλο CFD επιτρέπει την ανεξάρτητη παραλλαγή όλων των παραμέτρων, με πολύ λίγους περιορισμούς. Τα φυσικά πειράματα τείνουν να είναι πολύ πιο περιορισμένα. Για παράδειγμα, η κλίση μιας πραγματικής σήραγγας είναι καθορισμένη, εντούτοις σε ένα μοντέλο CFD το διάνυσμα της βαρύτητας μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή.

Πλήρεις Κλίμακες: οι τεχνικές CFD δεν απαιτούν κανένα είδος τεχνητής κλίμακας, το οποίο είναι συχνά ένας περιορισμός των φυσικών πειραμάτων.

Ανάλυση: τα φυσικά πειράματα απαιτούν όργανα παρακολούθησης (έλεγχοι ταχύτητας, μετατροπείς πίεσης, υπέρυθη απεικόνιση (IR), κλπ.) προκειμένου να παραχθούν τα ποσοτικά δεδομένα. Αυτή η διαδικασία θα είναι πάντα περιορισμένη και είναι συχνά το σημαντικότερο εμπόδιο σε μια πειραματική διαδικασία. Εν αντιθέσει, ένα μοντέλο CFD εμπεριέχει όλα τα στοιχεία (και περισσότερα) που θα μπορούσαν να χρειαστούν. Το CFD δεν πρέπει, εντούτοις, να θεωρηθεί ως αντικατάσταση του φυσικού πειράματος ή ως θεωρητική ανάλυση. Τα αποτελέσματα από ένα μοντέλο CFD δεν έχουν κανένα απολύτως νόημα χωρίς την επικύρωση από πειραματικά αποτελέσματα.

2.8 Ερευνητικές και Αριθμητικές Μελέτες

Η περίπτωση πυρκαγιάς σε σήραγγες αυτοκινητόδρομων είναι ένα φαινόμενο που μελετάται εκτενώς στη βιβλιογραφία καθώς επιφέρει πολλές συνέπειες και είναι συνδεδεμένο σε πολλές

περιπτώσεις με απώλειες ανθρώπινων ζωών. Παρά το ιδιαίτερο ενδιαφέρον των επιστημόνων σχετικά με το φαινόμενο αυτό, δεν έχει οριστεί κάποιο παγκόσμια αποδεκτό σύστημα σχεδιασμού και λειτουργίας ανθρώπινης ασφάλειας για αντίστοιχες περιπτώσεις (Hwang & Edwards, 2001). Ως εκ τούτου, οι διάφοροι μελετητές χρησιμοποιούν στην έρευνα τους διαφορετικά υπολογιστικά προγράμματα και εμπειρικά μοντέλα καταλήγοντας έτσι πολλές φορές σε διαφορετικά συμπεράσματα. Στην παρούσα ενότητα, θα εξετασθούν μελέτες από την υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετικά με την περίπτωση πυρκαγιάς σε σήραγγα, καθώς και τα υπολογιστικά προγράμματα και μοντέλα που χρησιμοποιούνται ανά περίπτωση για τη μελέτη του φαινομένου και τα αποτελέσματά τους.

2.8.1 Προσομοίωση LES για τη Μελέτη Καπνού σε Αεριζόμενη Σήραγγα

Ο καπνός έχει αποδειχτεί ότι είναι πιο επικίνδυνος παράγοντας από τη θερμότητα για τον άνθρωπο, δεδομένου ότι μπορεί να εξαπλωθεί με γρήγορο ρυθμό σε μια σήραγγα (Gao κα., 2004). Στη συγκεκριμένη μελέτη αεριζόμενης σήραγγας με καπνό, των Gao κα. (2004), δίνονται πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα για την περίπτωση πυρκαγιάς σε σήραγγα. Εφαρμόζεται υπολογιστική μελέτη για την προσομοίωση της κίνησης καπνού σε αεριζόμενη σήραγγα κάνοντας χρήση του μοντέλου τύρβης LES (Large eddy simulation). Έτσι, θεωρώντας τη φωτιά ως ογκομετρική εστία θερμότητας, μελετώνται διάφορα σενάρια με διαφορετικούς ρυθμούς εξαερισμού. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη έχει τρία αντικείμενα, τη χρήση του μοντέλου τύρβης LES ως εργαλείο προσομοίωσης πυρκαγιάς, τη σύγκριση LES με τη προσέγγιση Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS), όπως το μοντέλο τύρβης k-ε και τέλος τη μελέτη κίνησης καπνού σε σήραγγα με πυρκαγιά και την αποτελεσματικότητα διαμήκους συστήματος εξαέρωσης. Η έρευνα των Gao κα (2004) καταλήγει στα εξής συμπεράσματα:

- Οι γωνίες της φωτιάς με βάση το σχήμα της φλόγας συμφωνούν με τα πειραματικά δεδομένα της έρευνας και η συμπεριφορά της φλόγας επηρεάζεται από το ρυθμό εξαερισμού.
- Η προσομοίωση ροής που ξαναγυρνάει προς την είσοδο (*backflow*) με το μοντέλο LES είναι πιο αποδοτική από το μοντέλο τύρβης k-ε.

- Τα υπολογιστικά αποτελέσματα συμφωνούν με τα πειραματικά αποτελέσματα της έρευνας των Fletcher κα. (1994) στη γενική μορφή του θερμοκρασιακού προφίλ, αλλά οι υπολογιστικές τιμές είναι μεγαλύτερες.

2.8.2 Μοντέλο Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD) για Αντίθετη Ροή Καπνού

Στη μελέτη των Hwang & Edwards (2001) χρησιμοποιείται πρόγραμμα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής ως εργαλείο σχεδιασμού για τη μοντελοποίηση επιπέδων πυρκαγιάς σε σήραγγες. Σύμφωνα με τους Hwang & Edwards (2001), στις αεριζόμενες σήραγγες με πυρκαγιά, έχει παρατηρηθεί ότι ο καπνός και άλλα προϊόντα καύσης γεμίζουν τη σήραγγα σε μια συγκεκριμένη απόσταση αντίθετα από τη φυσική ροή του αέρα προς την έξοδο. Υπό ορισμένες συνθήκες ροής και πυρκαγιάς, ο καπνός μπορεί να διαμορφώσει ένα στρώμα κοντά στην οροφή και να ρέει με κατεύθυνση αντίθετη από το ρεύμα εξαερισμού. Η ύπαρξη της αντίστροφης στρωματοποιημένης ροής θερμών προϊόντων καύσης έχει ιδιαίτερη σημασία στην καταπολέμηση της πυρκαγιάς και εκκένωση των υπόγειων οδοστρωμάτων, σιηράγγων, και διαδρόμων οικοδόμησης. Είναι πρακτικής σημασίας η κατανόηση των φυσικών παραμέτρων και των καταστάσεων ροής κάτω υπό τις οποίες εμφανίζεται η αντίστροφη στρωματοποιημένη ροή.

Στην μελέτη των Hwang & Edwards (2001), το πρόγραμμα CFD χρησιμοποιείται ως εργαλείο σχεδιασμού για να διαμορφώσει τις πυρκαγιές εδαφικού επιπέδου σε μια αεριζόμενη σήραγγα. Η πυρκαγιά προσομοιώνεται με φλόγα διάχυσης προπανίου και εκχύνεται από οπή στο έδαφος της σήραγγας. Η μορφή της οπής μπορεί να είναι κυκλική ή ορθογωνική. Η σήραγγα έχει ορθογωνική διατομή με ικανοποιητικό μήκος προς τα πάνω για να προσαρμοστεί ο σχηματισμός της ροής αντίστροφου στρώματος. Το πρόγραμμα CFD2000 χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς ροής. Ένα πεπερασμένο σχέδιο ρυθμού αντίδρασης τεσσάρων βημάτων χρησιμοποιείται για να αντιπροσωπεύσει τη ρεαλιστική αλληλεπίδραση πυρκαγιάς-εξαερισμού στη ζώνη έκχυσης. Το standard μοντέλο τύρβης $k-\epsilon$ χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη ροή καναλιών. Η επακόλουθη ανάπτυξη στρωμάτων θερμού αερίου είναι τρισδιάστατη. Τα σχέδια ροής αναδιανομής, η μετακίνηση του οριακού στρώματος, και οι

κατανομές της θερμοκρασίας αερίου και ταχύτητας μελετώνται υπό διάφορες παραμέτρους πυρκαγιάς.

Τα αποτελέσματα της μελέτης των Hwang & Edwards (2001) παρουσίασαν μια ποιοτική συμπεριφορά μετακίνησης των προϊόντων καύσης στο κανάλι πυρκαγιάς. Ο συνυπολογισμός ενός σχεδίου αντίδρασης πεπερασμένου ρυθμού οδήγησε σε μακροχρόνιους υπολογισμούς. Μπορεί να είναι δυνατή η χρήση ενός απλούστερου σχεδίου αντίδρασης για την προσομοίωση ρεαλιστικού σεναρίου πυρκαγιάς. Οι παρόντες υπολογισμοί χρησιμοποιούν μια σταθερή αξία της πίεσης στην έξοδο καναλιών και μια ομοιόμορφη ροή της ταχύτητας αέρα εξαερισμού στην είσοδο καναλιών. Σε σενάριο πραγματικής πυρκαγιάς, οι ανεμιστήρες οδηγούν τον αέρα εξαερισμού, και καθώς η πυρκαγιά αναπτύσσεται, το ρεύμα εξαερισμού μειώνεται λόγω αυξημένης αντίστασης ροής στο κανάλι. Κατά συνέπεια, οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται στους παρόντες υπολογισμούς ισχύουν για το σενάριο πυρκαγιάς σε σταθερή κατάσταση.

2.8.3 Εκτίμηση Απόδοσης Συστημάτων Ασφάλειας σε Σήραγγες με Εξαερισμό

Η απόδοση των συστημάτων ασφάλειας σηράγγων για την προστασία από πυρκαγιά και παροχή εξαερισμού αξιολογείται από τους Li & Chow (2003) κάνοντας χρήση Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής. Αρχικά, αναθεωρούνται τα συστήματα ασφάλειας εξαερισμού που χρησιμοποιούνται συνήθως σε σήραγγες και στη συνέχεια, οι πτυχές ασφάλειας σχετικά με την πυρκαγιά και τον εξαερισμό σηράγγων συζητούνται. Η ροή αέρα που προκαλείται από μια τυχαία πυρκαγιά οχήματος σε μια σήραγγα προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας CFD. Με βάση τα αποτελέσματα, οι αποδόσεις των διαφορετικών συστημάτων ασφάλειας αξιολογούνται και συγκρίνονται. Τα εξεταζόμενα συστήματα είναι διαμήκη, ημιδιαμήκη, εγκάρσια, μερικά εγκάρσια, και συνδυασμένα διαμήκη και ημiegάρσια συστήματα εξαερισμού.

Η μελέτη των Li & Chow (2003) είναι μια έκθεση σχετική με το περιβάλλον πυρκαγιάς σε μια σήραγγα με χρήση CFD. Η ροή αέρα, η θερμοκρασία και ο καπνός που προκλήθηκαν από πυρκαγιά οχήματος σε ένα τμήμα της σήραγγας προσομοιώνονται από το PHOENICS v.3.2.

Έτσι, οι αποδόσεις των διαφορετικών συστημάτων εξαερισμού σήραγγων, όπως οι διαμήκεις και εγκάρσιες, αξιολογούνται και συγκρίνονται.

Τα συμπεράσματα της έρευνας είναι τα εξής

- Ο καπνός θα ψυχραινόταν και θα ανακατευόταν με τον αέρα στις περιοχές που ο καπνός δεν είχε ακόμα απομακρυνθεί. Οι μηχανικοί σχεδιασμού πρέπει να καταλάβουν το όριο μήκους για τη χρήση του φυσικού εξαερισμού. Υπό συνθήκες φυσικού εξαερισμού, ο σχεδιασμός της ταχύτητας του αέρα σε σήραγγα εξαρτάται από την κυκλοφορία και άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η εξάπλωση του καπνού και στις δύο πλευρές μπορεί να επιβραδυνθεί, ενισχύοντας την ψύξη του καπνού και την απώλεια άνωσης. Ο καπνός μπορεί μόνο να στρωματοποιηθεί μέσα σε μια μικρότερη απόσταση και θα ελαττωθεί έπειτα βαθμιαία.
- Η παρατήρηση των πραγματικών πυρκαγιών σε σήραγγες έδειξε ότι η κυκλοφορία δεν μπορεί να σταματήσει στο πρώτο στάδιο της ανάπτυξης πυρκαγιάς καθώς οι άνθρωποι που επηρεάζονται από την πυρκαγιά πρέπει να εκκενώσουν. Αυτό ενισχύεται όταν υπάρχουν περισσότερες από μια λωρίδες οδήγησης στη σήραγγα και δεν εμποδίζεται ολόκληρη η σήραγγα από το όχημα. Για τις σήραγγες μιας κατεύθυνσης, τα οχήματα των ελευθέρων λωρίδων κυκλοφορίας στη σήραγγα μπορούν να εκκενώσουν τον χώρο γρήγορα εάν η Διαχείριση Σήραγγας αποκριθεί αρκετά γρήγορα, ώστε να σταματήσει τα οχήματα στην πύλη εισόδου. Άλλοι παράγοντες όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες, ο τύπος κυκλοφορίας και οχημάτων πρέπει επίσης να εξεταστούν στο σχεδιασμό ασφάλειας σήραγγων με πυρκαγιά.
- Υπό συνθήκες κυκλοφορίας μιας κατεύθυνσης, τα οχήματα μπροστά από την πυρκαγιά πρέπει να εξέλθουν από τη σήραγγα σε περίπτωση που μια πυρκαγιά ξεσπά και εκείνοι που οδηγούν προς την πυρκαγιά παγιδεύονται. Δεδομένου ότι βρίσκονται στην πλευρά καθαρού αέρα της πυρκαγιάς, η διαμήκης ροή αέρος που προκαλείται από την κυκλοφορία των οχημάτων (φαινόμενο εμβόλου) κατά την διάρκεια του συμβάντος οδηγεί τον καπνό μακριά από τα παγιδευμένα αρχικά οχήματα. Εντούτοις, η διαμήκης ροή θα μειώνεται βαθμιαία και περισσότερος καπνός θα ρέει πίσω προς τα παγιδευμένα οχήματα.
- Η διαμήκης παροχή εξαερισμού από αεριωθούμενους ανεμιστήρες μπορεί να σταματήσει εάν η ικανότητα εξαερισμού υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται υπό κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Παλαιότερες μελέτες έδειξαν ότι το ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας μιας πυρκαγιάς σε μια σήραγγα

εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, και μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση της ταχύτητας εξαερισμού (Chow, 1998). Η υπερβολικά διαμήκης ροή αέρα μπορεί να είναι χειρότερη για τις συνθήκες από το σημείο της πυρκαγιάς προς την έξοδο.

- Εάν πρόκειται για ένα διάμηκες σύστημα εξαερισμού, ο καπνός μπορεί να φύγει από τη σήραγγα μόνο από την έξοδό της. Το σύστημα διαμήκους εξαερισμού από μόνο του δε θα είναι επαρκές σε περίπτωση πυρκαγιάς, όπου υπάρχει ενδεχόμενο να βρεθούν άνθρωποι παγιδευμένοι πέρα από την περιοχή της πυρκαγιάς. Για το λόγο αυτό, επιβάλλεται να υπάρχουν έξοδοι κινδύνου και στα δύο ρεύματα ανά συγκεκριμένη απόσταση ώστε να είναι εφικτή η εκκένωση της σήραγγας.
- Η αρχή για τον έλεγχο του στρώματος καπνού κατά τη διαδικασία της φάσης εκκένωσης και της φάσης καταστολής της πυρκαγιάς εφαρμόζεται στο ημιεγκάρσιο σύστημα. Μπορεί να είναι δύσκολο να υπάρξει μια ζώνη απολύτως καθαρή από καπνούς ώστε να είναι εύκολη η πρόσβαση και διάσωση, εάν δεν υπάρχει επαρκής απομάκρυνση καυσαερίων. Έτσι, απαιτείται μεγαλύτερη ικανότητα εξαγωγής αυτών χρησιμοποιώντας περισσότερες και μεγαλύτερες εξόδους για την εξαγωγή τους, με σκοπό την καλύτερη λειτουργία του ημιεγκάρσιου συστήματος.
- Τα πλεονεκτήματα του συστήματος διαμήκους εξαερισμού μαζί με αυτά της εξαγωγής καπνού μπορούν να συνδυαστούν δημιουργώντας ένα σύστημα διαμήκους εξαερισμού με τοπική εξαγωγή καπνού, με σκοπό τη βελτιστοποιημένη λειτουργία.
- Στον έλεγχο καπνού, το διάμηκες σύστημα εξαερισμού σε συνδυασμό με το σύστημα τοπικής εξαγωγής καπνού μπορεί να κανονιστεί ώστε να λειτουργεί σε διαφορετικές φάσεις. Για τη φάση εκκένωσης, ο καπνός θα εξάγεται τοπικά από την περιοχή πυρκαγιάς από τους εναέριους αγωγούς καπνού για να διατηρηθούν υποφερτές συνθήκες. Για τη διευκόλυνση της καταστολής της φωτιάς, το διάμηκες σύστημα θα ενεργοποιήσει στη συνέχεια τους κατάλληλους ανεμιστήρες που εισάγουν διαμήκη ροή αέρα για τον έλεγχο του καπνού στη μια πλευρά της σήραγγας, αφού οι επιβάτες έχουν εκκενώσει την περιοχή και έχουν μεταφερθεί σε άλλη σήραγγα μέσω των διασταυρώσεων.
- Το πλήρως εγκάρσιο σύστημα και το μερικώς εγκάρσιο σύστημα εξαερισμού, του οποίου οι διαδικασίες στηρίζονται μερικώς στην αραιώση και μερικώς στην εξαγωγή, είναι λιγότερο αποτελεσματικό στον έλεγχο καπνού. Μια περιοχή καθαρή από καπνούς μπορεί ακόμα να διατηρείται αρκεί να εξασφαλίζεται επαρκής ρυθμός εξαγωγής καπνού. Εντούτοις,

το ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας της πυρκαγιάς είναι πιθανόν να αυξηθεί από παροχή αέρα σε χαμηλά επίπεδα, που μπορεί μόνο να χειροτερεύσει την κατάσταση.

- Η πυρκαγιά από όχημα σε σήραγγα είναι πιθανόν να συμβεί δίπλα στην επένδυση των τοιχωμάτων της σήραγγας, που θα μειώσει την μαζική ροή στρωμάτων καπνού και θα αυξήσει το μέσο και μέγιστο ύψος φλόγας. Η δομή της φλόγας διάχυσης που παράγεται από ένα φλεγόμενο όχημα κοντά στην ενίσχυση της σήραγγας είναι μεγάλης σημασίας καθώς επηρεάζει την διάδοση της πυρκαγιάς. Η μέγιστη θερμοκρασία στο ύψος της οροφής ή σε χώρο που εκτείνεται περίπου 20 m από την πηγή της πυρκαγιάς μπορεί να φτάσει τους 700°C. Επομένως, η νομική απαίτηση για πυρκαγιά ελάχιστου ρυθμού 1 ώρας στους 250°C για σύστημα εξαερισμού δεν ικανοποιείται.

2.8.4 Έλεγχος Καπνού σε Σήραγγες με Διαμήκη Εξαερισμό

Στη συγκεκριμένη μελέτη του Chow (1998) δύο πτυχές του ελέγχου καπνού σε διαμήκη συστήματα εξαερισμού στις σήραγγες αναλύονται. Η πρώτη είναι η αύξηση στο ποσοστό μεταφοράς αέρα του στρώματος καπνού μετά από τη λειτουργία του συστήματος και η δεύτερη είναι αύξηση στο ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας ως συνεπεία της αύξησης στο ποσοστό παροχής αέρα για την καύση. Για την επαλήθευση της μελέτης εφαρμόστηκε μοντέλο CFD.

Η έρευνα αναφέρει ότι πολλές οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες έχουν κατασκευαστεί στην περιοχή διοίκησης Χονγκ Κονγκ (HKSAR, στο παρελθόν Hong Kong) και τουλάχιστον πέντε ακόμη σιδηροδρομικές σήραγγες θα κατασκευαστούν στα ερχόμενα έτη, με κατ' εκτίμηση συνολικό μήκος μεγαλύτερο από 12 km. Ο διαμήκης εξαερισμός σχεδιάζεται συνήθως σε τέτοιες σήραγγες για τον έλεγχο καπνού. Αυτό είναι κατάλληλο για τις υπόγειες σιδηροδρομικές σήραγγες με μικρή διατομή επειδή υπάρχουν περιορισμοί χώρου στις πόλεις όπου χωρίσματα ή εγκάρσιος εξαερισμός είναι δύσκολος να εγκατασταθεί.

Σε αυτόν τον τύπο συστήματος εξαερισμού, ο αέρας μεταφέρεται από τη μια άκρη της σήραγγας προς την πηγή της πυρκαγιάς έτσι ώστε ο καπνός να οδηγείται στην έξοδο. Στη μελέτη αυτή δύο σημεία εξετάζονται για το σχεδιασμό διαμήκους συστήματος εξαερισμού σε μια σήραγγα: πρώτον, η αύξηση στο ποσοστό παραγωγής καπνού και δεύτερον, η αύξηση

στην κρίσιμη ταχύτητα αέρα λόγω της αύξησης στο ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας από την πυρκαγιά. Αυτά τα δύο τα σημεία ελέγχονται με προσομοιώσεις CFD. Προσοχή δίνεται στο σχεδιασμό του συστήματος, ιδιαίτερα για μια σήραγγα με κυκλοφορία διπλής κατεύθυνσης. Τα βασικά σημεία είναι:

- Να δοθεί σαφής κατεύθυνση διαφυγής (αντίθετα από την ροή του αέρα) στους επιβάτες.
- Βελτίωση του οπτικού περιβάλλοντος της σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς επειδή οι περισσότερες από τις σιδηροδρομικές σήραγγες είναι σκοτεινές.
- Αύξηση του αριθμού εξόδων κινδύνου στην επιφάνεια για τις υπόγειες σήραγγες.
- Παροχή φορητών συσκευών αναπνοής και φωτισμού έκτακτης ανάγκης μέσα στη σήραγγα.
- Εγκατάσταση χωρισμάτων (προσωρινές κουρτίνες καπνού που ενεργοποιούνται από το σύστημα ανίχνευσης ή σταθεροί τοίχοι) για τις σήραγγες διπλής κυκλοφορίας.

2.8.5 Εκτίμηση Μοντέλου PHOENICS CFD σε Περίπτωση Πυρκαγιάς

Η μελέτη του Liu & Apte (2004) αξιολογεί την απόδοση μιας γενικής χρήσης του υπολογιστικού προγράμματος CFD, PHOENICS, συγκρίνοντας το πεδίο θερμότητας με μετρήσεις από πειράματα πυρκαγιάς σε γωνία δωματίου που έγινε με χρήση του προγράμματος CFD, CSIRO. Ένα κρίσιμο σημείο στο υπολογιστικό μοντέλο είναι ο σχεδιασμός πυρκαγιάς, η οποία, στην παρούσα μελέτη είναι ένα προφίλ ποσοστιαίας απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate - HRR) καύσης ενός αερίου, που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές της πυρκαγιάς. Επιλέχθηκαν δύο διαφορετικά πρότυπα καύσης - κατά ISO και ASTM, με διαφορετικό προφίλ ποσοστού απελευθέρωσης θερμότητας, σαν παραδείγματα έκλυσης της φωτιάς για την επαλήθευση της λύσης του προγράμματος PHOENICS. Οι δοκιμές περιλαμβάνουν μετρήσεις του ποσοστού απελευθέρωσης θερμότητας, του πεδίου θερμοκρασίας και των ροών θερμότητας στο πάτωμα, που προκλήθηκαν από την καύση του αερίου. Δεν υπήρξε καμία διάδοση πυρκαγιάς σε αυτήν την περίπτωση, αφού οι τοίχοι και οι οροφές καλύπτονται με μη-εύφλεκτη γυψοσανίδα.

Τα συμπεράσματα της έρευνας είναι τα εξής:

- Λογικό πεδίο θερμοκρασίας μπορεί να ληφθεί για τη διαμόρφωση μιας πυρκαγιάς σε ένα δωμάτιο δοκιμής χρησιμοποιώντας το πακέτο λογισμικού PHOENICS.
- Ο στερεός τοίχος πρέπει να συμπεριληφθεί στην περιοχή υπολογισμού αφού η διάδοση θερμότητας στον τοίχο αποτέλεσε ένα μεγάλο μέρος της συνολικής μεταφοράς θερμότητας, και αυτό μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια εσωτερικής ανάπτυξης θερμοκρασίας αερίου του μοντέλου CFD.
- Το μοντέλο τύρβης k-ε είναι κατάλληλο για την απεικόνιση της τυρβώδους ανωστικής τάσης, εάν το υπολογιστικό πλέγμα είναι αρκετά πυκνό.

2.8.6 Μοντέλο CFD Πυρκαγιάς σε Σήραγγα

Στη μελέτη των Tripathi κ.α. (2003) η προσομοίωση των ιδιοτήτων εκκένωσης μιας σήραγγας λόγω πυρκαγιάς από ατύχημα μέσα σε αυτή έχει πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας το τρισδιάστατο υπολογιστικό πρόγραμμα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής Fluidyn-PANACHE Ver PANTUNNEL. Αυτό το πρόγραμμα περιλαμβάνει μοντέλα για τύρβη, καύση, ακτινοβολία κλπ.

Στη συγκεκριμένη μελέτη, ερευνώνται δύο περιπτώσεις για διαφορετικές διατομές σήραγγων. Η πρώτη περίπτωση ερευνά τη διάδοση της θερμικής ροής και τη συγκέντρωση άλλων προϊόντων της πυρκαγιάς ως αποτέλεσμα της πυρκαγιάς από ατύχημα σε σήραγγα ορθογωνικής διατομής. Αυτή η περίπτωση αξιολογεί επίσης τη σημασία της εξόδου διαφυγής που παρέχεται για σύστημα εξαερισμού για πυρκαγιές 30 MW και 100 MW. Η δεύτερη περίπτωση ερευνά τη διάδοση της θερμικής ροής και τη συγκέντρωση άλλων προϊόντων καύσης της πυρκαγιάς, μέσα σε σήραγγα με ορθογωνική και τοξοειδή άνω διατομή. Η δεύτερη περίπτωση προβλέπει επίσης την επάρκεια του παρεχόμενου συστήματος εξαερισμού για πυρκαγιά 30 MW.

Έτσι, πιο συγκεκριμένα, τα αντικείμενα μελέτης της έρευνας, είναι η εκτίμηση εναλλακτικών στρατηγικών εξαερισμού για σήραγγες σε περίπτωση πυρκαγιάς και η διάδοση θερμότητας

και προϊόντων καύσης από την πυρκαγιά, όπως CO₂ και μείωση O₂ με σκοπό τη σκιαγράφηση περιοχών μη αποδεκτών ορίων ρύπων.

Συμπερασματικά από τη μελέτη των Tripathi κ.α. (2003), υποστηρίζεται ότι σε σχέση με μονοδιάστατους υπολογισμούς, ένας τρισδιάστατος υπολογισμός μπορεί να δώσει ουσιαστικά περισσότερες πληροφορίες στην περιοχή πυρασφάλειας για την περιγραφή της διάδοσης πυρκαγιάς και διασποράς των προϊόντων καύσης της πυρκαγιάς μέσα σε μια σήραγγα. Από τις δύο περιπτώσεις που ερευνήθηκαν χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο μοντέλο CFD, η πρώτη περίπτωση προσομοίωσε τη διάδοση της πυρκαγιάς και των προϊόντων της μέσα σε μια σήραγγα με ορθογωνική διατομή για 30 MW (ελαφρύ όχημα) και 100 MW (βαρύ όχημα) πυρκαγιά με μια έξοδο κινδύνου τοποθετημένη περίπου στη μέση της σήραγγας. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης εκτιμήθηκε η ανάγκη για άνοιγμα της εξόδου σύντομα μετά από την έναρξη της πυρκαγιάς και προβλέφθηκε η μέγιστη συγκέντρωση του CO₂ και ελάχιστη του O₂. Η δεύτερη περίπτωση προσομοίωσε τη διάδοση της πυρκαγιάς και των προϊόντων της μέσα σε μια σήραγγα με ορθογωνική και κυρτή (τοξοειδής) άνω διατομή για 30 MW (ελαφρύ όχημα) πυρκαγιά. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης προσδιορίζεται η θέση των εξόδων κινδύνου καθώς και οι περιοχές υψηλής συγκέντρωσης CO₂, χαμηλής συγκέντρωσης O₂ και περιοχές υψηλών θερμοκρασιών.

Η έρευνα έδειξε μέγιστη θερμοκρασία των 1420°C και κλασματική μάζα CO₂ 0,24 στο κέντρο της περιοχής της πυρκαγιάς. Η ανάλυση της διακύμανσης της συγκέντρωσης με το χρόνο δείχνει ότι είναι πολύ σημαντικό να ανοιχτεί θύρα εξόδου πολύ σύντομα αφού ξεκινήσει η πυρκαγιά προκειμένου να περιοριστεί η εξάπλωση των ρύπων σε μια πολύ μικρή περιοχή κοντά στην εστία της πυρκαγιάς. Επίσης, δείχνει ότι το άνοιγμα της θύρας εξόδου πλησίον της θέσης της πηγής πυρκαγιάς είναι χρήσιμο για την εξαγωγή των ρύπων ώστε να πέσουν γρήγορα τα επίπεδα συγκέντρωσης ρύπων σε αρκετά χαμηλότερο επίπεδο μέσα στη σήραγγα.

Η μελέτη πυρκαγιάς (30 MW) δείχνει ότι οι προτεινόμενες θύρες εξόδου δίπλα στη πηγή της πυρκαγιάς παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή των ρύπων και της θερμικής ροής για την παροχή καθαρού και ασφαλούς περιβάλλοντος μέσα στη σήραγγα. Επίσης δείχνει ότι το παρεχόμενο σύστημα εξαερισμού είναι αρκετά ικανοποιητικό, δεδομένου ότι το διαθέσιμο O₂

είναι επαρκές μέσα στη σήραγγα και η θερμοκρασία και η συγκέντρωση του CO₂ δεν φτάνουν ένα σημαντικό επίπεδο εκτός από την περιοχή της πυρκαγιάς. Η κλασματική μάζα CO₂ υπολογίζεται να είναι 0,24 για 30 MW πυρκαγιά στο κέντρο της θέσης της πυρκαγιάς. Εντούτοις, η αξία της είναι αρκετά χαμηλή στις άκρες της εστίας της πυρκαγιάς δεδομένου ότι εξάγεται από τις ανοιγμένες θύρες εξόδου. Η μείωση του O₂ στην εστία της πυρκαγιάς μπορεί επίσης να φανεί αναλογικά προς τη θερμοκρασία. Εντούτοις, η διαθεσιμότητα του οξυγόνου στη σήραγγα είναι επαρκής για την επιβίωση των χρηστών της σήραγγας εκτός από τη θέση πλησίον της πυρκαγιάς.

2.8.7 Πρόβλεψη Παραγώγων Αιθάλης και CO σε Σήραγγα με Εξαερισμού

Η αριθμητική μελέτη του Wang (2009) διεξάγεται με τη χρήση του μοντέλου τύρβης LES για να δώσει μια ποσοτική περιγραφή των τοξικών προϊόντων (CO, αιθάλη), τη στρωματοποίηση θερμοκρασίας και τις ροές θερμότητας από μια κυκλική εστία πυρκαγιάς σε σήραγγα διαμήκους εξαερισμού. Το αριθμητικό μοντέλο της εργασίας λύνει τις τρισδιάστατες, χρονικά εξαρτημένες εξισώσεις των Navier-Stokes, που συνδέονται με τα υπομοντέλα για το σχηματισμό αιθάλης και τη θερμική μεταφορά ακτινοβολίας. Η μετακίνηση καπνού διαμορφώνεται ως μια μη σταθερή διαδικασία, από τη στιγμή της ανάφλεξης μέχρι τη σύγκλιση σε μια σχεδόν σταθερή κατάσταση. Στην έρευνα αυτή, οι υπολογισμένες, χρονικά-μέσες θερμοκρασίες συγκρίνονται με τα πειραματικά στοιχεία από μια πραγματικού μεγέθους σήραγγα εξαερισμού, και επιτυγχάνεται μια σχετικά καλή ομοιότητα. Κάτω από μια κρίσιμη ταχύτητα εξαερισμού, το στρώμα που έχει αντίθετη ροή (*back flow layer*) παρασύρει το CO και την παραγωγή αιθάλης προς την είσοδο, και προβλέπεται η αντίστροφη εξάρτηση του μήκους αντίθετης ροής με την ταχύτητα εξαερισμού. Η μελέτη δίνει έμφαση στη χρησιμότητα της διαμόρφωσης τομέων για την ανάλυση των πυρκαγιών και της μετακίνησης καπνού (CO και αιθάλη) στις σήραγγες.

Στη μελέτη του Wang (2009), το μοντέλο τύρβης LES κάνει την προσομοίωση των προτύπων καύσης, παραγωγής αιθάλης και ακτινοβολίας και εξετάζεται σε σχέση με το στροβιλισμό του αέρα πάνω από την εστία της φωτιάς σε αεριζόμενη σήραγγα. Οι παρατηρήσεις που προκύπτουν είναι αρχικά ότι σε μια σήραγγα με διαμήκη εξαερισμό, το φαινόμενο

επιστροφής καπνού (*backlayer*) πραγματοποιείται εάν το ρεύμα εξαερισμού δεν είναι αρκετά ισχυρό. Στην κρίσιμη ταχύτητα εξαερισμού, το ανωστικό στρώμα καπνού (*buoyant plume*) είναι σημαντικά κλισμένο από το οριζόντιο και η επιστροφή καπνού μπορεί να κατασταλεί εντελώς πάνω από την εστία πυρκαγιάς. Τα αποτελέσματα CFD παρουσιάζουν ξεκάθαρα την σταθεροποίηση της κρίσιμης ταχύτητας εξαερισμού όταν η παραγωγή θερμότητας ξεπερνά μια ορισμένη τιμή και μια μέγιστη κρίσιμη ταχύτητα 3,1 m/s για την καταστολή της επιστροφής καπνού παρά το μέγεθος της σήραγγας. Τα αριθμητικά μοντέλα αποδεικνύονται να κατέχουν τη δυνατότητα να προβλεφθεί ένα μέγιστο αποτελεσματικό ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας HRR (Heat Release Rate) για ένα δεδομένο μέγεθος σηράγγων λόγω της μείωσης της αποδοτικότητας καύσης. Για το υδραυλικό ύψος των σηράγγων της μελέτης (3.3 m) το HRR πλησιάζει ένα μέγιστο της τάξης των 35 MW, που αντιστοιχεί σε ένα κρίσιμο ρυθμό παροχής καυσίμων 0.8 kg/s, πέρα από το οποίο η αποδοτικότητα της καύσης μειώνεται δραστικά στο 60% περίπου, ενώ η θερμοκρασία, η ροή θερμότητας, η αιθάλη και η παραγωγή CO συγκλίνουν ασυμπτωτικά. Κατά μήκος της σήραγγας, η συμβολή από την ακτινοβολία είναι υψηλότερη από 90% της συνολικής ροής θερμότητας σε ολόκληρο το φάσμα της ταχύτητας εξαερισμού.

Κεφάλαιο 3: Μαθηματικό Υπόβαθρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζει το μαθηματικό μοντέλο της συγκεκριμένης έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, το Μαθηματικό Μοντέλο αποτελείται από μια επισκόπηση των θεμελιωδών εξισώσεων που θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής στα επόμενα κεφάλαια για να διαμορφώσουν τις φυσικές διαδικασίες που περιλαμβάνονται στη μελέτη της περίπτωσης πυρκαγιάς σε σήραγγα. Επίσης, γίνεται μια σύντομη αναφορά στο υπολογιστικό πρόγραμμα και στα βασικά στοιχεία και παραμέτρους, όπως κατασκευή της γεωμετρίας, υπολογιστικού πλέγματος κλπ, που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα ANSYS FLUENT για την επίλυση του προβλήματος.

3.1 Μαθηματικό Μοντέλο

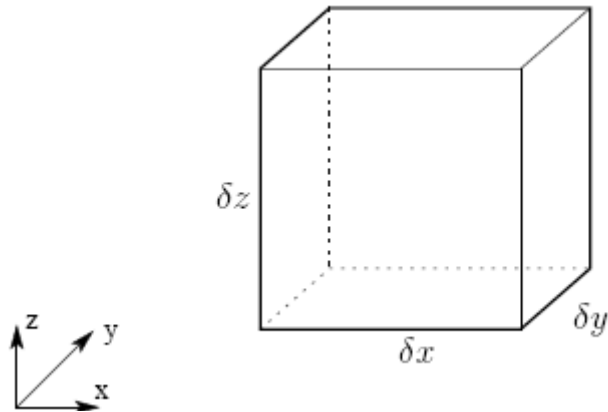
Μερικά από τα πρότυπα που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο αφορούν συγκεκριμένα το κώδικα Fluent CFD, όπως αυτός χρησιμοποιείται στη μεθοδολογία της συγκεκριμένης εργασίας. Οι εξισώσεις της μηχανικής των ρευστών και οι αριθμητικοί αλγόριθμοι που απαιτούνται για να τις λύσουν είναι γνωστές, εντούτοις με την ανάπτυξη των ψηφιακών υπολογιστών γίνεται εφικτό να διαμορφωθεί η συμπεριφορά των ρευστών. Πλέον, η χρήση CFD για τις περιπτώσεις πυρκαγιάς σε σήραγγα χρησιμοποιείται ευρέως λόγω και της αυξημένης χρήσης υπολογιστικών προγραμμάτων στη βιομηχανία.

3.1.1 Θεμελιώδεις Εξισώσεις

Οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τη φυσική της ροής των ρευστών αναφέρονται ως θεμελιώδεις εξισώσεις και είναι οι εξής:

- Η Εξίσωση Διατήρησης Μάζας
- Η Εξίσωση Ορμής
- Η Εξίσωση Ενέργειας

Κάθε μια από αυτές τις εξισώσεις μπορεί να παραχθεί με την εξέταση ενός στοιχειώδους όγκου μέσα σε ρευστό (Εικόνα 3.1). Να σημειωθεί ότι ο όγκος παραμένει σταθερός στο διάστημα καθώς το ρευστό κινείται εν μέσω του - αυτό αναφέρεται ως σύστημα Eulerian.



Εικόνα 3.1 Στοιχειώδης όγκος ρευστού

Εξίσωση Διατήρησης Μάζας

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας εκφράζει τον πρώτο βασικό νόμο της κλασικής μηχανικής, ότι η μάζα δεν καταστρέφεται ούτε δημιουργείται από το μηδέν. Για να διατηρηθεί η μάζα ο ρυθμός ροής σε έναν όγκο πρέπει να ισούται με το ρυθμό αλλαγής μάζας μέσα στον όγκο. Στη μηχανική των ρευστών, η εξίσωση συνέχειας δηλώνει ότι, σε οποιαδήποτε διαδικασία σταθερής κατάστασης, το ποσοστό της μάζας που εισάγεται σε ένα σύστημα είναι ίσο με το ποσοστό της μάζας που φεύγει από το σύστημα. 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:

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

Εξίσωση Ορμής

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής εκφράζει το δεύτερο βασικό νόμο της κλασικής μηχανικής. Σύμφωνα με το Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα ή Θεμελιώδη Νόμο Μηχανικής, ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ενός σώματος ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων που ασκήθηκαν πάνω του. Η εξίσωση ορμής είναι (Fluent, 2006):

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

όπου ρ : η πυκνότητα

u : το διάνυσμα ταχύτητας

p : η πίεση

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

S : οι εξωτερικές δυνάμεις (πχ ηλεκτροστατική)

σ : ο τανυστής τάσεων

Εξίσωση Ενέργειας

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας εκφράζει τον γενικευμένο Νόμο Θερμοδυναμικής (Α΄ Αξίωμα), σύμφωνα με τον οποίο το αλγεβρικό άθροισμα της μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας και του έργου που είτε παράγεται είτε δαπανάται από ένα σύστημα ισούται με το πόσο θερμότητα που εκλύεται ή απορροφάται από το σύστημα αυτό. Η εξίσωση ενέργειας (Fluent, 2006):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot q_r + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_l \nabla \cdot h_l \rho D_l \nabla Y_l$$

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

3.1.2 Μοντέλα Τύρβης

Η γένεση της τύρβης προκαλείται από αστάθεια της ροής οφειλόμενη είτε στις συνθήκες ροής είτε σε τυχαία διατάραξη και εμφανίζεται σε περιοχές σημαντικών δυνάμεων συνεκτικότητας. Η τύρβη είναι και χρονικά εξαρτημένη και πλήρως τρισδιάστατη και αποτελείται από περιστροφικές δίνες ή «στροβιλισμούς», που επιβάλλονται πέρα από την καθαρή ροή. Αυτοί οι στρόβιλοι εμφανίζονται σε ένα συνεχές φάσμα μεγεθών, από πολύ μεγάλο σε πολύ μικρό, και εμμένουν για σχετικά τις μεγάλες περιόδους του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι το επίπεδο τύρβης σε ένα σημείο εξαρτάται από το ιστορικό του ρευστού. Ουσιαστικά όλες οι ενδιαφέρουσες ροές είναι τυρβώδεις, και η τύρβη έχει σημαντικό αντίκτυπο στη διάχυση της ενέργειας, της μάζας και της ορμής σε ένα ρευστό (Hart, 2005).

Είναι γεγονός ότι κανένα πρότυπο τύρβης δεν είναι αποδεκτό παγκοσμίως ως το πιο κατάλληλο για όλες τις κατηγορίες προβλημάτων και εφαρμογές CFD. Η επιλογή του μοντέλου τύρβης εξαρτάται από εκτιμήσεις όπως η φυσική που περιβάλλει τη ροή, η καθιερωμένη πρακτική για μια συγκεκριμένη κατηγορία προβλήματος, το επίπεδο ακρίβειας που απαιτείται, οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι και το διαθέσιμο χρονικό διάστημα για την προσομοίωση. Για την πιο κατάλληλη επιλογή μοντέλου, πρέπει να κατανοηθούν οι ικανότητες και οι περιορισμοί των διάφορων επιλογών (Fluent, 2006).

Εξισώσεις Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)

Οι εξισώσεις Reynolds Averaged Navier Stokes (ή εξισώσεις RANS) είναι χρονικά μέσες εξισώσεις της κίνησης της ροής ρευστού. Οι εξισώσεις RANS χρησιμοποιούνται πρώτιστα για να περιγράψουν την τύρβη. Η ιδέα πίσω από τις εξισώσεις εισήχθη από τον Osborne Reynolds και είναι ο διαχωρισμός με βάση τον οποίο μια στιγμιαία ποσότητα χωρίζεται στη μέση χρονικά τιμή και στη διακύμανση. Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν με

τις προσεγγίσεις βασισμένες στη γνώση των ιδιοτήτων της τυρβώδους ροής για να δώσουν τις κατά προσέγγιση χρονικά μέσες λύσεις στις εξισώσεις των Navier Stokes.

Έτσι, κατά την μαθηματική ανάλυση των τυρβωδών ροών οι μεταβλητές στις εξισώσεις Navier Stokes αντικαθίστανται από τη μέση χρονικά τιμή (μέσο συνόλου ή χρονικό μέσο) και τη διακύμανσή τους. Για παράδειγμα, για τη στιγμιαία ταχύτητα ισχύει:

$$u = \bar{u} + u' \text{ και γενικά } \phi = \bar{\phi} + \phi'$$

Στα τυρβώδη πεδία ροής η μέση χρονικά τιμή της διακύμανσης είναι μηδενική, δηλαδή $\bar{u}' = 0$.

Αντικαθιστώντας τις συνιστώσες αυτής της μορφής για τις μεταβλητές της ροής στις εξισώσεις ορμής και θεωρώντας ένα μέσο χρόνο προκύπτουν οι εξισώσεις RANS. Οι πρόσθετοι όροι τάσης που περιέχονται στις εξισώσεις αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα της τύρβης και καλούνται **τάσεις Reynolds**:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$$

Το Μοντέλο Τύρβης k-ε

Το μοντέλο τύρβης k-ε είναι ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων, στις οποίες η λύση των δύο ξεχωριστών εξισώσεων κίνησης επιτρέπει να καθοριστούν ανεξάρτητα οι κλίμακες τυρβώδους ταχύτητας και μήκους. Το Standard model k-ε του FLUENT ανήκει στην κατηγορία μοντέλου τύρβης και είναι αντικείμενο υπολογισμών ροής πρακτικής μηχανικής στο χρόνο. Η ευρωστία, η οικονομία, και η λογική ακρίβεια για ένα ευρύ φάσμα των τυρβωδών ροών εξηγούν τη δημοτικότητά του 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 συνάρτηση 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 συνάρτηση 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 διακύμανσης μεταβολής της συμπιεστής τύρβης στο συνολικό ποσοστό της συνάρτησης καταστροφής. Τα $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ 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 (Fluent, 2006).

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 $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ε είναι:

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

Το Μοντέλο Τύρβης LES

Οι τυρβώδεις ροές χαρακτηρίζονται από δίνες με ένα ευρύ φάσμα κλιμάκων χρόνου και μήκους. Οι μεγαλύτερες δίνες είναι συνήθως συγκρίσιμες σε μέγεθος με το χαρακτηριστικό μήκος της μέσης ροής. Οι μικρότερες κλίμακες ευθύνονται για το διασκεδασμό της κινητικής ενέργειας τύρβης. Είναι δυνατό, θεωρητικά, να επιλυθεί άμεσα ολόκληρο το φάσμα των τυρβωδών κλιμάκων με χρήση της προσέγγισης γνωστής ως άμεση αριθμητική προσομοίωση

(Direct Numerical Simulation-DNS). Στο DNS δεν απαιτείται καμία διαμόρφωση, εντούτοις, το DNS δεν είναι εφαρμόσιμο για πρακτικά προβλήματα εφαρμοσμένης μηχανικής που περιλαμβάνουν ροές υψηλού αριθμού Reynolds. Το κόστος που απαιτείται για το DNS για να επιλύσει ολόκληρη τη σειρά των κλιμάκων είναι ανάλογο προς Re_i^3 , όπου Re_i είναι ο τυρβώδης αριθμός Reynolds. Επομένως, για τους υψηλούς αριθμούς Reynolds, το κόστος γίνεται απαγορευτικό.

Στο LES, οι μεγάλες δίνες επιλύονται άμεσα, ενώ οι μικρές μοντελοποιούνται. Η λογική του LES μπορεί να συνοψιστεί ως εξής (Fluent, 2006):

- Η ορμή, η μάζα, η ενέργεια, και άλλα βαθμωτά μεγέθη μεταφέρονται συνήθως από μεγάλες δίνες.
- Οι μεγάλες δίνες υπαγορεύονται από τη γεωμετρία και τις οριακές συνθήκες της σχετικής ροής.
- Οι μικρές δίνες εξαρτώνται λιγότερο από τη γεωμετρία, τείνουν να είναι πιο ισοτροπικές, και είναι συνεπώς πιο γενικές.
- Η πιθανότητα επιλογής ενός μοντέλου τύρβης που να είναι ικανοποιητικό για όλα τα προβλήματα είναι μεγαλύτερη για προβλήματα με μικρές δίνες.

Το LES απαιτεί πυκνότερα πλέγματα από εκείνα που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς RANS. Επιπλέον, το LES πρέπει να τρέξει για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα ώστε να ληφθούν σταθερά αποτελέσματα για τη ροή. Κατά συνέπεια, ο χρόνος υπολογισμού που απαιτείται από το LES είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν για σταθερούς υπολογισμούς RANS λόγω μεγαλύτερης χρήσης της μνήμης (RAM) και του χρόνου επεξεργασίας (CPU). Επομένως, υπολογιστές υψηλής απόδοσης (πχ. παράλληλοι υπολογισμοί) είναι απαραίτητοι για LES, ειδικά στις βιομηχανικές εφαρμογές.

3.2 Υπολογιστικό Πρόγραμμα ANSYS FLUENT

Το φαινόμενο της πυρκαγιάς σε αεριζόμενη σήραγγα προσομοιώθηκε μέσω του υπολογιστικού προγράμματος ANSYS FLUENT. Σε αυτήν την ενότητα, τα βασικά στοιχεία του προγράμματος θα αναφερθούν, ώστε να αναλυθούν στη συνέχεια οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη χρήση του προγράμματος για τη μελέτη του φαινομένου.

3.2.1 Εισαγωγή στο ANSYS FLUENT

Το ANSYS είναι το πρωτοπόρο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (PEA) σε ολόκληρο τον κόσμο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιονδήποτε τύπο ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, σε οποιαδήποτε βιομηχανική ή κατασκευαστική εφαρμογή. Μερικές από τις εφαρμογές του είναι (ANSYS, 2011):

- Τα μεγάλα δομοστατικά και ειδικά έργα
- Τα μηχανολογικά
- Οι σιδηρόδρομοι
- Η μετάδοση ισχύος
- Η παραγωγή ενέργειας
- Τα ηλεκτρονικά είδη
- Η αεροδιαστημική
- Η αυτοκινητοβιομηχανία
- Η βιοϊατρική

Το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS FLUENT διαθέτει απεριόριστες δυνατότητες που επιτρέπουν τη διεξαγωγή της προσομοίωσης επιφέροντας ακριβή αποτελέσματα, τα οποία προσεγγίζουν αυτά των πειραματικών μελετών. Πιο συγκεκριμένα, το ANSYS FLUENT είναι ένα εργαλείο σχεδιασμού και ανάλυσης με ευρείες δυνατότητες φυσικής προσομοίωσης, οι οποίες είναι απαραίτητες στην αναπαράσταση ροής, τύρβης, μεταφοράς θερμότητας ακόμα και σε χρήσεις βιομηχανικών εφαρμογών, που μπορούν να ποικίλλουν από τη ροή πάνω στην πτέρυγα ενός αεροσκάφους μέχρι την καύση σε ένα κλίβανο.

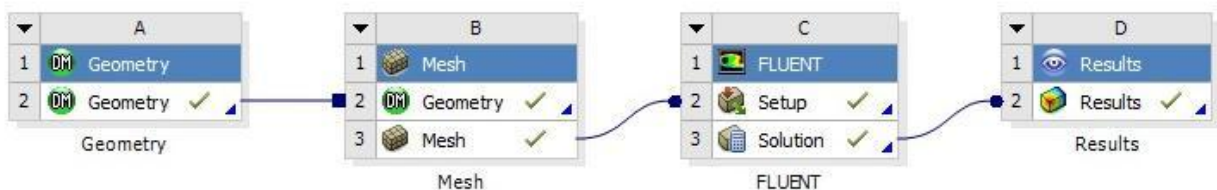
Η ενσωμάτωση του ANSYS FLUENT στο ANSYS Workbench (πλατφόρμα εργασίας) παρέχει στον χρήστη την δυνατότητα αμφίδρομης συσχέτισης όλων των κύριων συστημάτων σχεδίασης σε H/Y (CAD-Computer Aided Design), όπως ευρείες γεωμετρικές παραλλαγές και δημιουργίες με τη χρήση του ANSYS DesignModeler καθώς και προηγμένες τεχνικές κατασκευής πλέγματος μέσω του ANSYS Meshing. Έτσι, εισάγοντας τα δεδομένα αυτά στο υπολογιστικό κομμάτι του FLUENT το πρόγραμμα προχωρά στην επίλυση των εξισώσεων. Έπειτα, τα αρχεία και τα αποτελέσματα μπορούν να μελετηθούν με τη χρήση του ANSYS

CFD Post για περαιτέρω ανάλυση με σύγχρονα εργαλεία επεξεργασίας δεδομένων και σύγκριση αποτελεσμάτων διαφορετικών περιπτώσεων.

Ο συνδυασμός αυτών των πλεονεκτημάτων με την εκτενή γκάμα των δυνατοτήτων φυσικής προσομοίωσης, καθώς και τα γρήγορα και ακριβή αποτελέσματα που παρέχει, κάνουν το ANSYS FLUENT ένα από τα πιο εύχρηστα λογισμικά προσομοίωσης CFD διαθέσιμα ανά τον κόσμο.

3.2.2 Εφαρμογές του ANSYS FLUENT

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν κάποιες από τις πολλές εφαρμογές (υποπρογράμματα) του ANSYS FLUENT όπως η Γεωμετρία (DesignModeler), η Διαμόρφωση του Πλέγματος (Meshing), το Πρόγραμμα Επίλυσης Εξισώσεων (Fluent) και η Εμφάνιση των Αποτελεσμάτων (Results, CFD Post) τα οποία και θα αναλυθούν στη συνέχεια (ANSYS, 2011).



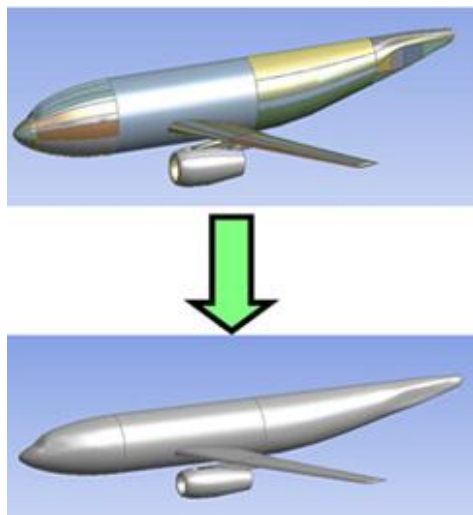
Εικόνα 3.2 Πλατφόρμα ANSYS Workbench

Γεωμετρία (ANSYS DesignModeler)

Όλες οι μηχανολογικές προσομοιώσεις ξεκινούν με τη γεωμετρία για την αναπαράσταση της σχεδίασης του προβλήματος. Η γεωμετρία μπορεί να είναι είτε ένα στερεό επιμέρους κομμάτι μιας κατασκευαστικής ανάλυσης ή ο όγκος του αέρα μιας ροϊκής ή ηλεκτρομαγνητικής μελέτης. Αυτή η γεωμετρία έχει προκύψει από ένα σύστημα CAD ή από σχεδιασμό στο χέρι. Το λογισμικό ANSYS DesignModeler παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισης της γεωμετρίας για περαιτέρω ανάλυση.

Το λογισμικό αυτό έχει τη δυνατότητα συσχετισμού με όλα τα άλλα κύρια συστήματα CAD με αποτέλεσμα τη μεταφορά, πρόσθεση, αφαίρεση δεδομένων τα οποία και αναβαθμίζονται κατ' επιλογή. Επιπροσθέτως, είναι δυνατό να σχεδιαστούν μοντέλα για κατασκευαστική χρήση και όχι απαραίτητα προσομοίωση, χρησιμοποιώντας σύνθετη γεωμετρία, η οποία θα περιλαμβάνει λεπτομέρειες και άλλα μικρότερης σημασίας χαρακτηριστικά, που δε θα ήταν απαραίτητα σε μια προσομοίωση. Δισδιάστατα σχέδια μπορούν να μετατραπούν σε τρισδιάστατα στερεά, τα οποία και μπορούν να επεξεργαστούν περαιτέρω.

Έτσι, συνδέοντας τη γεωμετρία που προέκυψε από το DesignModeler με το κατάλληλο πλέγμα και τις παραμέτρους επίλυσης μέσω της πλατφόρμας Workbench, δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε την ίδια γεωμετρία για διάφορες παραλλαγές της σχεδίασης.



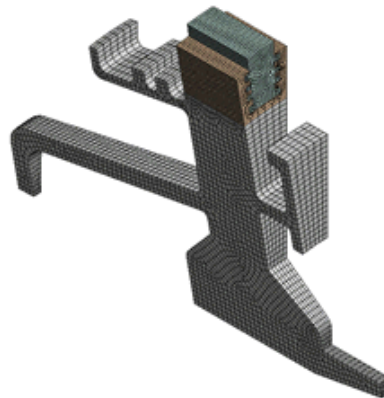
Εικόνα 3.3 Γεωμετρία Αεροσκάφους με ANSYS DesignModeler

Διαμόρφωση Πλέγματος (Meshing)

Η κατασκευή του πλέγματος είναι ένα από τα πιο κρίσιμα κομμάτια της μηχανολογικής προσομοίωσης. Υπερβολικός αριθμός κελιών μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα χρονοβόρα τρεξίματα επίλυσης, ενώ αντίθετα ένας μικρός αριθμός θα οδηγούσε σε ανακριβή αποτελέσματα. Η τεχνολογία του ANSYS Meshing παρέχει τον τρόπο ώστε να ισορροπήσουν αυτές οι απαιτήσεις και να προκύψει το σωστό πλέγμα για κάθε προσομοίωση με τον πιο

αυτοματοποιημένο δυνατό τρόπο. Τα πλεονεκτήματα όλων των ανεξάρτητων εργαλείων κατασκευής πλεγμάτων συγκεντρώθηκαν σε ένα και μόνο περιβάλλον με αποτέλεσμα να προκύπτουν κάποια από τα καλύτερα πλέγματα που είναι εφικτό να κατασκευαστούν. Το σύγχρονο αυτοματοποιημένο περιβάλλον του λογισμικού αυτού καθιστά απλή την κατασκευή διαφόρων ειδών πλεγμάτων, όπως τετραεδρικό, εξαεδρικό, πρισματικό κ.α.

Η διαφορετική φύση του εκάστοτε προβλήματος απαιτεί και διαφορετική προσέγγιση στην κατασκευή του πλέγματος. Στις προσομοιώσεις ρευστομηχανικής απαιτούνται πλέγματα υψηλής ποιότητας, τόσο στη διαμόρφωση των στοιχείων όσο και στην ομαλοποίηση. Αντίθετα, στις προσομοιώσεις κατασκευών το πλέγμα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα καθώς ο χρόνος τρεξίματος μπορεί να μειωθεί ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων. Το λογισμικό ANSYS Meshing διαθέτει ρύθμιση επιλογής της φύσης του προβλήματος και έτσι εγγυάται το κατάλληλο πλέγμα για την κάθε προσομοίωση.



Εικόνα 3.4 Ένα σύνθετο πλέγμα με ANSYS Meshing

Πρόγραμμα Επίλυσης Εξισώσεων (ANSYS Fluent)

Αφού έχει σχεδιαστεί η γεωμετρία και έχει κατασκευαστεί το πλέγμα, τα δεδομένα αυτά τοποθετούνται στο ANSYS Fluent, το οποίο αναλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων. Είναι ένα λογισμικό υψηλής ακρίβειας, το οποίο χρησιμοποιεί πεπερασμένους όγκους για τη διακριτοποίηση των περιοχών. Επίσης, σχηματίζει εξισώσεις πεπερασμένων όγκων με αποτέλεσμα να εγγυάται την ακριβή διατήρηση των ποσοτήτων ροής, μια ζωτικής σημασίας

προϋπόθεση για την ακριβή CFD προσομοίωση. Το ANSYS Fluent, σε αντίθεση με το ANSYS CFX το οποίο εστιάζει μόνο στην επίλυση των θεμελιωδών εξισώσεων μεταφοράς, προσφέρει ποικιλία προσέγγισης λύσεων. Και τα δύο λογισμικά επίλυσης εξισώσεων παρέχουν μια πλειάδα δυνατοτήτων φυσικής μοντελοποίησης που διασφαλίζουν ότι μια οποιαδήποτε ρευστομηχανική προσομοίωση θα έχει την απαραίτητη ακρίβεια.

Αποτελέσματα (CFD Post)

Οι προσομοιώσεις CFD δεν σταματούν με την πρόβλεψη της ροής του ρευστού. Για να επωφεληθούμε από την πρόβλεψη της ροής απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία, η οποία θα μας δώσει όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες όσον αφορά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ροής του ρευστού. Το λογισμικό ANSYS CFD Post διαθέτει όλα τα μέσα απεικόνισης και ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Σε αυτά τα μέσα περιλαμβάνονται δημιουργία εικόνων για την οπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ποιοτική ανάλυση και αριθμητικά δεδομένα, αυτοματισμός για διευκόλυνση επαναλαμβανόμενων διαδικασιών και τη δυνατότητα τρεξίματος σε ομάδες (batch mode).

Κεφάλαιο 4: Υπολογιστικό Μοντέλο και Μεθοδολογία

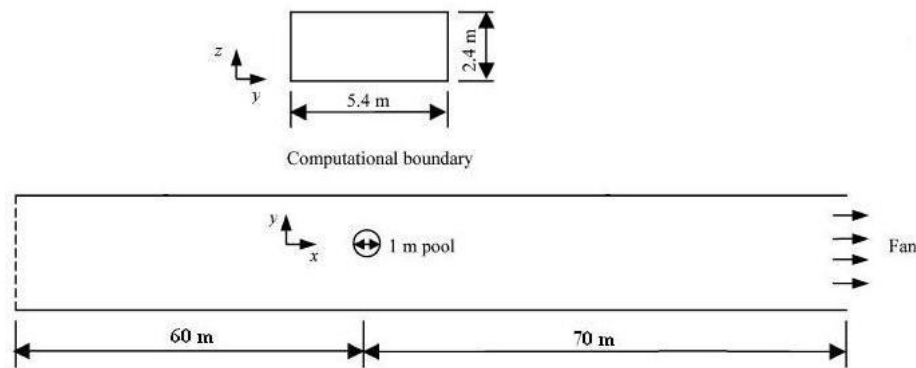
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

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.

4.1 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) προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των μοντέλων τύρβης k-ε (παρούσα μελέτη) και LES (μελέτη Gao κα., 2004). 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.



Εικόνα 4.1 Γεωμετρία και διαστάσεις της σήραγγας

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

Πίνακας 4.1 Τιμές \dot{m} και ταχύτητας εξαερισμού για τις τρεις περιπτώσεις μελέτης

Έτσι, έχοντας όλα τα αριθμητικά δεδομένα μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας \dot{Q} , η τιμή του οποίου 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 $V=A \cdot h$.

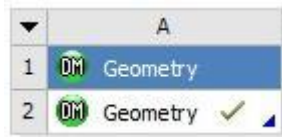
Case	\dot{Q} [MW]	\dot{Q}/V [MW/m ³]
a	2.76612	9.4181818
b	2.56854	8.7454545
c	2.291928	7.80363636

Πίνακας 4.2 Τιμές \dot{Q} και \dot{Q}/V για τις τρεις περιπτώσεις μελέτης

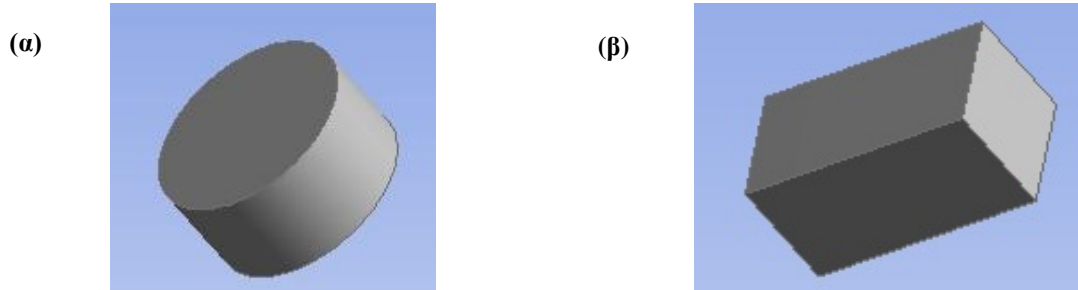
4.2 Αριθμητική Προσομοίωση στο ANSYS FLUENT

Έχοντας παρουσιάσει τις βασικές τιμές που χρησιμοποιούνται στη μελέτη των τριών περιπτώσεων, περιγράφεται η διαδικασία εισαγωγής τους στο ANSYS FLUENT και αναλύεται η αριθμητική προσομοίωση σε καθεμία από τις τέσσερις εφαρμογές του υπολογιστικού προγράμματος.

4.2.1 Γεωμετρία (DesignModeler)

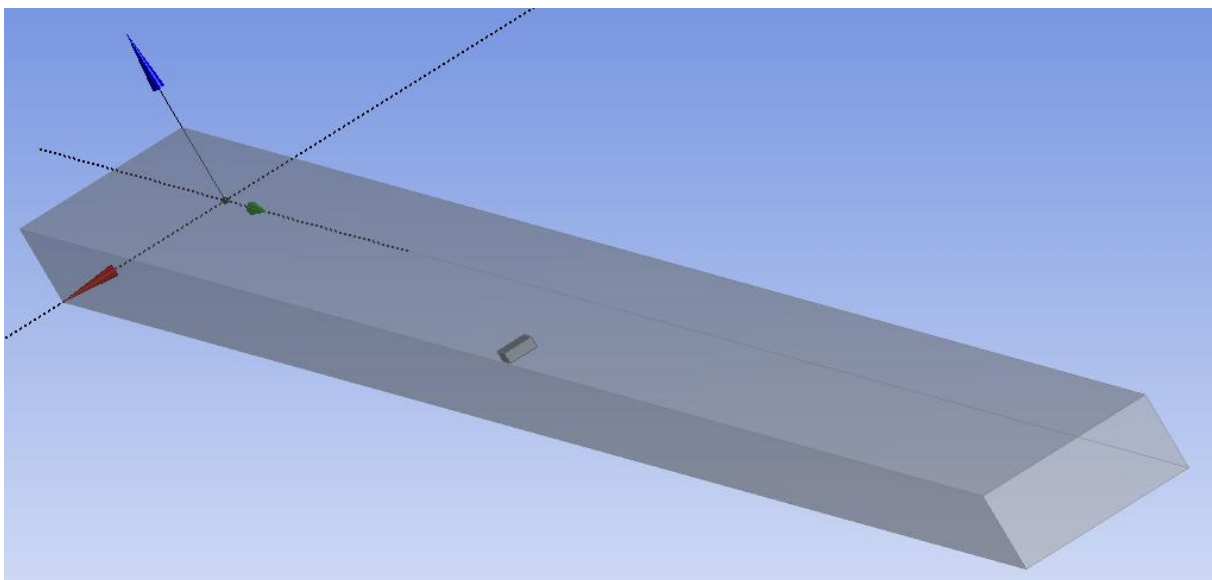


Το αρχικό και βασικό βήμα της προσομοίωσης πριν να προχωρήσουμε στην αριθμητική επίλυση είναι η κατασκευή της γεωμετρίας του προβλήματος στο ANSYS DesignModeler. Έτσι λοιπόν, έχοντας σαν δεδομένα τις αριθμητικές διαστάσεις τόσο της σήραγγας όσο και της εστίας της φωτιάς μπορούμε να προχωρήσουμε βήμα-βήμα στο σχεδιασμό της γεωμετρίας. Γνωρίζοντας πως η σήραγγα είναι ορθογωνικής διατομής καλούμαστε να αποφασίσουμε ποια θα είναι η γεωμετρία της εστίας της φωτιάς. Έχοντας σαν δεδομένα το εμβαδό βάσης και το ύψος της πηγής θερμότητας έχουμε να επιλέξουμε μεταξύ δύο πιθανών γεωμετριών, αυτή του κυλίνδρου και του παραλληλεπίπεδου.



Εικόνα 4.2 Πηγή θερμότητας σε (α) γεωμετρία κυλίνδρου και (β) γεωμετρία παραλληλεπίπεδου

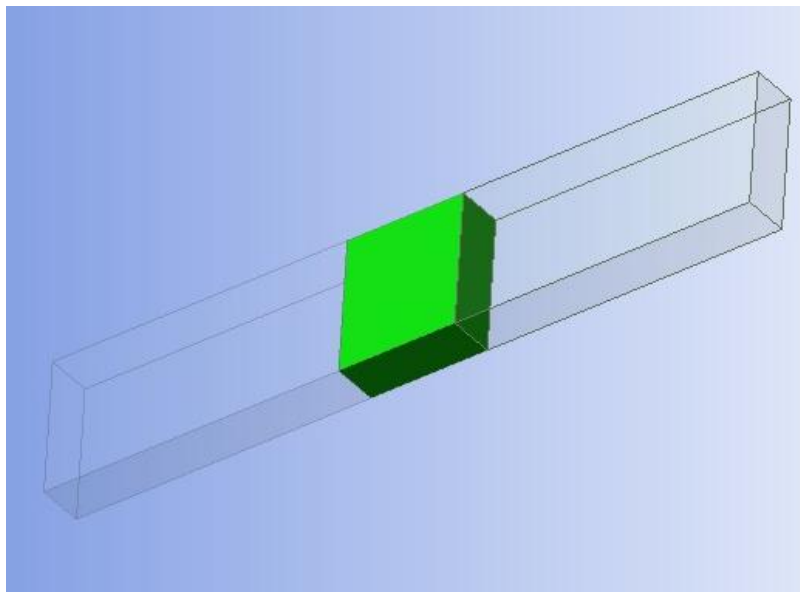
Εφόσον και στις δύο περιπτώσεις ο όγκος της πηγής θερμότητας παραμένει ίδιος, είναι στο χέρι μας να διαλέξουμε την κατάλληλη γεωμετρία λαμβάνοντας υπόψη άλλα κριτήρια. Στην περίπτωσή μας λοιπόν, και επειδή η σήραγγα είναι ορθογωνικής διατομής θα επιλέξουμε την γεωμετρία του παραλληλεπίπεδου, ώστε και το πλέγμα μας αργότερα να έχει μεγαλύτερη ομοιομορφία σε όλο του το μήκος. Μια πρώτη σκέψη θα ήταν να σχεδιάσουμε ένα παραλληλεπίπεδο με διαστάσεις 130 x 5.4 x 2.4, που θα αναπαριστούσε τη σήραγγα και μέσα σε αυτό ένα μικρότερο με διαστάσεις 1.0 x 0.89 x 0.33, που θα ήταν η πηγή θερμότητας.



Εικόνα 4.3 Γεωμετρία σήραγγας-φωτιάς με δύο παραλληλεπίπεδα

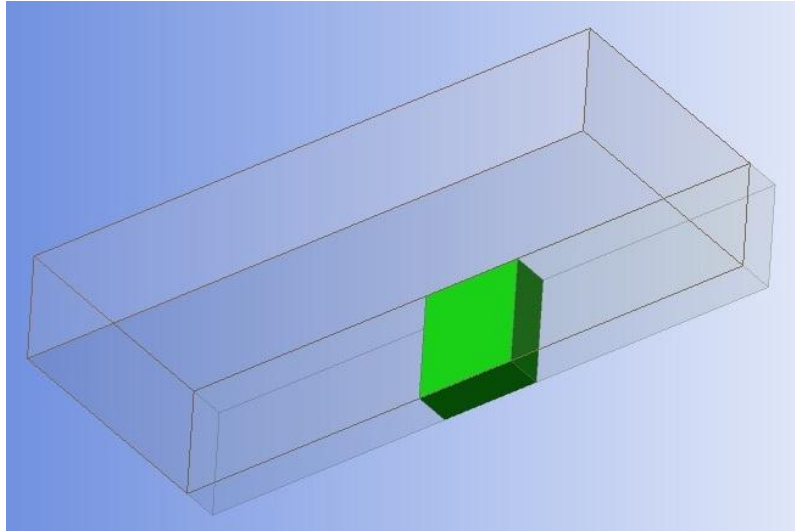
Μια τόσο απλή γεωμετρία όμως, παρά το γεγονός ότι περιλαμβάνει και τα δύο σώματα που εξετάζουμε, τη σήραγγα και την πηγή θερμότητας, θα μας δημιουργούσε προβλήματα στην κατασκευή του πλέγματος καθώς δε θα ήταν εύκολο να κάνουμε πυκνότερο το πλέγμα στην περιοχή της φωτιάς και γύρω από αυτήν, ώστε να έχουμε ακριβέστερα αποτελέσματα. Για να καταφέρουμε λοιπόν να πυκνώσουμε πιο εύκολα το πλέγμα στην περιοχή ενδιαφέροντος θα σχεδιάσουμε επιμέρους παραλληλεπίπεδα, τα οποία στο τέλος θα ενώσουμε για να γίνει ενιαία η γεωμετρία.

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.



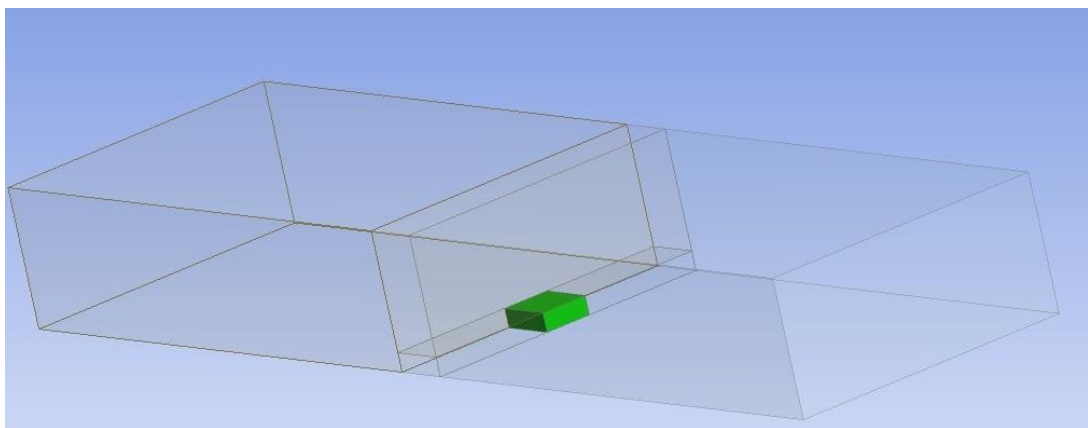
Εικόνα 4.4 Γεωμετρία- Βήμα 1

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



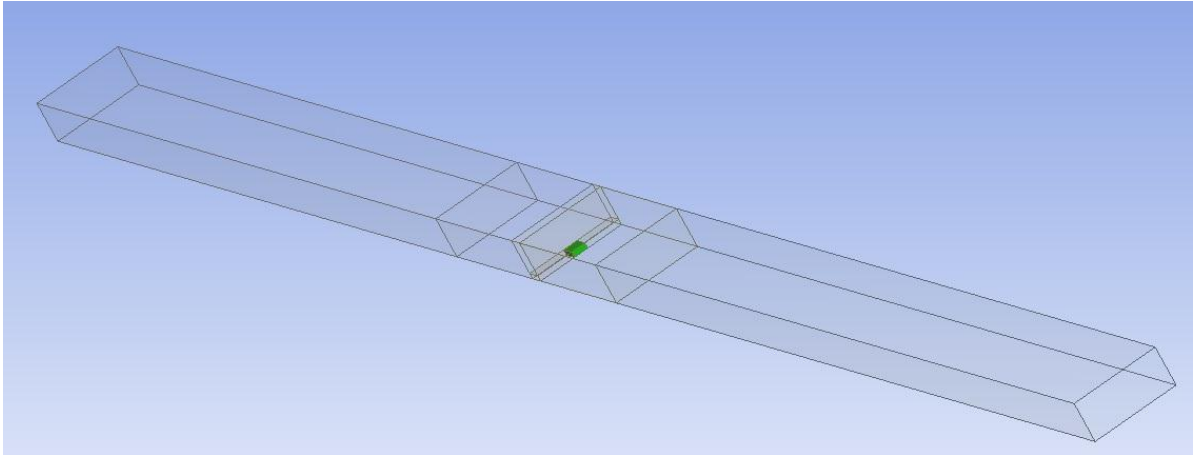
Εικόνα 4.5 Γεωμετρία- Βήμα 2

Αφού λοιπόν, σχεδιάσαμε με τα τέσσερα αυτά παραλληλόγραμμα τη φωτιά καθώς και την περιοχή που βρίσκεται πολύ κοντά σε αυτή, προχωράμε στο σχεδιασμό της υπόλοιπης περιοχής ενδιαφέροντος, στην οποία θα χρειαστεί να πυκνώσουμε και εκεί το πλέγμα αργότερα. Έτσι, σχεδιάζουμε δύο παραλληλόγραμμα διαστάσεων $9.5 \times 5.4 \times 2.4$ εκατέρωθεν των ήδη σχεδιασμένων και κατά μήκος της σήραγγας. Έτσι, δημιουργήσαμε ένα τμήμα της σήραγγας μήκους 20 m, όπου στο κέντρο του βρίσκεται η πηγή θερμότητας έχοντας ουσιαστικά έτοιμο το κομμάτι στο οποίο θα πυκνώσουμε περισσότερο το πλέγμα μας.



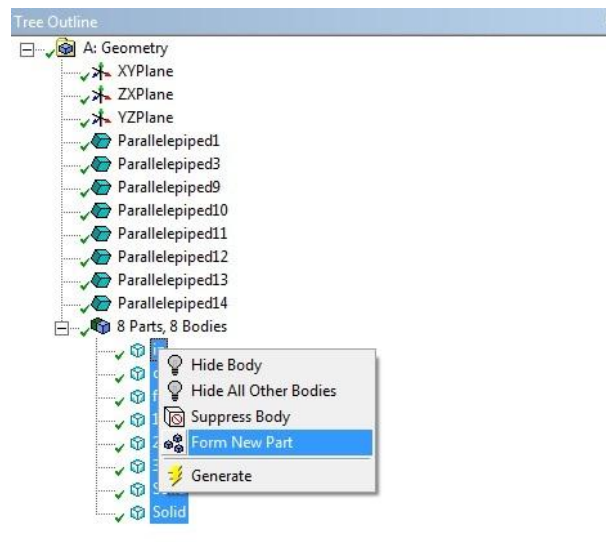
Εικόνα 4.6 Γεωμετρία- Βήμα 3

Τέλος, σχεδιάζουμε δύο παραλληλόγραμμα με ίδιο ύψος και πλάτος προς την είσοδο και έξοδο της σήραγγας που μαζί με την ήδη υπάρχουσα γεωμετρία θα έχουν συνολικό μήκος 130 m.



Εικόνα 4.7 Γεωμετρία- Βήμα 4

Έτσι, επιλέγουμε και τα οκτώ παραλληλεπίπεδα που σχεδιάσαμε και με τη βοήθεια της επιλογής «Form New Part» παίρνουμε την τελική μορφή της γεωμετρίας του προβλήματός μας και είμαστε έτοιμοι για την κατασκευή του πλέγματος.



Εικόνα 4.8 Ενσωμάτωση οκτώ παραλληλεπίπεδων σε μια γεωμετρία

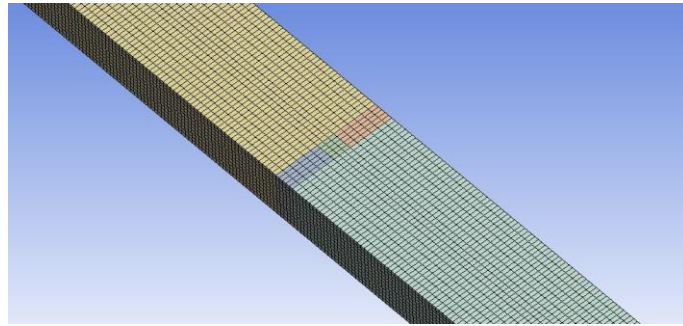
4.2.2 Διαμόρφωση Πλέγματος (Meshing)



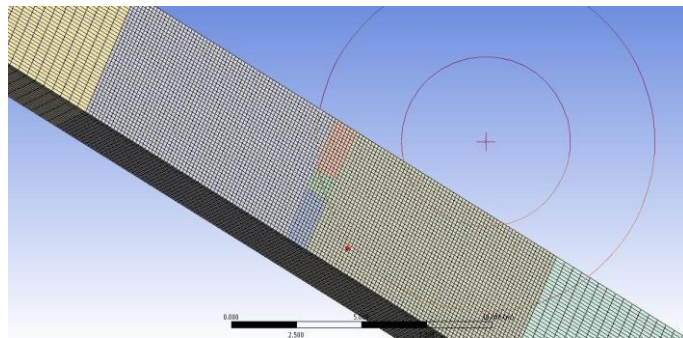
Προτού ξεκινήσουμε να φτιάχνουμε ένα πλέγμα πρέπει να έχουμε υπόψη σαν προτεραιότητες ότι το πλέγμα πρέπει να είναι πυκνότερο στην περιοχή ενδιαφέροντος, ώστε να μπορούμε να εξάγουμε τα ακριβέστερα δυνατά συμπεράσματα. Επίσης, από ένα σημείο πύκνωσης και μετά τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό ίδια κι έτσι μπορούμε να φτάσουμε σε ένα σημείο, όπου τα αποτελέσματα θα είναι ανεξάρτητα του πλέγματος. Αυτό είναι και το επιθυμητό σε κάθε τέτοια μελέτη. Η σωστή επιλογή του κατάλληλου πλέγματος είναι αυτή που καθορίζει την ακριβή επίλυση και την ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου. Με τον όρο «ανεξαρτησία της λύσης από το πλέγμα» εννοείται η πύκνωση εκείνων των περιοχών του πλέγματος, οι οποίες εμφανίζουν τη μεγαλύτερη κλίση των μετρούμενων μεγεθών. Έτσι, συγκρίνοντας δύο πλέγματα σε περίπτωση που οι δύο λύσεις είναι ίδιες επιλέγουμε το πιο αραιό πλέγμα, ενώ αν οι λύσεις διαφέρουν, τότε επιλέγουμε το πιο πυκνό και συνεχίζουμε τη σύγκριση αυτού με ένα ακόμη πυκνότερο. Όταν τα αποτελέσματα ταυτιστούν, τότε κρατάμε το αραιότερο πλέγμα από την τελευταία σύγκριση και μπορούμε να πούμε πως η λύση πλέον είναι ανεξάρτητη του πλέγματος.

Τα τρία πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση μας είχαν τα εξής στοιχεία:

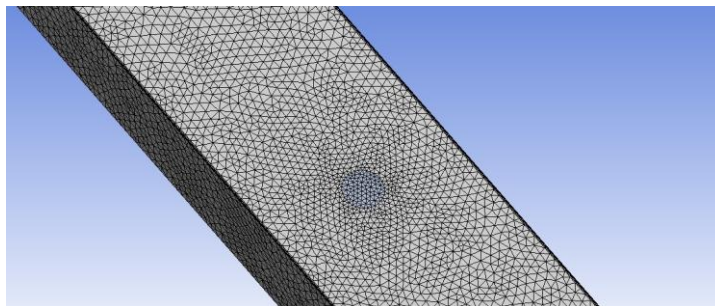
- A. Πλέγμα 1 (127920 κόμβοι, 110520 κελιά)
- B. Πλέγμα 2 (288522 κόμβοι, 246860 κελιά)
- Γ. Πλέγμα 3 (1367040 κόμβοι, 747597 κελιά)



Εικόνα 4.9 Πλέγμα 1-Αραιό



Εικόνα 4.10 Πλέγμα 2 και τελικό

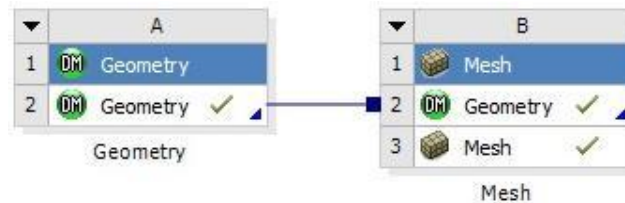


Εικόνα 4.11 Πλέγμα 3-Πυκνό

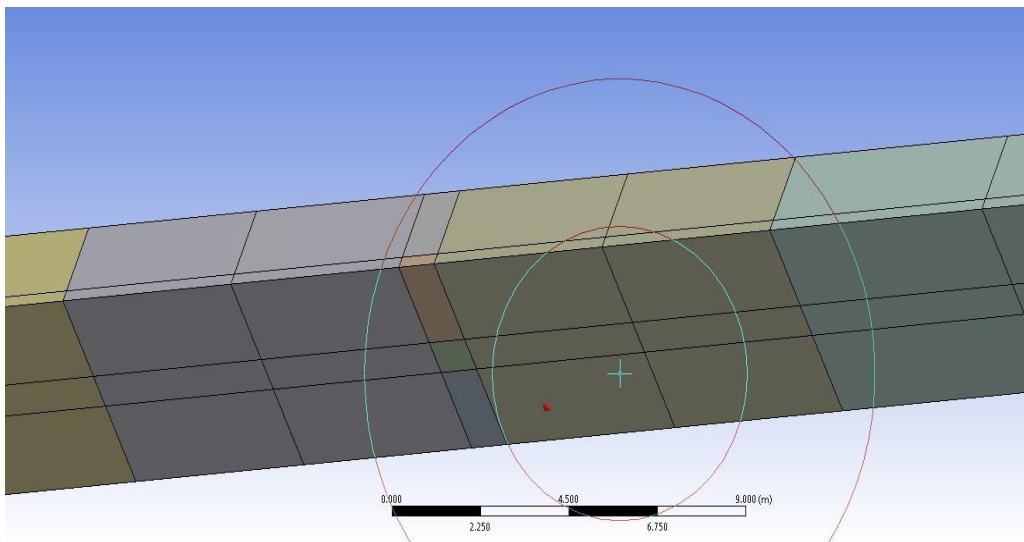
Στη μελέτη τους, οι Gao κα. (2004) εξετάζουν ένα τμήμα 90 m από τα συνολικά 130 της σήραγγας, ενώ το πλέγμα τους από τη μια άκρη ως την άλλη αποτελείται από 108416 κελιά, χρησιμοποιώντας και αυτοί με τη σειρά τους μεγαλύτερη πυκνωση στην περιοχή της φωτιάς. Η πηγή θερμότητας διακριτοποιείται σε $8 \times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

Αρχικά, επιλέγουμε το πλέγμα μας να είναι εξαεδρικό τόσο γιατί θέλουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με των Gao κα. έχοντας σαν βάση ένα παρεμφερές πλέγμα, όσο και γιατί ένα εξαεδρικό ομοιόμορφο πλέγμα με πυκνώσεις στα κατάλληλα σημεία απαιτεί λιγότερο χρόνο τρεξίματος επίλυσης των εξισώσεων απ' ότι ένα πιο σύνθετο.

Βήμα 1: Ενημερώνουμε το ANSYS Meshing με τη γεωμετρία που σχεδιάσαμε ενώνοντας τα κουτιά του Geometry και του Mesh στην πλατφόρμα του Workbench.



Ξεκινάμε επιλέγοντας τη μέθοδο «Multizone» για τη διαμόρφωση του πλέγματός μας με προεπιλογή τα εξαεδρικά κελιά. Το αποτέλεσμα που παίρνουμε πριν εισάγουμε όρια και διαστάσεις στο πλέγμα είναι το παρακάτω.

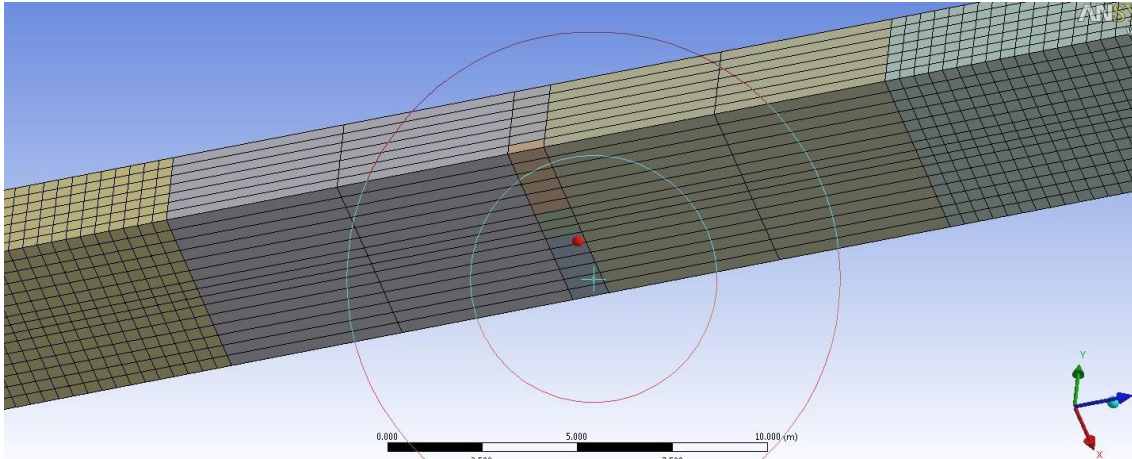


Εικόνα 4.12 Διαμόρφωση πλέγματος- Βήμα 1

Προφανώς και το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό, όμως καλό είναι όταν διαμορφώνουμε ένα πλέγμα να προχωράμε ένα-ένα τα στάδια ώστε να αποφύγουμε τυχόν σφάλματα που μπορεί να προκύψουν σε περίπτωση που εισάγουμε στο πρόγραμμα όλες τις παραμέτρους από την αρχή.

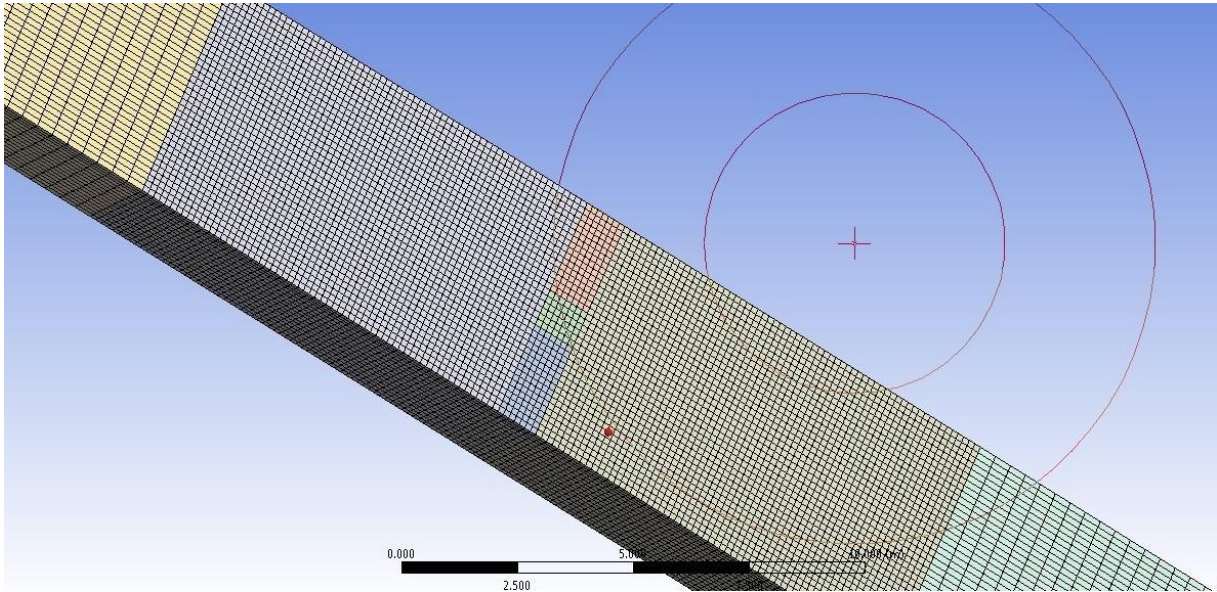
Βήμα 2: Επιλέγουμε τα δύο μεγάλα παραλληλόγραμμα της εισόδου και της εξόδου αντίστοιχα, την περιοχή δηλαδή ελάσσονος σημασίας, και τους εισάγουμε διαστάσεις

στοιχείων (element size) ίσο με 0.4 m. Το πλέγμα που θα προκύψει είναι όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

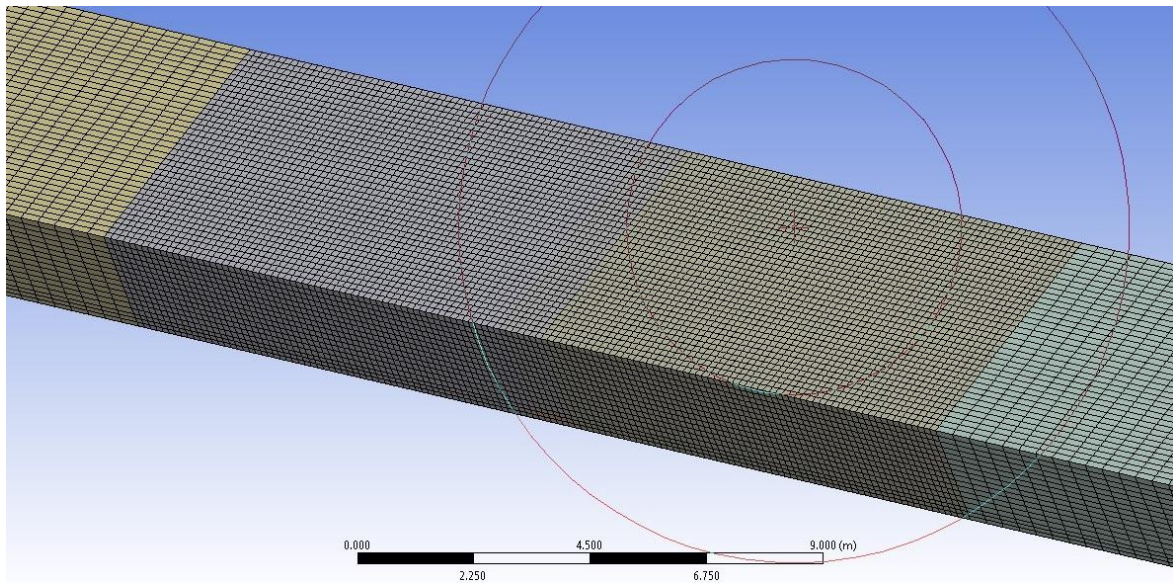


Εικόνα 4.13 Διαμόρφωση πλέγματος- Βήμα 2

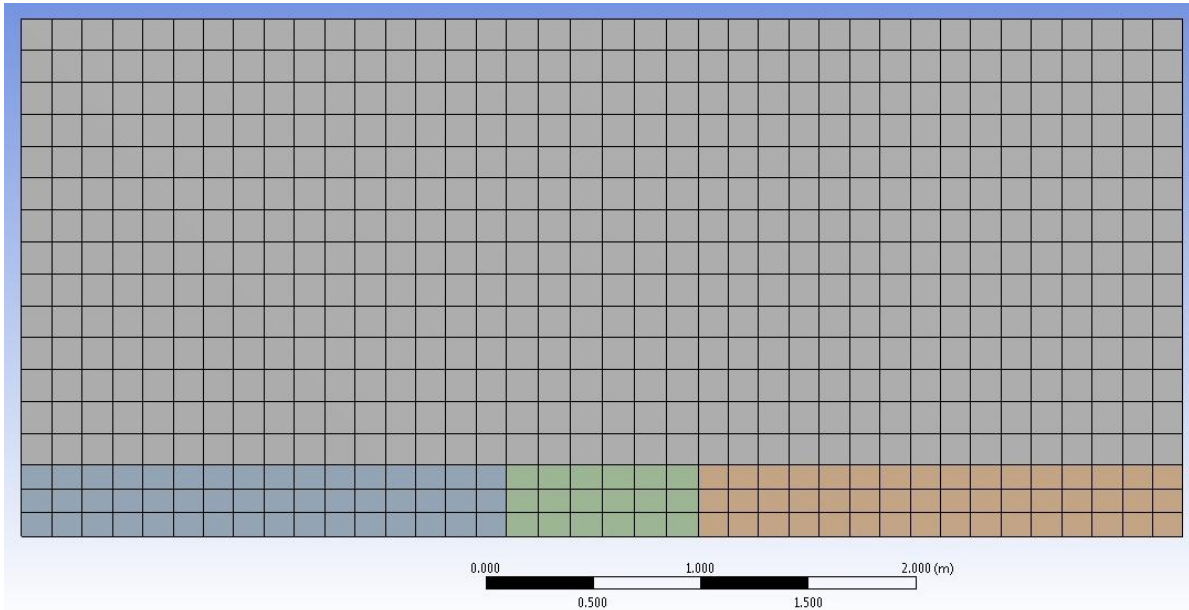
Βήμα 3: Επιλέγουμε τα έξι παραλληλόγραμμα της περιοχής μείζονος σημασίας και εισάγουμε διαστάσεις στοιχείων 0.15 m. Με τον τρόπο αυτό, στο τμήμα της σήραγγας που είναι 20 m γύρω από την πηγή θερμότητας πετυχαίνουμε το πλέγμα να είναι δύομιση φορές πιο πυκνό απ' ό τι στην είσοδο και στην έξοδο. Το αποτέλεσμα που θα προκύψει θα είναι και το τελικό, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



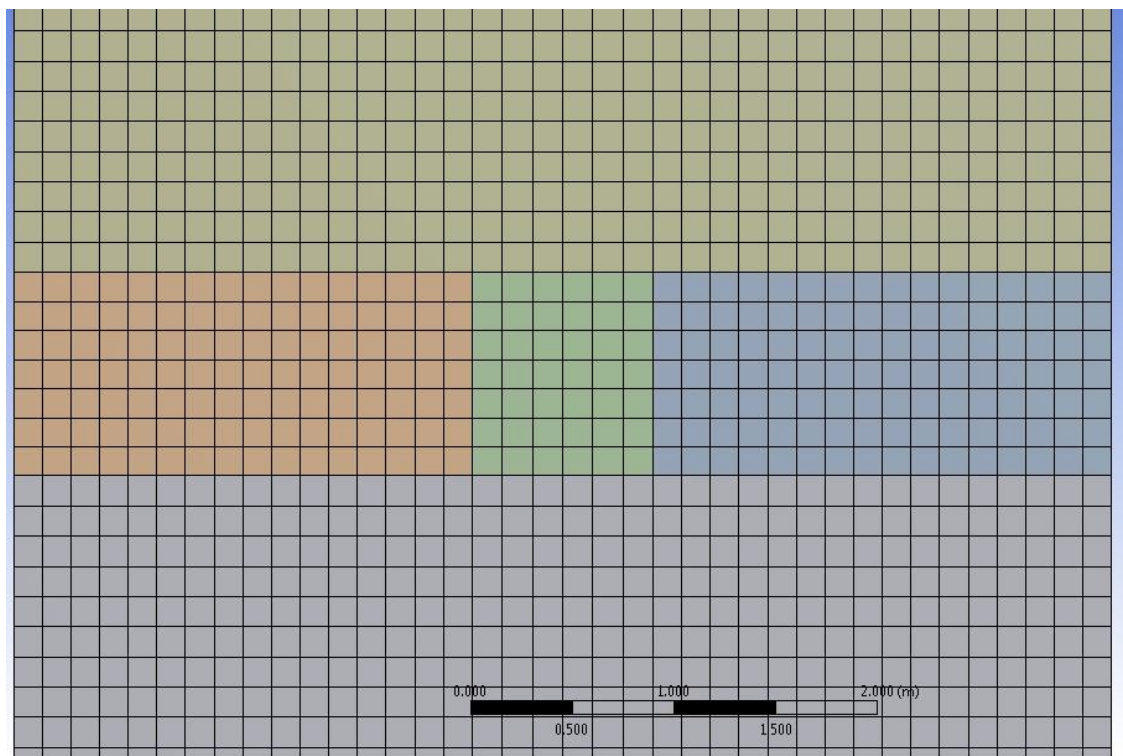
Εικόνα 4.14 Διαμόρφωση πλέγματος- Βήμα 3



Εικόνα 4.15 Διαμόρφωση πλέγματος- Βήμα 3



Εικόνα 4.16 Διαμόρφωση πλέγματος-Βήμα 3. Εγκάρσια τομή στην περιοχή της πηγής θερμότητας



Εικόνα 4.17 Διαμόρφωση πλέγματος-Βήμα 3. Κάτοψη στην περιοχή της πηγής θερμότητας

Το τελικό μας πλέγμα αποτελείται από 288522 κόμβους και 246860 κελιά, ενώ η πηγή θερμότητας από 7 x 6 x 3 κελιά ακμής 0.15 m. Η ποιότητα ενός πλέγματος εξαρτάται από την ποιότητα των στοιχείων του (element quality), το οποίο προκύπτει από το λόγο δύο ακμών ενός οποιουδήποτε στοιχείου του πλέγματος, ενώ η μέγιστη τιμή του element quality πρέπει να τείνει στη μονάδα. Ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να προσέξουμε είναι η «skewness» των στοιχείων του πλέγματος (ασυμμετρία) που η μέγιστη τιμή της δεν πρέπει να ξεπερνάει το 0.98. Τα αποτελέσματά μας για αυτά τα δύο χαρακτηριστικά του πλέγματος είναι τα παρακάτω.

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Sizing	
Inflation	
Advanced	
Pinch	
Statistics	
Nodes	288522
Elements	264860
Mesh Metric	Element Quality
Min	0,383118524191166
Max	0,999991281399811
Average	0,637277888330551
Standard Deviation	0,24949372946929

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Sizing	
Inflation	
Advanced	
Pinch	
Statistics	
Nodes	288522
Elements	264860
Mesh Metric	Skewness
Min	1,30579298047272E-10
Max	2,62119193919682E-06
Average	1,75453441127243E-07
Standard Deviation	2,21725794900351E-07

Εικόνα 4.18 Στοιχεία ποιότητας πλέγματος

4.2.3 Πρόγραμμα Επίλυσης Εξισώσεων (Fluent)

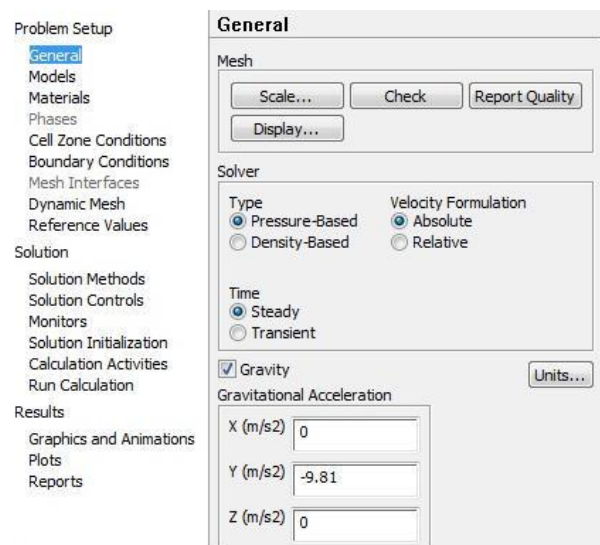


Έχοντας το τελικό πλέγμα και την τελική γεωμετρία μπορούμε να προχωρήσουμε στην αριθμητική επίλυση μέσω του Fluent. Ανοίγουμε το αντίστοιχο παράθυρο στην πλατφόρμα του Workbench και το ενώνουμε με αυτά των Geometry και Mesh έτσι ώστε να εισαχθούν οι σωστές παράμετροι για την επίλυση του προβλήματος.



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.

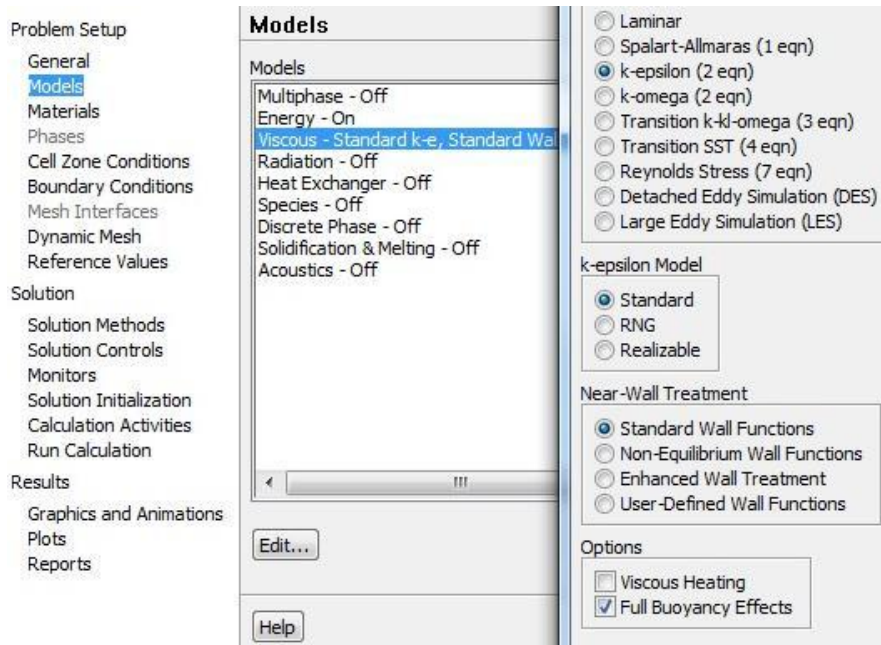
Στην επιλογή «General» του Problem Setup εισάγουμε την επιτάχυνση της βαρύτητας, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ στον άξονα Y όπως είναι σχεδιασμένη η σήραγγα στη γεωμετρία μας βάζοντας αρνητικό πρόσημο, λόγω αντίθετης κατεύθυνσης. Η ενεργοποίηση της βαρύτητας είναι απαραίτητη σε ροές με μεγάλες μεταβολές στην 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. Θεωρούμε ότι εξετάζουμε τη μόνιμη κατάσταση της Case b, δηλαδή ταχύτητα εξαερισμού 0.85 m/s και $Q/V=8.7454545 \text{ MW/m}^3$.



Εικόνα 4.19 Problem Setup- General

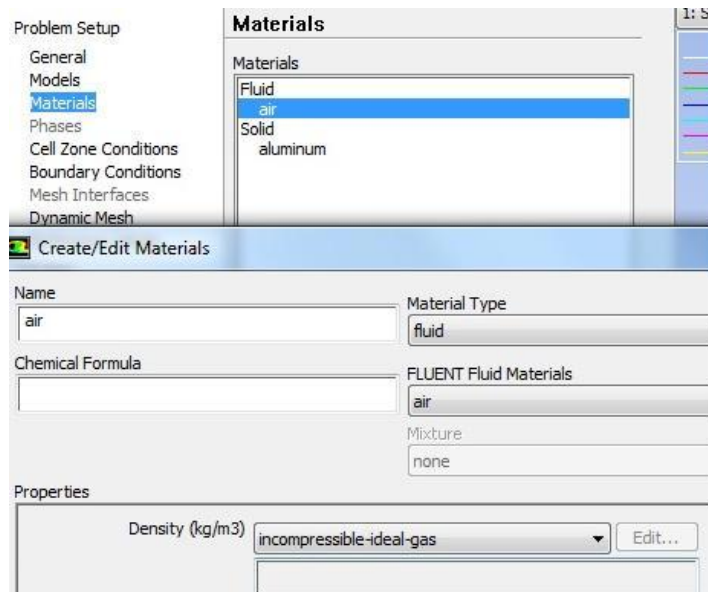
Στη συνέχεια, πατώντας στην επιλογή «Models» ενεργοποιούμε την εξίσωση ενέργειας και επιλέγουμε μοντέλο τύρβης. Από τη λίστα μοντέλων τύρβης ενεργοποιούμε το μοντέλο «standard k-epsilon» που ήταν και επιλογή μας εξ' αρχής για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής. Τέλος, έχοντας εισάγει την επιτάχυνση της βαρύτητας εμφανίζεται η επιλογή

«Full Buoyancy Effects» την οποία και ενεργοποιούμε ώστε να φανεί στα αποτελέσματα η ανωστική ροή.



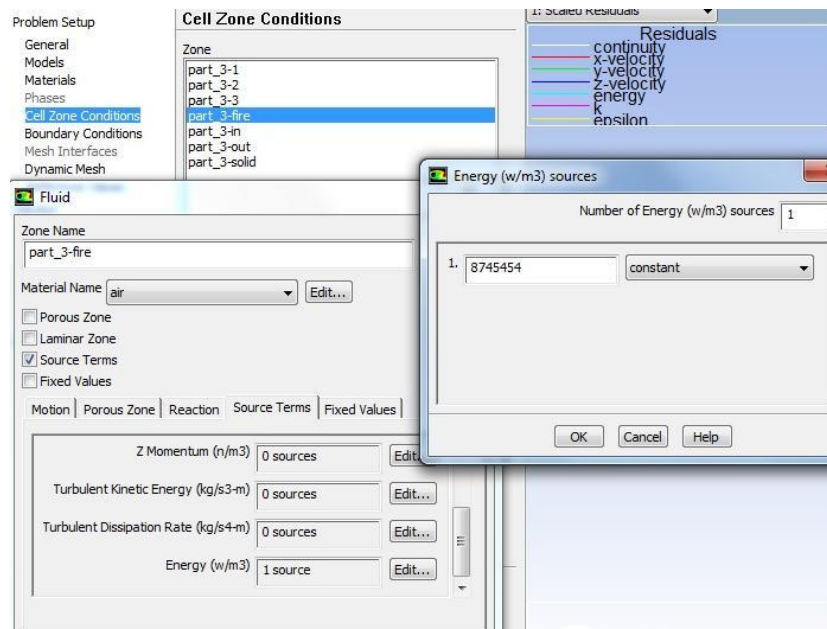
Εικόνα 4.20 Problem Setup- Models

Όπως αναφέρεται στην μελέτη των Gao κα. (2004) η ροή αερίων με αριθμό Mach μικρότερο του 0.3 ($M < 0.3$) μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστη. Επίσης, αυτό το κριτήριο ισχύει για την περίπτωσή μας αφού η ταχύτητα του αέρα είναι μικρότερη από 10 m/s και η ταχύτητα εξαερισμού χαμηλότερη από 2 m/s. Έτσι, πηγαίνοντας στην επιλογή «Materials» αλλάζουμε την πυκνότητα του αέρα από σταθερή σε «incompressible ideal gas».



Εικόνα 4.21 Problem Setup- Materials

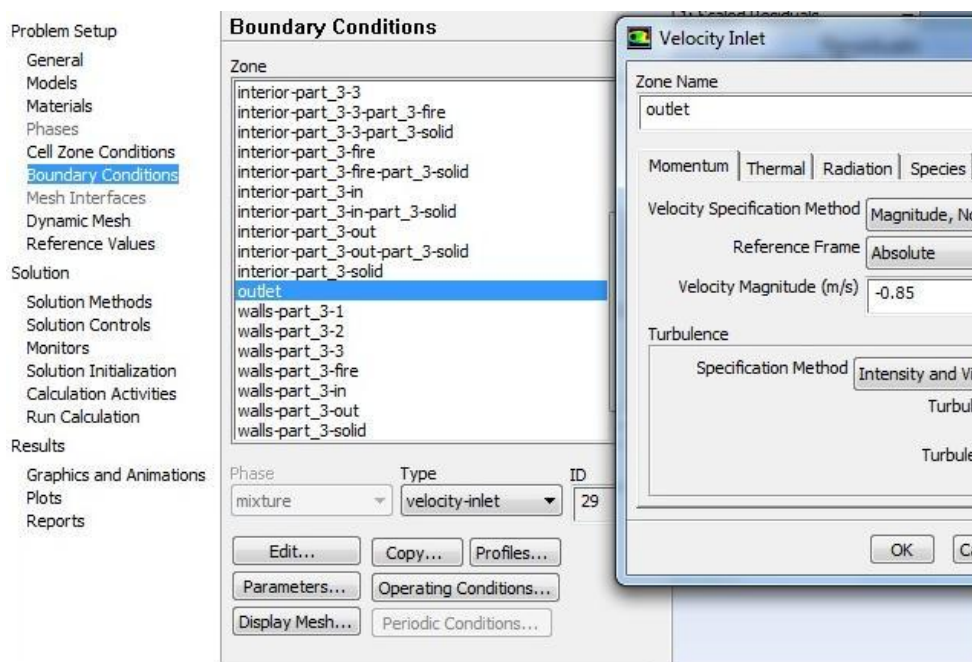
Στη συνέχεια, θα δώσουμε τιμή στην πηγή θερμότητας ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία: Ανοίγοντας την επιλογή «Cell Zone Conditions» και επιλέγοντας το κομμάτι της πηγής θερμότητας (Part Fire) ενεργοποιούμε την επιλογή «Source Terms», ορίζουμε 1 πηγή θερμότητας και της δίνουμε σταθερή τιμή 8745454.5 W/m^3 (το Q/V της Case b).



Εικόνα 4.22 Problem Setup- Cell Zone Conditions

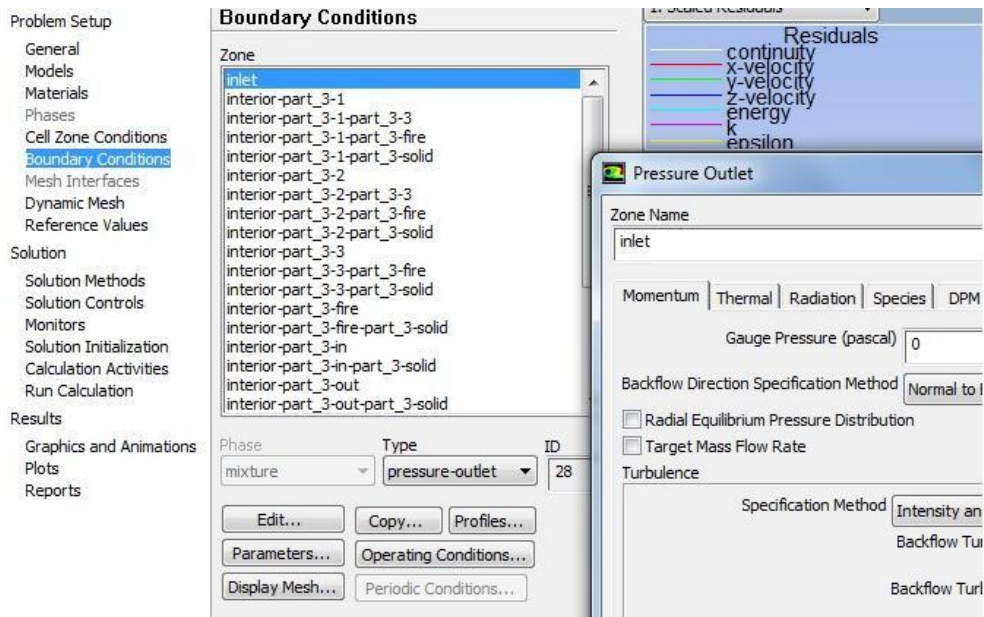
Στο επόμενο βήμα θα ορίσουμε τις οριακές συνθήκες (Boundary Conditions) του προβλήματος. Στις οριακές συνθήκες πρέπει να δώσουμε δεδομένα για όλα τα όρια του υπολογιστικού πεδίου.

Outlet: Στην έξοδο της σήραγγας μας ενεργοποιούμε την επιλογή «Velocity Inlet» (δεν υπάρχει η επιλογή Velocity Outlet) και εισάγουμε την ταχύτητα εξαερισμού των ανεμιστήρων. Επειδή οι ανεμιστήρες βρίσκονται στην εξαγωγή, γνωστή είναι η ογκομετρική παροχή στην έξοδο. Έτσι λοιπόν ορίζουμε ομοίμορφη ταχύτητα εξόδου -0.85 m/s (το αρνητικό πρόσημο δηλώνει έξοδο από το πεδίο), ενώ όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές δεν λαμβάνονται υπόψη (επειδή ακριβώς η ταχύτητα είναι προς τα έξω, άρα δε μεταφέρει πληροφορία για τη θερμοκρασία ή τα τυρβώδη μεγέθη μέσα στο πεδίο).



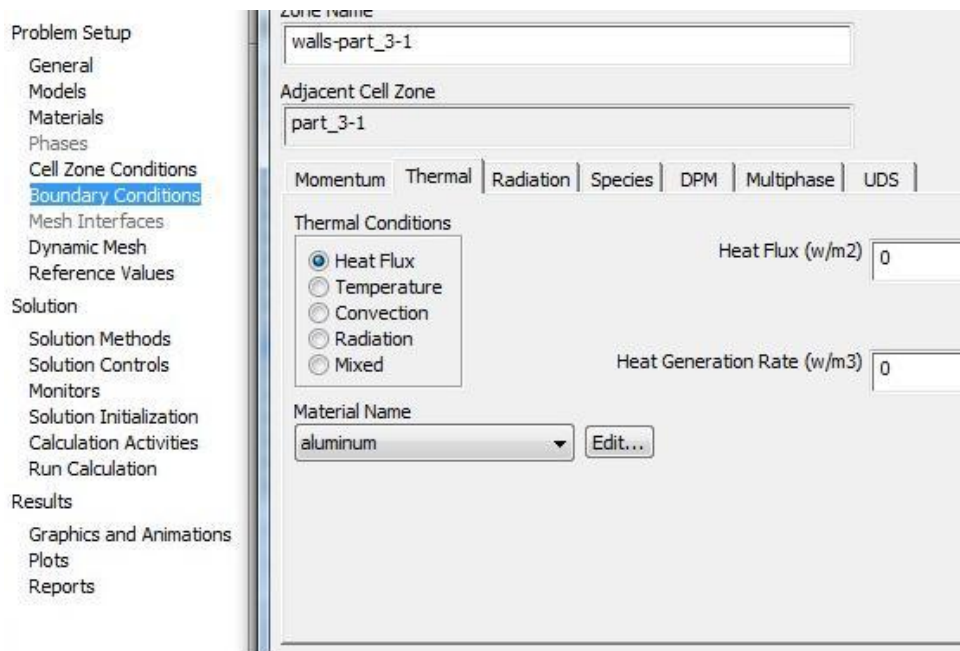
Εικόνα 4.23 Boundary Conditions Outlet

Inlet: Επειδή από τη μελέτη των Gao κα. (2004) δεν προκύπτει πληροφορία για την πίεση στην είσοδο ορίζουμε τη σχετική στατική πίεση ίση με την ατμοσφαιρική (δηλαδή «Gauge Pressure» [pascal] ίση με το μηδέν), διότι υποθέτουμε ότι η είσοδος της σήραγγας επικοινωνεί άμεσα με τον εξωτερικό αέρα.



Εικόνα 4.24 Boundary Conditions Inlet

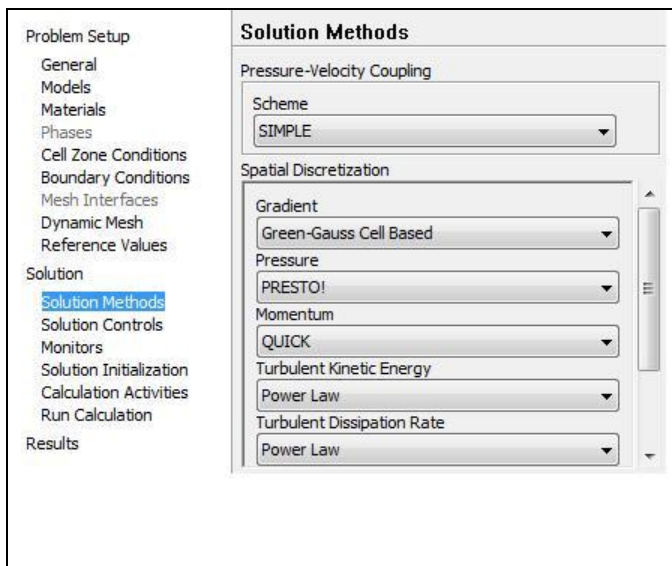
Walls: Θεωρούμε όλα τα τοιχώματα αδιαβατικά, επειδή η μετάδοση θερμότητας μέσω αυτών είναι αμελητέα συγκριτικά με αυτή της φωτιάς ($\text{Heat Flux}=0$)



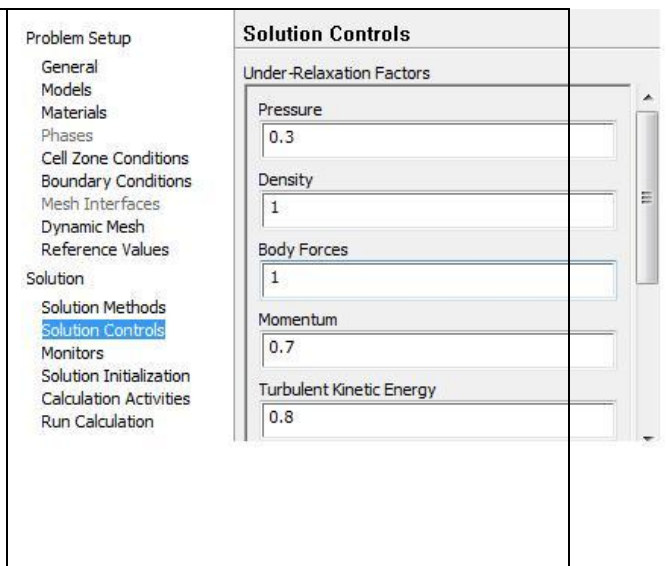
Εικόνα 4.25 Boundary Conditions Walls

Στους υπολογισμούς η θερμοκρασία περιβάλλοντος λαμβάνεται ίση με 300 K και το C_p ίσο με 1006 J/kg.

Στη συνέχεια ορίζουμε τα σχήματα διακριτοποίησης και τους συντελεστές υποχαλάρωσης, σύμφωνα με τις παρακάτω εικόνες.

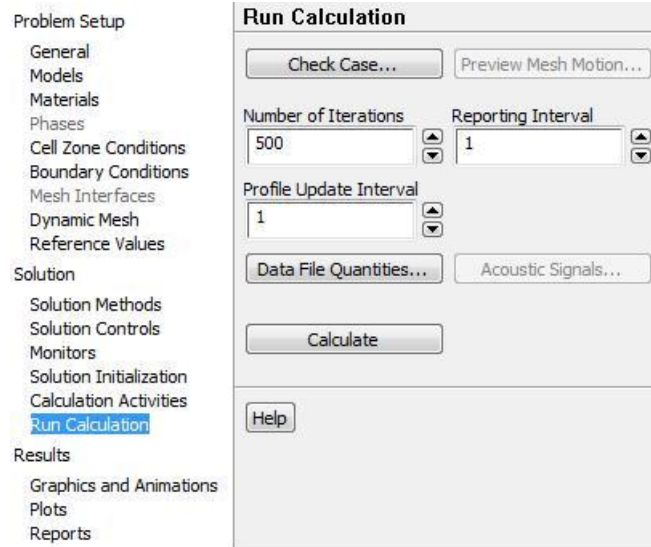


Εικόνα 4.26 Σχήματα διακριτοποίησης



Εικόνα 4.27 Συντελεστές υποχαλάρωσης

Τέλος, έχοντας εισάγει τα δεδομένα του προβλήματος στο Fluent εκκινούμε το τρέξιμο του προγράμματος με 500 επαναλήψεις για τη μόνιμη κατάσταση της Case b και σε περίπτωση που η λύση δε συγκλίνει, τότε τρέχουμε άλλες 500 επαναλήψεις με τους συντελεστές υποχαλάρωσης ελαφρά μειωμένους.



Εικόνα 4.28 Εκκίνηση Υπολογισμών

4.2.4 Αποτελέσματα (CFD Post)



Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης περίπτωσης (Case b) καθώς και των άλλων περιπτώσεων μόνιμης κατάστασης και μη παρουσιάζονται και αναλύονται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

Κεφάλαιο 5: Ανάλυση Αποτελεσμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Έχοντας παρουσιάσει το Μαθηματικό και Υπολογιστικό Μοντέλο της εργασίας, στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υπολογιστική μελέτη της κίνησης καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς σε αεριζόμενη σήραγγα. Έτσι, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της κίνησης του αέρα και καπνού και της διακύμανσης της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της σήραγγας κατά την περίπτωση φωτιάς. Τέλος, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης συγκρίνονται με αυτά αντίστοιχης έρευνας σε διαφορετικό μοντέλο τύρβης των Gao κα. (2004).

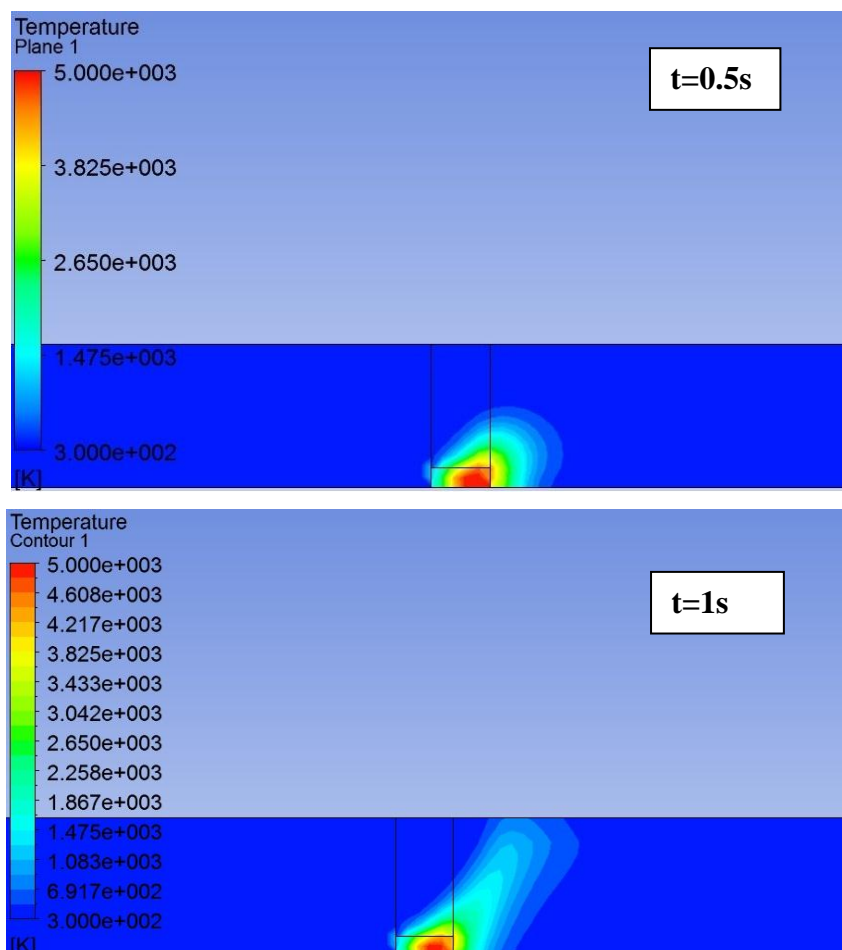
Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφέρουμε ότι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο τύρβης k-ε και σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με χαρακτηριστικά 3.00 GHz CPU και 3.25 GB μνήμη RAM. Στις περιπτώσεις που εξετάσαμε όσο υψηλότερη ήταν η τιμή του εξαερισμού τόσο μικρότερος ήταν κι ο χρόνος προσομοίωσης που χρειάστηκε. Για παράδειγμα, για την περίπτωση εξαερισμού με τιμή 2 m/s (Case c) η σύγκλιση της λύσης ήταν πολύ ταχύτερη σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις καθώς γινόταν και ταχύτερα η μεταφορά θερμότητας. Αντίθετα, για τις περιπτώσεις με τιμές εξαερισμού 0.5 m/s και 0.85 m/s, δηλαδή Case a και b αντίστοιχα, παρατηρείται το φαινόμενο της αντίθετης ροής καπνού και αέρα (backflow), με αποτέλεσμα να είναι πιο δύσκολο η λύση να συγκλίνει. Στις περιπτώσεις αυτές λοιπόν, από ένα σημείο των υπολογισμών και μετά χρησιμοποιούμε κατάλληλους συντελεστές υποχαλάρωσης, οι οποίοι βοηθούν στη μείωση του υπολογιστικού χρόνου αλλά και στην ταχύτερη σύγκλιση της λύσης.

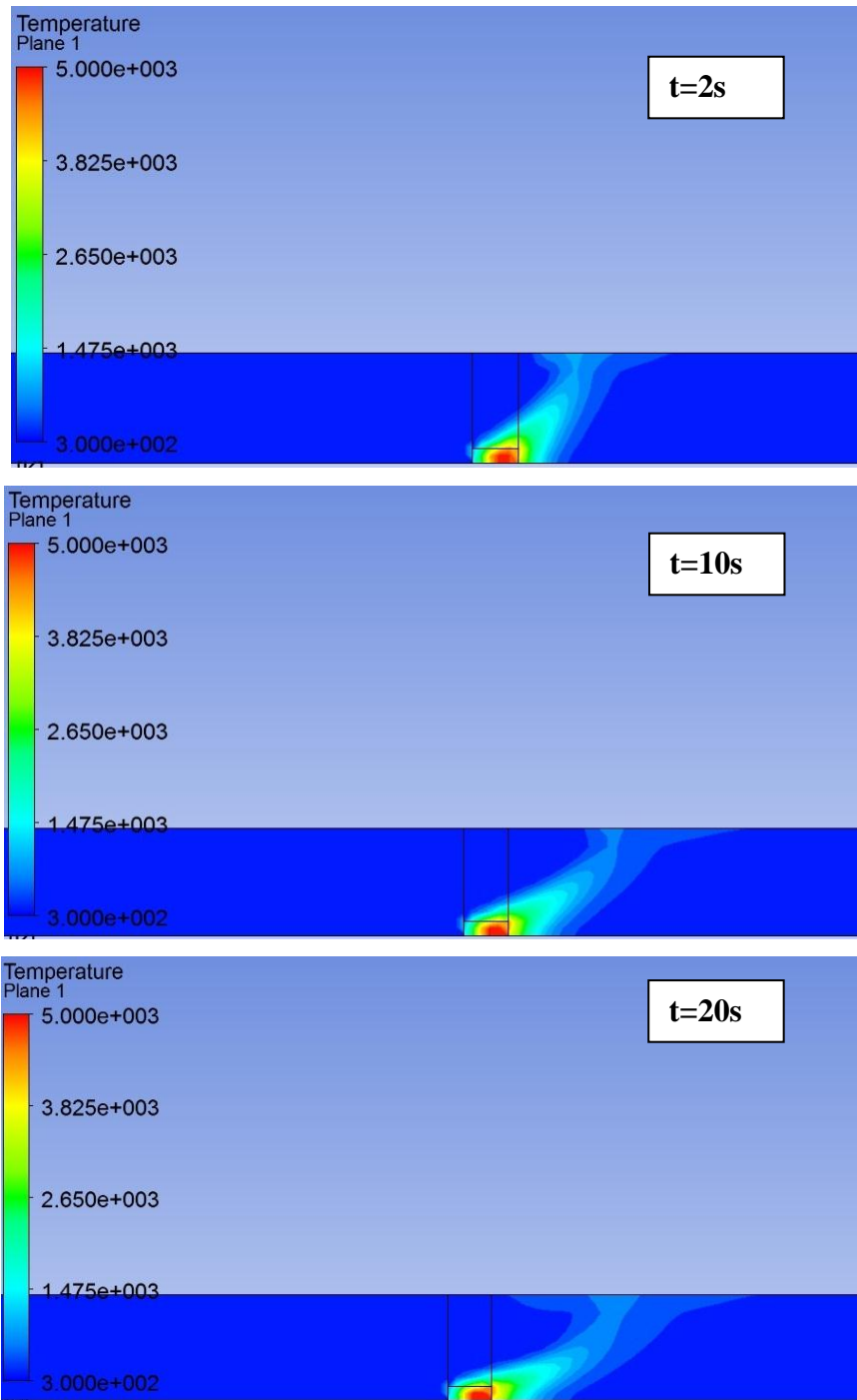
5.1 Στιγμαία Πεδία Θερμοκρασίας και Ταχύτητας

Σε αυτό το σημείο θα ήταν σκόπιμο να ξεκινήσουμε δείχνοντας την ανάπτυξη της φλόγας και την κίνηση του καπνού στα πρώτα στάδια εκδήλωσης της φωτιάς, προτού ακόμα εξετάσουμε τη μόνιμη κατάσταση. Αυτό λοιπόν, που εξετάσαμε για αρχή ήταν πεδία θερμοκρασίας και ταχύτητας για τις χρονικές στιγμές 0.5, 1, 2, 10 και 20 δευτερόλεπτα μετά την εκδήλωση της φωτιάς, όπως φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.

Case c (Ταχύτητα εξαερισμού 2 m/s, Πηγή θερμότητας 2.29 MW)

- **Θερμοκρασιακά Πεδία**



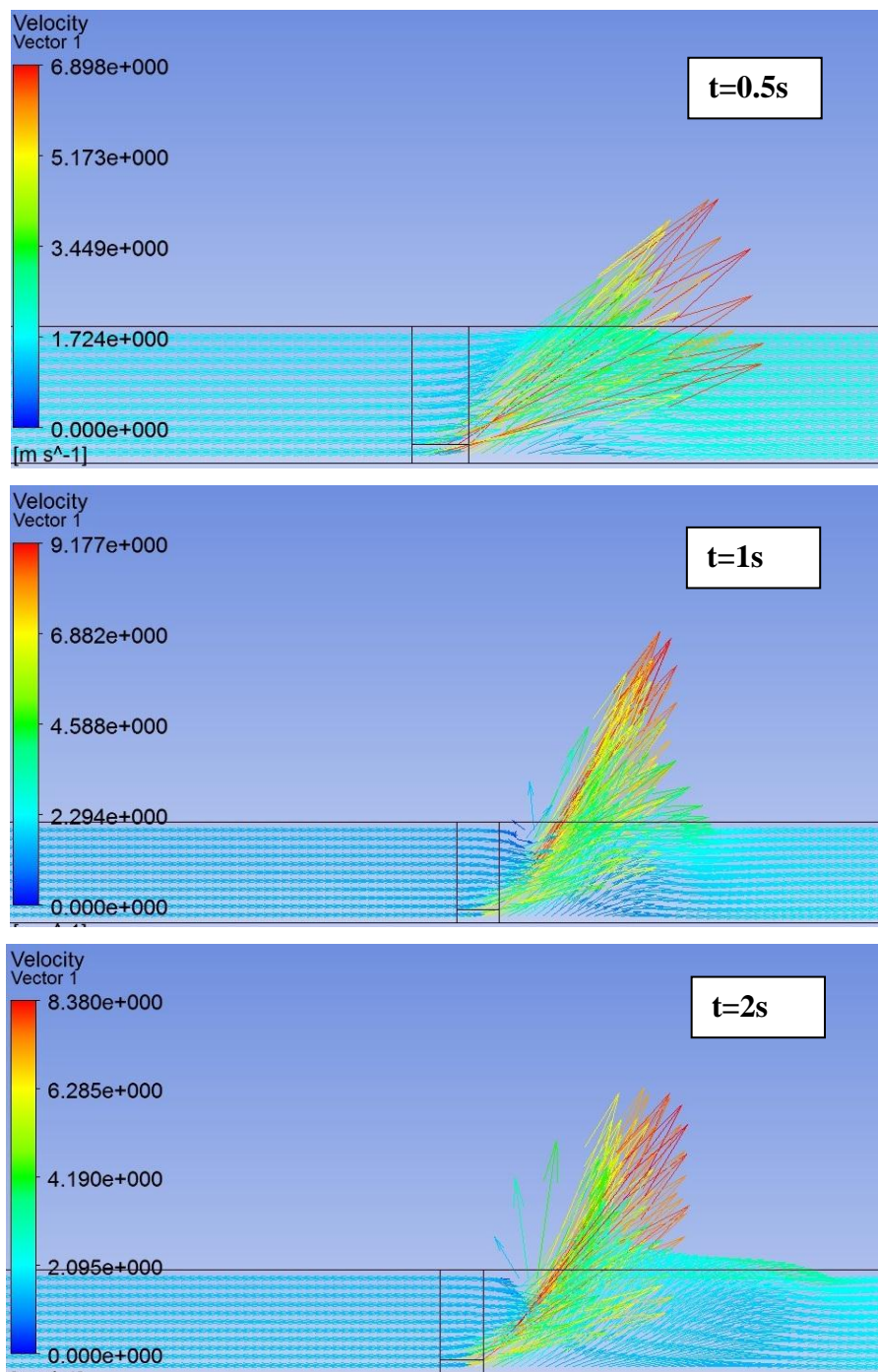


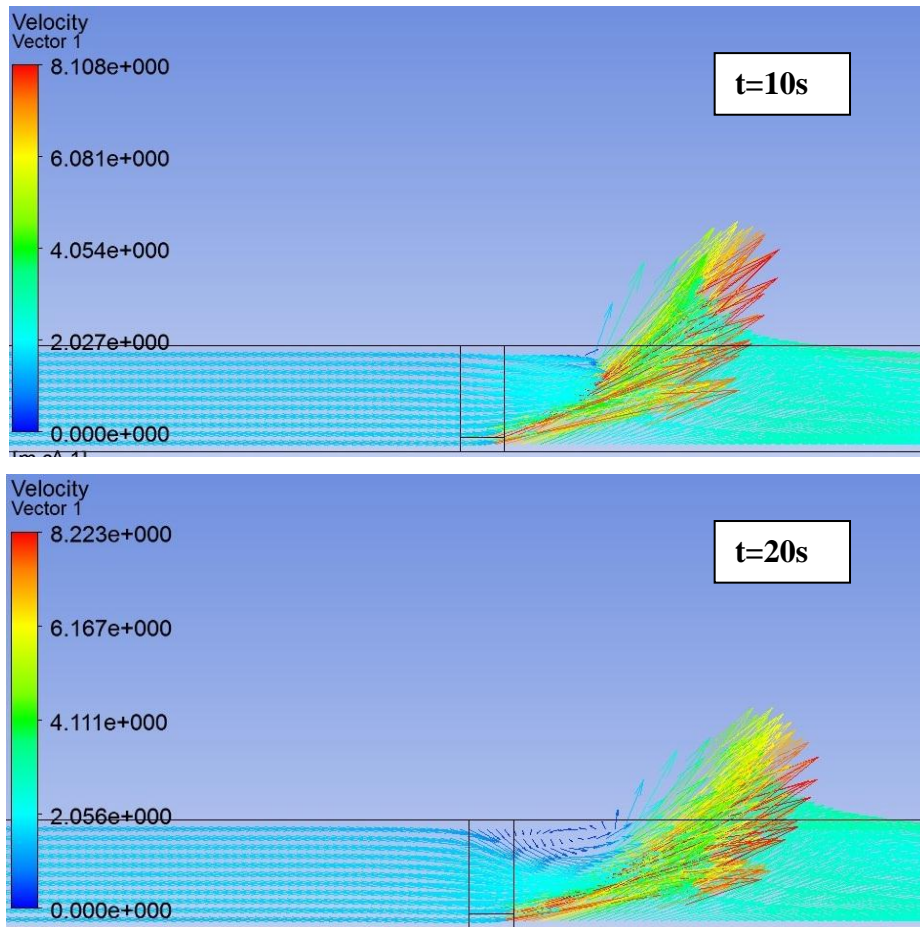
Εικόνα 5.1 Θερμοκρασιακά πεδία σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές- Case c

Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κάποιος από την αρχή της εκδήλωσης του φαινομένου, τόσο οι θερμότερες όσο και οι ψυχρότερες μάζες κατευθύνονται προς την έξοδο της σήραγγας αφού η τιμή του εξαερισμού που μελετάμε είναι η υψηλότερη των 3 περιπτώσεων

που εξετάζουμε και ισούται με 2 m/s. Από το πρώτο κιάλας δευτερόλεπτο οι θερμές μάζες φτάνουν το ύψος της οροφής της σήραγγας, λόγω του φαινομένου της ανωστικής ροής, χωρίς όμως την εμφάνιση του φαινομένου αντίθετης ροής (backflow) που θα συναντήσουμε στις επόμενες δύο περιπτώσεις (Case a, Case b).

- **Πεδία Ταχύτητας**



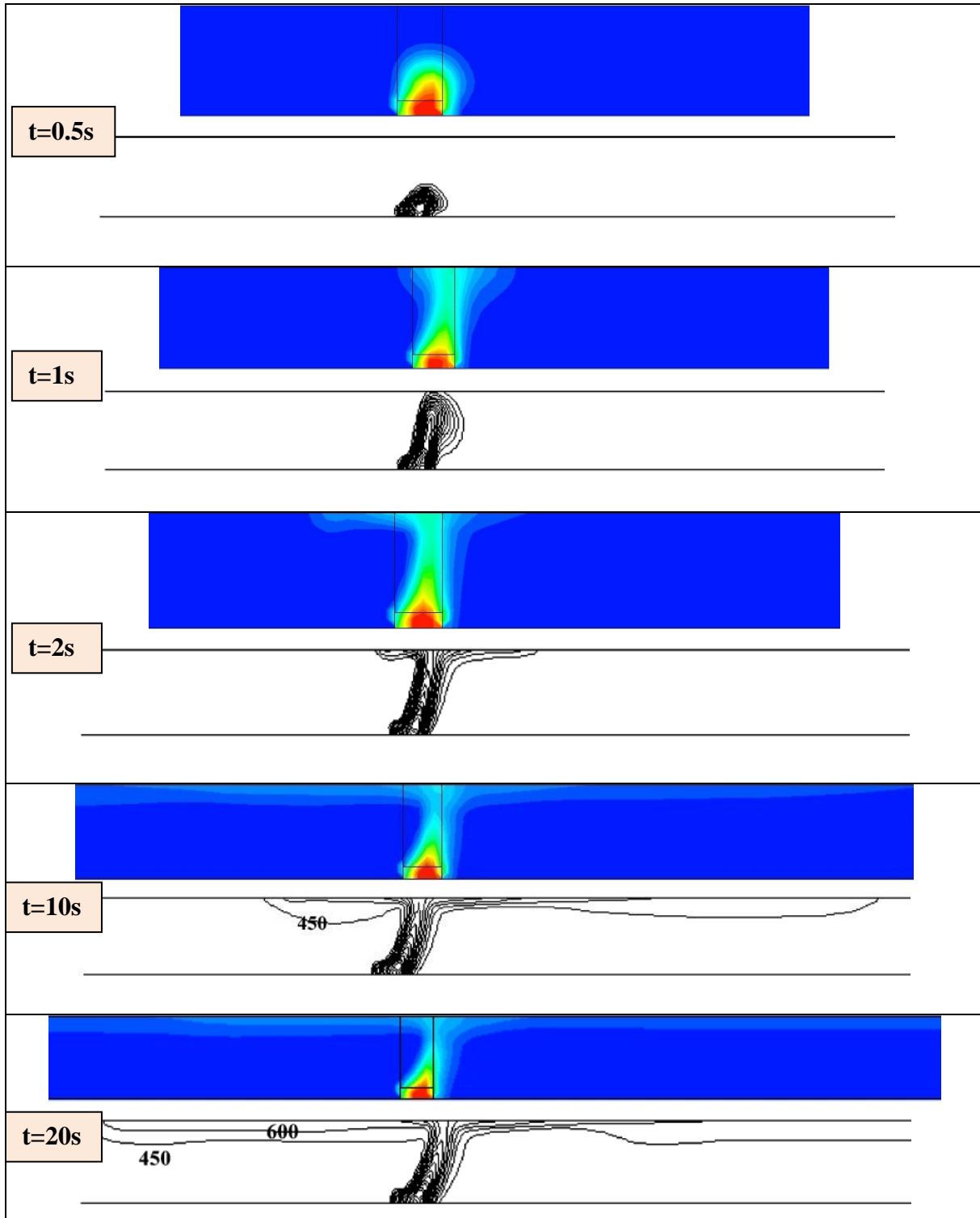


Εικόνα 5.2 Πεδία ταχύτητας σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές- Case c

Όπως παρατηρούμε και από τα διανύσματα της ταχύτητας δεν υπάρχει εμφάνιση του φαινομένου της αντίθετης ροής (backflow), ενώ οι τιμές των ταχυτήτων κυμαίνονται από 2-8 m/s.

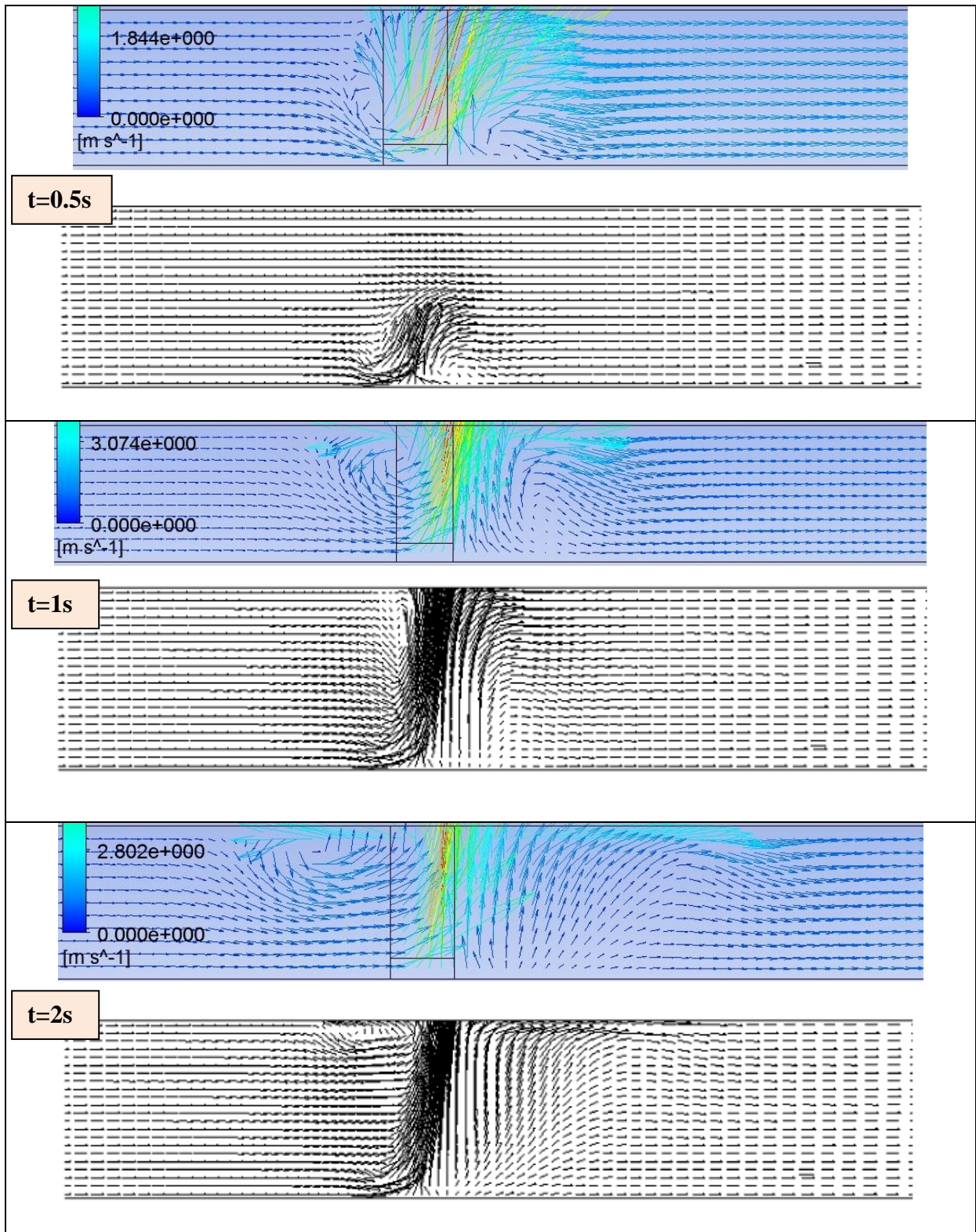
Case b (Ταχύτητα εξαερισμού 0.85 m/s, Πηγή θερμότητας 2.57 MW)

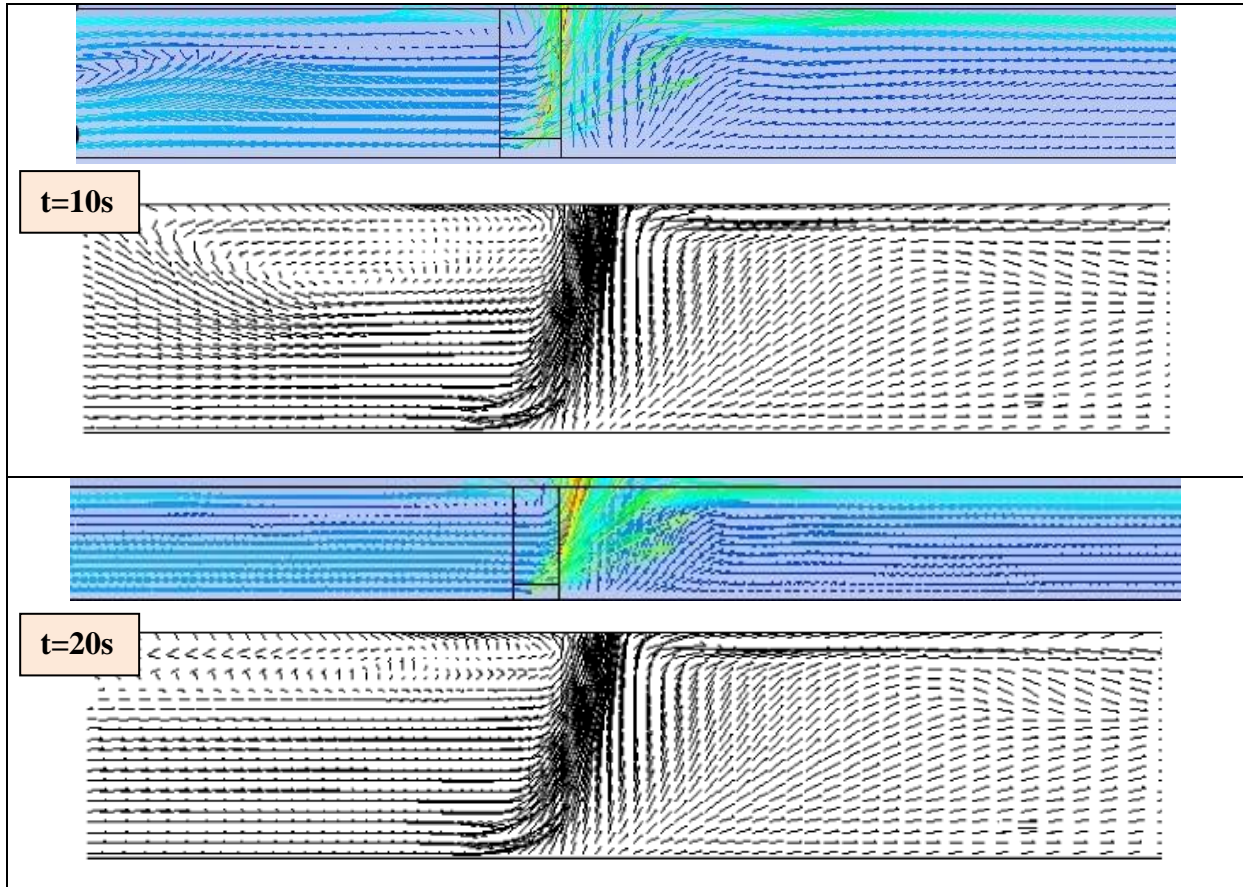
- Θερμοκρασιακά Πεδία



Εικόνα 5.3 Σύγκριση θερμοκρασιακών πεδίων μοντέλων τύρβης k-ε και LES αντίστοιχα-Case b

- Πεδία Ταχύτητας





Εικόνα 5.4 Σύγκριση πεδίων ταχύτητας μοντέλων τύρβης k-ε και LES αντίστοιχα- Case b

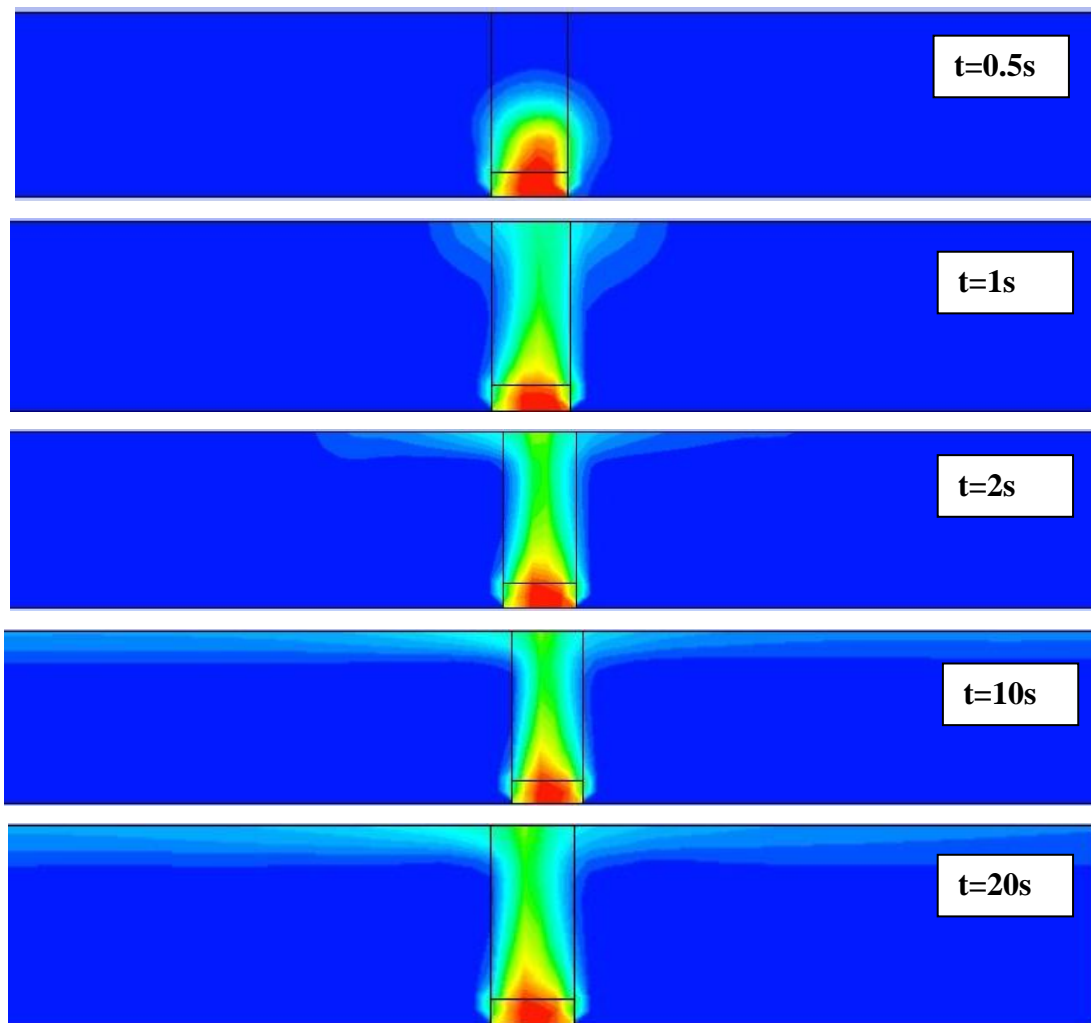
Από τη σύγκριση των παραπάνω σχημάτων για τα δύο μοντέλα τύρβης k-ε και LES παρατηρείται κατά ένα ικανοποιητικό ποσοστό ταύτιση αποτελεσμάτων τόσο για την περίπτωση θερμοκρασιακών πεδίων όσο και των πεδίων ταχύτητας. Οι διαφορές εντοπίζονται στις, κατά ένα μικρό ποσοστό, απόλυτες τιμές θερμοκρασίας και ταχύτητας με το k-ε να εμφανίζει ταχύτητες έως και 3 m/s μεγαλύτερες και θερμοκρασίες στα ίδια σημεία μεγαλύτερες το μέγιστο κατά 100 K.

Μια άλλη παρατήρηση είναι ότι στην προσομοίωση με μοντέλο τύρβης k-ε το φαινόμενο της αντίθετης ροής (backflow) γίνεται νωρίτερα αντιληπτό σε σχέση με την αντίστοιχη προσομοίωση με μοντέλο τύρβης LES. Πιο συγκεκριμένα, 10 δευτερόλεπτα μετά την εκδήλωση της φωτιάς, όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα σχήματα, η αντίθετη ροή του k-ε είναι αρκετά πιο εμφανής σε σχέση με αυτή του LES. Αντίθετα, μετά από 20 δευτερόλεπτα το φαινόμενο είναι το ίδιο ορατό και στις δύο περιπτώσεις.

Τέτοιες διαφορές είναι λογικό να παρατηρούνται, αφού το LES θεωρείται πολύ πιο ακριβές μοντέλο για τέτοιου τύπου προσομοιώσεις με το τίμημα του σαφώς μεγαλύτερου χρόνου υπολογισμού. Αυτό δε σημαίνει ότι επειδή το k-ε είναι λιγότερο απαιτητικό, δεν είναι και κατάλληλο για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

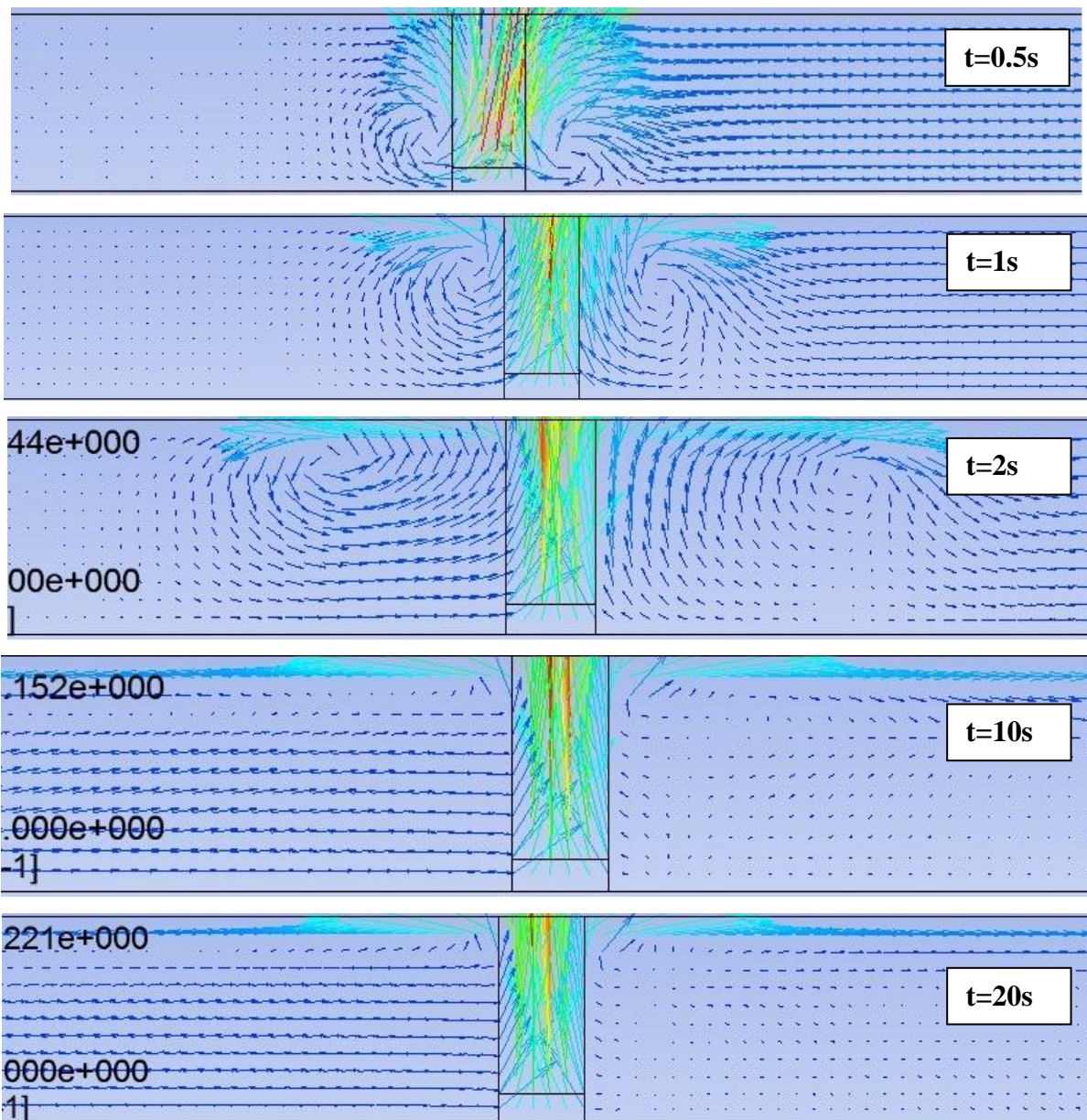
Case a (Ταχύτητα εξαερισμού 0.5 m/s, Πηγή θερμότητας 2.77 MW)

- **Θερμοκρασιακά Πεδία**



Εικόνα 5.5 Θερμοκρασιακά πεδία σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές- Case a

- Πεδία Ταχύτητας



Εικόνα 5.6 Πεδία ταχύτητας σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές- Case a

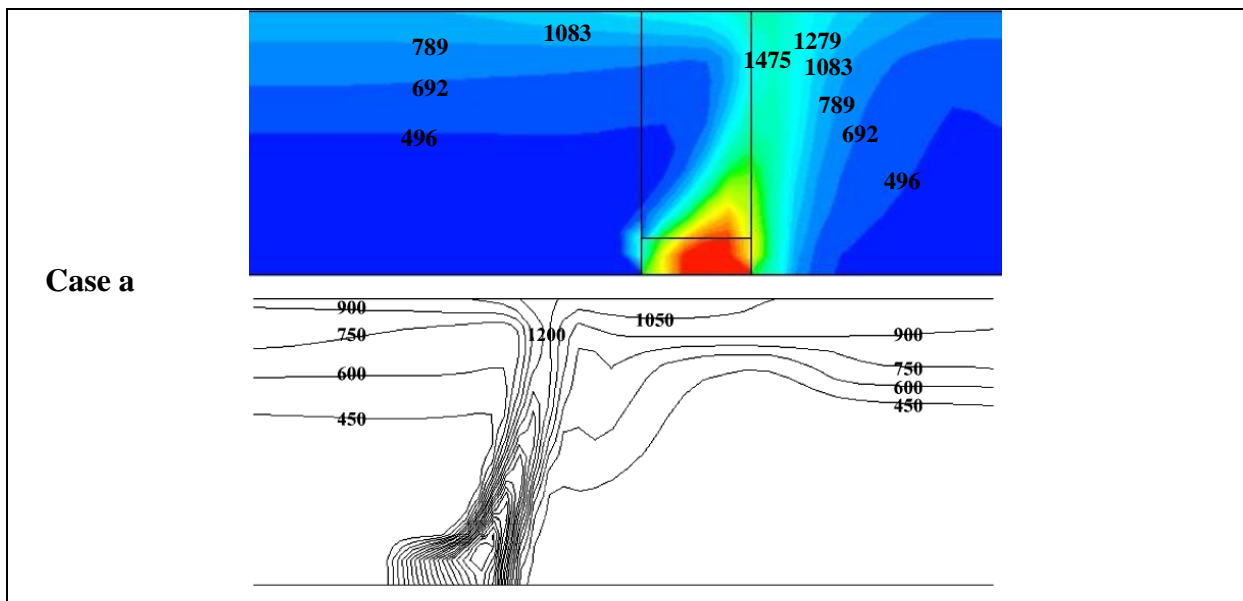
Εξετάζοντας τα σχήματα που αφορούν αυτή την περίπτωση, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι με τόσο μικρή ταχύτητα εξαερισμού από τους ανεμιστήρες, μόλις 0.5 m/s , το φαινόμενο της αντίθετης ροής γίνεται πολύ έντονο από τη στιγμή που οι θερμότερες μάζες φτάσουν το ύψος της οροφής της σήραγγας, λόγω του φαινομένου της ανωστικής ροής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι μάζες του ζεστού αέρα να μην κατευθύνονται προς την έξοδο της σήραγγας

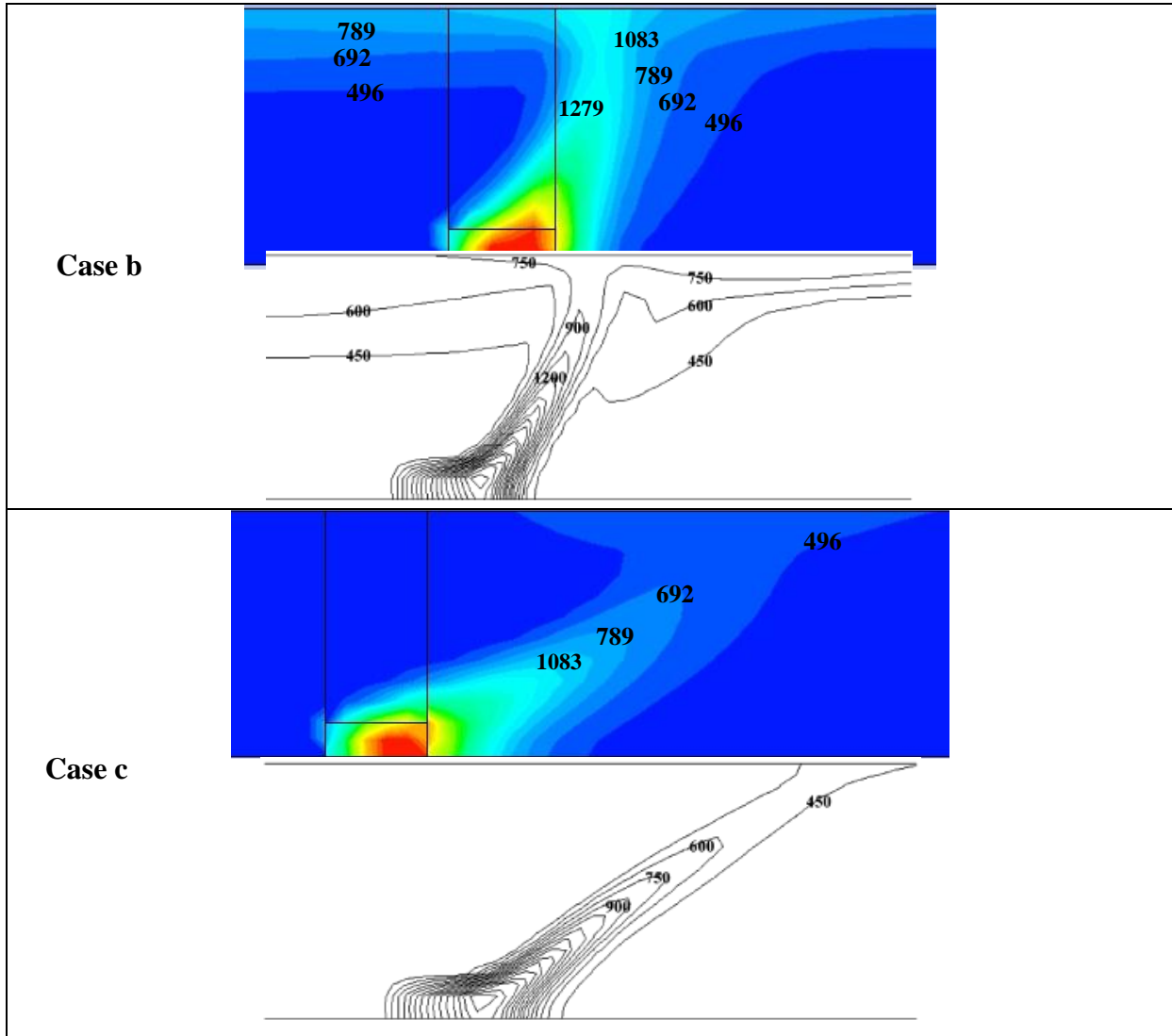
και τους ανεμιστήρες, αλλά να συσσωρεύονται στην οροφή πάνω από το σημείο της φωτιάς και να απλώνονται προς τις δύο κατευθύνσεις εκατέρωθεν της φωτιάς.

Αυτό θα ήταν ένα καταστροφικό σενάριο αν μιλούσαμε για μία πραγματική περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς μέσα σε μία σήραγγα γεμάτη με αυτοκίνητα και κυκλοφοριακό χάος λόγω της ύπαρξης της φωτιάς σχεδόν στο μέσον του μήκους της. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι παρά το γεγονός πως οι τιμές των πηγών θερμότητας είναι σχεδόν ίδιες στις τρεις περιπτώσεις που μελετάμε, η διαφορά έγκειται στην τιμή της ταχύτητας εξαερισμού των ανεμιστήρων στην έξοδο της σήραγγας. Αποφευκτέο σενάριο φυσικά θα ήταν και αυτό της περίπτωσης με ταχύτητα εξαερισμού 0.85 m/s (Case b), όμως σε αυτή την περίπτωση το φαινόμενο γίνεται ακόμη πιο αισθητό.

5.2 Σχήμα της Φλόγας και Κίνηση του Ζεστού Αέρα στη Μόνιμη Κατάσταση

Αφού εξετάσαμε τα αποτελέσματα για τα πρώτα δευτερόλεπτα εκδήλωσης της φωτιάς, παρακάτω θα αναλύσουμε τη μόνιμη κατάσταση που προκύπτει στη σήραγγα συγκρίνοντας παράλληλα τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας, στην οποία χρησιμοποιήθηκε μοντέλο τύρβης k-ε με αυτά που προέκυψαν από την προσομοίωση με μοντέλο τύρβης LES. Οι απεικονίσεις του σχήματος της φλόγας υπολογισμένες με k-ε και LES αντίστοιχα παρουσιάζονται παρακάτω.





Εικόνα 5.7 Σχηματισμοί φλόγας υπολογισμένοι για τις τρεις περιπτώσεις από k-ε και LES αντίστοιχα

Όπως παρατηρούμε από τα σχήματα της Εικόνας 5.7, στη μόνιμη κατάσταση, η λύσεις των k-ε και LES ταυτίζονται ακόμη περισσότερο και οι μόνες διαφορές που παρατηρούνται είναι στις τιμές της θερμοκρασίας, όπου το LES παρουσιάζει ελαφρά χαμηλότερες. Για την ακρίβεια, οι διαφορές των θερμοκρασιών [K] φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

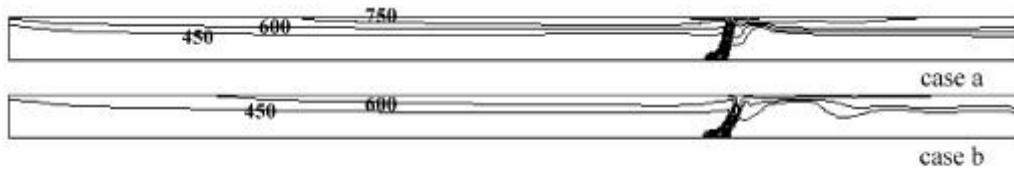
T [K] - LES	T [K] - k-ε
450	496
600	692
750	789
900	1083
1050	1279
1200	1475

Πίνακας 5.1 Απόκλιση στις τιμές θερμοκρασίας [K] με μοντέλο LES και k-ε

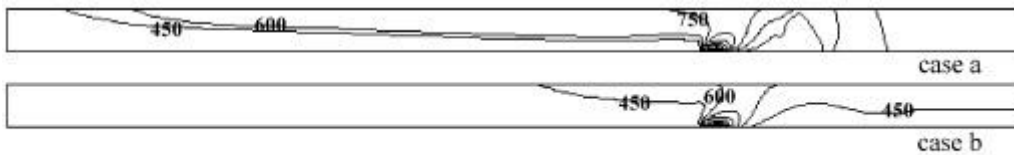
5.3 Αντίθετη Ροή του Ζεστού Αέρα (Backflow)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το φαινόμενο της αντίθετης ροής του αέρα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη σε οποιαδήποτε αεριζόμενη σήραγγα. Εάν η ροή του αέρα μέσα στη σήραγγα είναι χαμηλή, το φαινόμενο της ανωστικής ροής οδηγεί τις θερμές μάζες, με κατεύθυνση προς τα πάνω, κατευθείαν στην οροφή της σήραγγας με όλα τα προβλήματα που αυτό συνεπάγεται. Για μεγαλύτερες τιμές εξαερισμού, όπως πχ 2 m/s (Case c) τόσο το k-ε όσο και το LES δεν προβλέπουν την εμφάνιση του παραπάνω φαινομένου. Αντίθετα, για τις άλλες δύο περιπτώσεις εξαερισμού που μελετάμε (Case a, Case b) συναντάμε το φαινόμενο της αντίθετης ροής, κάτι που σύμφωνα με τους Gao κα. (2004) συμβαδίζει και με τα πειραματικά αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, στη μελέτη των Gao κα. για την περίπτωση με εξαερισμό 0.5 m/s (Case a) και στους δύο υπολογισμούς τους με τα δύο διαφορετικά μοντέλα τύρβης η αντίθετη ροή φτάνει μέχρι και την είσοδο της σήραγγας, κάτι που δε συμβαίνει για το μοντέλο k-ε για την Case b. Έτσι, ενώ με προσομοίωση LES και στις δύο περιπτώσεις χαμηλού εξαερισμού η αντίθετη ροή φτάνει μέχρι την είσοδο της σήραγγας, στην προσομοίωση με k-ε το φαινόμενο αυτό συναντάται μόνο στην πρώτη περίπτωση.

Σύμφωνα με τους δικούς μας υπολογισμούς όμως, για το μοντέλο k-ε πάντα, η αντίθετη ροή φτάνει και στις δύο περιπτώσεις μέχρι και την είσοδο της σήραγγας, πράγμα που έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης LES των Gao κα. και όχι με αυτά της προσομοίωσης με k-ε. Η σύγκριση μπορεί να γίνει παρατηρώντας τα παρακάτω σχήματα.



Εικόνα 5.8 Αποτελέσματα LES από μελέτη των Gao κα. (2004)



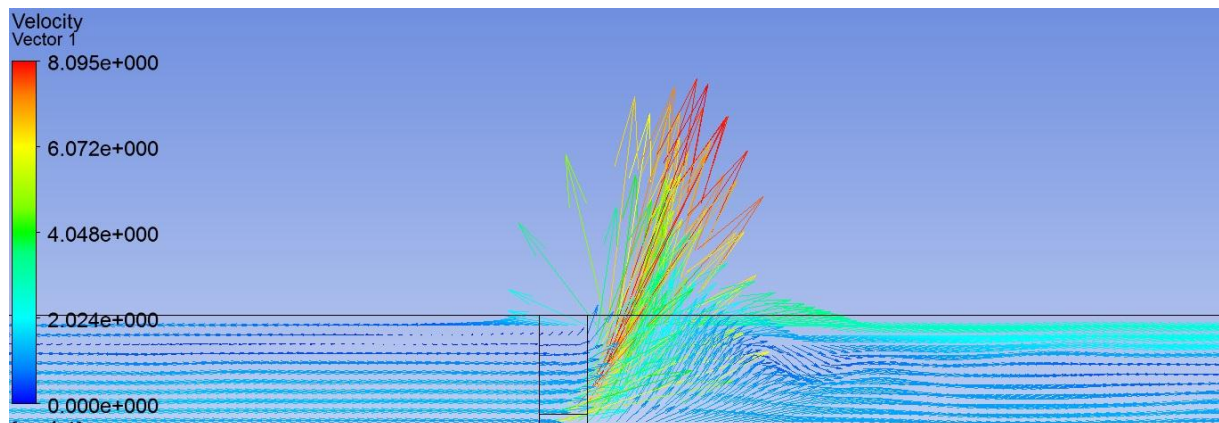
Εικόνα 5.9 Αποτελέσματα k-ε από μελέτη των Gao κα. (2004)



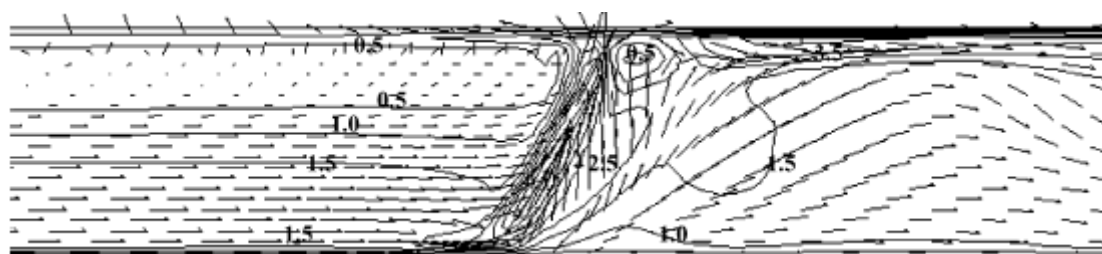
Εικόνα 5.10 Αντίθετη ροή του ζεστού αέρα

5.4 Συμπεριφορά της Ροής στην Περιοχή της Φωτιάς

Για να αναλύσουμε τη συμπεριφορά της ροής κοντά στη φωτιά θα χρησιμοποιήσουμε για παράδειγμα τα αποτελέσματα της περίπτωσης μέτριου εξαερισμού (Case b) και πιο συγκεκριμένα, προβάλλοντας την κατανομή της ταχύτητας στο κεντρικό κάθετο επίπεδο κατά μήκος της σήραγγας.



Εικόνα 5.11 Κατανομή ταχύτητας στη σήραγγα για την Case b- Αποτελέσματα k-ε



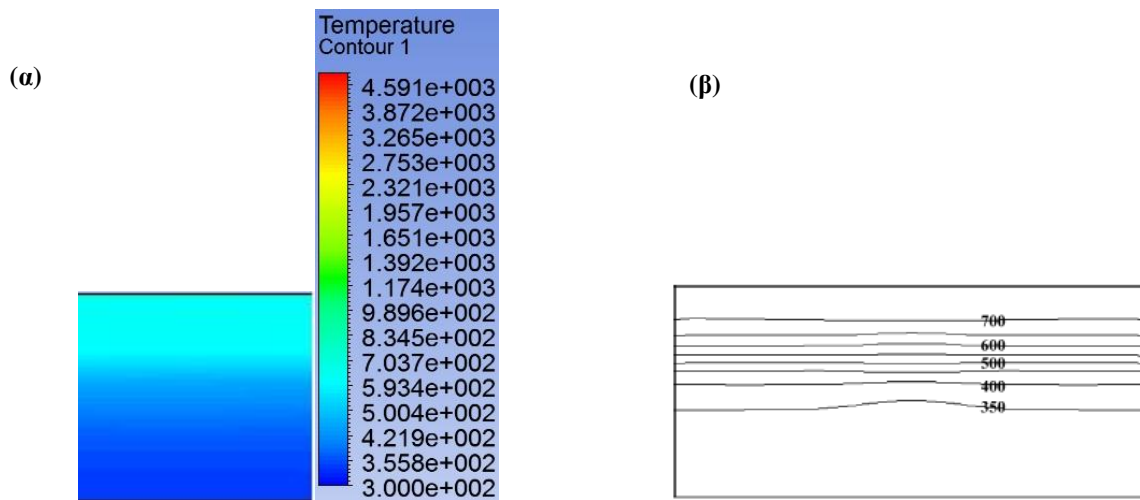
Εικόνα 5.12 Κατανομή ταχύτητας στη σήραγγα για την Case b- Αποτελέσματα LES

Η τρισδιάστατη φύση της ροής είναι εμφανής με το θερμό αέρα να ανυψώνεται λόγω της ανωστικής ροής και να συσσωρεύεται στην οροφή σχηματίζοντας ένα στρώμα. Όσο οι θερμές μάζες συσσωρεύονται, το στρώμα αυτό πλησιάζει τις γωνίες που σχηματίζει η οροφή με τα τοιχώματα της σήραγγας και να ανακατευθύνεται προς τα κάτω, δημιουργώντας έτσι ανακυκλοφορία της ροής. Η τρισδιάστατη ροή περιορίζεται σε μια περιοχή πριν και μετά τη φωτιά, ενώ έξω από αυτή την περιοχή, η ροή είναι σχεδόν μονοδιάστατη.

Όσον αφορά τις ταχύτητες που αναπτύσσονται κοντά στη φωτιά, σε καμία από τις τρεις περιπτώσεις που εξετάσαμε δεν ξεπερνούν τα 10 m/s και έτσι, θεωρώντας την ταχύτητα του ήχου ίση με 340 m/s, σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες ο αριθμός Mach σε αυτή τη μελέτη είναι μικρότερος του 0.3 ($M < 0.3$). Επομένως, η υπόθεση που κάναμε στην αρχή των υπολογισμών για ασυμπίεστη ροή επαληθεύεται.

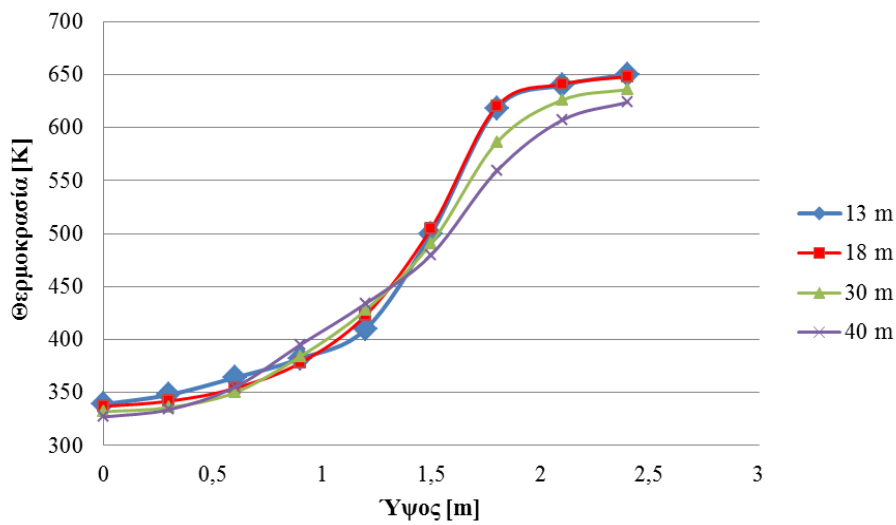
5.5 Κατανομή Θερμοκρασίας στη Σήραγγα

Ο ζεστός αέρας που παράγεται από την πηγή θερμότητας ρέει με ένα σύνθετο τρισδιάστατο τρόπο. Όσο προχωράμε προς την έξοδο όμως, παρατηρείται έντονη θερμοκρασιακή στρωματοποίηση. Για να γίνει πιο εύκολα αντιληπτό αυτό, εξετάσαμε την κατανομή της θερμοκρασίας 20 m μετά την πηγή θερμότητας. Παρατηρούμε ότι και για τα δύο μοντέλα τύρβης, k-ε και LES αντίστοιχα, η στρωματοποίηση των θερμοκρασιών είναι εμφανής.

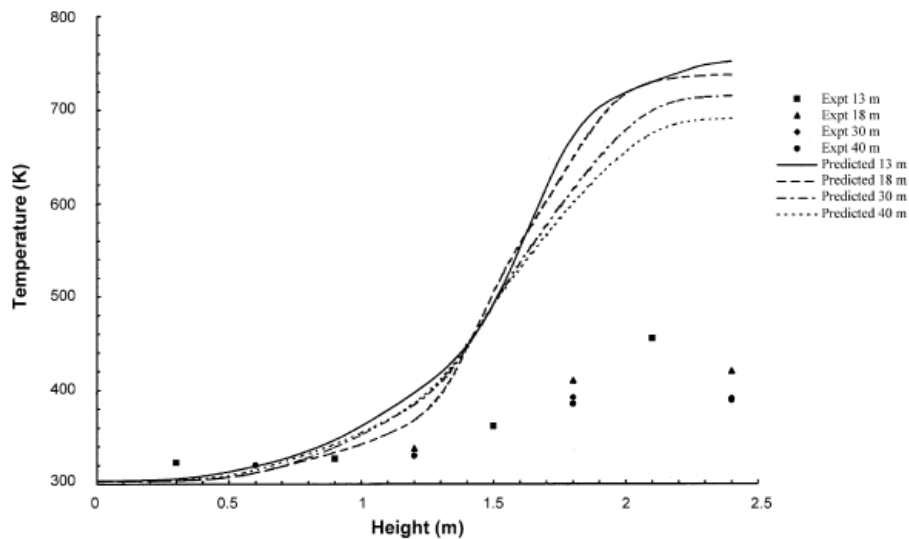


Εικόνα 5.13 Κατανομή της θερμοκρασίας [K] 20 m μετά τη φωτιά (Case b) για (α) k-ε και (β) LES

Τέλος, εξετάσαμε την κατανομή της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία της σήραγγας, έχοντας σαν μεταβλητές το κατακόρυφο ύψος και τη θερμοκρασία για κάποια απόσταση μετά τη φωτιά, και πιο συγκεκριμένα 13,18,30 και 40 μέτρα μετά τη φωτιά αντίστοιχα.



Εικόνα 5.14 Τιμές της θερμοκρασίας ανά ύψος σε διάφορες αποστάσεις από τη φωτιά (k-ε)

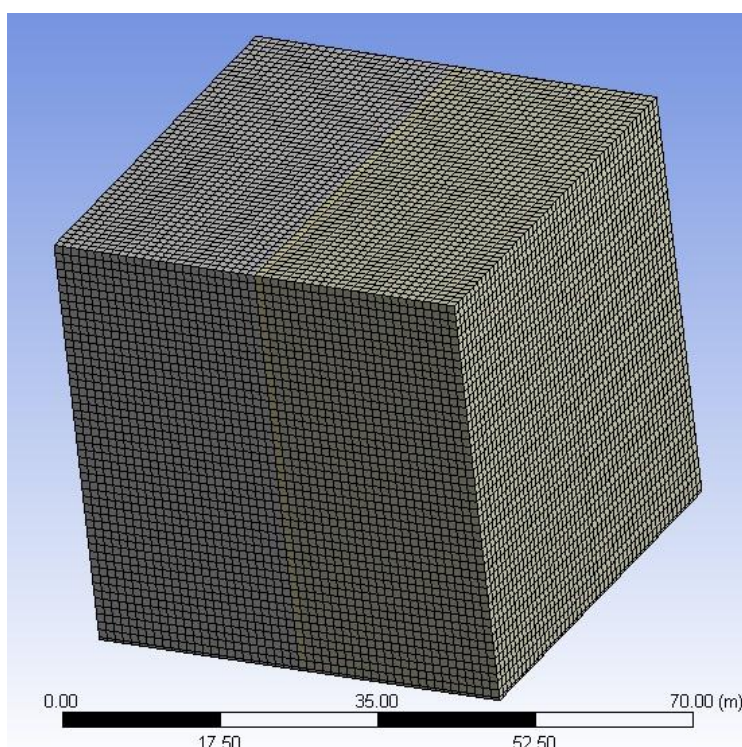


Εικόνα 5.15 Τιμές της θερμοκρασίας ανά ύψος σε διάφορες αποστάσεις από τη φωτιά (LES)

Από τα δύο διαγράμματα, τόσο για την προσομοίωση με μοντέλο τύρβης k-ε όσο και για την προσομοίωση με LES, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα αφενός συμφωνούν σχηματικά με τα πειραματικά αποτελέσματα, αφετέρου οι υπολογισμένες τιμές από τις προσομοιώσεις είναι υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές.

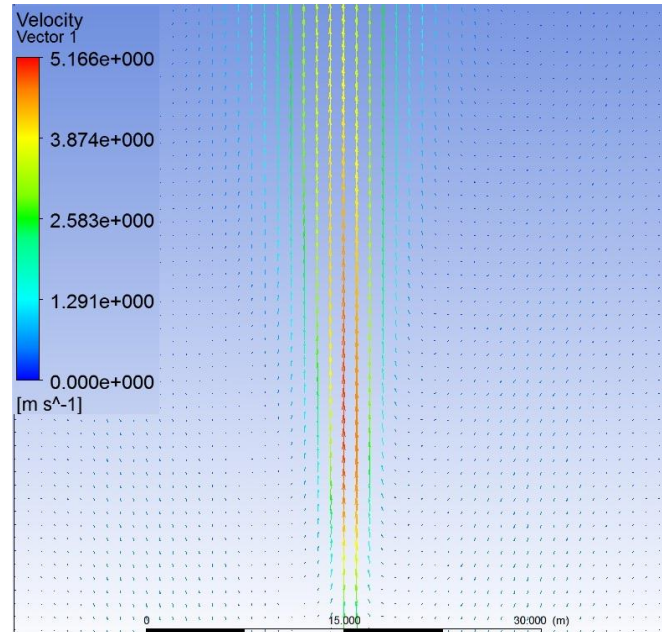
5.6 Πηγή θερμότητας σε ανοιχτό περιβάλλον

Με σκοπό να γίνει πιο εμφανής η διαφορά μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και αυτών της υπολογιστικής προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω μετρήσεις. Τοποθετήσαμε την ίδια πηγή θερμότητας σε ανοιχτό περιβάλλον με $Q=2.3$ MW για να ελέγξουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με μοντέλο τύρβης k-ε σε σχέση με αυτά με μοντέλο τύρβης LES αλλά και με τις πειραματικές μετρήσεις (Heskestad-NFPA/SFPE, 2002). Το φυσικό περιβάλλον προσομοιώθηκε σαν κύβος διαστάσεων 50m x 50m x 50m, ενώ η πηγή θερμότητας σαν παραλληλεπίπεδο 1m x 0.89m x 0.33m στο κέντρο της βάσης του κύβου, με τον ίδιο δηλαδή τρόπο που προσομοιώθηκε και σε όλους τους παραπάνω υπολογισμούς. Οι υπολογισμοί έγιναν σε περιβαλλοντικές συνθήκες με θερμοκρασία $T=300$ K, ατμοσφαιρική πίεση $p=101325$ Pascal, $C_p=1006$ J/kg και επιτάχυνση της βαρύτητας $g=9.81$ m/s. Η εγκάρσια ταχύτητα της ροής θεωρείται μηδενική, ενώ το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα καρτεσιανό πλέγμα 137904 κόμβων και 130050 κελιών όπως φαίνεται παρακάτω.

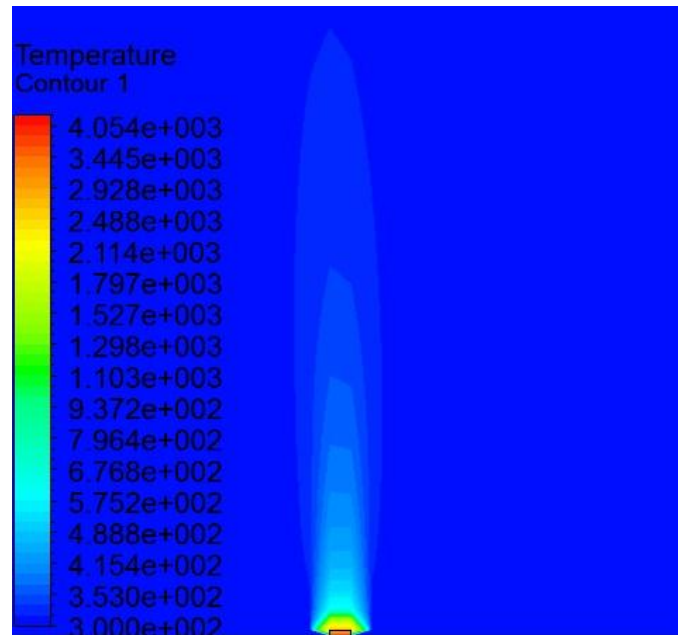


Εικόνα 5.16 Υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς

Κάνοντας τις ίδιες υποθέσεις και χρησιμοποιώντας τις ίδιες υπολογιστικές ρυθμίσεις όπως και σε όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, υπολογίζουμε την θερμοκρασία του αέρα ανάλογα με το ύψος της φλόγας, καθώς και τις ταχύτητες που αναπτύσσονται στα ίδια σημεία. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



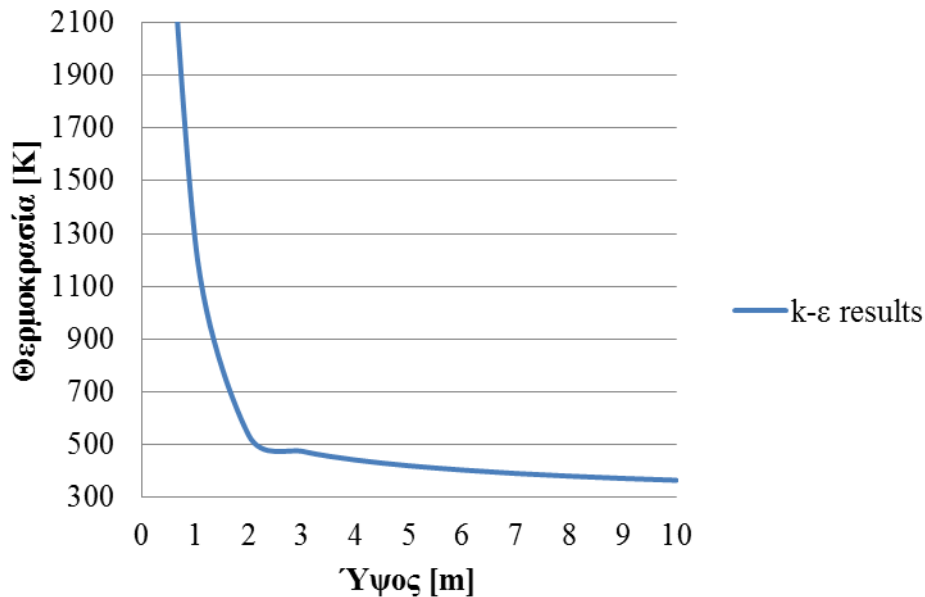
Εικόνα 5.17 Πεδία ταχύτητας για τη μόνιμη κατάσταση



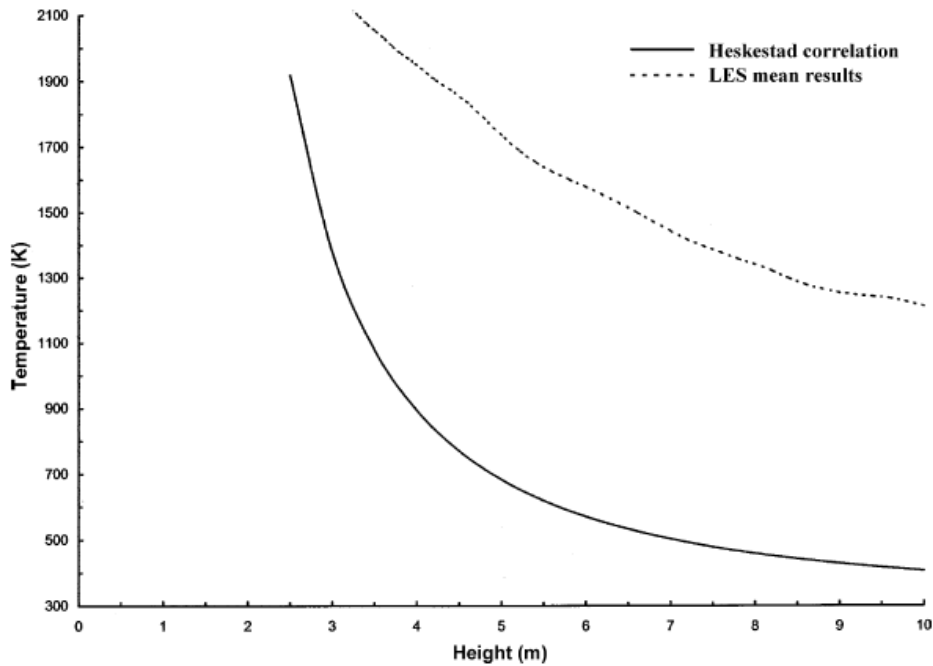
Εικόνα 5.18 Πεδία θερμοκρασίας στη μόνιμη κατάσταση

Όπως θα μπορούσε εύκολα να προβλεφθεί λόγω της μηδενικής εγκάρσιας ταχύτητας της ροής, αλλά και όπως προκύπτει από τις παραπάνω εικόνες, τόσο τα θερμοκρασιακά πεδία όσο και τα πεδία των ταχυτήτων που αναπτύσσονται στην περιοχή είναι συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες εμφανίζονται πάνω στον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας και 12-15 μέτρα πάνω από την πηγή θερμότητας με τη μέγιστη τιμή τους να φτάνει τα 5.166 m/s. Όσο για τη θερμοκρασία παίρνει τη μέγιστη τιμή της $T_{max}=4054$ K στο ύψος της πηγής θερμότητας, ενώ όσο ανεβαίνουμε κατακόρυφα η τιμή της θερμοκρασίας σταδιακά πέφτει.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται οι τιμές της θερμοκρασίας ανάλογα με το κατακόρυφο ύψος τόσο για τη δικιά μας μελέτη που χρησιμοποιήθηκε μοντέλο τύρβης k-ε, όσο και για τη μελέτη των Gao κα (2004) που χρησιμοποίησαν μοντέλο τύρβης LES για την προσομοίωση του προβλήματος. Τέλος στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις (Heskestad-NFPA/SFPE, 2002).



Εικόνα 5.19 Τιμές θερμοκρασίας ανά ύψος για αποτελέσματα k-ε



Εικόνα 5.20 Τιμές θερμοκρασίας ανά ύψος για αποτελέσματα LES και πειραματικά αποτελέσματα

Από τη σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα για προσομοίωση με μοντέλο τύρβης LES και τις πειραματικές μετρήσεις μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα. Παρατηρούμε ότι οι τιμές της θερμοκρασίας που προέκυψαν από τους υπολογισμούς μας είναι χαμηλότερες σε σχέση με αυτές των πειραματικών μετρήσεων, ενώ αντίθετα οι τιμές της προσομοίωσης με μοντέλο τύρβης LES είναι υψηλότερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες πειραματικές.

Οι διαφορές που εντοπίζονται σε σχέση με τις πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας είναι λογικό να υπάρχουν καθώς τόσο στη δικιά μας μελέτη, όσο και σε αυτή των Gao κα. (2004) θεωρήσαμε ότι δεν υπάρχει το φαινόμενο της ακτινοβολίας και της καύσης. Παρά το γεγονός ότι το μοντέλο τύρβης LES θεωρείται πιο αξιόπιστο και ακριβές από το k-ε για αντίστοιχες προσομοιώσεις, βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα των δύο διαφορετικών μοντέλων εμφανίζουν την ίδια σχεδόν απόκλιση συγκριτικά με τις πειραματικές μετρήσεις. Έτσι μπορούμε να πούμε με σχετική ασφάλεια ότι και το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήσαμε για την συγκεκριμένη προσομοίωση, εκτός από το μικρότερο υπολογιστικό χρόνο που χρειάστηκε σε σχέση με το LES, παρουσίασε και αρκετά ακριβή αποτελέσματα στο βαθμό βέβαια που μπορούν να συγκριθούν τα πειραματικά αποτελέσματα με αυτά μιας CFD προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα & Επίλογος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΕΠΙΛΟΓΟΣ

6.1 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 η φωτιά σε σήραγγα με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος προσομοίωσης ANSYS FLUENT. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας μοντέλο τύρβης k-ε και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάστηκαν αναλυτικά. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα μελέτης (των Gao κα., 2004) σε μοντέλο τύρβης LES και σχολιάστηκαν εκτενώς οι ομοιότητες αλλά και διαφορές των αποτελεσμάτων.

6.2 Σύνοψη της Έρευνας

Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι το μοντέλο τύρβης k-ε είναι κατάλληλο να προβλέψει με μεγάλη ακρίβεια το σχηματισμό της φλόγας αλλά και την αντίθετη ροή του καπνού. Αυτή η μελέτη αποδεικνύει πως είναι εφικτό να προσομοιωθεί η κίνηση του καπνού μέσα σε αεριζόμενη σήραγγα με μεγάλη επιτυχία. Επίσης, μετά τους υπολογισμούς είμαστε σε θέση να επιλέξουμε σχεδιαστικές παραλλαγές και άλλες εναλλακτικές λειτουργίες της σήραγγας με απώτερο σκοπό την αποφυγή κάποιων φαινομένων σε περίπτωση ενός τέτοιου ατυχήματος. Αυτό που προκύπτει σαν βασικό συμπέρασμα μετά από τους παραπάνω υπολογισμούς είναι ότι χωρίς καν να πειράζουμε τη γεωμετρία της σήραγγας, τον τύπο του εξαερισμού ή κάποιο άλλο χαρακτηριστικό της, μπορούμε να αποφύγουμε την αντίθετη ροή του καπνού αυξάνοντας απλά την ταχύτητα εξαερισμού.

Και με τα δύο μοντέλα προσομοίωσης μπορούμε να επιτύχουμε αρκετά ακριβή αποτελέσματα, με τη διαφορά ότι για την προσομοίωση με μοντέλο LES απαιτείται πολύ μεγαλύτερος χρόνος υπολογισμού. Όμως, λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειας των αποτελεσμάτων του προτιμάται η χρήση του για προσομοιώσεις πιο σύνθετων δομών ροής και για έργα υψηλότερου κόστους.

6.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν συμβαδίζουν με αυτά της πειραματικής μελέτης αλλά και ότι τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν κρίνονται άκρως ικανοποιητικά, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι μια τέτοια προσομοίωση θα μπορούσε να βρει εφαρμογή σε πολλούς άλλους τομείς.

Από τη στιγμή που η πρόβλεψη της κίνησης του καπνού μέσα στη σήραγγα στέφθηκε με επιτυχία, μια αντίστοιχη μελέτη θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σε σήραγγες με διαφορετική γεωμετρία ή ακόμα και με πιο σύγχρονα και σύνθετα συστήματα εξαερισμού. Εφαρμογή επίσης θα μπορούσε να βρει σε υπόγεια μέσα μεταφοράς αλλά και σε αίθουσες ή κτίρια που συγκεντρώνουν μεγάλο πλήθος κόσμου.

Επειδή σε περίπτωση ενός τέτοιου ατυχήματος εκτός από υλικές ζημιές και χρήματα μπορεί να χαθούν και ανθρώπινες ζωές, είναι ζωτικής σημασίας το θέμα να αντιμετωπίζεται με μεγαλύτερη ευαισθησία και συνεχή έρευνα για ελαχιστοποίηση των κινδύνων. Σίγουρα ο συγκεκριμένος τομέας εξελίσσεται διαρκώς, όπως και όλοι οι τομείς που σχετίζονται με την τεχνολογία και είναι πλέον θέμα χρόνου να έρθει η στιγμή που τα αποτελέσματα μιας υπολογιστικής προσομοίωσης δε θα απέχουν καθόλου από αυτά των μακροχρόνιων πειραματικών μελετών.

Βιβλιογραφία

1. ANSYS, 2011. <http://www.ansys.com>
2. Banjac, M., Nikolić, B., 2008. 'Numerical Study of Smoke Flow Control in Tunnel Fires Using Ventilation Systems', FME Transactions, Vol. 36, pp. 145-150
3. Beard, A. N., Watt, H., 2006. 'A Theoretical Model of Major Fire Spread in a Tunnel', Fire Technology, Vol. 42, pp. 303–328
4. Beard, A., Carvel, R. 2005. 'The handbook of tunnel fire safety', Thomas Telford Publishing'
5. Borchiellini, R., Verda, V., 2009. 'A fuzzy logic procedure for ventilation control in case of fire in long tunnels', Fire Safety Journal, Vol. 44, pp. 612–621
6. Bostrom, L., Larsen, C. K., 2006. 'Concrete for Tunnel Linings Exposed to Severe Fire Exposure', Fire Technology, Vol. 42, pp. 351–362
7. Brandeis, J., Bergmann, D. 1983. 'A Numerical Study of Tunnel Fires', Combustion Science and Technology, Vol. 35, pp. 133-155
8. Carvel, R. O., Beard, A. N., Jowitt, P. W. 2001. 'The influence of longitudinal ventilation systems on fires in Tunnels', Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, pp. 3-21
9. Charters, D. A., Gray, W. A., McIntosh, A. C., 1994. 'A Computer Model to Assess Fire Hazards in Tunnels (FASIT)', Fire Technology First Quarter, pp. 135-154
10. Chen, F., 2000. 'Smoke propagation in road tunnels', Appl Mech Rev., Vol. 53, 8, pp. 207-218
11. Cheng, L. H., Ueng, T. H., Liu, C. W. 2001. 'Simulation of ventilation and fire in the underground facilities', Fire Safety Journal, Vol. 36, pp. 597–619
12. Chow, W. K. 1998. 'On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation', Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 13, No 3, pp. 271-275
13. Deng, W., Li, X., Zhu, Y., 2007. 'Coupling Simulation n Subway Tunnel Smoke Propagation', Proceedings: Building Simulation 2007, pp. 1246-1253
14. EUR-Lex, 2004. 'Η πρόσβαση στο δίκαιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης', ΟΔΗΓΙΑ 2004/54/EK ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ, <http://eur->

15. 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*, Vol. 23, No 4, pp. 305–325
16. Fluent, 2006. 'ANSYS Fluent 6.3 User's Guide', Fluent Inc
17. 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* Vol. 19 pp. 577–586
18. Gasser, I., Jens Struckmeier, J., 2002. 'An asymptotic-induced one-dimensional model to describe fires in tunnels', *Math. Meth. Appl. Sci.* Vol. 25, pp. 1231–1249
19. Grant, G. B. Jagger, S. F., Lea, C. J. 1998. 'Fires in Tunnels', *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 356, No 1748, *Fire Dynamics* pp. 2873-2906
20. Haack, A. 1998. 'Fire Protection in Traffic Tunnels: General Aspects and Results of the EUREKA Project', *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 13, No. 4, pp. 377-381
21. Haack, A. 2002. 'Current safety issues in traffic tunnels', *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 17, pp. 117–127
22. Hart, R. A., 2005. 'Numerical Modeling of Tunnel Fires and Water Mist Suppression', Thesis submitted to the University of Nottingham
23. Hasofer, A. M., 2009. 'Modern sensitivity analysis of the CESARE-Risk computer fire mode', *Fire Safety Journal*, Vol. 44, pp. 330–338
24. Hoffmann, N., Markatos, N. C., 1988. 'Thermal radiation effects on fires in enclosures', *Appl. Math. Modelling*, Vol. 12, pp. 129-140
25. Huang, H., Ooka, R., Kato, S. 2007. 'A Numerical Study of Firebrands Scattering in Urban Fire Based on CFD and Firebrands', *Aerodynamics Measurements, Journal of Fire Sciences*, Vol. 25, pp. 355-378
26. Hwang, C. C., Edwards, J. C., 2001. 'CFD Modeling of Smoke Reversal', NIOSH, pp. 1-12
27. Hwang, C. C., Edwards, J.C. 2005. 'The critical ventilation velocity in tunnel fires—a computer simulation', *Fire Safety Journal*, Vol. 40, pp. 213–244

28. Ingason, H., 2006. 'Large Fires in Tunnels, Fire Technology, Vol. 42, pp. 271–272
29. Kang, K., 2006. 'Computational Study of Longitudinal Ventilation Control during an Enclosure Fire within a Tunnel', Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 16, pp. 159-181
30. Kashef, A., Bénichou, N., Loughheed, G., Debs, A., 2004. 'Application of CFD techniques for modelling fire tests in road Tunnels', CFD 2004, 12th Annual Conference of the Computational Fluid Dynamics Society of Canada, Ottawa, Ontario, May 9-11, 2004, pp. 288-289
31. Khoury, G. A., 2003. 'Passive fire Protection in tunnels', Concrete for the construction industry, Vol. 37, No. 2
32. Kim, E., Woycheese, J. P., Dembsey, N. A., 2008. 'Fire Dynamics Simulator (Version 4.0) Simulation for Tunnel Fire Scenarios with Forced, Transient, Longitudinal Ventilation Flows', Fire Technology, Vol. 44, pp. 137–166
33. Kumar, S., 2004. 'Recent Achievements in Modeling the Transport of Smoke and Toxic Gases in Tunnel Fires', Safe & Reliable Tunnels, Innovative European Achievements, First International Symposium, Prague 2004, pp. 94-105
34. Kunsch, J. P., 1999. 'Critical velocity and range of a pre-gas plume in a ventilated tunnel', Atmospheric Environment, Vol. 33, pp. 13-24
35. Kunsch, J. P., 2005. 'Modelling of tunnel fires and experimental validation', PAMM · Proc. Appl. Math. Mech. Vol. 5, pp. 677–678
36. Levy, S. S., Sandzimier, 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
37. 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
38. 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

39. 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
40. 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
41. Lonnermark, A., Ingason, H., 2006. 'Fire Spread and Flame Length in Large-Scale Tunnel Fires', Fire Technology, Vol. 42, pp. 283–302
42. Lowndes, I. S., Crossley, A. J., Yang, Z. Y., 2004. 'The ventilation and climate modelling of rapid development tunnel Drivages', Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, pp. 139–150
43. McGrattan K. B., Hamins, A. 2006. 'Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire', Fire Technology, Vol. 42, pp. 273–281
44. Megret O., Vauquelin, O., 2000. 'Short Communication, A model to evaluate tunnel fire characteristics', Fire Safety Journal, Vol. 34, pp. 393-401
45. Muhasilovic, M., Deville, M. O. 2007. 'Tunnel-Curvature's Influence on the Propagation of the Consequences of Large-Scale Accidental Fire - a CFD- Investigation', Turkish J. Eng. Env. Sci., Vol. 31, pp. 391- 402
46. NFPA/SFPE, 2002. 'The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association', Quincy, MA, Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, MD, pp. 2–6
47. Nilsen, A. R., Log, T., 2009. 'Results from three models compared to full-scale tunnel fires tests, Fire Safety Journal, Vol. 44, pp. 33–49
48. Oka Y., Atkinson, G. T., 1995. 'Control of Smoke Flow in Tunnel Fires', Fire Safety Journal, Vol. 25, pp. 305-322
49. Pichler, C., Lackner, R., Mang, H. A., 2006. 'Safety Assessment of Concrete Tunnel Linings under Fire Load', Journal of Structural Engineering, ASCE, pp. 961-969
50. Reszka, P., Steinhaus, T., Biteau, H., Carvel, R., Rein, G., Torero, J., 2007. 'A Study of Fire Durability for a Road Tunnel: Comparing CFD and Simple Analytical Models', ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods In Tunnelling (EURO:TUN 2007) Eberhardsteiner J. et al. (Eds.) Vienna, Austria, August 27-29, 2007

51. Tripathi, S., Habip, M., Souprayen, C., Dagba, Y., 2003. 'CFD Model of Fire Inside a Tunnel', Fifth International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Marseille, France, 2003.
52. Den Boer, D. J., Mertens, J. J., Van Oerle, N. J., 2003. 'Validation of CFD calculations of full scale medium sized fires in a two lane road tunnel', BHR Group 2003, Vehicle Tunnels 11, pp. 657-668
53. Wang Y., Jiang J., Zhu, D., 2009. 'Full-scale experiment research and theoretical study for fires in tunnels with roof openings', Fire Safety Journal, Vol. 44, pp. 339–348
54. Wang, H.Y., 2009. 'Prediction of soot and carbon monoxide production in a ventilated tunnel fire by using a computer simulation', Fire Safety Journal, Vol. 44, pp. 394–406
55. Weng, Y. C., Ke, M. T., Chen, S. L., 2009. 'Safety Reliability Method Applied to Evaluate Smoke Control System of Fire Accident in the Tunnel of Mass Rapid Transit System', Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2009 Vol. II, July 1-3, 2009, London, U.K.
56. WIKIPEDIA, www.wikipedia.org
57. Woodburn, P. J., Britter, R. E., 1996. 'CFD Simulations of a Tunnel Fire Part I', Fire Safety Journal, Vol. 16, pp. 35-62
58. Woodburn, P. J., Britter, R. E., 1996. 'CFD Simulations of a Tunnel Fire--Part II', Fire Safety Journal, Vol. 26, pp. 63-90
59. Wu, Y., Bakar, M. Z. A. 2000. 'Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems- a study of the critical velocity, Fire Safety Journal, Vol. 35, pp. 363-390
60. Xiaojun, C. 2008. 'Simulation of temperature and smoke distribution of a tunnel fire based on modifications of multi-layer zone model', Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, pp. 75–79
61. Xue H., Chew, T. C, Cheong, H. F., 1995. 'Transient Three-Dimensional Fire-Induced Air Flow in a Full Scale Ventilated Tunnel', Combustion Science and Tech., Vol. 105, pp. 117-129
62. Xue, H., Hihara E., Saito, T., 1993. 'Turbulence model of fire-induced air flow in a ventilated tunnel', hr. J. Hem Muss Trumfir. Vol. 36, No. 7, pp. 1739-1718
63. Εθνικό Τυπογραφείο, ET 2011. <http://www.et.gr/index.php>

64. European Commission, 2011. 'EU Road Safety Tunnels'
http://ec.europa.eu/transport/road_safety/topics/infrastructure/tunnels/index_el.htm
65. Καβουλάκος, Ν. Β., 1999. 'Αερισμός και λοιπά Η/Μ συστήματα οδικών σιηράγγων Εγνατίας οδού', Δημερίδα Οι Σήραγγες της Εγνατίας Οδού, "ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε." & Ε.Ε.Σ.Υ.Ε, Ιωάννινα, 15-16/10/99
66. Κουρκούμπας, Δ. Σ., 2008., 'Έξαερισμός Οδικών Σιηράγγων και Σχετικά Μοντέλα Πυρκαγιών- Εφαρμογή στη Σήραγγα του Αγ. Ηλία', Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ
67. Μερεντίτης, Β., Ζήλιας, Θ., Κόσσυφας, Χ., Καραχάλιου, Π., Αλεξόπουλος, Κ. 2004. 'Σχέδιο οδηγιών συντάξεως μελετών, τεύχος σιηράγγων έργα Η/Μ και φωτισμού υπαιθρίων οδικών σιηράγγων'
68. Παπαϊωάννου, Π. και Γεωργίου Γ., 2005. 'Ατυχήματα σε σήραγγες και ανθρώπινη συμπεριφορά', 3ο Πανελλήνιο συνέδριο οδικής ασφάλειας, Πάτρα, 10-11 Οκτ., 2005
69. Σακκάς, Κ.Μ.Γ., Νομικός, Π.Π., Πανιάς Δ., 2010. 'Προστασία Σιηράγγων από Πυρκαγιά', 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 – 1/10 2010, Βόλος
70. Σαραμούρτσης, Α., 2005. 'Εφαρμογή μεθόδων ποσοτικής ανάλυσης κινδύνου σε οδικές σιηραγγες', 3ο Πανελλήνιο συνέδριο οδικής ασφάλειας, Πάτρα, 10-11 Οκτ., 2005

Συγγράμματα

71. Μαθιουλάκης, Δ. Σ., Αναγνωστόπουλος, Ι. Σ., Τουζόπουλος, Δ. Γ., 2005. 'Βιομηχανική Ρευστομηχανική', Εκδόσεις ΕΜΠ
72. Μαθιουλάκης, Δ. Σ. , 2006. 'Μηχανική των Ρευστών ΙΙ (Σημειώσεις)', Εκδόσεις ΕΜΠ
73. Μπεργελές, Γ., 2006. 'Υπολογιστική Ρευστομηχανική', Εκδόσεις Συμεών
74. Τσαγγάρης, Σ., 2005. 'Μηχανική των Ρευστών', Εκδόσεις Συμεών