

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΦΙΤΣΑΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΠΟΚΑΠΝΙΣΜΟΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ
ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ακαδημαϊκό Έτος: 2019 - 2020

Επιβλέπων: ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Επιβλέπων: ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

15/7/2020

ABSTRACT

An increase in tunnelling manufacturing have brought a higher demand to safety measures, among others fire safety. Experimental data from fire accidents in tunnels are always important for researchers in order to solve engineering problems. However, computer engineering has been extremely developed in the last twenty years so complicated problems are more easily resolved with. Computational Fluid Dynamics is a well known approach to solve flow behaviour phenomena with a sustaining realistic accuracy. Fires accidents would not be an exception.

In order to complete this assignment we are going to use the Fire Dynamic Simulation (FDS) software as an open source fluid mechanic software. This software is a well known all over the world engineering communities as a well-validated code for fire simulation. The studied tunnel is 500 meters long ,11 meters width and 7 meters height. Dual jet fan groups with an airflow exit 20 m/s were tested.

A diesel pool fire accident was examined which located in the middle of a railway tunnel corresponding to 8 MW. A fire validation process was conducted in order to maintain a comparative difference between empirical equations and FDS predictions .

The grid sensitivity criteria was examined with three different grid approaches. The first case was to run a model with a coarse mesh, the second was a medium mesh and the last one was a fine grid.

Purpose of this research is to accomplish the critical velocity after four minutes from fire ignition for three hypothetical scenarios. Three different cases were examined at a time a) an empty tunnel without any fire accident, b) a 8 MW accident case in the middle of tunnel, c) an accident with a 8 MW fire with a train in the middle of the tunnel.

Keywords:

cfD, LES, fire dynamic simulation, tunnel fire, critical velocity, jet fans, jet fan modelling, dynamic Smagorinsky, mesh sensitivity analysis, temperature validation

Ευχαριστίες

Κατά αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κύριο Κωσταντίνο Βασιλόπουλο για την ανάθεση της διπλωματικής μου εργασίας, για την ενθάρρυνση του ,την πολύτιμη βοήθειά του και την καθοδήγηση σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της. Τον κύριο Σαρρή Ιωάννη για την υποστήριξη του σε θέματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής καθώς και για την συμβολή του ώστε να δοθεί η άδεια να χρησιμοποιήσουμε τις υπηρεσίες του υπερυπολογιστή. Να σημειωθεί η προσφορά του κ. Λεκάκη Ιωάννη, για την παραχώρηση του χώρου εργασίας μου κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου και του εξοπλισμού που χρειάστηκε. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθώ στην ομάδα του εργαστηρίου θερμορευστομηχανικής, τον κύριο Ανάργυρο Παλάμπιγκ και τον κύριο Χαρίτων Εμμανουήλ Παυλίδη για τις συμβουλές και την συνεργασία μας στον κοινό αγώνα για γνώση και εμπάθυση. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους ήταν κοντά μου και ιδιαίτερα την μητέρα μου που με στήριξε σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

ABSTRACT	i
Ευχαριστίες	iii
Κατάλογος Σχημάτων	vi
Κατάλογος Πινάκων	x
Κατάλογος Εξισώσεων	xi
Λίστα ακρωνυμίων.....	xiii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας	2
1.4 Περιγραφή συστημάτων αερισμού	3
1.4.2 Συστήματα Μηχανικού αερισμού.....	5
1.5 Ανεμιστήρες ώσης - Jet-fans.....	6
2 Περιγραφή της σήραγγας	8
2.1 Σήραγγες.....	8
2.2 Τυπική διατομή σήραγγας.....	8
2.3 Περιγραφή λίμνης φωτιάς	10
2.4 Τεχνική προμελέτη μηχανικού αερισμού	11
2.4.1 Κρίσιμη ταχύτητα.....	11
2.4.2 Αναλυτική επίλυση των απωλειών της σήραγγας.....	13
2.5 Διάταξη της σιδηροδρομικής σήραγγας	15
2.5.1 Περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της σήραγγας ...	15
2.5.2 Υλικά κατασκευής της σιδηροδρομικής σήραγγας.....	17
2.5.3 Περιγραφή του μηχανικού αερισμού.....	17
2.6 Επιλογή μοντέλου ανεμιστήρα	18
3 Μεθοδολογία	20
4 Υπολογιστική παραμετροποίηση.....	27
4.1 Περιγραφή υπολογιστικού χωρίου	27
4.2 Υπολογιστικό πλέγμα.....	27
4.2.1 Ορισμός του υπολογιστικού πλέγματος	28
4.2.2 Πολλαπλά πλέγματα	28
4.2.3 Παράλληλη επεξεργασία του κώδικα FDS με πρωτόκολλο MPI (Message Passing Interface.....	29
4.2.4 Επιλογή – Ανάλυση πλέγματος.....	30
4.2.5 Κατασκευή πλέγματος.....	32
4.2.6 Δομή πλέγματος.....	32
4.2.7 Ευαισθησία πλέγματος.....	33
5 Υπολογιστική μοντελοποίηση του μηχανικού αερισμού.....	37
5.1 Σχολιασμός	42
6 Αποτελέσματα	43
6.1 Πιστοποίηση θερμοκρασίας	44

6.1.1 Αναλυτική προσέγγιση	45
6.2 Σενάριο χωρίς την έναρξη πυρκαγιάς	48
6.3 Σενάριο πυρκαγιάς χωρίς την παρουσία τρένου	53
6.3.1 Ταχύτητα	54
6.3.2 Θερμοκρασία.....	59
6.3.3 Συγκέντρωση μονοξειδίου	63
6.4 Σενάριο πυρκαγιάς υπό την παρουσία μηχανής έλξης	67
6.4.1 Ταχύτητα	68
6.4.2 Θερμοκρασία.....	76
6.4.3 Συγκέντρωση μονοξειδίου	81
6.5 Αριθμητικά αποτελέσματα.....	86
6.5.1 Ταχύτητα	86
6.5.2 Θερμοκρασία.....	93
6.5.3 Συγκέντρωση CO	100
7 Συμπεράσματα	107
8 Μελλοντική εργασία- έρευνα.....	108
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	109

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1 Σύστημα φυσικού αερισμού χωρίς αγωγό απαγωγής σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης	4
Σχήμα 1-2 Σύστημα φυσικού αερισμού με ενδιάμεσο αγωγό απαγωγής σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης.....	5
Σχήμα 1-3 Σύστημα διαμήκους αερισμού με αγωγό απαγωγής στο στόμιο σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης.....	6
Σχήμα 1-4 Σύστημα μηχανικού αερισμού σε σήραγγα με χρήση ανεμιστήρων jet fans.....	6
Σχήμα 1-5 Schematic of a free circular jet (Awbi, 2003).....	7
Σχήμα 2-1 Τυπική διατομή σιδηροδρομικής σήραγγας Cut and Cover	9
Σχήμα 2-2 Χρονική εξέλιξη του ρυθμού εκλυόμενης θερμότητας HRR.....	10
Σχήμα 2-3 Διαμήκης τομή της σήραγγας κατά μήκος	16
Σχήμα 2-4 Κάτοψη της σιδηροδρομικής σήραγγας	16
Σχήμα 2-5 Κάθετη τομή σήραγγας του υπολογιστικού χωρίου με την παρουσία	16
Σχήμα 2-6 Περιτύπωμα συρμού εντός της εξεταζόμενης σήραγγας σύμφωνα με τα πρότυπα του Ο.Σ.Ε.....	16
Σχήμα 2-7 Χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη του ανεμιστήρα.....	18
Σχήμα 2-8 Πίνακας χαρακτηριστικών ιδιοτήτων ανεμιστήρα.	19
Σχήμα 4-1 An example of a multiple-mesh geometry [7].....	28
Σχήμα 4-2 Παραδείγματα κανόνων της χρήσης πλέγματος.[7].....	29
Σχήμα 4-3 Απεικόνιση πλέγματος στο πλούμιο φωτιάς 0.25 m ανάλυσης.....	31
Σχήμα 4-4 Απεικόνιση πλέγματος ανεμιστήρα ώσης 0.125 m ανάλυσης	32
Σχήμα 4-5 Απεικόνιση των περιοχών πύκνωσης και αραίωσης πλέγματος.....	33
Σχήμα 4-6 Απεικόνιση στατιστικού σφάλματος μεσαίου και πυκνού πλέγματος στο προφίλ της ταχύτητας	35
Σχήμα 4-7 Προφίλ ταχύτητας ανά μονάδα ύψους διαφορετικής πύκνωσης πλέγματος.....	36
Σχήμα 5-1 Χρονικός στατιστικός μέσος της x-συνιστώσας της ταχύτητας στην έξοδο του ανεμιστήρα για διαφορετική ανάλυση πλέγματος και συντελεστή Smagorinsky σταθερό.....	38

Σχήμα 5-2 Στατιστική απόκλιση της x-συνιστώσας της ταχύτητας από την ονομαστική ταχύτητα στην έξοδο του ανεμιστήρα για μήκος διακριτοποίησης $\delta x=0.125m$ και διαφορετική μοντελοποίηση της τύρβης.	39
Σχήμα 5-3 Προφίλ δύναμης ώσης στην έξοδο του ανεμιστήρα για μήκος διακριτοποίησης $\delta x=0.125m$ για επίλυση της τύρβης με δυναμικό και σταθερό συντελεστή Smagorinsky.....	40
Σχήμα 5-4 Προφίλ της x-συνιστώσας της ταχύτητας-σε απόσταση δέκα διαμέτρων από την έξοδο του ανεμιστήρα για διαφορετικά μοντέλα τύρβης.	41
Σχήμα 5-5 Ροϊκές γραμμές στο επίπεδο συμμετρίας του ανεμιστήρα με τα χρώματα να περιγράφουν το πεδίο τιμών της x-συνιστώσας της ταχύτητας, στην περίπτωση χρήσης του σταθερού συντελεστή Smagorinsky	42
Σχήμα 5-6. Ροϊκές γραμμές στο επίπεδο συμμετρίας του ανεμιστήρα με τα χρώματα να περιγράφουν το πεδίο τιμών της x-συνιστώσας της ταχύτητας, στην περίπτωση χρήσης του δυναμικού συντελεστή Smagorinsky	42
Σχήμα 6-1 Γραφική σύγκριση της ονομαστικής θερμότητας ισχύος 8MW σε σχέση με εκείνη που προλέχθηκε από τον κώδικα FDS.....	44
Σχήμα 6-2 Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας στην οροφή για α) $x=10m$, β) $x=30m$, γ) $x=50m$, δ) $100m$ ανάντι της πυρκαγιάς.....	45
Σχήμα 6-3 Χρονικό θερμοκρασιακό προφίλ στην οροφή της σήραγγας 30 m ανάντι της φωτιάς.	46
Σχήμα 6-4 Χρονικό θερμοκρασιακό προφίλ στην οροφή της σήραγγας 50 m ανάντι της φωτιάς.	47
Σχήμα 6-5 Χρονικό θερμοκρασιακό προφίλ στην οροφή της σήραγγας 100 m ανάντι της φωτιάς.	47
Σχήμα 6-6 Ισοϋψής κατανομή της U_x στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από: a) 30 s ,b) 60 s, c) 160 s, d) 260 s, e) 560s, f)680 s.....	51
Σχήμα 6-7 Ισοϋψής κατανομή της U_x στο επίπεδο διέλευσης των πεζών μετά από: a) 30s ,b) 60s, c) 160s, d) 260s, e) 560s, f)680 s.....	52
Σχήμα 6-8 Χρονική εξέλιξη της εξάπλωσης καπνού για μετά από : a) 200s ,b) 260s, c) 360s, d) 390s, e) 680s	56
Σχήμα 6-9 Ισοϋψής κατανομή της U_x στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από: a) 200s ,b) 260s, c)390s , d) 680s.....	57
Σχήμα 6-10 Ισοϋψής κατανομή της U_x στο επίπεδο διέλευση των πεζών μετά από: a) 200 s ,b) 260 s, c)390 s , d) 680 s.....	58
Σχήμα 6-11 Ισοϋψής κατανομή θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από: a) 240s ,b) 340s, c)440s) , d) 540s,e)680s	61

Σχήμα 6-12 Ισοϋψής κατανομή θερμοκρασίας στο κρηπίδωμα μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d) 490s, e)680s.....	62
Σχήμα 6-13 Ισοϋψής κατανομή συγκέντρωσης CO στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d) 590s,e)680s	65
Σχήμα 6-14 Ισοϋψής κατανομή συγκέντρωσης CO στο κρηπίδωμα μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d) 490s,e)680s	66
Σχήμα 6-15 Χρονική εξέλιξη της εξάπλωσης καπνού για μετά από: a) 200s ,b) 260s, c)360s) , d) 390s,e)680s	72
Σχήμα 6-16 Ισοϋψής κατανομή ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς της σήραγγας μετά από : a) 200s ,b) 260s, c)390s), d) 680s.....	73
Σχήμα 6-17 Ισοϋψής κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο του συρμού μετά από: a) 200s ,b) 260s, c)390s), d) 680s	74
Σχήμα 6-18 Ισοϋψής κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο του κρηπιδώματος μετά από: a) 200s ,b) 260s, c)390s) , d) 680s	75
Σχήμα 6-19 Ισοϋψής κατανομή θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο μετά από: a) 240s ,b) 340s, c)390s) , d) 680s.....	78
Σχήμα 6-20 Ισοϋψής κατανομή θερμοκρασίας στο επίπεδο του συρμού μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d)490s ,e)680s	79
Σχήμα 6-21 Ισοϋψής κατανομή θερμοκρασίας στο κρηπίδωμα μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d)490s ,e)680s.....	80
Σχήμα 6-22 Ισοϋψής κατανομή CO στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d)490s ,e)680s	83
Σχήμα 6-23 Ισοϋψής κατανομή CO στο επίπεδο του συρμού μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d)680 s.....	84
Σχήμα 6-24 Ισοϋψής κατανομή CO στο κρηπίδωμα μετά από: a) 240s ,b) 260s, c)390s) , d) 680s.....	85
Σχήμα 6-25 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.....	86
Σχήμα 6-26 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς 50 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.....	87
Σχήμα 6-27 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς 100 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.....	88
Σχήμα 6-28 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς 100 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.....	90
Σχήμα 6-29 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο επίπεδο διέλευσης των πεζών 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.....	91

Σχήμα 6-30 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο επίπεδο διέλευσης των πεζών 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς	92
Σχήμα 6-31 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο επίπεδο διέλευσης των πεζών 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς	94
Σχήμα 6-32 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο 50 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.....	95
Σχήμα 6-33 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο 100 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.....	96
Σχήμα 6-34 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο επίπεδο διέλευσης 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.....	97
Σχήμα 6-35 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο επίπεδο διέλευσης 50 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.....	98
Σχήμα 6-36 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο επίπεδο διέλευσης 100 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.....	99
Σχήμα 6-37 Χρονική συγκέντρωση του CO στο συμμετρικό επίπεδο 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς	100
Σχήμα 6-38 Χρονική συγκέντρωση του CO στο συμμετρικό επίπεδο 50 m κατάντι της λίμνης φωτιάς	101
Σχήμα 6-39 Χρονική συγκέντρωση του CO στο συμμετρικό επίπεδο 100 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.....	102
Σχήμα 6-40 Χρονική συγκέντρωση του CO στο επίπεδο διέλευσης 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς	103
Σχήμα 6-41 Χρονική συγκέντρωση του CO στο επίπεδο διέλευσης 50 m κατάντι της λίμνης φωτιάς	105
Σχήμα 6-42 Χρονική συγκέντρωση του CO στο επίπεδο διέλευσης 100 m κατάντι της λίμνης φωτιάς	106

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1 Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων σκυροδέματος	17
Πίνακας 2-2 Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων χάλυβα	17
Πίνακας 2-3 χαρακτηριστικών ιδιοτήτων ανεμιστήρα που επιλέχθηκε.....	19
Πίνακας 4-1 Σενάρια επίλυσης ανεξαρτησίας πλέγματος	34
Πίνακας 4-2 Στατιστικά αποτελέσματα προφίλ ταχύτητας ανά μονάδα ύψους .	36
Πίνακας 5-1 Ποσοστιαία απόκλιση από την ονομαστική ταχύτητα του ανεμιστήρα με χρήση διαφορετικών μοντέλων παραγωγής τύρβης	40

Κατάλογος Εξισώσεων

(2-1).....	11
(2-2).....	11
(2-3).....	12
(2-4).....	13
(2-5).....	13
(2-6).....	13
(2-7).....	14
(2-8).....	14
(2-9).....	14
(2-10).....	15
(3-1).....	22
(3-2).....	22
(3-3).....	23
(3-4).....	23
(3-5).....	23
(3-6).....	23
(3-7).....	23
(3-8).....	24
(3-9).....	24
(3-10).....	24
(3-11).....	24
(3-12).....	24
(3-13).....	25
(3-14).....	25
(3-15).....	25
(3-16).....	26
(3-17).....	26
(3-18).....	26

(3-19).....	26
(3-20).....	26
(3-21).....	26
(4-1).....	30
(4-2).....	34
(4-3).....	34
(4-4).....	34
(4-5).....	34
(5-1).....	38
(5-2).....	38
(5-3).....	38
(5-4).....	40
(6-1).....	45
(6-2).....	45
(6-3).....	46
(6-4).....	46
(6-5).....	46

Λίστα ακρωνυμίων

CFD	Computational Fluid Dynamics
LES	Large Eddy Simulation
FDS	Fire Dynamic Simulation
FFT	Fast Fourier Transformation
MPI	Message Passage Interface
HRR	Heat Release Rate
NIST	National Institute of Standards and Technology
G.C.I	Grid Convergence Index
UIC	International Union of Railways
NFPA	National Fire Protection Association
ISAVFT	International Security Assistance Force
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
Ο.Σ.Ε	Όμιλος Σιδηροδρόμων Ελλάδος

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Θερμορευστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, στο πλαίσιο ολοκλήρωσης των ακαδημαϊκών μου σπουδών στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών κατά το ακαδημαϊκό έτος 2019-2020. Στόχος της έρευνας είναι η μελέτη και ανάλυση ενός ατυχήματος λίμνης φωτιάς μέσα σε σιδηροδρομική σήραγγα με την χρήση υπολογιστικών μεθόδων (CFD). Συγκεκριμένα αναφερόμαστε στην περίπτωση ανάπτυξης πυρκαγιάς στο εσωτερικό σήραγγας τρένου μελετώντας την επίδραση της στο ροϊκό πεδίο με την χρήση jet fans και τους τρόπους που είναι δυνατή η αντιμετώπισή της. Η ανάγκη για τέτοιου είδους έρευνα έχει προκύψει από την αυξανόμενη αναφορά ατυχημάτων λόγω πυρκαγιάς σε κλειστούς χώρους με μεγάλη πληθυσμιακή κινητικότητα. Η ανάπτυξη των υπερυπολογιστών έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη της υπολογιστικής ρευστομηχανικής με αποτέλεσμα να μπορούμε να προσεγγίσουμε με ακρίβεια φυσικά φαινόμενα χωρίς την διεξαγωγή πραγματικών πειραμάτων μεγάλης ή μικρής κλίμακας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα μελετηθεί η ανάπτυξη πυρκαγιάς σε σιδηροδρομική σήραγγα καθώς και ο αποκαπνισμός της με διαμήκες σύστημα αερισμού. Με την βοήθεια αριθμητικού υπολογισμού θα εξετάσουμε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ανάπτυξης της ροής του αέρα κατά μήκος της σήραγγας. Αρχικά θα μελετήσουμε την επίδραση του αερισμού χωρίς την παρουσία φωτιάς, στη συνέχεια θα προστεθεί μια εστία φωτιάς 8MW και τέλος θα μελετηθεί το φαινόμενο με την παρουσία μηχανής έλξης στο μέσο της σήραγγας. Στόχος είναι να επιτευχθεί μια μέση ταχύτητα ροής που θα επηρεάσει τον αποκαπνισμό καθώς και η ταχύτητα ροής στο μέσο ύψος αναπνοής (1.6 m) του ανθρώπου θα εξασφαλίσει συνθήκες ασφαλούς διαφυγής. Για την επίλυση όλων αυτών των ζητημάτων θα χρησιμοποιηθεί ο ανοιχτού κώδικα προσομοίωσης φωτιάς FDS-SMV της NIST [3]. Για το υπολογιστικό κομμάτι της μελέτης αυτής θα κατασκευαστεί σήραγγα τετραγωνικής διατομής με πραγματικές διαστάσεις σύμφωνα με τα πρότυπα cut and cover του Ο.Σ.Ε.

1.2 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Οι κύριοι στόχοι της διπλωματικής εργασίας διακρίνονται σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά την επίτευξη στόχων που εξασφαλίζουν τους κανόνες ασφάλειας μέσω συγκεκριμένων χαρακτηριστικών ροής. Η δεύτερη αφορά περισσότερο την υπολογιστική-αριθμητική προσέγγιση μέσω διαφορετικών παραμέτρων. Συγκεκριμένα διακρίνονται σε:

- a) Έλεγχος της ικανότητας του μηχανικού αερισμού να αντιμετωπίσει τον πλήρη αποκαπνισμό της σιδηροδρομικής σήραγγας για διαφορετικά σενάρια φωτιάς.
- b) Η επίτευξη της κρίσιμης ταχύτητας αερισμού μέσω αριθμητικής προσομοίωσης και σύγκρισή της σύμφωνα με τον νέα αναλυτική μέθοδο του NFPA (Tunnel and Protection 2020).
- c) Έλεγχος της καλύτερης μεθόδου προσομοίωσης των ανεμιστήρων ώσης με διαφορετικό μήκος διακριτοποίησης και μοντέλου παραγωγής τύρβης.
- d) Έλεγχος της συγκέντρωσης μονοξειδίου στο επίπεδο διέλευσης των πεζών.

1.3 Ανάγκη μελέτης σιδηροδρομικών σηράγγων

Τα υπόγεια έργα αποτελούν μια από τις πιο δημοφιλής κατηγορίες έργων που εξετάζονται από ένα μεγάλο εύρος επιστημονικής προσέγγισης. Η αύξηση του πληθυσμιακού δυναμικού, η μείωση των αποστάσεων μεταξύ δύο σημείων αλλά και η ασφαλέστερη μετάβαση σε αυτά δημιουργούν την ανάγκη για κατασκευή σηράγγων. Οι σήραγγες κατασκευάζονται σε οδικά ή σιδηροδρομικά συγκοινωνιακά δίκτυα προκειμένου να συνδέσουν ορεινές δυσπρόσιτες περιοχές με σκοπό την αποφυγή κατολισθήσεων και άλλων γεωλογικών προβλημάτων. Η συνήθης δομή μια τυπικής σήραγγας αποτελείται δύο κλάδους διέλευσης για την αποφυγή ατυχημάτων μεταξύ των δύο κατευθύνσεων. Όσον αφορά την ασφάλεια διέλευσης των οχημάτων συστήνονται πολλές εναλλακτικές. Κυρίως αυτές που αναφέρονται στον εξαερισμό της σήραγγας σε περιπτώσεις που ατυχήματα μπορεί να προκληθούν εντός της, όπως η έναρξη πυρκαγιάς. Η κατηγοριοποίηση των μεθόδων αερισμού αναλύεται σε παρακάτω κεφάλαια με περισσότερη λεπτομέρεια.

Οι έρευνες που μελετούν την αλληλεπίδραση των ατυχημάτων βασίζονται σε εμπειρικές αλλά και σε υπολογιστικές μεθόδους όπως αυτές τις υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD). Η τελευταία, δίνει την δυνατότητα στους μελετητές να εξετάζουν διαφορετικά σενάρια, με υψηλή προσέγγιση και ακρίβεια εξασφαλίζοντας τους κανόνες της ισχύουσας νομοθεσία για τα μέτρα ασφαλείας.

1.4 Περιγραφή συστημάτων αερισμού

Όλες οι σιδηροδρομικές σήραγγες κλειστού τύπου υπέργειες ή υπόγειες χρήζουν την ανάγκη κατάλληλου αερισμού για την ασφαλή λειτουργία τους σε έκτακτες περιπτώσεις εκκένωσης λόγω πυρκαγιάς. Ο αερισμός της σήραγγας κρίνεται απαραίτητος σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία προκειμένου να απομακρύνονται οι εκπομπές ρύπων που προέρχονται από τους διερχόμενους συρμούς ώστε να ρυθμίζονται οι συγκεντρώσεις ρύπων εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Την ίδια στιγμή είναι κατάλληλος να εξασφαλίζει την ελάχιστη απαιτούμενη ταχύτητα ροής ώστε να απομακρύνεται ο καπνός σε περίπτωση ατυχήματος φωτιάς και να καθιστά δυνατή την λήψη μέτρων και <<γρήγορων>> αποφάσεων εξασφαλίζοντας υψηλά επίπεδα ορατότητας και χαμηλής τοξικότητας κατά την διάρκεια της εκκένωσης. Τα συστήματα αερισμού κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

(α) Σε συστήματα φυσικού αερισμού

(β) Σε συστήματα μηχανικού αερισμού

Ο φυσικός αερισμός συνηθίζεται να χρησιμοποιείται σε σήραγγες μικρού μήκους με χαμηλό φορτίο. Σε αντίθετη περίπτωση η χρήση μηχανικού αερισμού καθίστανται υποχρεωτική.

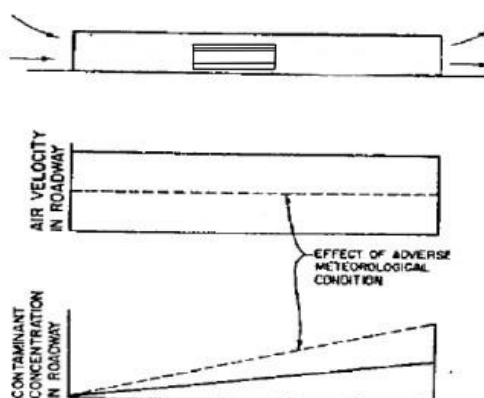
1.4.1 Συστήματα φυσικού αερισμού

Η λειτουργία του φυσικού αερισμού βασίζεται στις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες στις οποίες βρίσκεται η σήραγγα. Οι συνθήκες αυτές είναι το αιολικό δυναμικό της περιοχής, το θερμοκρασιακό προφίλ, η υγρασία της ατμόσφαιρας κλπ. Για να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες φυσικού αερισμού εντός της

διατομής της σήραγγας θα πρέπει στο εξωτερικό περιβάλλον να επικρατούν συνθήκες που να ικανοποιούν αυτήν την απαίτηση.

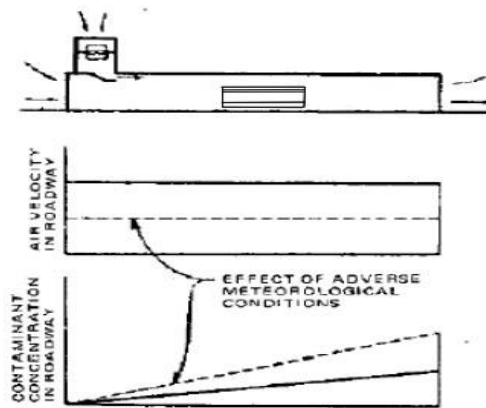
Μία από τις πιο σημαντικές συνθήκες στον φυσικό αερισμό είναι η διαφορά πίεσης ανάμεσα στο στόμιο αναρρόφησης και κατάθλιψης εξαιτίας υψομετρικής διαφοράς, είτε λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας είτε λόγω του αιολικού δυναμικού. Επιπροσθέτως συνυπολογίζεται η διαφορά πίεσης που προκύπτει εξαιτίας της κίνησης των βαγονιών σύμφωνα με το φαινόμενο του <<εμβόλου>> στην σήραγγα. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι πως τα φυσικά μεγέθη που καθορίζουν τον φυσικό αερισμό συνεχώς μεταβάλλονται βάσει εξωτερικών συνθηκών με αποτέλεσμα μια μεταβολή της ταχύτητας να αλλάζει εντελώς τον σχεδιασμό της σήραγγας. Ένα επιπλέον αρνητικό αποτέλεσμα είναι η μεγάλη συγκέντρωση βλαβερών ρύπων αν δεν υπάρχει η έγκαιρη απομάκρυνσή του καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Η ροή αέρα σε ένα σύστημα φυσικού αερισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί από το ένα στόμιο εισόδου προς το στόμιο εξόδου έτσι ώστε να διατηρείται μια σταθερή διαφορά πίεσης (ΔP) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-1.



Σχήμα 1-1 Σύστημα φυσικού αερισμού χωρίς αγωγό απαγωγής σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης

Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σύστημα ενδιάμεσης απαγωγής όπως φαίνεται στο σχήμα 1-2. Η λύση αυτή χαρακτηρίζεται καταλληλότερη σε περιπτώσεις σήραγγας διπλής κατεύθυνσης.



Σχήμα 1-2 Σύστημα φυσικού αερισμού με ενδιάμεσο αγωγό απαγωγής σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης

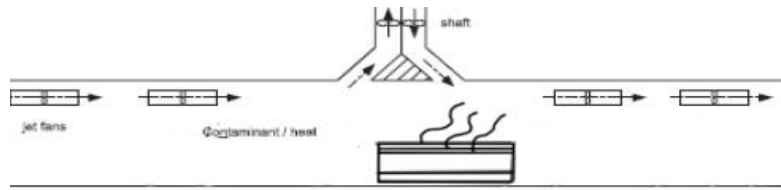
1.4.2 Συστήματα Μηχανικού αερισμού-

Στα συστήματα μηχανικού αερισμού, οι ποσότητες των παραγόμενων ρύπων, η ορατότητα και τα υπόλοιπα μεγέθη ροής επιτυγχάνονται με χρήση την μηχανολογικού εξοπλισμού αξονικών ή φυγοκεντρικών ανεμιστήρων .Οι κατηγορίες μηχανικού αερισμού χωρίζονται στις εξής:

- **Διαμήκης αερισμός**

Στην περίπτωση του διαμήκη αερισμού η μεταφορά του αέρα γίνεται από το στόμιο εισροής ως το στόμιο εκροής με την χρήση ανεμιστήρων τοποθετημένοι σε συγκεκριμένες θέσεις όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1-3. Η ταχύτητα αέρα διατηρείται σταθερή σε όλο το μήκος της σήραγγας και οι συγκεντρώσεις ρύπων αυξάνονται μέχρι την μέγιστη τιμή στο στόμιο εξόδου.

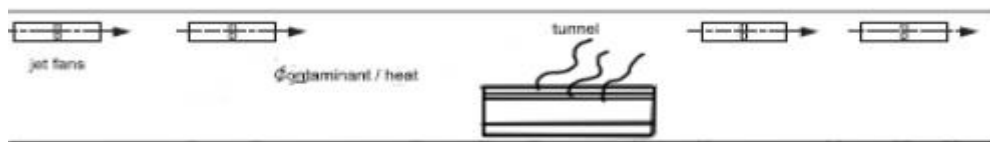
Ο διαμήκης αερισμός με χρήση ενδιάμεσου αγωγού απαγωγής στο μέσο της σήραγγας 1-3 συνίσταται για σήραγγες διπλής κατεύθυνσης. Στην περίπτωση αυτή ο ανεμιστήρας στον κεντρικό αγωγό (shaft) απάγει αέρα από το περιβάλλον και ο μεταφερόμενος αέρας εισέρχεται και από τα δύο στόμια εισόδου-εξόδου.



Σχήμα 1-3 Σύστημα διαμήκους αερισμού με αγωγό απαγωγής στο στόμιο σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης

- **Με χρήση jet fans**

Η πιο διαδεδομένη τεχνική διαμήκους αερισμού σε σήραγγες είναι με την χρήση συγχρόνων ανεμιστήρων ώσης (jet-fans). Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την τοποθέτηση και την διαστασιολόγηση κατάλληλων ανεμιστήρων κατά μήκος της σήραγγας σε ζευγάρια είτε στην κορυφή είτε στις πλαϊνές πλευρές της. Αποτελούν τον πιο οικονομικό τρόπο καθώς δεν απαιτούνται εγκάρσιοι αεραγωγοί για την διασύνδεση καθ' όλο το μήκος της σήραγγας. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι οι αυξημένες διαστάσεις της διατομής της σήραγγας και η διασπορά του καπνού στην οροφή καθ' όλο το μήκος της σήραγγας σε περίπτωση πυρκαγιάς.

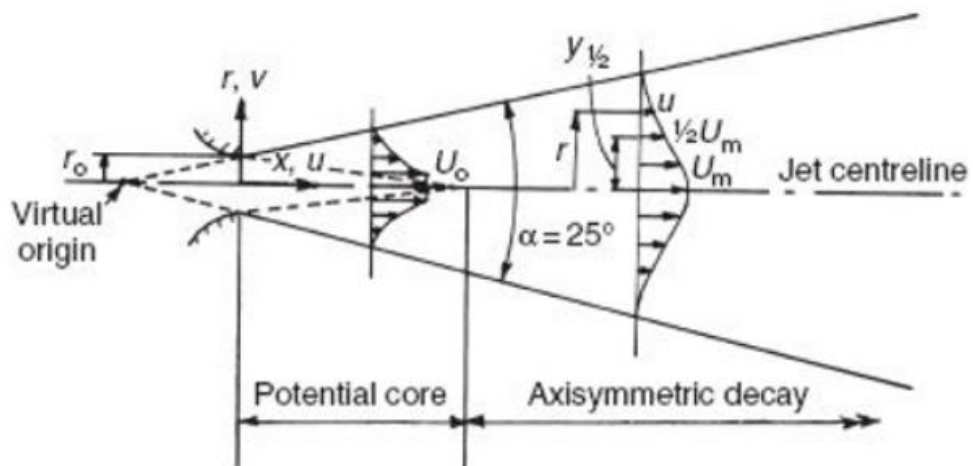


Σχήμα 1-4 Σύστημα μηχανικού αερισμού σε σήραγγα με χρήση ανεμιστήρων jet fans

1.5 Ανεμιστήρες ώσης - Jet-fans

Οι ανεμιστήρες ώσης (jet-fans) χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε συστήματα με διαμήκη εξαερισμού. Οι ανεμιστήρες παράγουν μία δέσμη αέρα υψηλής ταχύτητας η οποία με τη σειρά της μεταφέρει μια μεγαλύτερη ποσότητα που περιβάλλει τους ανεμιστήρες μέσω μιας διαδικασίας που εξαναγκάζει τον αέρα να αυξήσει την ορμή του. Η ποσότητα του αέρα που παρασύρεται από τον ανεμιστήρα αυξάνεται με την ταχύτητα και την ποσότητα του αέρα που εξέρχεται από αυτόν. Οι ανεμιστήρες ώσης χαρακτηρίζονται άμεσα με την ονομαστική

ωστική δύναμή τους (Thrust) η οποία μετριέται σε (N). Η ισχύς του ανεμιστήρα μπορεί να αναλυθεί πλήρως με την επίλυση της ορμής και της ενέργειας. Ο βαθμός απόδοσης του ανεμιστήρα στα συστήματα εξαερισμού εξαρτάται από τον λόγο της επιφάνειάς εξόδου του ανεμιστήρα ως προς την επιφάνεια του δευτερεύοντος ρεύματος ($\alpha = A_j/A_s$). Αυτός ο διαχωρισμός είναι εμφανής στο σχήμα 1-6 όπου φαίνεται η κύρια περιοχή της ροής κατάντι της εξόδου του ανεμιστήρα όπου αναμιγνύεται με τον περιβάλλοντα αέρα. Η μέση ταχύτητα ροής του ανεμιστήρα στο συμμετρικό επίπεδο είναι ίση με την ταχύτητα του ανεμιστήρα στην εκροή. Στην συμμετρική περιοχή μείωσης (decay) κυριαρχούν φαινόμενα υψηλής ανάμειξης στρωμάτων ρευστού με αποτέλεσμα η μέση ταχύτητα να μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από ακροφύσιο εκροής.



Σχήμα 1-5 Schematic of a free circular jet (Awbi, 2003)

2 Περιγραφή της σήραγγας

2.1 Σήραγγες

Η χρήση τους μπορεί να ποικίλει ικανοποιώντας διαφορετικές ανάγκες του ανθρώπου όπως συγκοινωνίες, βιομηχανία κλπ. Με την αύξηση της τεχνολογίας εμφανίστηκε η απαίτηση για την ασφαλέστερη λειτουργία τους, συντήρηση και κατασκευή τους. Οι σήραγγες αποτελούν ειδικά έργα που απαιτούν αρχικά την μελέτη και τεκμηρίωση τους σύμφωνα με την εκάστοτε τεχνική νομοθεσία. Επιπροσθέτως την μελέτη των φυσικών χαρακτηριστικών τους στις οποίες αυτές κατασκευάζονται. Συγκεκριμένα βασίζονται στους γεωλογικούς χάρτες της περιοχής, και μετρήσεις στις επιφάνειες διάτρησης, υδρολογικές παρατηρήσεις, μετρήσεις σεισμικότητας κλπ.

Οι γρηγορότερες και οικονομικότερες λύσεις οδήγησαν σε δύο μεγάλες κατηγορίες διάνοιξης σηράγγων.

- Με την χρήση εκρηκτικής ύλης
- Με μηχανικά μέσα

Για να ληφθεί η καταλληλότερη επιλογή λαμβάνονται υπόψιν τα παραπάνω κριτήρια [4]. Παρόλα αυτά η διάνοιξη των σηράγγων παρουσιάζει πολλές απρόοπτες συνθήκες. Έτσι όταν οι ενδείξεις δεν είναι ενθαρρυντικές αποφεύγεται με αλλαγή χαράξεως ή με την κατασκευή μεγάλων ορυγμάτων όταν δεν δημιουργείται κίνδυνος από την γενικότερη διαταραχή του εδάφους. Σε περιπτώσεις διπλής σήραγγας γραμμής μπορεί να περιλάβει και τις δύο γραμμές εκτός αν λόγοι οικονομικοί/γεωλογικοί επιβάλλουν την κατασκευή για κάθε γραμμή ξεχωριστών σηράγγων.

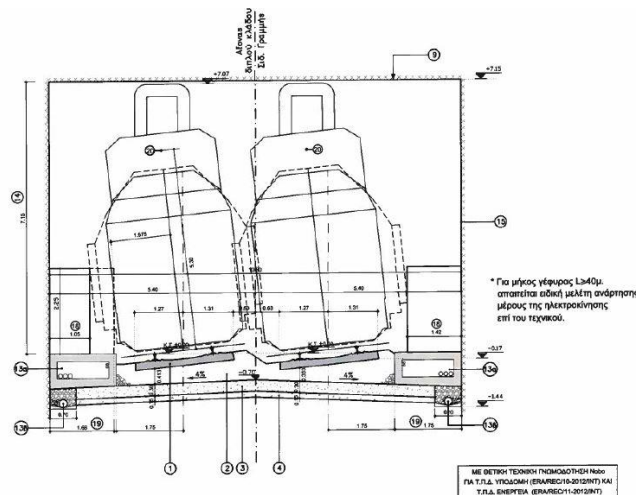
2.2 Τυπική διατομή σήραγγας

Η τυπική διατομή σιδηροδρομικής σήραγγας παρουσιάζεται στο σχήμα 2-1 σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Οργανισμού Σιδηροδρόμων Ελλάδος (Ο.Σ.Ε) (Δοκουμετζίδα, Κούσιου et al. 1954). Ως βασικά χαρακτηριστικά για την κατασκευή μιας τέτοιας σήραγγας είναι τα ακόλουθα:

- Η διατομή θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν από το περιτύπωμα των συρμών, δεδομένου ότι θα πρέπει να ληφθεί το κατάλληλο επίπεδο ασφαλείας, για να αντιμετωπιστούν μικρομετατοπίσεις της γραμμής και μικροσφάλματα χάραξης αυτής. Συγκαταλέγονται δε, οι μετακινήσεις των σκαπτικών μηχανημάτων και η προφύλαξη των κρηπιδωμάτων από προσκρούσεις που τυχόν μπορεί να συμβούν εντός της.
- Σύμφωνα με τον κανονισμό DS804 ο οποίος αναφέρεται κυρίως σε σιδηροδρομικά έργα, αλλά και με τις οδηγίες του UIC (Διεθνούς Ενώσεως Σιδηροδρόμων), η ελάχιστη απόσταση που πρέπει να εφαρμόζεται μεταξύ του άξονα κάθε γραμμής και του κοντινότερου κρασπέδου είναι 2.2 μέτρα.
- Η διατομή θα πρέπει να περιλαμβάνει την κατασκευή πεζοδρομίου για την ασφαλή διέλευση του προσωπικού συντήρησης ή των σωστικών συνεργείων σε περίπτωση ατυχήματος. Σε περίπτωση σήραγγας με δύο κλάδους το κρηπίδωμα θα πρέπει να κατασκευάζεται έκαστος ,διαφορετικά προτείνεται η κατασκευή του σε έναν από τους δύο κλάδους.

Το πεζοδρόμιο θα πρέπει να είναι κατάλληλα διαμορφωμένο ώστε να δέχεται συστήματα τηλεπικοινωνιών και ελέγχου όπως, θερμοκρασίας υγρασίας και συγκέντρωσης τοξικών ρύπων.

Δ.Ι.Σ.Σ.Α.



Σχήμα 2-1 Τυπική διατομή σιδηροδρομικής σήραγγας Cut and Cover

2.3 Περιγραφή λίμνης φωτιάς

Η προς μελέτη εργασία έγινε με σκοπό να περιγράψει το πεδίο ροής εντός σιδηροδρομικής σήραγγας σε περίπτωση ατυχήματος φωτιάς λίμνης πετρελαίου. Πρόκειται για μία εστία με ισχύ 8 MW με διαστάσεις 0.25 τετραγωνικά μέτρα τοποθετημένη στα 250 μέτρα. Η μέγιστη τιμή ρυθμού εκπομπής θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (HRRPUA) είναι $3.2 \cdot 10^4$ (kW/m²) για χρονικό διάστημα 120 δευτερολέπτων και περιγράφεται από την παρακάτω καμπύλη σχήμα 2-2 μέσω της υπορουτίνας του κώδικα FDS (McGrattan, Hostikka et al. 2020)



Σχήμα 2-2 Χρονική εξέλιξη του ρυθμού εκλυόμενης θερμότητας HRR

Η καύσιμη ύλη που χρησιμοποιήθηκε για την ανάφλεξη και την μελέτη του φαινομένου είναι πετρελαίο με τυπική σύσταση καυσίμου C:12 H:23. Τα προϊόντα της καύσης είναι μονοξείδιο του άνθρακα με απόδοση παραγωγής CO=0.1 και απόδοση παραγωγής καπνού soot yield =0.09 . Ως απόδοση παραγωγής καπνού ορίζεται η ποσότητα καπνού ανά γραμμάριο καυσίμου που διαχέεται κατά μήκος της ροής συγκρινόμενη με την διάχυση της φωτιάς στον περιβάλλοντα αέρα.

2.4 Τεχνική προμελέτη μηχανικού αερισμού

Σε κάθε κατασκευή σιδηροδρομικής σήραγγας, προηγείται ο σχεδιασμός των γεωμετρικών της χαρακτηριστικών, με βάση τις απαιτήσεις που ζητούνται. Στη συνέχεια ακολουθεί ο σχεδιασμός του μηχανικού αερισμού. Συγκεκριμένα, χρειάζεται να μελετηθεί η συμπεριφορά του μηχανικού αερισμού, οι απώλειες που εμφανίζονται λόγω του μήκους των τοιχωμάτων της σήραγγας, των συρμών αλλά και την ύπαρξη τοπικής φωτιάς. Τελικός στόχος είναι να ικανοποιηθούν τα απαραίτητα κριτήρια ασφαλείας για την ασφαλή εκκένωση σε περίπτωση ατυχήματος.

2.4.1 Κρίσιμη ταχύτητα

Ως κρίσιμη ταχύτητα ορίζεται η ελάχιστη ταχύτητα που πρέπει να επιτευχθεί μέσω διαμήκους αερισμού στο εσωτερικό της σήραγγας προκειμένου να αποφευχθεί η αναστροφή του καπνού ανάντι ή κατάντι του σημείου πυρκαγιάς (backlayering). Η αναλυτική λύση (2-1) για την προσέγγιση της κρίσιμης ταχύτητας δόθηκε από τον (Thomas 1968) και κατέληξε ότι η κρίσιμη συνθήκη η οποία χρειάζεται για να καταστέλλεται η αναστροφή του καπνού είναι όταν το Fr_m είναι ίσο με ένα. Δηλαδή, όταν οι ανωστικές και οι δυνάμεις αδρανείας είναι της ίδιας ισχύος. Η σχέση που προσδιορίζει την κρίσιμη ταχύτητα είναι :

$$V_c = \left(\frac{gQ_c H}{\rho_0 C_p T_f A} \right)^{1/3} \quad (2-1)$$

Η πιο δημοφιλής σχέση έχει προταθεί από τον Kennedy et al (Tarada 2010) και είναι της μορφής

$$V_c = K_1 K_2 \left(\frac{gQ_c H}{\rho_0 C_p T_f A} \right)^{1/3} \quad (2-2)$$

Όπου:

$K_1 = Fr_c^{1/3}$ όπου ο αριθμός Froude κατά τον Kennedy λαμβάνεται ίσος με 4.5

$K_2 = 1 + 0.0375(\text{grade})^{0.80}$, ο παράγοντας κλίσης (grade) λαμβάνεται ως ποσοστό

Q_c = ρυθμός εκλυόμενης θερμότητας [KW/m²]

H, ύψος της σήραγγας	[m]
A, διατομή της σήραγγας	[m ²]
C _p , ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα	[KJ/kg°C]
ρ, πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες	[Kg/m ³]
T _f , θερμοκρασία καυσαερίων	[°C]

Στην παρούσα εργασία ωστόσο πρόκειται να γίνει εφαρμογή της νέας εξίσωσης προσδιορισμού της κρίσιμης ταχύτητας όπως αυτή προτάθηκε στο ISAVFT 2019 θέτοντας πλέον στον NFPA 502 2020 Edition standard [1] την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{u}{\sqrt{gH}} = \begin{cases} 0.81 \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\alpha} C_p T_{\alpha} g^{\frac{1}{2}} H^{\frac{5}{2}}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{H}{W} \right)^{\frac{1}{12}} e^{\left(\frac{-l_0}{18.5H} \right)}, & \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\alpha} C_p T_{\alpha} g^{\frac{1}{2}} H^{\frac{5}{2}}} \right) \leq 0.15 \left(\frac{H}{W} \right)^{-0.25} \\ 0.43 e^{\left(\frac{-l_0}{18.5H} \right)}, & \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\alpha} C_p T_{\alpha} g^{\frac{1}{2}} H^{\frac{5}{2}}} \right) > 0.15 \left(\frac{H}{W} \right)^{-0.25} \end{cases} \quad (2-3)$$

Όπου:

L₀=0, ο παράγοντας κλίσης λαμβάνεται ως ποσοστό

Q_c=34000, ο ρυθμός εκλυόμενης θερμότητας [KW/m²]

W=11, το πλάτος της σήραγγας [m]

H=7, το ύψος της σήραγγας [m]

A=77, η διατομή της σήραγγας [m²]

C_p=1.005, η ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα [KJ/kg°C]

ρ=1.20, η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες [Kg/m³]

T_α=30, η θερμοκρασία περιβάλλοντος [°C]

Η αναλυτική δίκλαδη συνάρτηση (2-3) απαιτεί την ικανοποίηση ενός εκ των δύο κριτηρίων. Στην προκειμένη μελέτη η τιμή της κρίσιμης ταχύτητας εκτιμήθηκε στα 2.5 m/s κάνοντας χρήση του πρώτου κλάδου.

2.4.2 Αναλυτική επίλυση των απωλειών της σήραγγας

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αναλυτικές λύσεις για τον προσδιορισμό της συνολικής πτώσης πίεσης από το στόμιο εισόδου ως το στόμιο εξόδου. Στην προκαταρκτική μελέτη, με βάση την προσέγγιση της Mosen Ltd, εμπεριέχεται η ύπαρξη μηχανικού αερισμού, η παρουσία συρμών καθώς και η παρουσία πυρκαγιάς με σκοπό τον υπολογισμό της απαιτούμενης ώσης που απαιτείται για τον αποκαπνισμό της σήραγγας. Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ώσης γίνεται χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$Thust = \sum \Delta p \cdot A = (\Delta p_{\tau\rho\acute{\epsilon}\nu\omicron\upsilon} + \Delta p_{\tau\rho\iota\beta\acute{\omega}\nu} + \Delta p_{\epsilon\lambda\kappa\upsilon\sigma\mu\acute{\omicron}\upsilon} + \Delta p_{\alpha\nu\epsilon\mu\omicron\pi\iota\epsilon\sigma\eta\varsigma} + \Delta p_{\varphi\omega\tau\iota\acute{\alpha}\varsigma}) A \quad (2-4)$$

Όπου

$$\Delta p_{\tau\rho\acute{\epsilon}\nu\omicron\upsilon} = C_{br} C_D N \left(\frac{A_{\tau\rho\acute{\epsilon}\nu\omicron\upsilon}}{A_{\tau\upsilon\eta\tau\upsilon\eta\lambda}} \right) \rho_{air} \frac{V_{ox}^2}{2} \quad (2-5)$$

Οι συντελεστές της σχέσης (2-5) ορίζονται ως: N, ο αριθμός συρμών στην εξεταζόμενη περίπτωση που ισούται με την μονάδα, C_{br} , ο συντελεστής μείωσης οπισθέλκουσας τρένου ίσος με 1. Το πηλίκο των επιφανειών ορίζεται από την επιφάνεια που καταλαμβάνει το τρένο (16.06 m²) και της επιφάνειας της διατομής της σήραγγας (77 m²). Ως ρ_{air} ορίζεται η πυκνότητα του αέρα εντός της σήραγγας με τιμή 1.2 (Kg/m³) και ως V_{ox} η σχετική ταχύτητα των οχημάτων ως προς την ταχύτητα του αέρα εντός της σήραγγας ίση με 4 (m/s) εφόσον ο συρμός παραμένει ακίνητος.

Οι απώλειες εξαιτίας των τριβών εντός της σήραγγας ορίζονται από την σχέση :

$$\Delta p_{\tau\rho\iota\beta\acute{\omega}\nu} = \left(\zeta_1 + \zeta_2 + \lambda \frac{L}{Dh} \rho_{air} \frac{V_u^2}{2} \right) \quad (2-6)$$

με ζ_1 ίσο με 0.6 και ζ_2 1 αντίστοιχα. Ως συντελεστής τριβών ορίζεται ο παράγοντας λ με τιμή 0.024 πολλαπλασιασμένος με το μήκος της σήραγγας L και διαιρεμένος με την υδραυλική διάμετρο όπως αυτή αναφέρεται παραπάνω. Τέλος η ταχύτητα V_u ορίζεται ως η ταχύτητα αέρα στη σήραγγα ανάλογα την περίπτωση ανάντι ή κατάντι της φωτιάς.

Στον υπολογισμό της συνολικής πτώσης πίεσης συνυπολογίζεται η διαφορά πίεσης που ευθύνεται εξαιτίας των ανωστικών δυνάμεων (buoyancy forces). Η εξίσωση που προσεγγίζει αυτή την επίδραση είναι:

$$\Delta p_{\text{ελκυσμού}} = \Delta H \cdot \rho_{\text{air}} g \cdot \frac{(T_t - T_0)}{(T_t + 273)} \quad (2-7)$$

Με ΔH ορίζεται η υψομετρική διαφορά μεταξύ του στομίου αναρρόφησης και κατάθλιψης της σήραγγας. Το πηλίκο της διαφοράς των θερμοκρασιών υπολογίζεται μέσω της μέσης θερμοκρασίας εντός της σήραγγας T_t ίση με 390K και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος 293K.

Για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης λόγω της επίδρασης του ανέμου μπορεί να προσεγγιστεί από την αναλυτική λύση:

$$\Delta p_{\text{ανεμο πίεσης}} = \frac{v_{\text{air}}^2}{2} \rho_{\text{air}} \quad (2-8)$$

Όπου v_{air} ορίζεται η ταχύτητα του αέρα που εμποδίζει την έξοδο του αέρα.

Τέλος, η πτώση πίεσης που λαμβάνεται υπόψιν είναι εξαιτίας της ύπαρξης φωτιάς εντός της σήραγγας. Η αναλυτική λύση που προσφέρεται για την προσέγγισή της είναι :

$$\Delta p_{\text{φωτιάς}} = \frac{0,00009 \cdot Q \cdot 1000000}{u \cdot D^2} \quad (2-9)$$

Προκειμένου να υπολογιστεί η σχέση (2-9) συμπεριλαμβάνουμε την τιμή της παραγόμενης εκλυόμενης θερμότητας που ανέρχεται στα 8 MW, της μέσης ταχύτητας αέρα πριν την φωτιά καθώς και της υδραυλικής διαμέτρου.

Τέλος για τον υπολογισμό της συνολικής ώσης των ανεμιστήρων προσεγγίζεται από την σχέση:

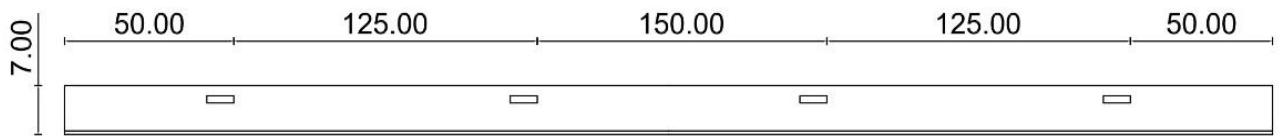
$$S = \rho_{air} Q_{fan} (u_{fan} - u_{tunnel}) n \quad (2-10)$$

Όπου η παροχή του ανεμιστήρα Q_{fan} ορίζεται σε επόμενο κεφάλαιο με τιμή 16 m^3/s και η ταχύτητα u_{fan} 20.4 m/s σύμφωνα με το σχήμα (2-8). Η ταχύτητα της σήραγγας u_{tunnel} είναι ίση με την κρίσιμη ταχύτητα πολλαπλασιασμένη με το σύνολο των ανεμιστήρων n όπου $n=8$ στην περίπτωση μας. Οπότε η απαιτούμενη ώση εντός της σήραγγας είναι 2,196 N και 2,521 N των ανεμιστήρων αντίστοιχα.

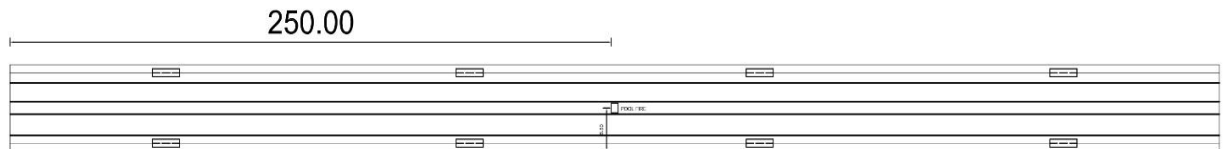
2.5 Διάταξη της σιδηροδρομικής σήραγγας

2.5.1 Περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της σήραγγας

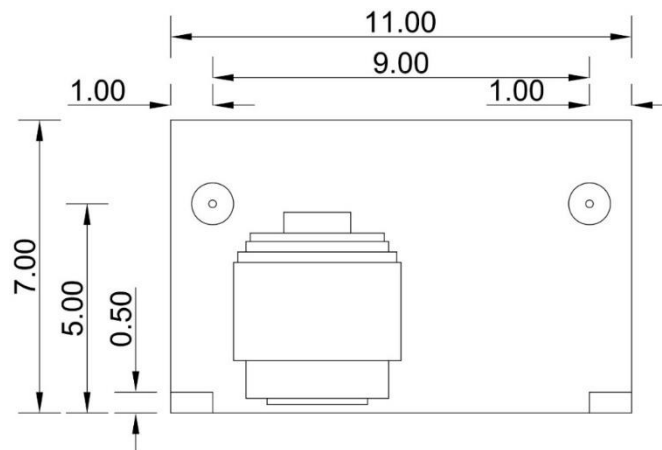
Πρόκειται για μια σήραγγα τετραγωνικής τυπικής διατομής με βάση τις τυπικές διαστάσεις του Ο.Σ.Ε όπως φαίνεται στο σχήμα 2-3, 2-4 με μήκος 500 m, 11 μέτρα στο πλάτος και 7 μέτρα ύψος. Εντός της σιδηροδρομικής σήραγγας περιλαμβάνονται κρηπιδώματα στα δύο άκρα κατά μήκος της τα οποία εξυπηρετούν την ασφαλή εκκένωση του πληθυσμού σε περίπτωση ατυχήματος πυρκαγιάς. Τα πλαϊνά κρηπιδώματα έχουν ύψος 0.5 m και πλάτος 1 m όπως φαίνεται στο σχήμα 2-5. Όσον αφορά την διάταξη του μηχανικού αερισμού υπολογίστηκε πως η ελάχιστη απόσταση τοποθέτησή τους, είναι 85 m από τον κάθε ανεμιστήρα για να εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη απόδοσή τους. Στην συγκεκριμένη μελέτη οι ανεμιστήρες τοποθετήθηκαν όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2-4. Για τους υπολογισμούς θα χρησιμοποιηθεί μια μηχανή έλξης συρμών όπου η γεωμετρία του έχει προκύψει σύμφωνα με ευρωπαϊκά πρότυπα κατασκευής συρμών και το υλικό κατασκευής του είναι από κατασκευαστικό χάλυβα. Οι ιδιότητες του συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα 2-2.



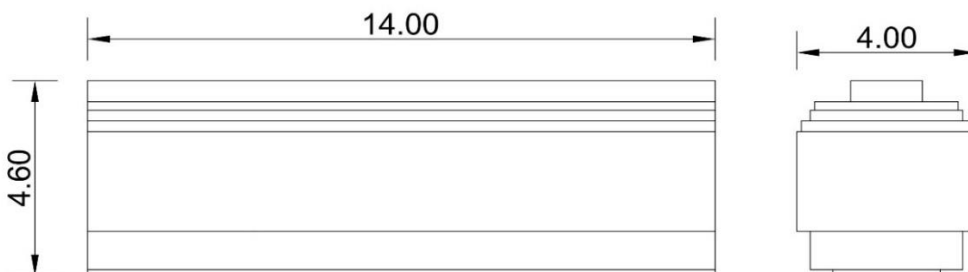
Σχήμα 2-3 Διαμήκης τομή της σήραγγας κατά μήκος



Σχήμα 2-4 Κάτοψη της σιδηροδρομικής σήραγγας



Σχήμα 2-5 Κάθετη τομή σήραγγας του υπολογιστικού χωρίου με την παρουσία τραίνου



Σχήμα 2-6 Περιτύπωμα συρμού εντός της εξεταζόμενης σήραγγας σύμφωνα με τα πρότυπα του Ο.Σ.Ε

2.5.2 Υλικά κατασκευής της σιδηροδρομικής σήραγγας

Τα υλικά που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση της εξεταζόμενης μελέτης τους παρουσιάζονται στον πίνακα 2-1 καθώς και τα υλικά κατασκευής του συρμού στον πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-1 Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων σκυροδέματος

Πυκνότητα	$\rho(\text{kg/m}^3)$	2100
Ειδική θερμότητα	$C_p(\text{Kj}/(\text{kgK}))$	0.88
Αγωγιμότητα	$W/(\text{m}\cdot\text{K})$	1.0
Συντελεστής απορρόφησης	1/m	5.0E4

Πίνακας 2-2 Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων χάλυβα

Πυκνότητα	$\rho(\text{kg/m}^3)$	7850
Ειδική θερμότητα	$C_p(\text{Kj}/(\text{kgK}))$	0,46
Αγωγιμότητα	$W/(\text{m}\cdot\text{K})$	50,2
Συντελεστής απορρόφησης	1/m	5.0E4

2.5.3 Περιγραφή του μηχανικού αερισμού

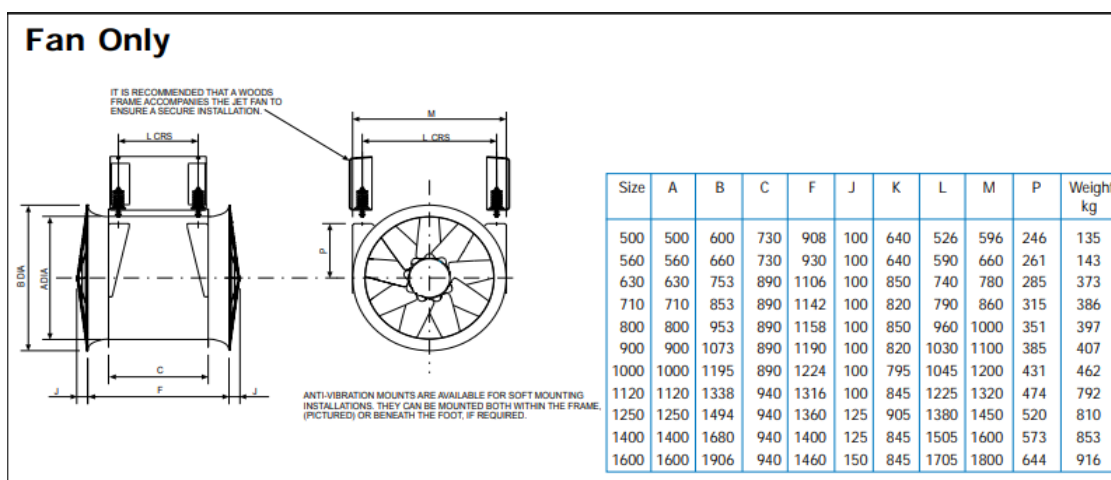
Χρησιμοποιήθηκε διαμήκης αερισμός σύμφωνα με τον χρόνο ενεργοποίησης προσδιορίστηκε στα 4 λεπτά από την έναρξη της φωτιάς. Ο χρόνος αυτός προέκυψε από τον συνυπολογισμό του χρόνου εντοπισμού (2 λεπτά), του χρόνου συνειδητοποίησης (1 λεπτό) και του χρόνου επικοινωνίας, μετάδοσης της πληροφορίας και έναρξης του μηχανικού αερισμού από το κέντρο ελέγχου (1 λεπτό). Ο χρόνος εντοπισμού συμβαίνει για χρονικό 120 δευτερολέπτων από την έναρξη της φωτιάς ο χρόνος συνειδητοποίησης συμβαίνει στα 180 δευτερόλεπτα Για λόγους σταθερής παροχής τάσης η ενεργοποίηση του επόμενου ανεμιστήρα

ώσης γίνεται 5 δευτερόλεπτα μετά τον προηγούμενο και αποδίδει την μέγιστη παροχή του σε χρονικό διάστημα 30 δευτερολέπτων.

Κατά μήκος της σήραγγας τοποθετήθηκαν οχτώ ανεμιστήρες ώσεως σε τέσσερις ομάδες των δύο οι οποίοι ενεργοποιούνται σύμφωνα με τον παραπάνω τρόπο. Το πρώτο ζευγάρι ανεμιστήρων τοποθετείται σε απόσταση 50 m από την είσοδο της σήραγγας και σε απόσταση 0.5 μέτρων από το τοίχωμα. Η επόμενη ομάδα απέχει 125 m από την προηγούμενη και 70 m από την εστία της φωτιάς ενώ η τρίτη ομάδα απέχει 150 m από την δεύτερη. Κλείνοντας η τελευταία ομάδα βρίσκεται 50 m από την έξοδο της σήραγγας.

2.6 Επιλογή μοντέλου ανεμιστήρα

Η επιλογή του ανεμιστήρα έγινε από τον κατασκευαστικό κατάλογο της WOODS air movement σύμφωνα με τον οποίο οι πραγματικές διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά μεγέθη του αναγράφονται παρακάτω σχήμα 2-7.



Σχήμα 2-7 Χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη του ανεμιστήρα

Το συνολικό μήκος του ανεμιστήρα είναι τα 3 μέτρα ,το πλάτος τα 100 εκατοστά ενώ η χαρακτηριστική του διάμετρος είναι 0.9 m

50 Hz TRULY REVERSIBLE RANGE

Fan Type	Speed rev/min	Blade Angle (°)	Thrust (N)	Volume Flow	Outlet Velocity (m/s)	Absorbed Power kW	N/kW	Frame Size	Motor Rating (kW)	Sound Power dBW	Sound Pressure dB(A)
50JTS	2900	30	146	5	25.5	3.2	45.6	F2225	3.3	94	59
50JTS	2900	40	215	6	30.6	6.2	34.7	F2229	6.5	97	62
56JTS	2900	32	247	7	28.4	6.5	37	F2229	6.5	98	64
56JTS	2900	35	278	7.5	30.5	8	32.7	D132/19	8.5	99	65
56JTS	2900	40	333	8.2	33.3	11	30.3	D132/22	11	100	66
63KTS	2900	25	295	8.7	27.9	8.1	34.7	D132/19	8.5	98	65
63KTS	2900	31	380	9.9	31.8	12.3	30.2	D160/18	13	101	68
63KTS	2900	36	445	10.8	34.6	16.8	25.4	D160/23	17.5	103	70
63KTS	2900	44	552	12.1	38.8	25.8	20.4	D160/32	27	105	72
71KTS	2950	28	545	13.7	34.6	17.4	31.3	D160/23	17.5	103	71
71KTS	2950	31	635	14.7	37.1	21.6	29.4	D160/28	22	105	73
71KTS	2950	34	730	15.5	39.2	26.6	27.4	D160/32	27	106	74
71KTS	2950	40	938	17	42.9	38.8	24.2	D180/40	40	108	76
80JTS	1450	30	242	10.6	21.1	4.1	59	F2249	4.2	89	55
80JTS	1450	36	309	12	23.9	6.2	49.8	D132/18	6.3	93	59
80JTS	1450	41	368	13.1	26.1	8.5	43.3	D132/24	9	96	62
90JTS	1450	32	422	15.5	24.4	8.6	49.1	D132/24	9	94	60
90JTS	1450	38	532	17.4	27.3	12.9	41.2	D160/20	13	98	64
90JTS	1450	42	609	18.7	29.4	16.4	37.1	D160/26	17	100	66
100JTS	940	33	290	14.2	18.1	4.2	69	D132/19	4.5	88	52
100JTS	940	39	350	16	20.4	6.1	57.4	D132/26	6.3	92	56
100JTS	1470	29	600	20.4	26	12.5	48	D160/20	13	96	64
100JTS	1470	33	710	22.2	28.3	16.2	43.8	D160/26	17	98	66
100JTS	1470	40	875	25.6	32.6	24.6	35.6	D160/40	26	103	71
100JTS	1470	44	960	27.7	35.3	30.5	31.5	D180/40	32	105	73

Σχήμα 2-8 Πίνακας χαρακτηριστικών ιδιοτήτων ανεμιστήρα.

Τα χαρακτηριστικά του ανεμιστήρα που επιλέχθηκε για την παρούσα μελέτη συγκεντρώνονται συνοπτικά στον πίνακα 2-3.

Πίνακας 2-3 χαρακτηριστικών ιδιοτήτων ανεμιστήρα που επιλέχθηκε

Τύπος ανεμιστήρα	100JTS
Παροχή (m ³ /s)	16
Ταχύτητα εκροής (m/s)	20.4
Thrust(N)	350
Καταναλισκόμενη ισχύς (KW)	4.2

3 Μεθοδολογία

3.1 Υπολογιστικά Μοντέλα

Τα τελευταία είκοσι χρόνια έχει δημιουργηθεί η ανάγκη για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού πυροπροστασίας που να ακολουθούν τις εκάστοτε ισχύουσες νομικές διατάξεις. Η αξιολόγηση της αποδοτικότητας δίνεται από την δυνατότητα να εξεταστούν εναλλακτικές σχεδιαστικές επιλογές προκειμένου να επιτευχθεί το καταλληλότερο επίπεδο ασφαλείας. Προκειμένου να προσεγγίσουν μια ικανή λύση οι ερευνητές επενδύουν σε λογισμικά μοντελοποίησης φωτιάς τα οποία θα τους επιτρέψουν να προσομοιάσουν τα υπό μελέτη σενάρια βάση των προαναφερθέντων κανονισμών. Αν και τα φαινόμενα που εμπλέκονται σε περίπτωση πυρκαγιάς είναι πολύπλοκα η μαθηματική τους μοντελοποίηση συνεχώς και αυξάνεται. Τα προβλήματα μηχανικής ρευστών όπως η παραγωγή και μοντελοποίηση της τύρβης ακόμα και της καύσης δεν έχουν επιλυθεί πλήρως και αποτελούν σημαντική πρόκληση από μόνα τους. Για την παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο ανοιχτός κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής και προσομοίωσης φωτιάς FDS (McGrattan, Hostikka et al. 2020).

Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής FDS

Ο κώδικας FDS αναπτύχθηκε από το NIST σε συνεργασία με τον τεχνολογικό ερευνητικό κέντρο VTT της Φιλανδίας. Πρόκειται για ένα μοντέλο υπολογιστικής ρευστομηχανικής που επιλύει αριθμητικά τις εξισώσεις Navier-Stokes, με έμφαση σε, θερμικές ροές χαμηλών ταχυτήτων, στην παραγωγή καπνού και την μεταφορά μάζας και θερμότητας (McGrattan and Forney 2004). Ο κώδικας χρησιμοποιεί τις απλοποιημένες εξισώσεις καύσης για χαμηλούς αριθμούς Mach. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιείται για την επίλυση των μερικών παραγώγων των εξισώσεων διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας.

Ο αλγόριθμος επιλύει το ροϊκό πεδίο με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών δευτέρας τάξεως για τις χωρικές και χρονικές παραγώγους με την μέθοδο επίλυσης τύπου πρόβλεψης-διόρθωσης (predictor-corrector). Η μέθοδος

πρόβλεψης διόρθωσης υπολογίζει το επόμενο σημείο της λύσης βασιζόμενο σε προηγούμενα σημεία και στη συνέχεια διορθώνει τις προβλέψεις με την χρήση κατάλληλης σχέσης. Αρχικά γίνεται μια υπόθεση για τα βαθμωτά μεγέθη του ροϊκού πεδίου (θερμοκρασία, πυκνότητα και πίεση) και στην συνέχεια με την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, εκφρασμένες υπό μορφή πεπερασμένων διαφορών, επιλύεται το πεδίο των ταχυτήτων, με χρήση του πεδίου των πιέσεων, όπου και προκύπτουν οι νέες τιμές του πεδίου ταχυτήτων. Κατόπιν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις διατήρησης υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές της πίεσης και έτσι λαμβάνονται νέες τιμές για την πίεση και την ταχύτητα. Η επανάληψη των παραπάνω βημάτων επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση των τιμών των ταχυτήτων .

Το πρόγραμμα FDS, λύνει τα τυρβώδη μεγέθη του πεδίου, με το μοντέλο τύρβης των μεγάλων δινών (LES: Large Eddy Simulation). Το μοντέλο αυτό επιλύει σ' ένα ροϊκό πεδίο τις δίνες μεγάλης κλίμακας, οι οποίες είναι υπεύθυνες και για τη τυρβώδη κινητική ενέργεια και επιδρούν στην ανάπτυξη του πεδίου ροής. Ενώ οι μικρότερες δίνες είναι υπεύθυνες για την απορρόφηση και καταστροφή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Οι μικρές δίνες εύκολα μπορούν να μοντελοποιηθούν και να υπολογιστούν οι μέσες τιμές τους εφαρμόζοντας χωρικό φίλτρο ανάλογα με τη διάστασή τους, ενώ οι μεγάλες δίνες επιλύονται. Στο πρόγραμμα FDS για τη μοντελοποίηση των μεγάλων δινών χρησιμοποιείται το μοντέλο Smagorinsky με δυνατότητα χρήσης δυναμικού συντελεστή στις νεότερες εκδόσεις.

Με την χρήση της μεθόδου LES είναι φανερό πως απαιτεί υψηλή υπολογιστική ισχύ αφού επιλύει της εξισώσεις Navier-Stokes σε χρονικά μεταβαλλόμενα χρονικά βήματα. Ωστόσο το μοντέλο έχει ξεπεράσει αρκετά εμπόδια και καθίσταται αποτελεσματικό για την εξισορρόπηση υπολογιστικού κόστους και ακρίβειας. Με αυτόν τον τρόπο η προσέγγιση και η επίλυση τρισδιάστατων φαινομένων που μπορεί να συμπεριλαμβάνει διάφορα μεταβατικά φαινόμενα είναι συνηθισμένη.

Οι διατύπωση των εξισώσεων και οι αριθμητική απεικόνιση των αλγορίθμων περιγράφονται αναλυτικά στον οδηγό του κώδικα FDS (McGrattan 2006). Το

κυρίως πρόγραμμα είναι γραμμένο σε FORTRAN 90 και C και η πρώτη του κυκλοφορία έγινε διαθέσιμη το 2000. Ο κώδικας φέρει μεγάλη υποστήριξη από την διεθνή κοινότητα και συνεχώς διορθώνεται και βελτιώνεται. Για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 6.6.7.

3.2 Μαθηματικό μοντέλο

Θεμελιώδεις εξισώσεις

Για την αριθμητική προσέγγιση των μερικών παραγώγων των εξισώσεων διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών δευτέρας τάξης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις διατήρησης που επιλύονται στον κώδικα FDS:

α) Εξίσωση Διατήρηση της Μάζας

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας γράφεται συνήθως σε όρους των κλασμάτων μάζας για κάθε ξεχωριστό αέριο χημικό συστατικό Y_α :

$$\frac{\partial(\rho Y_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho Y_\alpha \vec{u} = \nabla \cdot \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha + \dot{m}'''_{b,\alpha} + \dot{m}'''_\alpha \quad (3-1)$$

αθροίζοντας όλες τις εξισώσεις για κάθε ξεχωριστό αέριο χημικό συστατικό (Εξίσωση 1-1), θα προκύψει ότι $\sum Y_\alpha = 1$, όπου $\sum Y_\alpha$ το άθροισμα όλων των κλασμάτων μάζας του μείγματος. Ακόμη ισχυρισμός δεν είναι αληθής, για κάθε περίπτωση. Ωστόσο, οι εξισώσεις μεταφοράς επιλύονται για τη συνολική μάζα και για όλα (εκτός από ένα) συστατικά, υπονοώντας ότι ο όρος διάχυσης των χημικών ειδών επιλέγεται έτσι ώστε το άθροισμα όλων των όρων διάχυσης να είναι μηδέν.

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις του FDS κώδικα είναι:

α) Εξίσωση συνέχειας της μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3-2)$$

β) Εξίσωση Διατήρηση Ορμής

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_{d,i} + \dot{m}_b''' u_{b,i} \quad (3-3)$$

$$\varepsilon = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 2\mu (S_{ij} S_{ij} - \frac{1}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})^2), S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3-4)$$

εφαρμόζοντας το Favre filter

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b'''} \tilde{u}_{b,i} \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}^{sgs}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b'''} \tilde{u}_{b,i} \quad (3-6)$$

όπου ο όρος δύναμης fb αντιπροσωπεύει τις εξωτερικές δυνάμεις όπως π.χ. η οπισθέλκουσα.

$$\tau_{ij} = \mu \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right) \quad (3-7)$$

όπου δ_{ij} είναι η σταθερά Kroneker, $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$

S_{ij} είναι ο τανυστής παραμόρφωσης, μ είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

γ) Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

όρος ε εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού και δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon = \tau_{ij} \nabla \quad (3-8)$$

δ) Εξίσωση για κάθε αέριο συστατικό που μεταφέρεται στον αέρα:

$$\frac{\partial(\rho Z_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Z_\alpha \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Z_\alpha) + \dot{m}_\alpha''' \quad (3-9)$$

Ροη χαμηλών αριθμών Mach

Οι Rehm και Baum [9] παρατήρησαν ότι για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας όπως η φωτιά, η χωρική και η χρονική επίλυση της πίεσης p , μπορεί να αποσυντεθεί σε μια πίεση υποβάθρου (background), $\bar{p}(z, t)$, συν μια διαταραχή, $\tilde{p}(x, y, z, t)$ όπου μόνο η πίεση υποβάθρου που διατηρείται στην εξίσωση κατάσταση (ιδανικός νόμος για το αέριο):

$$\bar{p} = \rho T R \sum_a \frac{Z_a}{W_a} = \frac{\rho R T}{\bar{W}} \quad (3-10)$$

Ως z ορίζεται η χωρική συντεταγμένη προς την κατεύθυνση της βαρύτητας. έτσι, ώστε η διαστρωμάτωση της ατμόσφαιρας να συμπεριλαμβάνεται στην πίεση του υπόβαθρου. Η διαταραχή, της πίεσης \tilde{p} , οδηγεί στην κίνηση ρευστού.

Η δεύτερη συνέπεια της ροής με χαμηλό αριθμό Mach είναι ότι η εσωτερική ενέργεια, e , και η ενθαλπία, h , μπορεί να σχετίζεται με όρους θερμοδυναμικής του υποβάθρου πίεσης: $h = e + \bar{p}/\rho$. Η εξίσωση διατήρησης της ενέργεια μπορεί να γραφτεί με όρους "λογικής" ενθαλπίας, h_s :

$$\frac{\partial(\rho h_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \dot{q}'' \quad (3-11)$$

όπου \dot{q}''' είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου. Ο όρος \dot{q}'' είναι η ροή θερμότητας από ακτινοβολία και από συναγωγή και είναι ίση με

$$\dot{q}'' = -k \nabla T - \sum_a h_{s,a} \rho D_a \nabla Y_a + \dot{q}_r'' \quad (3-12)$$

Όπου k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και \vec{q}'' είναι η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας σε στερεή επιφάνεια.

Η εξίσωση (3-11) δεν επιλύεται ρητά. Αντ' αυτού, η απόκλιση της ταχύτητας υπολογίζεται ως εξής:

$$\nabla \cdot u = \frac{1}{\rho h_s} \left[\frac{D}{Dt} (\bar{p} - \rho h_s) + \dot{q}''' + \dot{q}_r''' - \dot{q}_r''' - \nabla \cdot \dot{q}'' \right] \quad (3-13)$$

Η επέκταση των παραγώγων υλικών στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης (2.10) παράγει ένα αρκετά περίπλοκο έκφραση για την απόκλιση που περιλαμβάνει τους όρους προέλευσης και διάχυσης από τη μάζα, το είδος και την ενέργεια εξισώσεις συντήρησης. Η σημασία του για τον συνολικό αλγόριθμο είναι ότι μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μόνο το θερμοδυναμικές μεταβλητές ρ , Z και p . Όπως θα φανεί παρακάτω, ο τρόπος προώθησης της ταχύτητας ροής στο Δt χρόνος είναι η πρώτη εκτίμηση των θερμοδυναμικών μεταβλητών στο επόμενο βήμα, ο υπολογισμός της απόκλισης και, στη συνέχεια λύστε μια εξίσωση για την πίεση που θα εγγυηθεί ότι η απόκλιση της τρέχουσας ταχύτητας είναι ίδια σε αυτό που υπολογίζεται μόνο από τις θερμοδυναμικές μεταβλητές

Σταθερά Smagorinsky

Για την μοντελοποίηση του ιξώδους των δινών σύμφωνα με την ανάλυση Smagorinsky προκύπτει ότι:

$$\mu_t = \rho (C_s \Delta)^2 |S| \quad (3-14)$$

$$|S| = \sqrt{\left(2S_{ij}S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla u)^2 \right)} \quad (3-15)$$

Όπου $C_s=0.2$ είναι ένας συντελεστής που προσδιορίζεται θεωρητικά σύμφωνα με το FDS Verification Guide και $\Delta=(\delta x \delta y \delta z)^{1/3}$ είναι το πλάτος του φίλτρου. Ωστόσο ο συντελεστής Smagorinsky είναι εξαρτώμενος από τον τύπο της ροής. Για παράδειγμα σε διαμητικές ροές ο συντελεστής C_s χρειάζεται να μειωθεί περίπου στο 0.1.

Δυναμικός συντελεστής Smagorinsky

Για το δυναμικό μοντέλο Smagorinsky η προσέγγιση του συντελεστή C_s στην εξίσωση (3-14) δεν λαμβάνεται ως σταθερός αλλά υπολογίζεται βάση των τοπικών συνθηκών ροής. Ως συνέπεια της χρήσης αυτού τα αποτελέσματα είναι καλύτερα στην πρόβλεψη των τάσεων υποπλεγματικής κλίμακας.

$$\mu_t = \rho(C_s\Delta)^2 |\tilde{S}| \quad (3-16)$$

$$(C_s\Delta)^2 = \frac{L_{ij}M_{ij}^{dev}}{M_{ij}^{dev}M_{ij}^{dev}} \quad (3-17)$$

Όπου L_{ij} είναι οι τάσεις Leonard όπου υπολογίζονται ως

$$L_{ij} = \overline{\rho\tilde{u}_i\tilde{u}_j} - \frac{\overline{\rho\tilde{u}_i}\overline{\rho\tilde{u}_j}}{\overline{\rho}} \quad (3-18)$$

Ο ρυθμός μεταβολής των τάσεων,

$$|\tilde{S}| = (2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ji})^{0.5} \quad (3-19)$$

Μοντέλο Deardorff

$$\mu_t = \rho \left(C_v\Delta \sqrt{k_{sgs}} \right) \quad (3-20)$$

$$k_{sgs} = \frac{1}{2}((\bar{u} - \hat{u})^2 + (\bar{v} - \hat{v})^2 + (\bar{w} - \hat{w})^2) \quad (3-21)$$

Όπου \bar{u} είναι ο μέσος όρος της ταχύτητας u στο κέντρο του κελιού και \hat{u} ο σταθμισμένος όρος της ταχύτητας στα εφαπτόμενα κελιά.

4 Υπολογιστική παραμετροποίηση

4.1 Περιγραφή υπολογιστικού χωρίου

Για τον υπολογισμό όλων των προς μελέτη μετρούμενων μεγεθών ροής είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός υπολογιστικού μοντέλου που να αντιπροσωπεύει το πραγματικό αντικείμενο σε πραγματικές ή σε υπό κλίμακα διαστάσεις. Το υπολογιστικό μοντέλο μελέτης σχεδιάστηκε με την χρήση του λογισμικού PYROSIM (McGrattan 2013) ενός γραφικού περιβάλλοντος απεικόνισης του ανοιχτού κώδικα FDS (Fire Dynamic Simulation). Το υπολογιστικό χωρίο σχεδιάστηκε σύμφωνα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας όπως αναφέρθηκαν παραπάνω στο κεφάλαιο 2.5.1. Το δάπεδο και η οροφή θεωρούνται κλειστά, ενώ είναι σημαντικό να σημειωθεί πως οι ακριβείς διαστάσεις του μοντέλου επεκτείνονται 4 μέτρα εκτός της εσοδου και έξοδου της σήραγγας αντίστοιχα κατά τον διαμήκη άξονα x. Η επιλογή αυτή έγινε με σκοπό η ροή εντός της σήραγγας να αντιμετωπίζεται φυσικά ως μέρος της λύσης των θεμελιωδών εξισώσεων διαφορετικά η πίεση υπολογίζεται με υπόθεση. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του μοντέλου και να προσομοιώσουμε τις περιβάλλουσες εξωτερικές συνθήκες.

4.2 Υπολογιστικό πλέγμα

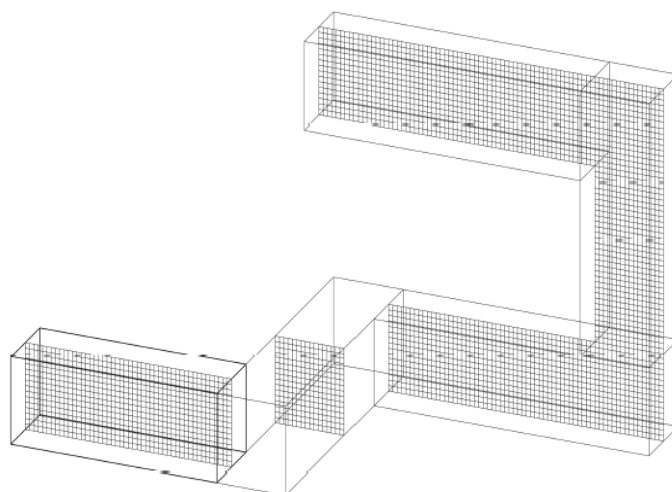
Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η περιγραφή της δομής του υπολογιστικού πλέγματος και η αιτιολόγησή της. Αρχικά το πλέγμα κατασκευάστηκε σύμφωνα με τις διαστάσεις της σήραγγας εξαιρώντας από αυτή την είσοδο και την έξοδο για λόγο που αναφέρεται σε παρακάτω κεφάλαια. Επιπλέον αναφέρουμε ότι έγινε παραμετρική μελέτη για την επιλογή του πλέγματος σε σημεία όπου θεωρήθηκε ότι η διάσταση του πλέγματος επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Λεπτομερή περιγραφή δίδεται στα παρακάτω υπό κεφάλαια. Για την κατασκευή του πλέγματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PYROSIM 2020.

4.2.1 Ορισμός του υπολογιστικού πλέγματος

Το πλέγμα ορίζεται ως το σύνολο των κελιών που απαρτίζουν το υπολογιστικό χωρίο με την χρήση του ανοιχτού κώδικα FDS και ορίζονται με ομοιόμορφα εξάεδρα κυβικών κελιών σε καρτεσιανές συντεταγμένες και ενιαίο όγκο ελέγχου. Για παράδειγμα εάν έχουμε ένα πλέγμα το οποίο είναι αυτής της μορφής &MESH IJK=10,20,30, XB=0.0,1.0,0.0,2.0,0.0,3.0/ σημαίνει πως έχουμε έναν όγκο ελέγχου αποτελούμενος από $10 \times 20 \times 30 = 6000$ κελιά τα οποία επεκτείνονται 1 m κατά την x διεύθυνση 2 m κατά την y και 3 m κατά την z. Σημειώνεται ότι επειδή κατά τη διάρκεια των υπολογισμών χρησιμοποιείται η μέθοδος FFT (Fast Fourier Transformation) οι διαστάσεις του πλέγματος κατά την y, z διεύθυνση είναι απαραίτητο να ακολουθούν ρητά κάποιους κανόνες. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό η δεύτερη και τρίτη διάσταση του πλέγματος πρέπει να είναι της μορφής $2k \times 3m \times 5n$ όπου k, m, n είναι ακέραιοι αριθμοί.

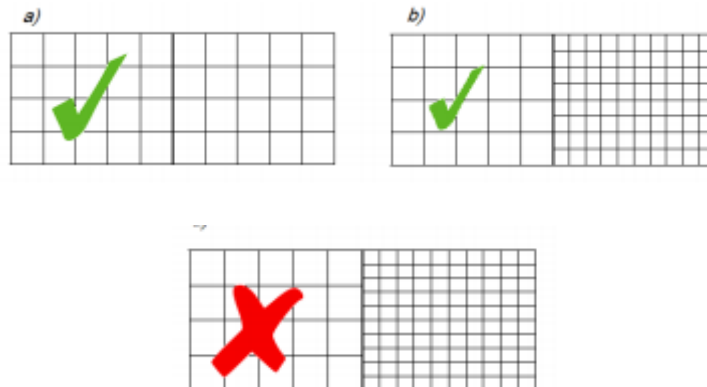
4.2.2 Πολλαπλά πλέγματα

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του υπολογιστικού χωρίου είναι ότι μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα πλέγματα τα οποία μπορούν να εφάπτονται μεταξύ τους αν και αυτό δεν είναι πάντα απαραίτητο.



Σχήμα 4-1 An example of a multiple-mesh geometry (McGrattan, Hostikka et al. 2020)

Οι κανόνες που πρέπει να ακολουθούνται ώστε να μεταβιβάζονται οι πληροφορίες μεταξύ των πλεγμάτων σωστά αφορούν την κατά μεταξύ τους αντιστοιχία των κελιών που τα αποτελούν. Ένα παράδειγμα καλής συσχέτισης μεταξύ πλεγμάτων είναι το παρακάτω με τις περιπτώσεις a) και b) να ισχύουν ενώ η c) να μην ενδείκνυται.



Σχήμα 4-2 Παραδείγματα κανόνων της χρήσης πλέγματος.(McGrattan, Hostikka et al. 2020)

4.2.3 Παράλληλη επεξεργασία του κώδικα FDS με πρωτόκολλο MPI (Message Passing Interface)

Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί πως με την χρήση πολλαπλών πλεγμάτων είναι δυνατή η παράλληλη διεργασία MPI (Message Passing Interface). Πρόκειται για μια δυνατότητα η οποία επιτρέπει τον κατακερματισμό του υπολογιστικού χωρίου προκειμένου να κατανέμεται σε περισσότερους επεξεργαστές. Συνήθως κάθε πλέγμα καταλαμβάνει και μια διεργασία που αντιστοιχεί στον δικό της επεξεργαστή. Η προτεραιότητα των διεργασιών παίζει καθοριστικό ρόλο για αυτό επιλέγονται πρώτα τα πλέγματα με την υψηλότερη ανάλυση. Με το τρόπο αυτό μειώνεται σημαντικά ο υπολογιστικός χρόνος υπολογισμού της επίλυσης χωρίς αυτό να οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συνεχής αύξηση των πλεγμάτων οδηγεί σε μείωση του υπολογιστικού χρόνου αναλογικά.

4.2.4 Επιλογή – Ανάλυση πλέγματος

Οι υπολογιστικές εφαρμογές διακρίνονται για την ικανότητα τους να προσφέρουν ακρίβεια και αξιοπιστία μέσω των αριθμητικών μεθόδων τους. Στην περίπτωση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής ένα μέσο της ακρίβειας αποτελεί η ανάλυση του πλέγματος. Για την προσομοίωση του πλουμίου φωτιάς χρησιμοποιείται η αδιάστατη έκφραση $D^*/\delta x$ ως ένα μέτρο διακριτοποίησης έτσι ώστε να λύνεται το πεδίο ροής σωστά. Με D^* ορίζεται η χαρακτηριστική διάμετρος φωτιάς και δx χαρακτηριστικό μέγεθος του κελιού. (McGrattan, Hostikka et al. 2020)

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{C_p T_\infty \rho_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (4-1)$$

Όπου: \dot{Q} ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας λόγω της φωτιάς,

$\rho_{amb} = 1,2 \text{ kg / m}^3$ η πυκνότητα του αέρα περιβάλλοντος,

$C_p = 1 \text{ kJ / kgK}$ η ειδική θερμοχωρητικότητα,

$T_{amb} = 303 \text{ K}$ η θερμοκρασία περιβάλλοντος και

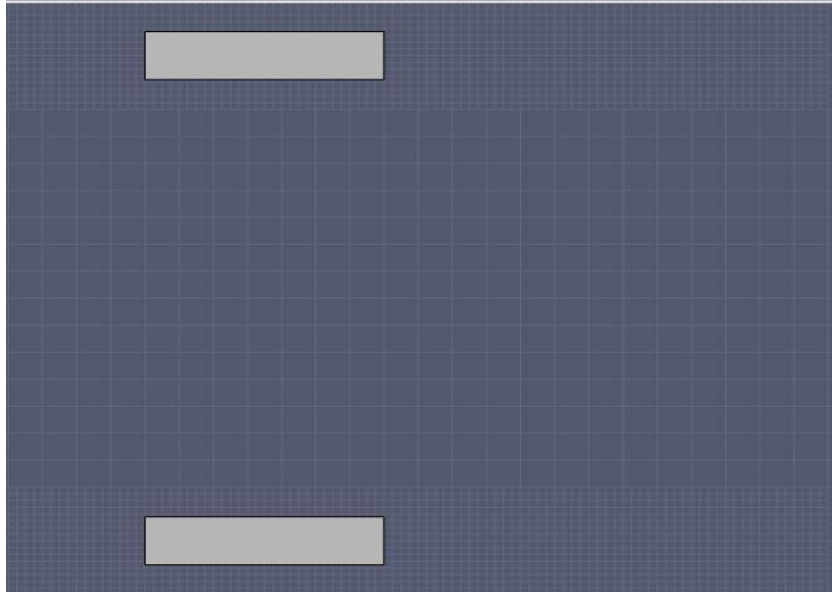
$g \text{ m/s}^2 = 9,81 / \text{η σταθερά της βαρύτητας}$

Για την επίλυση της φωτιάς έγινε με βάση την ευαισθησία πλέγματος των (States, United States et al. (2006)) με λόγο $D^*/\delta x$. Αυτές οι τιμές έχουν αποδεχθεί χρήσιμες στο να λύνουν επαρκώς την συμπεριφορά δυναμικού πλουμίου φωτιάς. Με βάση τα παραπάνω η χαρακτηριστική διάσταση κελιού που επιλέχθηκε είναι $\delta x = 0.25 \text{ m}$. Με αυτόν τον τρόπο η διακριτική ικανότητα του πλέγματος είναι ικανοποιητική για την επίλυση του σεναρίου φωτιάς χωρίς να αυξάνεται το υπολογιστικό κόστος υπέρμετρα.



Σχήμα 4-3 Απεικόνιση πλέγματος στο πλούμιο φωτιάς 0.25 m ανάλυσης

Όσον αφορά το σύστημα μηχανικού αερισμού η μελέτη των φαινομένων που αναπτύσσονται χρειάζονται μεγαλύτερη ανάλυση πλέγματος αφού οι διακυμάνσεις στο πεδίο της ταχύτητας είναι πολύ μεγαλύτερες. Σύμφωνα με την έρευνα των (v.d.Giesen, Penders et al. 2011), (Gonzalez 1984), (Awbi 2004) που έγινε κατέληξαν στο υπολογιστικό διάστημα διακριτοποίησης κατά το οποίο η ταχύτητα ροής συγκλίνει με τις πειραματικές μετρήσεις και τα εμπειρικά μοντέλα. Στην έρευνα συμπεριλήφθηκαν η μέση ταχύτητα ροής, η παραγωγή της τύρβης ή ο υπολογισμός της μέσω διαφορετικών μοντέλων και η συμβολή της πυκνότητας του πλέγματος στον υπολογισμό της ταχύτητας. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία επιλέχθηκε πλέγμα με διαστάσεις 0.125 m με χρήση υποπλεγματικού μοντέλου constant Smagorinsky.



Σχήμα 4-4 Απεικόνιση πλέγματος ανεμιστήρα ώσης 0.125 m ανάλυσης

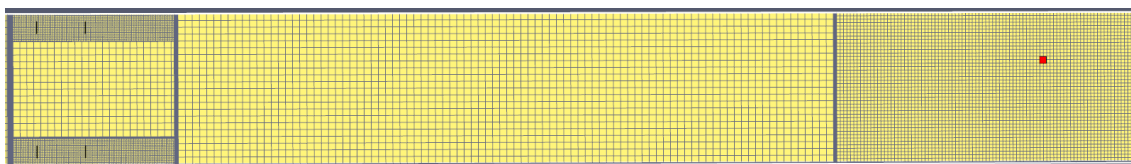
4.2.5 Κατασκευή πλέγματος

Το υπολογιστικό πλέγμα εκτείνεται 4 μέτρα ανάντη της σήραγγας και 4 μέτρα κατόντι. Οι υπόλοιπες διαστάσεις του ταυτίζονται με εκείνες της πραγματικής γεωμετρίας. Οι διαστάσεις των κελιών που χρησιμοποιήθηκαν είναι 0.5 m για τις περιπτώσεις χαμηλού ενδιαφέροντος όπως η είσοδος και η έξοδος της σήραγγας. Όσον αφορά την χρήση 0.25 m ανάλυσης επιλέχθηκε για να υπολογιστεί η λίμνη φωτιάς. Τέλος η ανάλυση 0.125 m κρίθηκε κατάλληλη για να προλέξει την ταχύτητα των ανεμιστήρων ώσης. Όλα τα πλέγματα είναι ομοιόμορφα και εφάπτονται στα εκάστοτε όρια τους σύμφωνα με τους κανόνες που αναφέρθηκαν.

4.2.6 Δομή πλέγματος

Το υπολογιστικό χωρίο αποτελείται συνολικά από 17 διαφορετικά πλέγματα στην περίπτωση όπου μελετάται μόνο η επίδραση του μηχανικού αερισμού και 19 διαφορετικά πλέγματα στα δύο σενάρια πυρκαγιάς. Ανεξάρτητα από την εξεταζόμενη περίπτωση η διάρθρωση του υπολογιστικού χωρίου διακρίνεται σε μια βασική δομή. Συγκεκριμένα αναφερόμαστε στην είσοδο και έξοδο της σήραγγας καθώς και στο συμμετρικό επίπεδο ροής καθώς και σε σημεία όπου δεν υπάρχει σύστημα μηχανικού αερισμού ή εμφάνιση πυρκαγιάς. Το μέγεθος του πλέγματος είναι 0.5 m στις περιπτώσεις χαμηλού ενδιαφέροντος 0.25 m στην

περίπτωση ανάπτυξης πυρκαγιάς και 0.125 για την μελέτη μηχανικού αερισμού όπως φαίνονται στο σχήμα.



Σχήμα 4-5 Απεικόνιση των περιοχών πύκνωσης και αραιώσης πλέγματος

4.2.7 Ευαισθησία πλέγματος

Έχοντας υπόψιν τα σφάλματα αποκοπής ή διακριτοποίησης που προκύπτουν από τις αριθμητικές μεθόδους των προγραμμάτων ρευστομηχανικής πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της ευαισθησίας πλέγματος. Συγκεκριμένα αναφερόμαστε στην άμεση σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που λαμβάνουμε μέσω της εκτέλεσης ενός σεναρίου με διαφορετική ανάλυση πλέγματος. Οι συνθήκες που επικρατούν σε όλες τις δοκιμές καθώς και οι διαστάσεις όσο και χρονική διάρκεια προσομοίωσης είναι ίδιες που καθιστούν την διαδικασία επαναλαμβανόμενη. Συγκεκριμένα, συγκρίνουμε τις διαφορές που προκύπτουν στο προφίλ ταχύτητας ανά μονάδα ύψους της σήραγγας 10 μέτρα από την εστία της φωτιάς για ένα αραιό ένα μεσαίο και ένα πυκνό πλέγμα. Το αραιό πλέγμα έχει διαστάσεις κελιού $\delta x=0.5$ m το μεσαίο $\delta x=0.25$ m και το πυκνό $\delta x=0.15$ m εφόσον έχουμε εύρος από 0.54-0.135 μέτρα σύμφωνα το παραπάνω κριτήριο D^* . Προκειμένου να εξετάσουμε και να ορίσουμε το στατιστικό σφάλμα που προκύπτει για τα διαφορετικά πλέγματα της προσέγγισης του σφάλματος σύγκλισης χρησιμοποιείται αναλυτική λύση η ακριβής και οι ρυθμοί σύγκλισης μελετώνται γραφικά. Ωστόσο σε πολλά πρακτικά προβλήματα η ακριβής λύση είναι άγνωστη.

Για να υπολογιστεί το σφάλμα χρησιμοποιούμε την σχέση (4-5) μια γνωστή μέθοδος στην υπολογιστική ρευστομηχανική γνωστή ως Grid Convergence Index (GCI) (Roache 1994)]. Αρχικά χρειάζεται να οριστεί ένα αντιπροσωπευτικό μέγεθος κελιού h . Όπου για περιπτώσεις τρισδιάστατης μελέτης ορίζεται ως:

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{1/3} \quad (4-2)$$

Ενώ για περιπτώσεις δυσδιάστατης μελέτης ορίζεται ως:

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta A_i) \right]^{1/2} \quad (4-3)$$

Όπου ΔV_i είναι ο όγκος και ΔA_i η επιφάνεια του η-ιστού κελιού και N είναι ο συνολικός αριθμός κελιών που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς. Είναι επιθυμητό ο λόγος της πύκνωσης $r = h_{\text{coarse}}/h_{\text{fine}}$ να είναι μεγαλύτερος από 1.3 όπως προκύπτει αυτός εμπειρικά. Στην συνέχεια υπολογίζεται το σχετικό σφάλμα

$$e_a^{21} = \left| \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1} \right| \quad (4-4)$$

Όπου το φ_1 είναι η αριθμητική επίλυση του πλέγματος πυκνότερης ανάλυσης και φ_2 η αριθμητική επίλυση που προκύπτει από την αραιότερη ανάλυση πλέγματος. Καταλήγοντας στην τελική σχέση υπολογισμού του στατιστικού σφάλματος ως

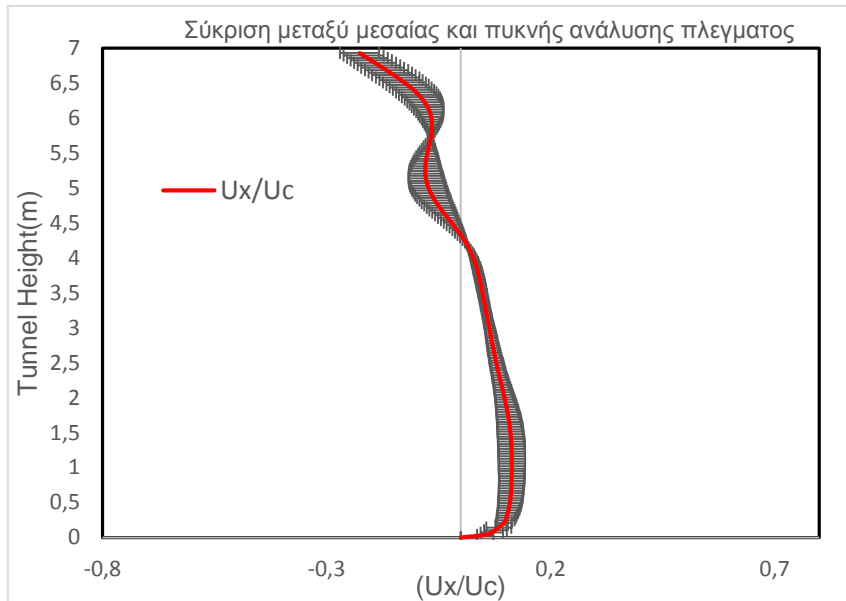
$$GCI_{\text{fine}} = F_s \left(\frac{|e_{21}|}{r_{21}^p} - 1 \right) \quad (4-5)$$

με $F_s=1.25$ είναι συντελεστής ασφάλειας το r_{21} είναι ο λόγος πύκνωσης και το $p=2$ ο δεύτερης τάξης βαθμός διακριτοποίησης.

Πίνακας 4-1 Σενάρια επίλυσης ανεξαρτησίας πλέγματος

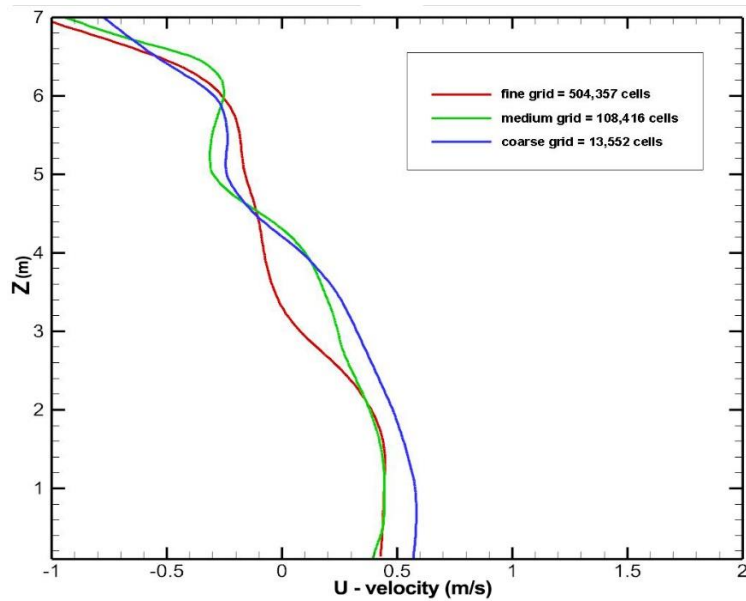
sim no	μέγεθος κελιού	αριθμός κελιών	r_{21}	Χρόνος προσομοίωσης s)	Υπολογιστικός χρόνος
1	0.5 m	13,552	1.67	800	3 hours 58 min
2	0.25 m	108,416	r_{32}	800	7 hours 45 min
3	0.15 m	504,357	2	800	18 hours 36 min

Στο παρακάτω σχήμα 4-6 αναπαρίστανται γραφικά η αδιαστατοποιημένη σύγκριση των αποτελεσμάτων της ταχύτητας μεταξύ της μεσαίας και πυκνής πύκνωσης. Ως μέσο αδιαστατοποίησης χρησιμοποιήθηκε η κρίσιμη ταχύτητα λόγος για την οποία θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 4-6 Απεικόνιση στατιστικού σφάλματος μεσαίου και πυκνού πλέγματος στο προφίλ της ταχύτητας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα προφίλ της μέσης αδιάστατης ταχύτητας ανά μονάδα ύψους της σήραγγας. Η παρουσίαση γίνεται από το πυκνότερο στο αραιότερο πλέγμα με εμφανή τις περιοχές σύγκλισης των λύσεων και αποκλίσεων.



Σχήμα 4-7 Προφίλ ταχύτητας ανά μονάδα ύψους διαφορετικής πύκνωσης πλέγματος.

Σύμφωνα με την στατιστική μελέτη που διεξάχθηκε τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την σύγκριση παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4-2 Στατιστικά αποτελέσματα προφίλ ταχύτητας ανά μονάδα ύψους

Πυκνό-μεσαίο		Μεσαίο-αραιό	
Max	7.8 %	Max	5.9 %
Μέσο σφάλμα	3.6 %	Μέσο σφάλμα	2.8 %

Από ότι παρατηρούμε στο σχήμα 4-7 στα χαμηλότερα ύψη της σήραγγας οι λύσεις της ταχύτητας μεταξύ της μεσαίας και πυκνής διακριτοποίησης συγκλίνουν αρκετά. Ωστόσο η διαφορά αυτή αυξάνεται στο μέσος της σήραγγας όπου εκεί παρουσιάζονται και οι μέγιστες αποκλίσεις σε σχέση με το fine grid.

5 Υπολογιστική μοντελοποίηση του μηχανικού αερισμού

Για τον αποκαπνισμό της σήραγγας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του διαμήκη μηχανικού αερισμού όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Για την μοντελοποίηση των ανεμιστήρων ώσης χρησιμοποιήθηκε η υπορουτίνα του κώδικα FDS HVAC. Έχοντας επιλέξει τον ανεμιστήρα 100JTS, τα χαρακτηριστικά του οποίου ορίζονται στο σχήμα 2-7, 2-8 και στον πίνακα 2-1 όπως διάμετρος, διατομή, το μήκος, η παροχή χρειάζεται να ελέγξουμε την δυνατότητα του λύτη HVAC να προλέξει με όση μεγαλύτερη ακρίβεια τα ονομαστικά του μεγέθη ροής. Η μελέτη αυτή υπολογίζει την α) επίλυση της ταχύτητας ακριβώς πριν την είσοδο και ακριβώς μετά την έξοδο του ανεμιστήρα και β) την δύναμη ώσης (Thrust) του ανεμιστήρα ώσης κατά την λειτουργία του.

Η εξεταζόμενη περίπτωση θα μελετήσει εάν το μήκος διακριτοποίησης επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα καθώς και οι παράμετροι που συμβάλουν σε αυτά όπως ο υπολογισμός της τύρβης. Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων έχουν πραγματοποιηθεί στατιστικές μέθοδοι κατά την δειγματοληψία με στόχο την εξαγωγή του αριθμητικού μέσου της διακύμανσης της ταχύτητας που υπολογίζεται από τον κώδικα. Για την προσέγγιση του προφίλ της ταχύτητας του ανεμιστήρα ορίστηκε ένας κυβικός όγκος ελέγχου με διαστάσεις 4 μέτρα στο ύψος 4 μέτρα στο πλάτος και 8 μέτρα στο μήκος. Ο ανεμιστήρας τοποθετήθηκε στο επίπεδο συμμετρίας του όγκου ελέγχου αποκλείοντας την επίδραση του τοιχώματος στο απόρευμα. Προσδιορίστηκε το αξονοσυμμετρικό του κέντρο έτσι ώστε να συμπίπτει με το κέντρο του τοπικού κελιού του υπολογιστικού χωρίου. Ικανοποιώντας αυτές τις παραδοχές αρχικά δεν λαμβάνουμε υπόψιν την επίδραση της συνθήκης μη ολίσθησης της ροής στο τοίχωμα. Κατά δεύτερον οι μετρήσεις μας λαμβάνονται στο κέντρο της επιφάνειας του κοντινότερου σε απόσταση κελί ($\delta x = 0.125$ m) από την έξοδο του ανεμιστήρα όπου και αυτή επιλύεται εξ ορισμού.

Για την προσέγγιση της ταχύτητας του ανεμιστήρα πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις από τους (v.d.Giesen, Penders et al. 2011). Αντίστοιχη έρευνα έχει γίνει από τους (Holmes 1973) και (Kümmel 2004), όπου

εξέτασαν την μέση ταχύτητα ροής του ανεμιστήρα, με τον δεύτερο να μελετά αγωγούς τετραγωνικής διατομής. Η σχέση (5-1) παρέχει την συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων.

$$\frac{u_m}{u_0} = \left(\frac{0.48}{\frac{ax}{d_0} + 0.145} \right) \quad (5-1)$$

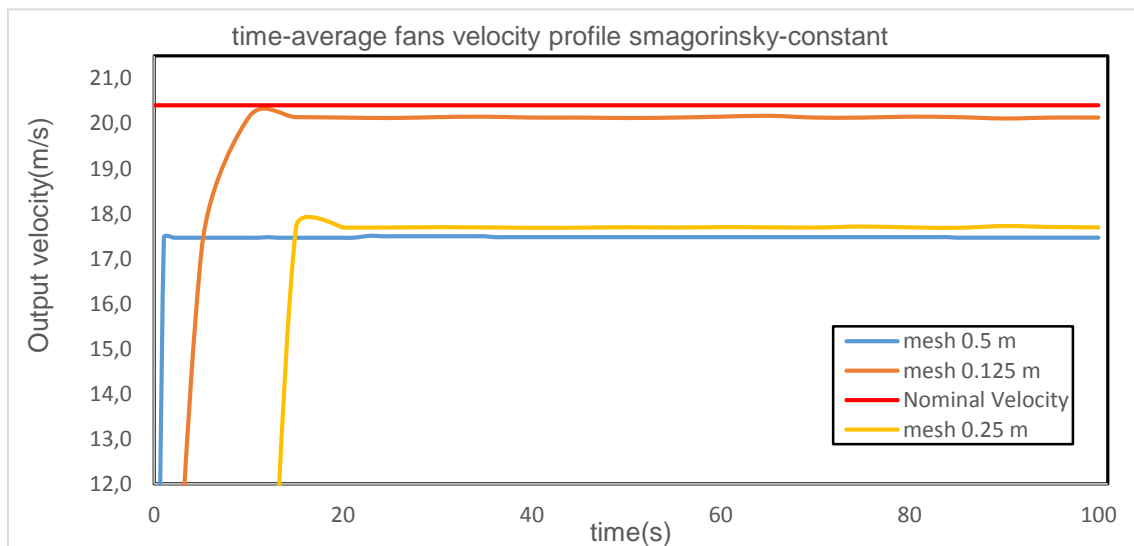
Όπου u_m ισούται με την αξονική ταχύτητα βλέπε σχήμα (1-6) x ορίζεται ως η απόσταση από την έξοδο του ανεμιστήρα , a μια σταθερά που κυμαίνεται από 0.076-0.080 για κυλινδρικούς αγωγούς και d_0 η διάμετρος εξόδου του ανεμιστήρα.

Η δεύτερη προσέγγιση όπως αναφέρεται παραπάνω δίδεται από την σχέση

$$x_0 = \frac{h}{m} \quad (5-2)$$

$$U_{\max}(x) = \frac{h_0}{x} \quad (5-3)$$

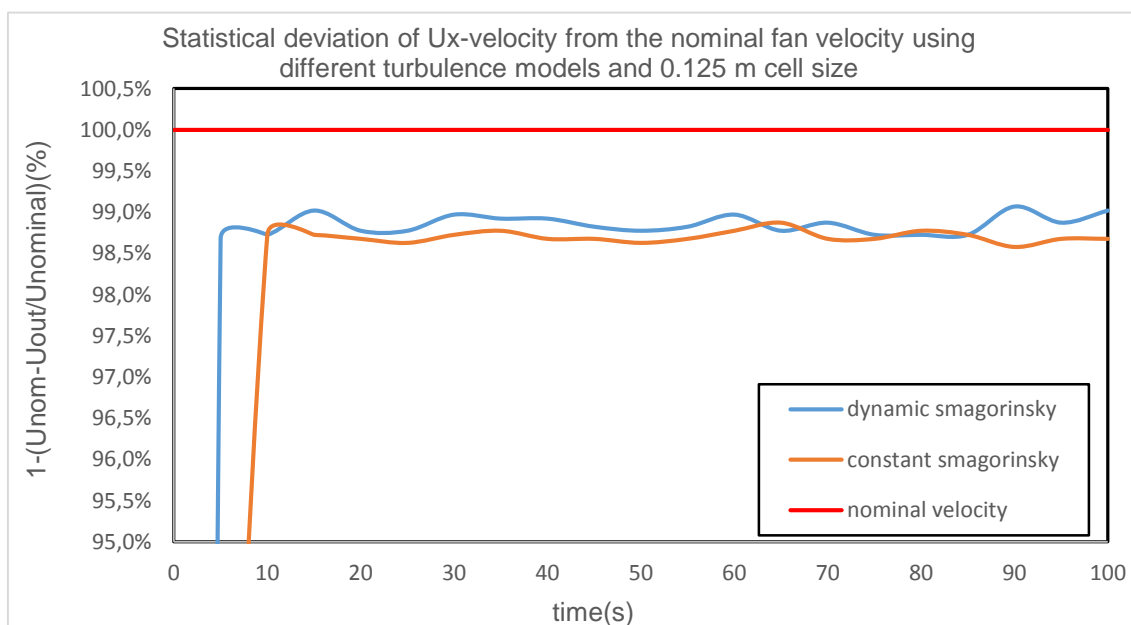
Όπου x_0 είναι το μήκος του δυναμικού πυρήνα της ροής όπως φαίνεται στο σχήμα (1-6) ,h είναι το μήκος της τετραγωνικής διατομής και m μια σταθερά η οποία κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.12-0.20.



Σχήμα 5-1 Χρονικός στατιστικός μέσος της x-συνιστώσας της ταχύτητας στην έξοδο του ανεμιστήρα για διαφορετική ανάλυση πλέγματος και συντελεστή Smagorinsky σταθερό.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται πως το μήκος διακριτοποίησης επηρεάζει σημαντικά την πρόλεξη της ταχύτητας του ανεμιστήρα. Εξετάζοντας αρχικά την μεγαλύτερη ανάλυση πλέγματος ($\delta x=0.5m$) παρατηρείται μέση απόκλιση 14.3% από την ονομαστική ταχύτητα ενώ 14.15% ελάχιστη και 14.37% ως μέγιστη. Συνεχίζοντας με την περίπτωση της μεσαίας ανάλυσης πλέγματος ($\delta x=0.25m$) παρατηρείται πως το σφάλμα υπολογισμού της ταχύτητας μειώνεται με μέσο όρο σφάλματος 12.7% ενώ 12.5% ελάχιστο και 13% μέγιστο. Τέλος ελέγχεται η χρήση πλέγματος με 0.125 m ανάλυση για την οποία η λύση συγκλείνει όπως αναφέρεται βιβλιογραφικά παραπάνω. Παρατηρείται σαφώς μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόλεξη της ταχύτητας εκροής του ανεμιστήρα με μέση απόκλιση 2% ενώ ως ελάχιστη 1.12% και μέγιστη ως 1.4%.

Στην παραπάνω έρευνα που πραγματοποιήθηκε, εξετάζεται η μοντελοποίηση της τύρβης θεωρώντας το μοντέλο παραγωγής (Smagorinsky) της σταθερό. Καταλήγουμε ότι η χρήση πλέγματος 0.125 m ανάλυσης, προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες δύο προσεγγίσεις διακριτοποίησης. Παρακάτω, ακολουθεί η επίδραση της μοντελοποίησης της τύρβης στον υπολογισμό της ταχύτητας του ανεμιστήρα.



Σχήμα 5-2 Στατιστική απόκλιση της x-συνιστώσας της ταχύτητας από την ονομαστική ταχύτητα στην έξοδο του ανεμιστήρα για μήκος διακριτοποίησης $\delta x=0.125m$ και διαφορετική μοντελοποίηση της τύρβης.

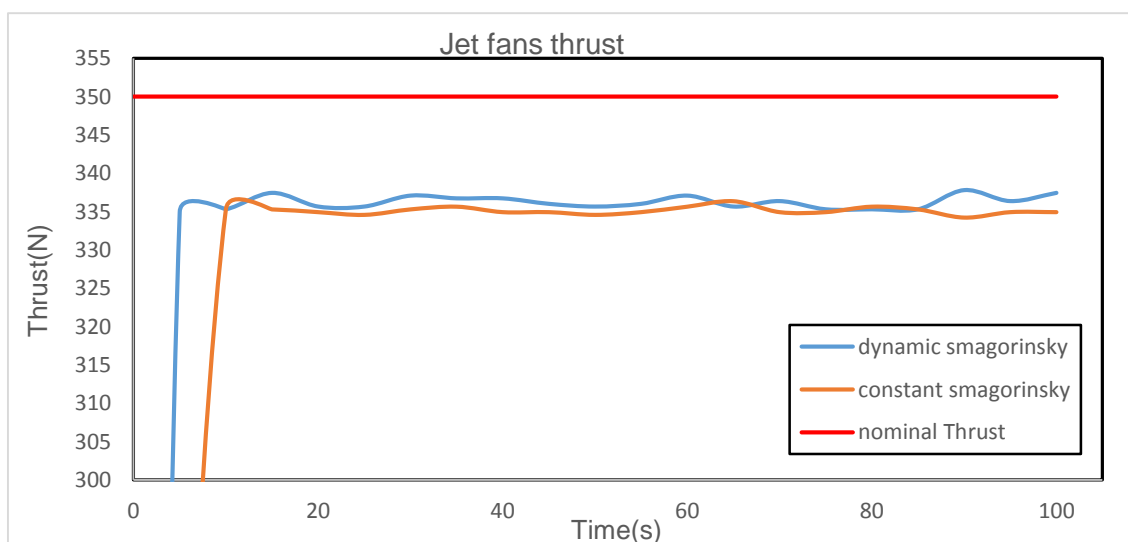
Πίνακας 5-1 Ποσοστιαία απόκλιση από την ονομαστική ταχύτητα του ανεμιστήρα με χρήση διαφορετικών μοντέλων παραγωγής τύρβης

Dynamic Smagorinsky	Constant Smagorinsky
Max=1.32%	Max=1.96%
Min=0.93%	Min=1.12%
Average=1.15%	Average=1.33%

Παρακάτω απεικονίζεται γραφικά η δύναμη ώσης του ανεμιστήρα σε σύγκριση με την ονομαστική τιμή του και με την χρήση διαφορετικών μοντέλων τύρβης. Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την προσέγγιση της ώσης είναι η ακόλουθη:

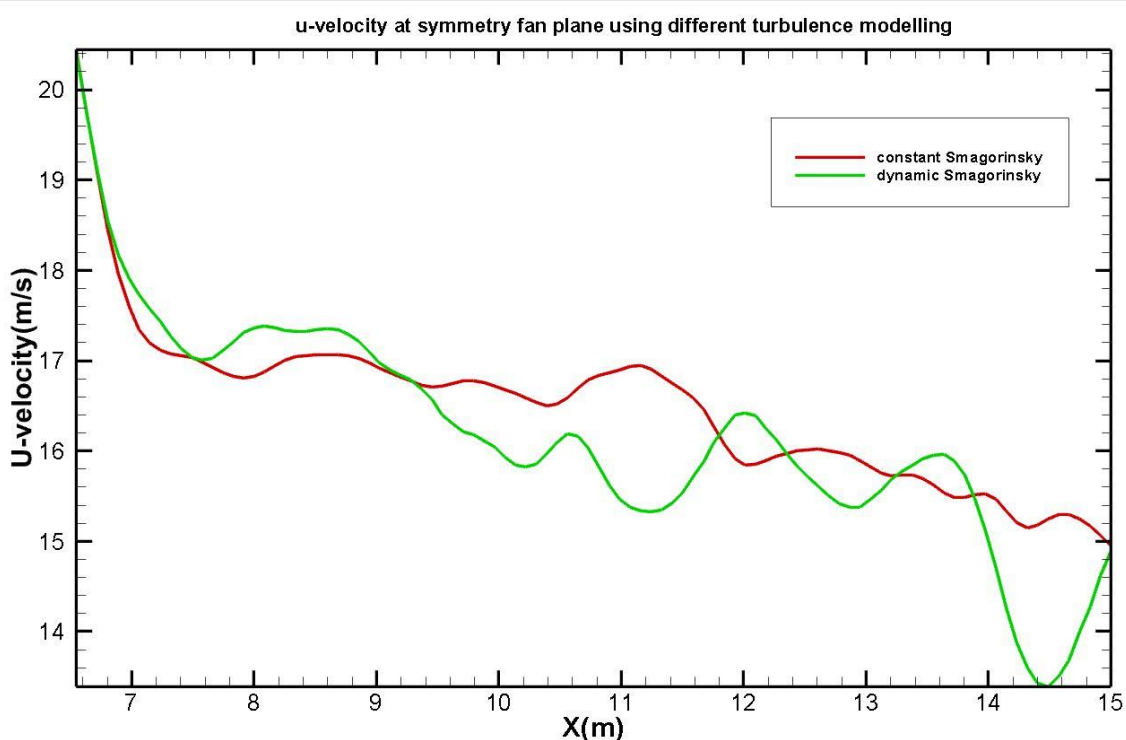
$$T_{max} = \rho A_A V_A (V_A - V_c) \quad (5-4)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, A_A η επιφάνεια του ανεμιστήρα ώσης χωρίς το κέλυφος, V_A η ταχύτητα εξόδου του ανεμιστήρα όπως αυτή υπολογίζεται από τον κώδικα και V_c η κρίσιμη ταχύτητα αερισμού.

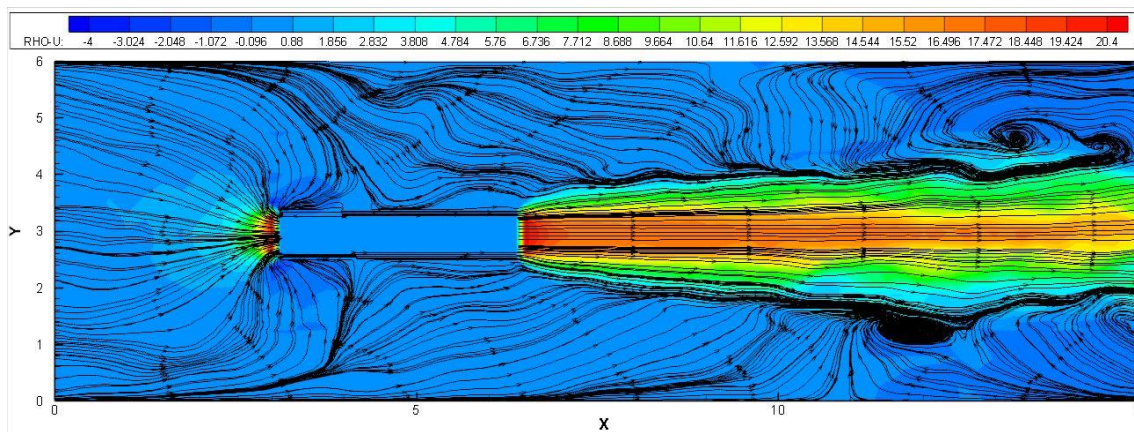


Σχήμα 5-3 Προφίλ δύναμης ώσης στην έξοδο του ανεμιστήρα για μήκος διακριτοποίησης $\delta x=0.125m$ για επίλυση της τύρβης με δυναμικό και σταθερό συντελεστή Smagorinsky.

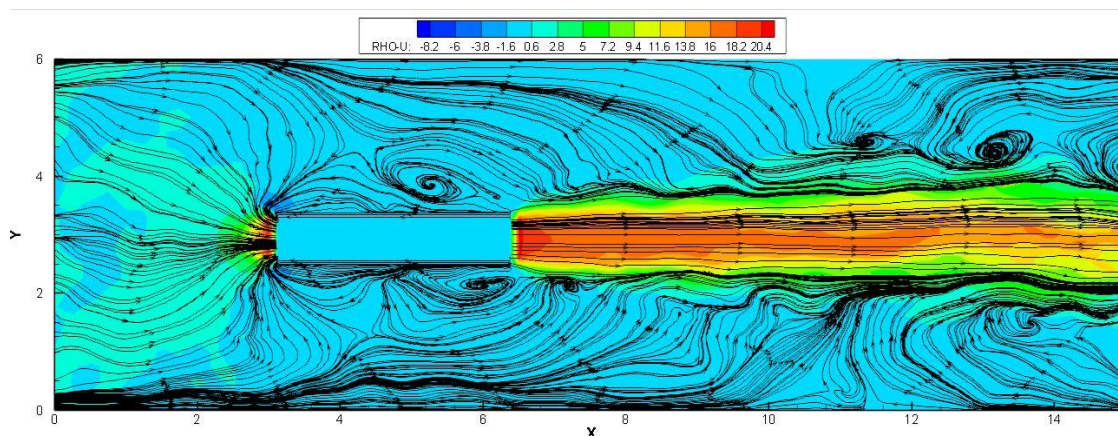
Στο σχήμα 5-4 απεικονίζεται η δειγματοληπτική ικανότητα του κώδικα να εξαγάγει στατιστικά δεδομένα με χρήση «probes» σε διαφορετικά σημεία του υπολογιστικού χωρίου. Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν 100 τοπικά σημεία στην έξοδο του ανεμιστήρα με μέγιστη απόσταση δέκα διαμέτρων από την έξοδο του. Η εξαγωγή των δεδομένων αφορά τον στατιστικό μέσο της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο αξονοσυμμετρικό επίπεδο του ανεμιστήρα για τον εκάστοτε αισθητήρα. Ο χρόνος δειγματοληψίας είναι 1400 δευτερόλεπτα, έτσι ώστε να επιτύχουμε μια στατιστικά σταθερή ροή (statistical stationary). Η διακύμανση της ταχύτητας που υπολογίζεται από τον κώδικα συγκρινόμενη με τη μέση στατιστική ταχύτητα, παρουσιάζει περιοδικότητα για μεγαλύτερη διάρκεια προσομοίωσης. Η σύγκριση έγινε μεταξύ της χρήσης σταθερού και δυναμικού συντελεστή Smagorinsky και για μήκος διακριτοποίησης στον άξονα x 0.125m.



Σχήμα 5-4 Προφίλ της x-συνιστώσας της ταχύτητας-σε απόσταση δέκα διαμέτρων από την έξοδο του ανεμιστήρα για διαφορετικά μοντέλα τύρβης.



Σχήμα 5-5 Ροϊκές γραμμές στο επίπεδο συμμετρίας του ανεμιστήρα με τα χρώματα να περιγράφουν το πεδίο τιμών της x-συνιστώσας της ταχύτητας, στην περίπτωση χρήσης του σταθερού συντελεστή Smagorinsky



Σχήμα 5-6. Ροϊκές γραμμές στο επίπεδο συμμετρίας του ανεμιστήρα με τα χρώματα να περιγράφουν το πεδίο τιμών της x-συνιστώσας της ταχύτητας, στην περίπτωση χρήσης του δυναμικού συντελεστή Smagorinsky

5.1 Σχολιασμός

Μελετώντας την περίπτωση της χρήσης του σταθερού συντελεστή Smagorinsky σχήμα 5-5, παρατηρούμε ότι υπάρχουν μικρότερες διακυμάνσεις της ταχύτητας, σε σύγκριση με την χρήση του δυναμικού συντελεστή, με αποτέλεσμα το πεδίο ροής να είναι περισσότερο ομογενοποιημένο πλευρικά του ανεμιστήρα σχήμα 5-6. Σημαντική παρατήρηση, αποτελεί ο σχηματισμός των δύο πλαϊνών δινών που οριοθετούνται από την αξονοσυμμετρική ζώνη μείωσης (decay) της ταχύτητας

μακριά από έξοδο του ανεμιστήρα. Λόγος στον οποίο οφείλεται η εν λόγω συμπεριφορά της ροής είναι η απώλεια της ορμής όσο το κινούμενο ρευστό απομακρύνεται από την έξοδο του ανεμιστήρα. Η ροή του αέρα στις περιοχές που δημιουργούνται οι πλευρικές δίνες δεν επηρεάζεται από την αδιατάραχτη ροή οπότε σε αυτή την οριοθετημένη περιοχή δημιουργούνται δύο ζώνες χαμηλής πίεσης που εξαναγκάζουν το ρευστό να ανακυκλοφορεί.

Στην επίλυση του σχήματος σχήμα 5-6, παρατηρούνται περιοχές όπου επικρατεί μεγαλύτερη διακύμανση της ταχύτητας στο πεδίο ροής, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δύο επιπλέον ανακυκλοφορίες πλευρικά του κελύφους του ανεμιστήρα. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται εξαιτίας της προσέγγισης των τιμών των διατμητικών τανυστών σύμφωνα με την (3-14 ως 3-16). Ως αποτέλεσμα της χρήσης του δυναμικού συντελεστή παρατηρείται ότι καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια από την αδιατάραχτη ροή του πεδίου. Στο δυναμικό μοντέλο το γινόμενο του χωρικού φίλτρου-συντελεστή C_s εμπεριέχει τον σταθμικό μέσο όρο της πυκνότητας σε αντίθεση με το σταθερό Smagorinsky μοντέλο όπου διατηρείται ανεπηρέαστη. Συμπερασματικά, η ενέργεια που χάνεται λόγω απώλειας ορμής τοπικά στο πεδίο ροής με ισχυρή παραγωγή τύρβης, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση δυναμικού συντελεστή θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτίωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων.

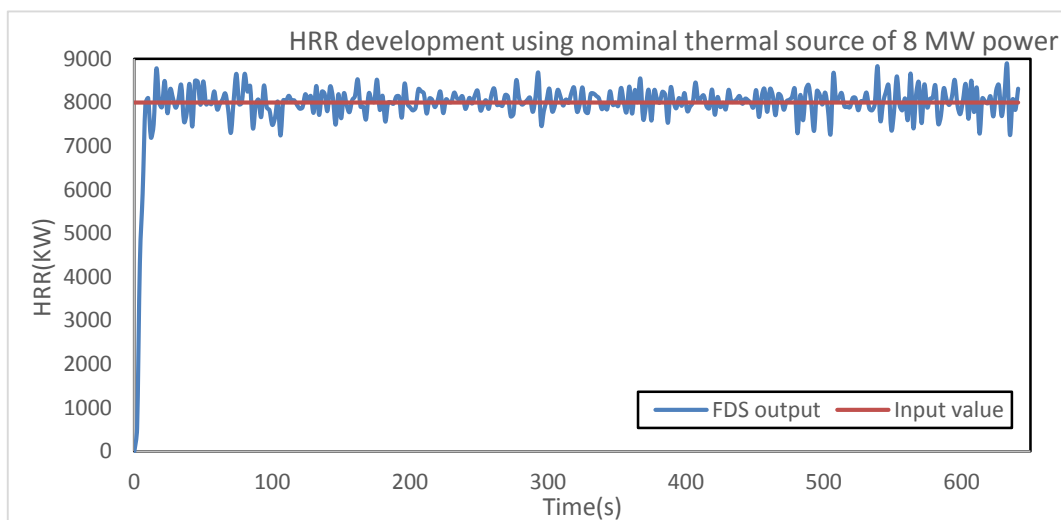
6 Αποτελέσματα

Στο παρακάτω κεφάλαιο αναλύονται τα αριθμητικά αποτελέσματα του κώδικα σύμφωνα με τα εξής βήματα. α) Αρχικά εξετάζεται η έννοια της πιστοποίησης των αποτελεσμάτων του κώδικα για την πρόλεξη της θερμοκρασίας σύμφωνα με αναλυτικές λύσεις-ημιεμπειρικές σχέσεις. β) Στην συνέχεια γίνεται αναλυτική παρουσίαση τους, περιγραφή τους, ανάλυση και σχολιασμός τους τόσο γραφικά όσο και με την χρήση του λογισμικού SmokeView, καθώς και με την χρήση κατάλληλων διαγραμμάτων. Συγκεκριμένα εξετάζεται η μελέτη της σιδηροδρομικής σήραγγας με την επίδραση των ανεμιστήρων ώσης, ακολουθεί η μελέτη της έναρξης πυρκαγιάς και ο αποκαπνισμός της σήραγγας και τέλος συνδυάζονται τα παραπάνω εισάγοντας τον συρμό του σχήματος 2-6.

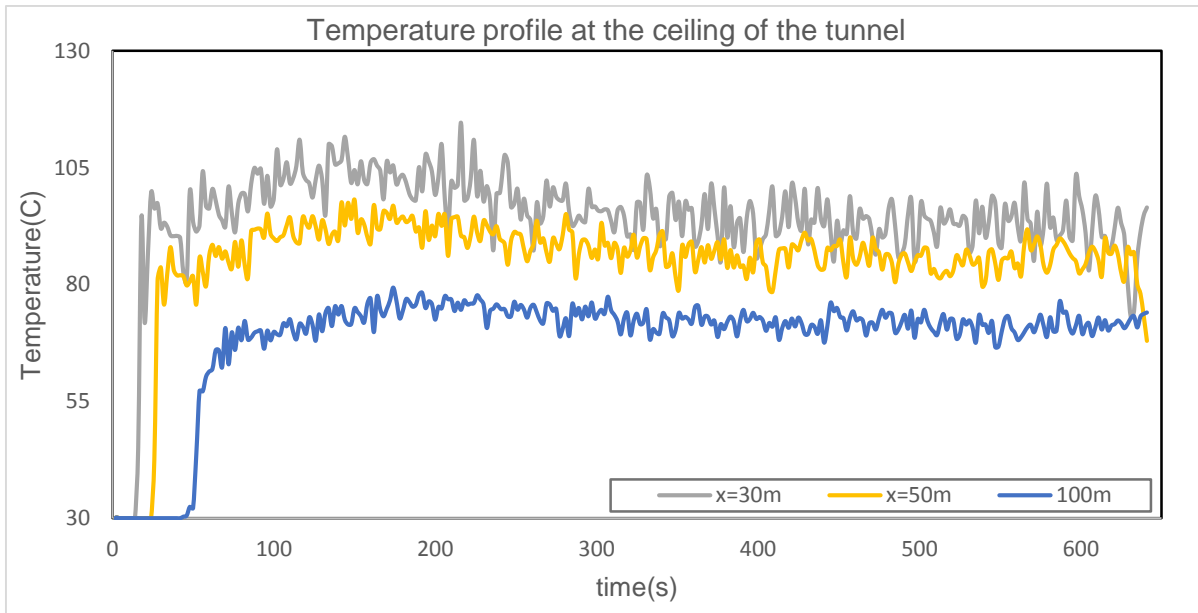
6.1 Πιστοποίηση θερμοκρασίας

Στο παρόν κεφάλαιο πρόκειται να μελετηθεί η πιστοποίηση της θερμοκρασίας, που προκύπτει από την χρήση αριθμητικών μεθόδων του κώδικα σε σύγκριση με αναλυτικές μεθόδους επίλυσης. Η προς μελέτη περιοχή θερμοκρασιών αφορά την μέση θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην οροφή της σήραγγας στα α) 10 m, β) 30 m, γ) 50 m, δ) 100 m ανάντι του σημείου έναρξης της πυρκαγιάς υπό την επίδραση του μηχανικού αερισμού. Στην μελέτη των αποτελεσμάτων που χρησιμοποιούν διάφοροι κώδικες υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι σημαντικό να είμαστε βέβαιοι για την πιστότητα αυτών συγκρίνοντας τα με κάποια αναλυτική μαθηματική σχέση.

Στην παρούσα διαδικασία είναι σημαντική η αναφορά των παρακάτω παραδοχών. Το υπολογιστικό μοντέλο της σήραγγας πληροί τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται σε προηγούμενα κεφάλαια. Ωστόσο η χρήση μη χρονικά μεταβαλλόμενου HRR σταθερής ισχύος και η μείωση του μεγέθους του κελιού διακριτοποίησης σε $\delta x=0.25\text{m}$ και 120m ανάντη του πλουμίου αποτελούν τις βασικές αρχικές παραμετροποιήσεις στο αρχικό μοντέλο.



Σχήμα 6-1 Γραφική σύγκριση της ονομαστικής θερμότητας ισχύος 8MW σε σχέση με εκείνη που προλέχθηκε από τον κώδικα FDS.



Σχήμα 6-2 Χρονική εξέλιξη θερμοκρασίας στην οροφή για α) $x=10m$, β) $x=30m$, γ) $x=50m$, δ) $100m$ ανάντι της πυρκαγιάς.

6.1.1 Αναλυτική προσέγγιση

Παρακάτω παρουσιάζονται οι ημιεμπειρικές σχέσεις σύμφωνα με τους (Ingason, Li et al. 2014), (Haack 1998) που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της μέγιστης θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας και στην συνέχεια η μέση θερμοκρασία στις προεπιλεγμένες αποστάσεις όπως φαίνονται στο σχήμα 6-2.

$$\frac{\Delta T(x)}{\Delta T_{max}} = 0.55 * e^{-0.143 \frac{x-x_v}{H}} + 0.45 e^{-0.024 \frac{x-x_v}{H}} \quad (6-1)$$

Όπου x είναι η απόσταση από την πηγή της φωτιάς, H το ύψος της σήραγγας και x_v είναι η εικονική απόσταση υπολογισμένη σύμφωνα με την σχέση (6-2).

$$x_v = \begin{cases} L_f - 10H, & L_f > 10H \\ 0, & L_f \leq 10H \end{cases} \quad (6-2)$$

Όπου το L_f είναι το μήκος της φωτιάς σε μέτρα υπολογισμένο από τον (Ingason et al.2015). Η μέση θερμοκρασία εξαρτάται από την μέγιστη θερμοκρασία στην οροφή της σήραγγας (ΔT_{max}) μέσω της παρακάτω δίκλαδης συνάρτησης.

$$\Delta T_{max} = \begin{cases} 17.5 \frac{\dot{Q}^{2/3}}{H_{eff}^{5/3}}, & V' \leq 0.19 \\ \frac{\dot{Q}}{u_o b_{fo}^{1/3} H_{eff}^{5/3}}, & V' > 0.19 \end{cases} \quad (6-3)$$

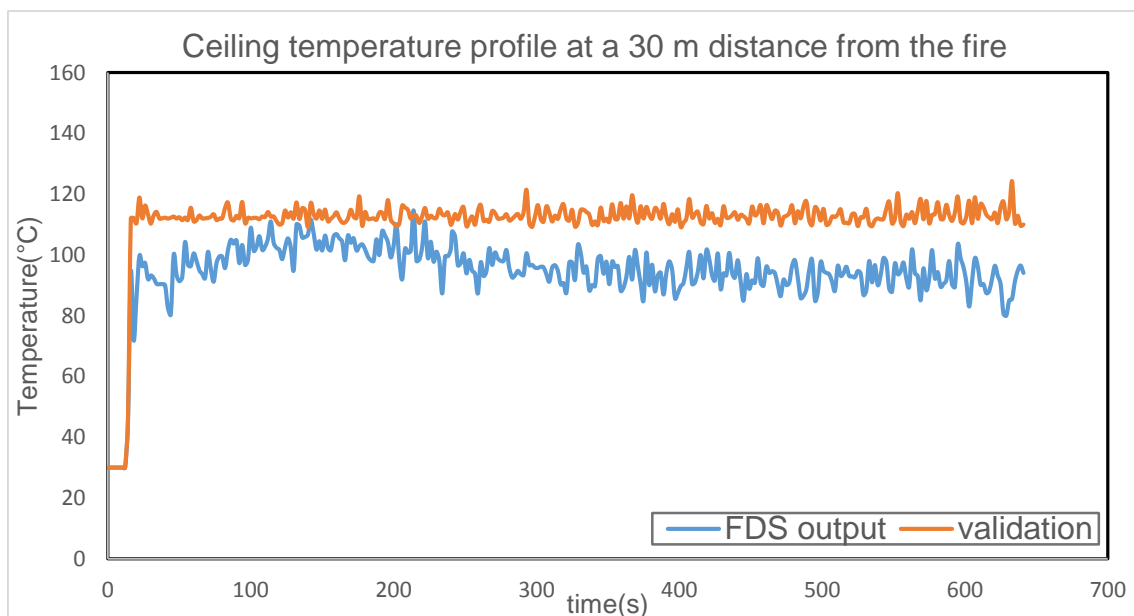
Όπου \dot{Q} είναι το συνολικό HRR ίσο με 8 MW, H_{eff} είναι το μετρούμενο ύψος της οροφής της σήραγγας (m), u_o είναι η ταχύτητα αερισμού και b_{fo} είναι η ακτίνα του πλουμίου (m). Το κριτήριο V' ορίζεται ως η αδιάστατη ταχύτητα αερισμού δηλαδή:

$$V' = \frac{u_o}{w^*} \quad (6-4)$$

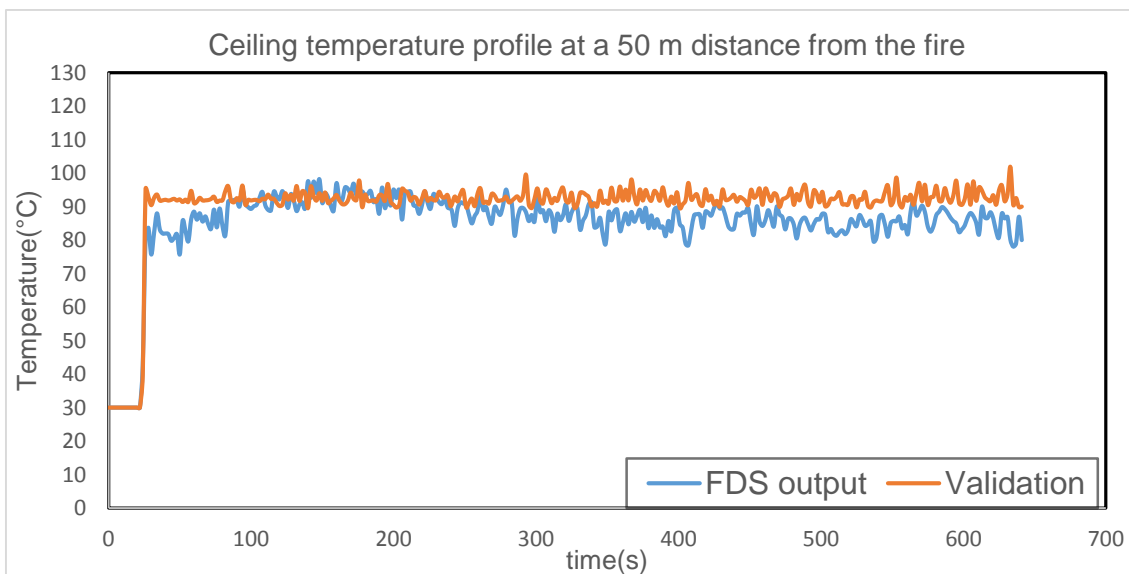
με w^* η χαρακτηριστική ταχύτητα του πλουμίου εκφρασμένη ως

$$w^* = \left(\frac{g\dot{Q}}{b_{fo}\rho_o C_p T_o} \right)^{1/3} \quad (6-5)$$

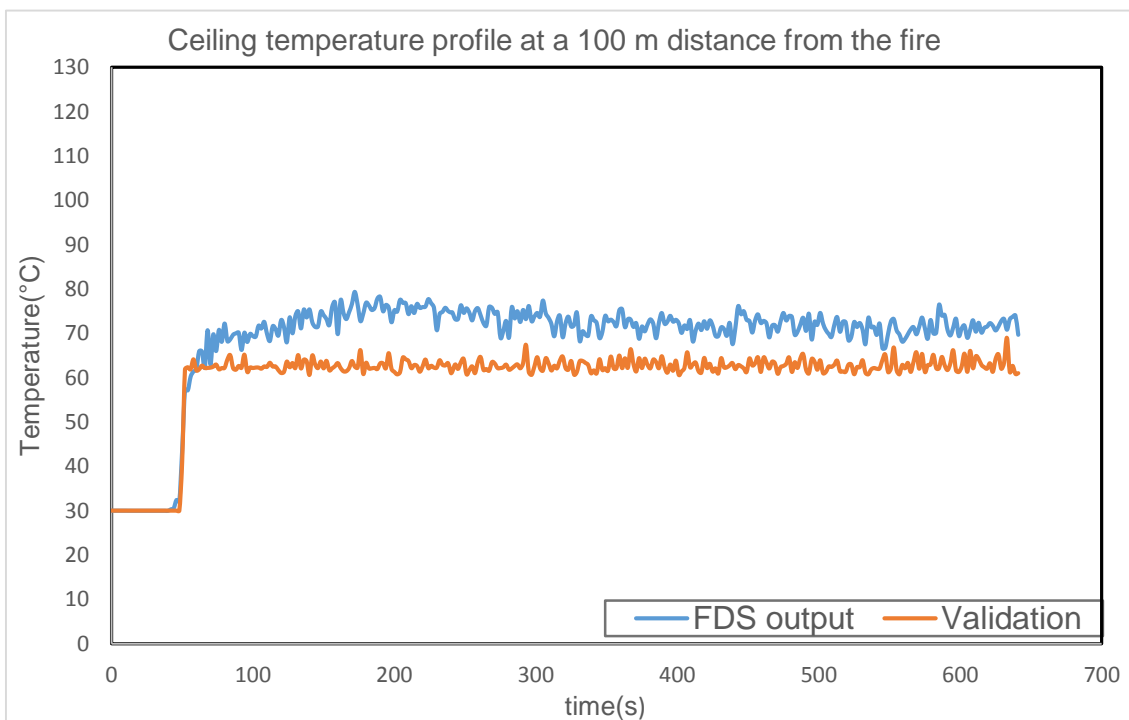
Όπου ρ_o (Kg/m³) είναι η ατμοσφαιρική πυκνότητα του αέρα, C_p (KJ/KgK) είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα και T_o (K) η θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 6-3 Χρονικό θερμοκρασιακό προφίλ στην οροφή της σήραγγας 30 m ανάντι της φωτιάς.



Σχήμα 6-4 Χρονικό θερμοκρασιακό προφίλ στην οροφή της σήραγγας 50 m ανάντι της φωτιάς.

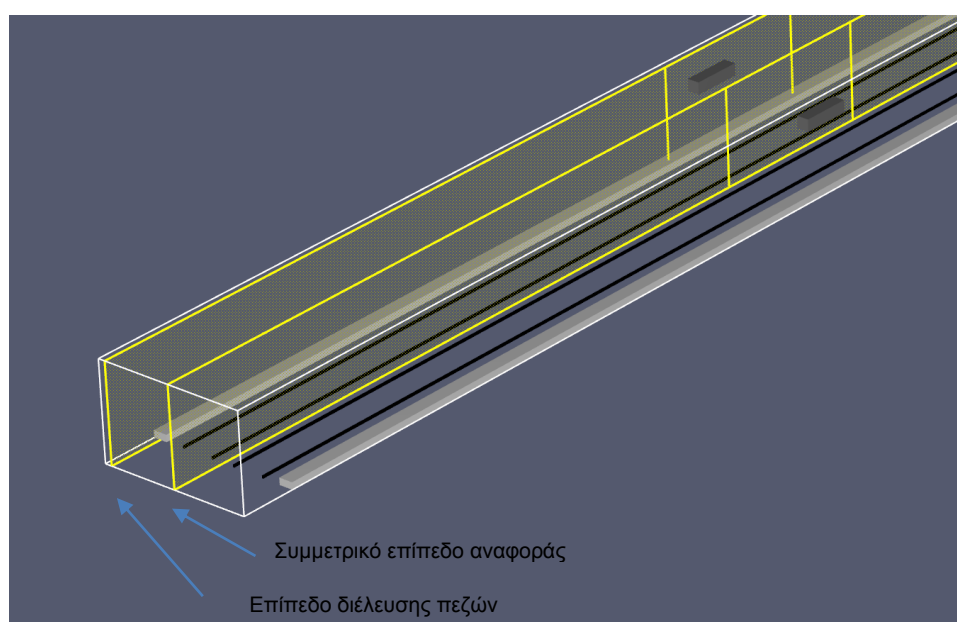


Σχήμα 6-5 Χρονικό θερμοκρασιακό προφίλ στην οροφή της σήραγγας 100 m ανάντι της φωτιάς.

Σύμφωνα με την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, παρατηρούμε πως η κατανομή της θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας από τα διαφορετικά σημεία δειγματοληψίας, ακολουθείται από την αναλυτική σχέση που χρησιμοποιήθηκε για την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του σχήματος 6-3 ,παρατηρείται πως η μέση στατιστική απόκλιση μεταξύ των χρονικά μεταβαλλόμενων τιμών του κώδικα και των πιστοποιημένων τιμών, είναι 14,6%. Όσον αφορά την περίπτωση του σχήματος 6-4, το μέσο στατιστικό σφάλμα αγγίζει την τιμή του 5,9% και 14% αντίστοιχα, στην περίπτωση του σχήματος 6-5.

6.2 Σενάριο χωρίς την έναρξη πυρκαγιάς

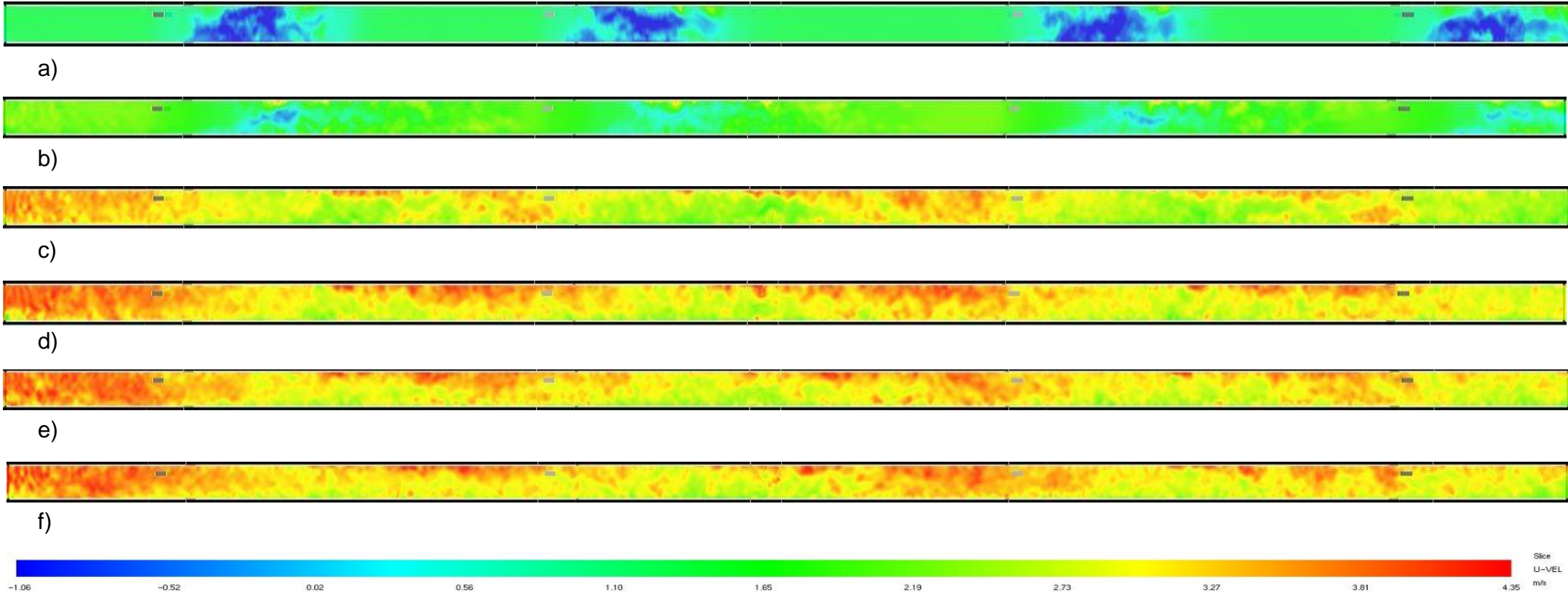
Στο παρόν κεφάλαιο θα εξετάσουμε την πρώτη περίπτωση της μελέτης αυτής της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα θα μελετηθεί η επίδραση του μηχανικού αερισμού στο εσωτερικό της σήραγγας χωρίς την ύπαρξη κανενός σεναρίου που σχετίζεται με οποιοδήποτε ατύχημα. Σκοπός είναι να απεικονίσουμε και να σχολιάσουμε την περιγραφή του πεδίου ροής, όσον αφορά την x-συνιστώσα της ταχύτητας, σε κάθε επίπεδο ενδιαφέροντος. Τα επίπεδα αυτά διακρίνονται αναφορικά στο συμμετρικό επίπεδο της σήραγγας και στο επίπεδο διέλευσης των πεζών.



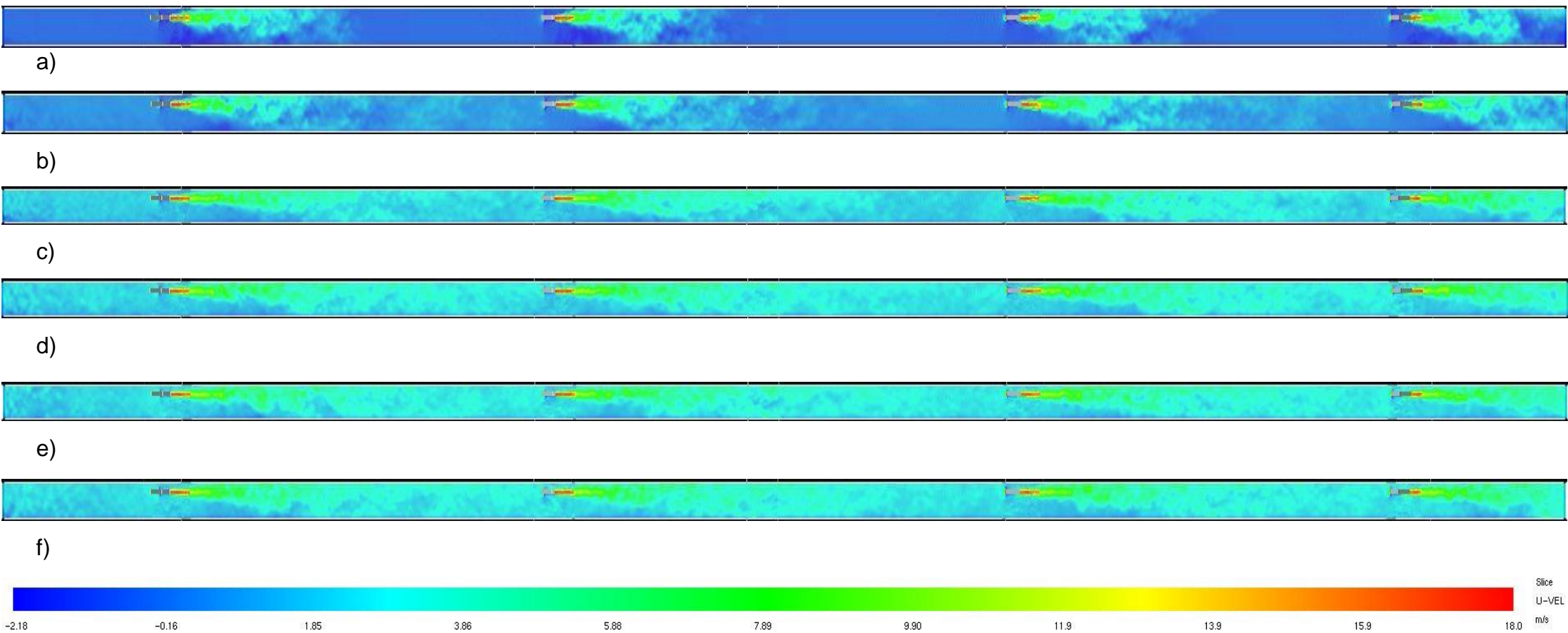
Στην απεικόνιση του σχήματος 6-6 περιγράφεται το πεδίο ροής στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς. Συγκεκριμένα στο σχήμα 6-6 a) περιγράφεται το πεδίο ροής την χρονική στιγμή που οι ανεμιστήρες ώσης έχουν αποκτήσει την μέγιστη ταχύτητα παροχή τους. Την χρονική στιγμή αυτή, παρατηρούνται ζώνες στο πεδίο ροής εντός της σήραγγας, όπου η τιμή της ταχύτητας είναι αρνητική με αποτέλεσμα να δημιουργείται αναστροφή της ροής. Οι περιοχές αυτές διακρίνονται μακριά από την έξοδο του ακροφυσίου εν αντιθέσει με τις περιοχές ενδιάμεσα αυτών όπου η ταχύτητα διατηρεί θετικές τιμές. Στον διπλάσιο χρόνο προσομοίωσης δηλαδή στα 60 s παρατηρούμε ότι η ταχύτητα αποκτά θετικό μέτρο και διεύθυνση. Μετά από 100 s, στο σχήμα 6-6 c) παρατηρείται ραγδαία αύξηση της ταχύτητας στην είσοδο της σήραγγας η οποία συνεχίζει να αυξάνεται όσο το φαινόμενο εξελίσσεται χρονικά. Στην περίπτωση του σχήματος 6-6 d) και χρόνο 260 s παρατηρούμε πως η x -συνιστώσα της ταχύτητας στην οροφή της σήραγγας εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις προηγούμενες χρονικές στιγμές. Τέλος στο σχήμα 6-6 e) και f) παρατηρείται ότι το πεδίο ροής δεν αλλάζει δραστικά. Σημαντικό είναι να αναφερθεί, ότι στο τέλος της προσομοίωσης η ταχύτητα στην είσοδο και στην έξοδο της παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές που δημιουργούνται λόγω της χρήσης του μηχανικού αερισμού.

Όσον αφορά τη μελέτη της επίδρασης του μηχανικού αερισμού στο επίπεδο του κρηπιδώματος, δεχόμαστε την παραδοχή ότι συμπίπτει με το αξονοσυμμετρικό κέντρο του επιπέδου των ανεμιστήρων, εφόσον η διαφορά μεταξύ τους στον άξονα y είναι 0.3 m. Άρα το πεδίο τιμών της ταχύτητας μπορεί να περιγράφεται με τον ίδιο τρόπο. Στο σχήμα 6-7 a) παρατηρούμε πως για την χρονική στιγμή των 30 s οι ανεμιστήρες ώσης έχουν αποκτήσει την ικανότητα να λειτουργούν στην μέγιστη παροχή τους σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευαστή τους πίνακας 2-3. Παρατηρείται επίσης ότι γίνεται μετακίνηση του μέχρι τότε ακίνητου περιβάλλοντα αέρα για τα πρώτα μέτρα ανάντη των ανεμιστήρων ώσης. Η ταχύτητα εκροής τους αγγίζει την ονομαστική τιμή σύμφωνα με τον κατασκευαστή με αποτέλεσμα να επηρεάζει σημαντικά το υπόλοιπο πεδίο ροής. Στο σχήμα 6-7 b) η επιρροή των ανεμιστήρων δημιουργεί την απαραίτητη δύναμη ώσης (Thrust) ώστε να αυξηθεί η ταχύτητα του αέρα στο υπόλοιπο της σήραγγας. Μετά από διάστημα 100 s σχήμα 6-7 c) η τιμή της

ταχύτητας αυξάνεται σε όλο το μήκος της σήραγγας με τις μεγαλύτερες τιμές της να εμφανίζονται στην οροφή της. Όσον αφορά τις χρονικές στιγμές μεταξύ 260 s ως 680 s (σχήμα 6-7 d και f) παρατηρείται πως η μεταβολή της ταχύτητας στο πεδίο δεν μεταβάλλεται δραστικά με αποτέλεσμα να εμφανίζεται στο πεδίο ροής μεγάλη ομοιογένεια. Σημαντική παρατήρηση είναι πως δεν εμφανίζονται καθόλου σημεία αναστροφής της ροής εφόσον η ταχύτητα δεν παίρνει αρνητικές τιμές.



Σχήμα 6-6 Ισοϋψής κατανομή της U_x στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από: a) 30 s ,b) 60 s, c) 160 s, d) 260 s, e) 560s, f)680 s



Σχήμα 6-7 Ισοϋψής κατανομή της U_x στο επίπεδο διέλευσης των πεζών μετά από: a) 30s ,b) 60s, c) 160s, d) 260s, e) 560s, f)680 s

6.3 Σενάριο πυρκαγιάς χωρίς την παρουσία τρένου

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθεί κατά πόσο η χρήση του μηχανικού αερισμού, είναι ικανή να πραγματοποιήσει τον πλήρη αποκαπνισμό της σήραγγας, σε περίπτωση πυρκαγιάς. Το δεύτερο σενάριο περιλαμβάνει την έναρξη πυρκαγιάς, ισχύος 8 MW εντός της σιδηροδρομικής σήραγγας, σε απόσταση 250 μέτρων από την είσοδό της που αποτελεί και την δυσμενέστερη περίπτωση αποκαπνισμού. Η θέση του πλουμίου φωτιάς βρίσκεται στο συμμετρικό επίπεδο της διατομής $y=5.5$ m όπου σε αυτό εξετάζονται τόσο τα βαθμωτά όσο και τα διανυσματικά μεγέθη που περιγράφονται παρακάτω. Σημαντική σημείωση είναι πως η ισχύς της φωτιάς λίμνης είναι χρονικά μεταβαλλόμενη σύμφωνα με το σχήμα 2-3 όπου για διάστημα 100 s διατηρεί την μέγιστη τιμή της. Το χρονικό σημείο όπου οι ανεμιστήρες ώσης ξεκινούν την λειτουργία τους είναι 240 s μετά από την έναρξη της πυρκαγιάς και η διαφορά φάσης της εκκίνησης τους είναι 5 s για κάθε ομάδα ανεμιστήρων. Στη συνέχεια, πρόκειται να εξεταστεί υπό το ίδιο πρίσμα συνθηκών τα μεγέθη στο επίπεδο των ανεμιστήρων ώσης καθώς και στο επίπεδο του κρηπιδώματος. Σημαντική αναφορά πρέπει να γίνει στην εξής παραδοχή. Συμβατικά έχουμε δεχθεί πως το επίπεδο των ανεμιστήρων και του διαζώματος διέλευσης συμπίπτουν εφόσον απέχουν μεταξύ τους απόσταση Δy ίση με 0.3 m. Οπότε τα μεγέθη ροής όπως η ταχύτητα η θερμοκρασία και τα προϊόντα της καύσης μπορούν να σχολιαστούν ενιαία. Στόχος είναι η απεικόνιση και ο σχολιασμός των εν λόγω μεγεθών ροής ώστε να μπορεί εκ πρώτης όψευς να διαμορφωθεί κατάλληλη στρατηγική που να εξασφαλίζει την ασφάλεια διέλευσης.

Στο σχήμα 6-8 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της εξάπλωσης του καπνού εντός της σήραγγας για χρονική διάρκεια 680 s από την έναρξη της φωτιάς. Στο εν λόγω σχήμα παρουσιάζονται αναλυτικά οι διακριτές χρονικές στιγμές όπου λαμβάνει χώρα ο πλήρης αποκαπνισμός της σήραγγας. Συγκεκριμένα στο σχήμα 6-8 a) παρουσιάζεται η διάχυση της αιθάλης στο εσωτερικό της σήραγγας χωρίς την επιρροή του μηχανικού αερισμού. Παρατηρείται πως το φαινόμενο αναστροφής καπνού (backlayering) είναι εμφανές και συγκεκριμένα καταλαμβάνει τα 2/4 της σήραγγας. Στην συνέχεια στο σχήμα 6-8 b) παρατηρείται η μεγαλύτερη διαμήκης

εξάπλωση του καπνού αφού την ίδια χρονική στιγμή οι ανεμιστήρες ώσης της τελευταίας ομάδας ξεκινούν την λειτουργία τους. Σημαντική αναφορά χρειάζεται να γίνει στις περιοχές, οι οποίες για την χρονική στιγμή των 260 s, έχουν υψηλή συγκέντρωση καπνού ανά μονάδα ύψους της σήραγγας. Τέτοιες ζώνες εμφανίζονται στο μέσο επίπεδο αναπνοής περιγραφή του οποίου θα γίνει σε επόμενα κεφάλαια. Μετά από διάρκεια 100 s σχήμα 6-8 c, διακρίνεται έντονα η επίδραση του μηχανικού αερισμού στο εσωτερικό της σήραγγας και μετά από το πέρασ 30 s σχήμα 6-8 d παρατηρείται η εξάλειψη του φαινομένου αναστροφής καπνού. Καθώς οι ανεμιστήρες ώσης συνεχίζουν να λειτουργούν στην μέγιστη παροχή τους παρατηρούμε πως ο πλήρης αποκαπνισμός της σήραγγας κατάντι του σημείου πυρκαγιάς σχήμα 6-8 e) έχει πλέον επιτευχθεί . Σημαντική σημείωση είναι πως αν και η ισχύς της φωτιάς δεν έχει μηδενιστεί, τα επίπεδα ορατότητας είναι πολύ καλύτερα σε σχέση με τις προηγούμενες χρονικές στιγμές ανάντη του σημείου πυρκαγιάς.

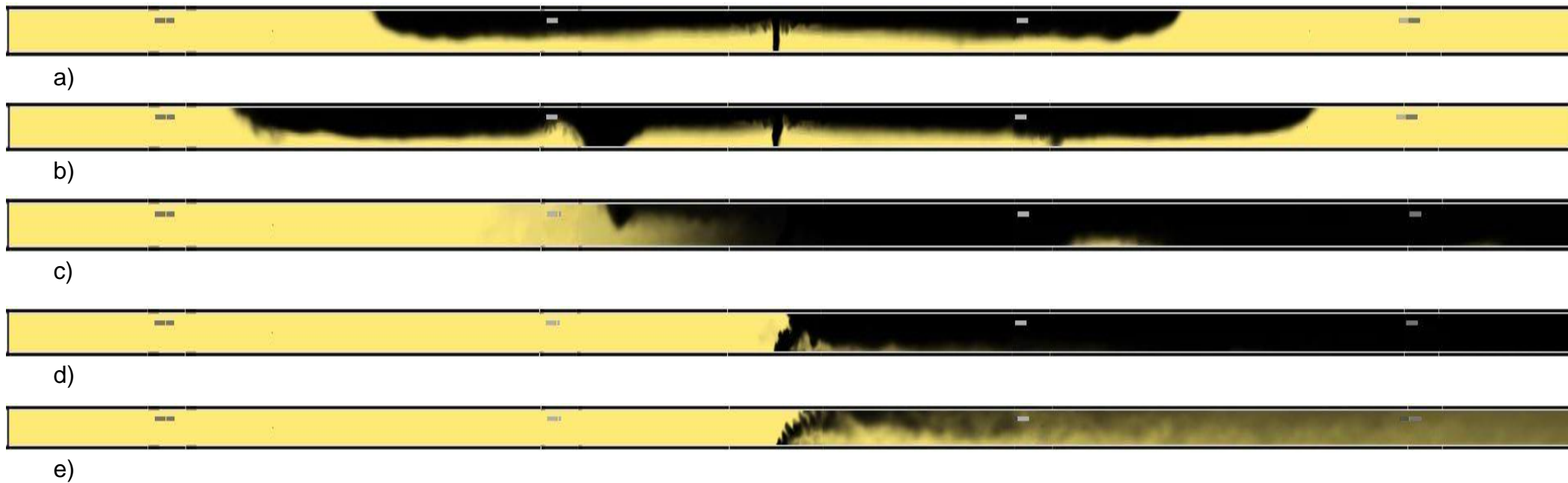
6.3.1 Ταχύτητα

Στη συνέχεια θα σχολιαστεί η επίδραση του μηχανικού αερισμού στην ταχύτητα του αέρα εντός της σήραγγας. Πρόκειται να εξετασθεί το συμμετρικό επίπεδο αλλά και το επίπεδο των ανεμιστήρων-κρηπιδώματος για τον ίδιο χρόνο προσομοίωσης με την περίπτωση του κεφαλαίου 6.2.

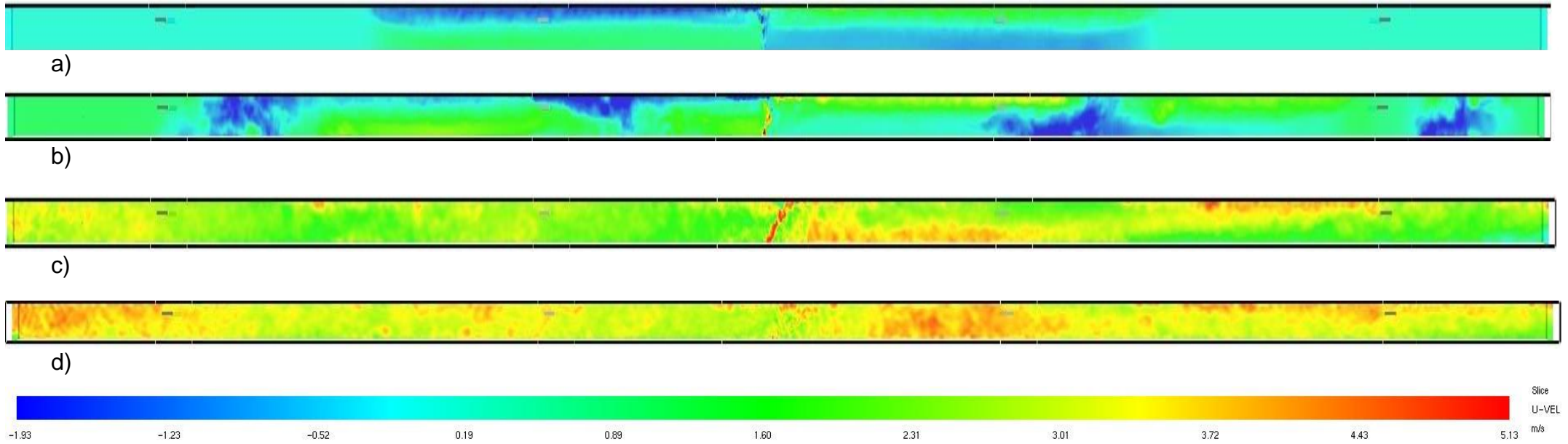
Στο σχήμα 6-9 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή του πεδίου τιμών της ταχύτητας. Για τα πρώτα 200 s από την έναρξη της φωτιάς παρατηρούμε πως έχει ήδη εμφανιστεί το φαινόμενο αναστροφής καπνού. Υπό το πρίσμα της ταχύτητας διακρίνουμε πως στην οροφή της σήραγγας το μέτρο της ταχύτητας είναι ίδιο με την διαφορά να έγκειται στο πρόσημο της. Η αύξηση της ταχύτητας είναι αναμενόμενη εφόσον η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει την πίεση και εν τέλει την τιμή της ταχύτητας στο πεδίο ροής. Είναι δε εμφανές πως κάτω από το θερμό υπόστρωμα του καπνού οι τιμές της ταχύτητας είναι σαφώς μικρότερες αφού τα στρώματα αέρα σε αυτές τις περιοχές δεν επηρεάζονται από την αύξηση της θερμοκρασίας. Συνεχίζοντας, στο χρονικό διάστημα των 260 s από την έναρξη της φωτιάς σχήμα 6-9 b, βλέπουμε πως η τιμή της ταχύτητας του πλουμίου είναι σαφώς μεγαλύτερη από την προηγούμενη χρονική στιγμή,

εφόσον η ισχύς της φωτιάς αγγίζει για πρώτη φορά την μέγιστη τιμή της. Ωστόσο είναι πλέον διακριτές οι περιοχές στις οποίες η ταχύτητα κατευθύνεται με αρνητικό πρόσημο με αποτέλεσμα την αναστροφή της ροής και την ανάμιξη του θερμού και του ψυχρότερου υποστρώματος. Μετά από 230 s σχήμα 6-9 c) την χρονική στιγμή 360 s από την έναρξη της φωτιάς το φαινόμενο της αναστροφής καπνού αρχίζει να καταστέλλεται. Σε αυτό το διακριτό σημείο του χρόνου είναι εμφανές πως η τιμή της ταχύτητας κατάντι της φωτιάς διατηρεί σταθερό μέτρο με σποραδικές διακυμάνσεις της κυρίως στο στόμιο εισόδου της σήραγγας. Όσον αφορά την απόσταση από το κέντρο της σήραγγας ως την έξοδο της παρατηρείται η τιμή της ταχύτητας είναι υψηλότερη από τις προηγούμενες χρονικές στιγμές. Τέλος στο σχήμα 6-9 d) βλέπουμε πως η τιμή της ταχύτητας απέκτησε μεγαλύτερο πεδίο τιμών τόσο στην είσοδο της σήραγγας όσο και στο σημείο αμέσως μετά την λίμνη φωτιάς παρόλο που ισχύς της μειώθηκε 85%.

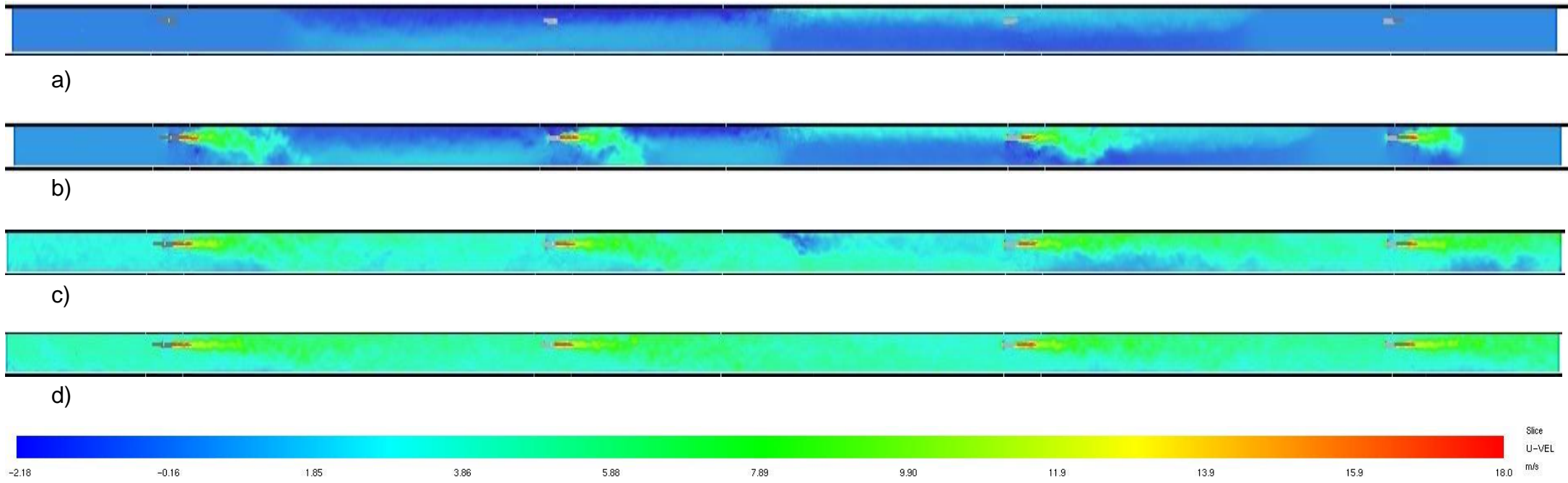
Στο σχήμα 6-10 πρόκειται να σχολιαστεί το επίπεδο των ανεμιστήρων και του επιπέδου διέλευσης πεζών και σωστικών συνεργείων ή συντήρησης. Σε 240 s από την έναρξη της φωτιάς παρατηρούμε πως η ταχύτητα στην οροφή της σήραγγας παρουσιάζει συμμετρική συμπεριφορά ως προς το πεδίο τιμών της διαφοροποιώντας τις δύο περιοχές ανάντη και κατάντη της φωτιάς μέσω του πρόσημού της. Σε αυτό το χρονικό σημείο της προσομοίωσης η τιμή της ταχύτητας είναι μικρότερη της κρίσιμης με αποτέλεσμα το φαινόμενο αναστροφής καπνού (back layering) να επηρεάζει το επίπεδο διέλευσης των πεζών. Μετά από διάστημα 60 s σχήμα 6-10 b δηλαδή 260 s από την έναρξη της φωτιάς οι ανεμιστήρες ώσης της τελευταίας ομάδας ($x=450$ m) έχουν ξεκινήσει να λειτουργούν με αποτέλεσμα να αυξήσουν την ταχύτητα της ροής. Κομβικό χρονικό σημείο αποτελεί το σχήμα 6-10 c) στο οποίο η αναστροφή του καπνού έχει πλέον εξαλειφθεί. Παρατηρείται πως η ταχύτητα ροής στο επίπεδο του κρηπιδώματος τηρεί τις προδιαγραφές για την ασφαλή εκκένωση των πεζών. Επιπροσθέτως δεν παρουσιάζονται έντονες διακυμάνσεις της ταχύτητας που θα μπορούσε να δυσχεραίνει την διέλευση τους. Τέλος, στο χρονικό διάστημα των 680 s σχήμα 6-10 d) η τιμή της ταχύτητας δεν αλλάζει δραστικά με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το πεδίο ροής με μεγαλύτερη ομοιογένεια.



Σχήμα 6-8 Χρονική εξέλιξη της εξάπλωσης καπνού για μετά από : a) 200s ,b) 260s, c) 360s, d) 390s, e) 680s



Σχήμα 6-9 Ισοϋψής κατανομή της U_x στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από: a) 200s ,b) 260s, c)390s , d) 680s



Σχήμα 6-10 Ισοϋψής κατανομή της U_x στο επίπεδο διέλευση των πεζών μετά από: a) 200 s ,b) 260 s, c)390 s , d) 680 s

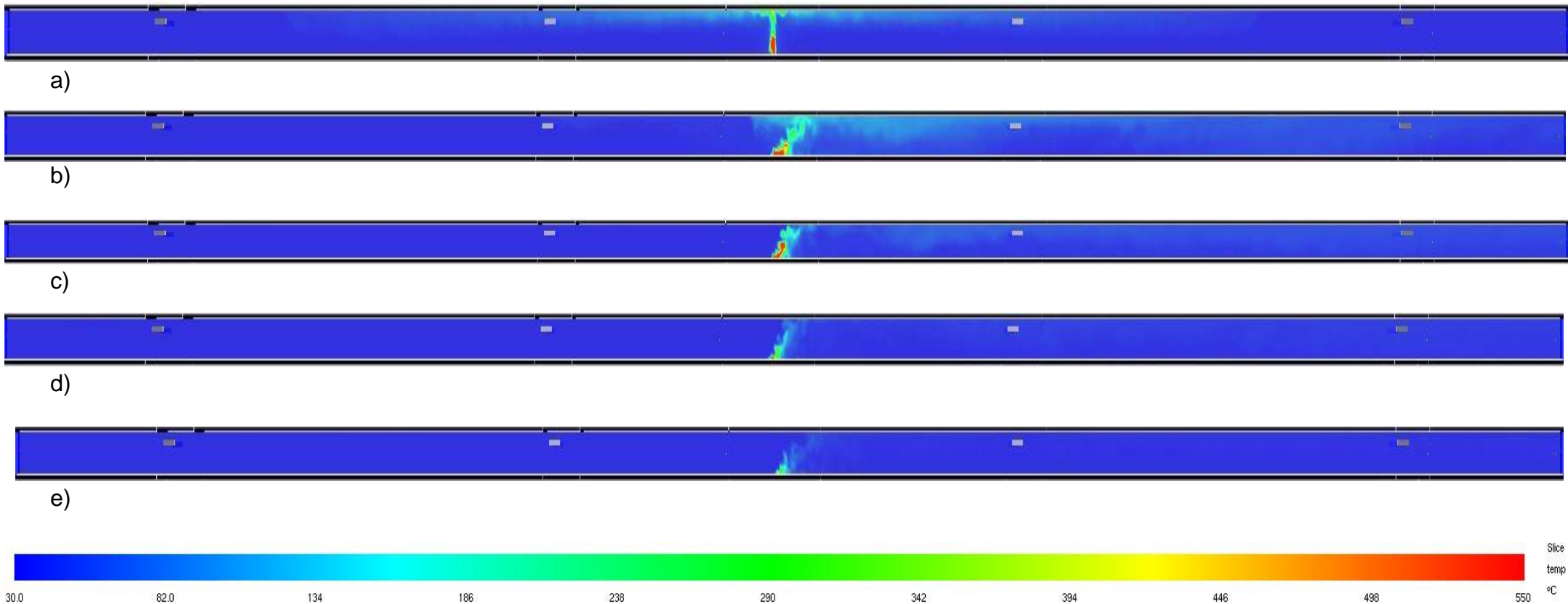
6.3.2 Θερμοκρασία

Στο παρόν κεφάλαιο, θα μελετηθεί το θερμοκρασιακό προφίλ εντός της σιδηροδρομικής σήραγγας για διακριτές χρονικές στιγμές, από την αρχή ως το πέρας της προσομοίωσης. Τα επίπεδα ενδιαφέροντος διακρίνονται αρχικά στο επίπεδο συμμετρίας της σιδηροδρομικής σήραγγας, καθώς και στο αξονοσυμμετρικό κέντρο των ανεμιστήρων ώσης, με την παραδοχή ότι συμπίπτει του επιπέδου διέλευσης των πεζών. Σκοπός είναι να αξιολογηθεί κατά πόσο η επίδραση του μηχανικού αερισμού, επηρεάζει την διάχυση της θερμότητας σε κάθε επίπεδο ενδιαφέροντος. Με τελικό στόχο να αξιολογηθεί εκ πρώτης όψεως αν οι τιμές της θερμοκρασίας αποτελούν σημαντικό κίνδυνο.

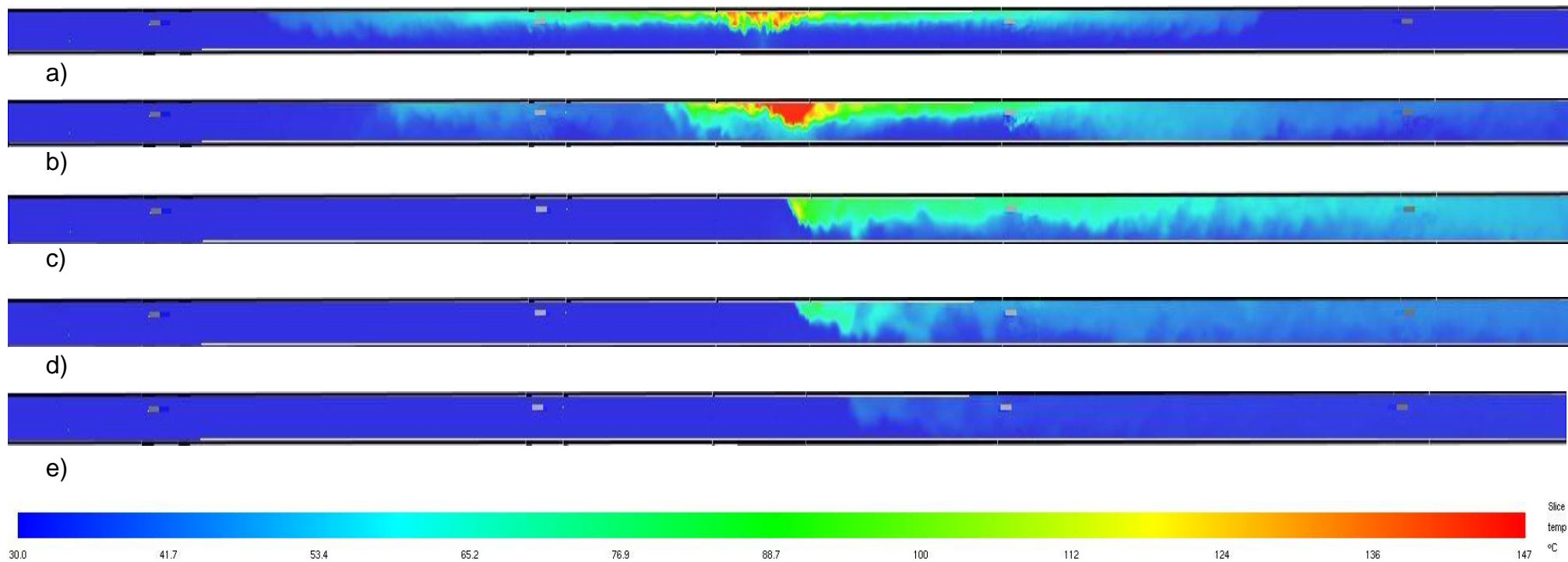
Σε πρώτο στάδιο εξετάζουμε την ισοϋψή κατανομή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς. Αρχικά, στο σχήμα 6-11 a η φωτιά έχει φτάσει στο σημείο μέγιστης ισχύος της και παρατηρούμε πώς η τιμή της θερμοκρασίας του πλουμίου είναι η μέγιστη. Μέχρι εκείνη την χρονική στιγμή, δεν εμφανίζονται υψηλές θερμοκρασίες στο υπόλοιπο της σήραγγας, όπως και στην οροφή της ειδικότερα στο σημείο της εστίας της φωτιάς. Να σημειωθεί επίσης πως μέχρι την χρονική στιγμή των 240 s οι ανεμιστήρες ώσης είναι εκτός λειτουργίας. Στην συνέχεια στο σχήμα 6-12 b) παρατηρούμε πως η κατανομή της θερμοκρασίας από το στόμιο εισόδου της σήραγγας ως το μέσο της διατηρεί την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η κατάσταση της ροής είναι ήδη επηρεασμένη από την λειτουργία των jet fans τα οποία στην ίδια χρονική στιγμή εμποδίζουν την αναστροφή του καπνού. Στο χρονικό σημείο των 340 s η ισχύς της φωτιάς παρουσιάζει σημείο καμψής με αποτέλεσμα ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας να φθίνει συνεχώς. Συνεπώς σε χρονικό διάστημα 100 s (σχήμα 6-11 a και b) διακρίνεται η επίδραση του μηχανικού αερισμού στην κατανομή της θερμοκρασίας στην δυσμενέστερη συνθήκη του ατυχήματος. Όσο το φαινόμενο εξελίσσεται χρονικά, παρατηρείται πως δεν υπάρχει μεγάλη μεταβολή στο πεδίο θερμοκρασιών ανάντη και κατόντη του σημείου πυρκαγιάς σχήμα 6-11 c ως 6-11 e μέχρι την λήξη της προσομοίωσης.

Μετά την περιγραφή του επιπέδου συμμετρίας, ακολουθεί ο σχολιασμός της θερμοκρασιακής κατανομής στο επίπεδο των ανεμιστήρων και κρητιδώματος.

Στο χρονικό σημείο των 240 s, οι ανεμιστήρες ώσης είναι εκτός λειτουργίας με αποτέλεσμα η διάχυση της θερμότητας, να προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας στα γειτονικά στρώματα αέρα όπως φαίνεται στο σχήμα 6-12 a). Η μέγιστη θερμοκρασία παρατηρείται στην οροφή της σήραγγας για τα πρώτα μέτρα ανάντη και κατόντη της λίμνης φωτιάς ενώ όσο η απόσταση μεγαλώνει από την πηγή της θερμότητας η τιμή της θερμοκρασίας μειώνεται. Στη συνέχεια, σχήμα 6-12 b) δηλαδή σε χρονικό διάστημα 300 s από την έναρξη της προσομοίωσης, εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας στην οροφή της σήραγγας αγγίζοντας την μέγιστη τιμή της. Το σημείο αυτό αποτελεί κρίσιμο διότι αυτή η μεταβολή παρουσιάζεται στο μέσο της σήραγγας. Ο λόγος για τον οποίο διακρίνεται αυτή η συμπεριφορά του θερμοκρασιακού προφίλ είναι η αρχικά η επίδραση του μηχανικού αερισμού. Συγκεκριμένα η μεταφορά των θερμών καυσαερίων, εξαιτίας του μηχανικού αερισμού, αναμιγνύονται με εκείνα που παράγονται εξαιτίας της πηγής θερμότητας. Κατά δεύτερον στην συγκεκριμένη θέση της σήραγγας, το πλούμιο διατηρεί την μέγιστη ισχύ του με αποτέλεσμα να συνεισφέρει συνεχώς υψηλά ποσά θερμότητας. Ως χρονικό σημείο αλλαγής της συμπεριφοράς της κατατομής θερμοκρασίας είναι αυτό του σχήματος 6-12 c). Η μείωση της οφείλεται στην αύξηση της ταχύτητας με αποτέλεσμα να μειώνεται η μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί η εξάλειψη του φαινομένου αναστροφής του καπνού που καθιστά τα πρώτα 250 m της σήραγγας ασφαλή προς διέλευση. Όσο το φαινόμενο εξελίσσεται χρονικά, οι τιμές της θερμοκρασίας μειώνονται σημαντικά στο συμμετρικό επίπεδο της σήραγγας ($x=250$ m) καθώς και στο στόμιο εξόδου της. Η εν λόγω συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι η ισχύς της φωτιάς μειώνεται σταδιακά. Παράλληλα η επίδραση των ανεμιστήρων ώσης εξαναγκάζουν τα θερμά καυσαέρια να εγκαταλείψουν την σήραγγα από το στόμιο εξόδου της με αποτέλεσμα η συνολική θερμοκρασία εντός της να ελαττώνεται. Στο πέρας της προσομοίωσης (σχήμα 6-12 e) η θερμοκρασία που επικρατεί εντός της σήραγγας κυμαίνεται γύρω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος με στόχο την ασφαλή αντιμετώπιση του ατυχήματος υπό το πρίσμα της θερμοκρασίας.



Σχήμα 6-11 Ισοϋψής κατανομή θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από: a) 240s ,b) 340s, c)440s) , d) 540s,e)680s



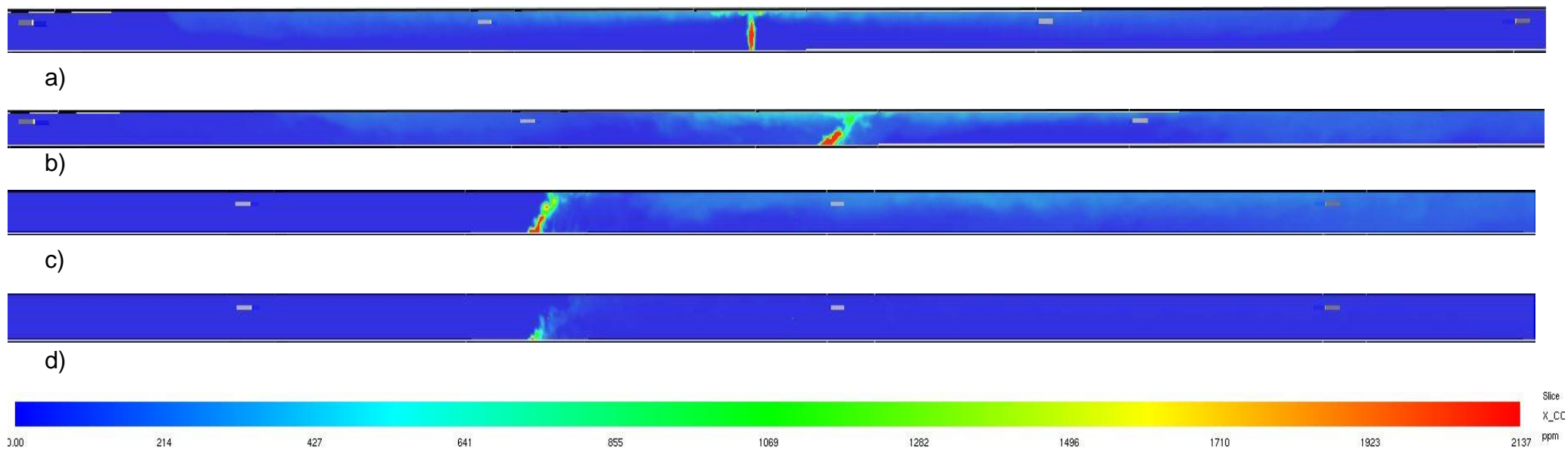
Σχήμα 6-12 Ισοϋψής κατανομή θερμοκρασίας στο κρηπίδωμα μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d) 490s, e)680s

6.3.3 Συγκέντρωση μονοξειδίου

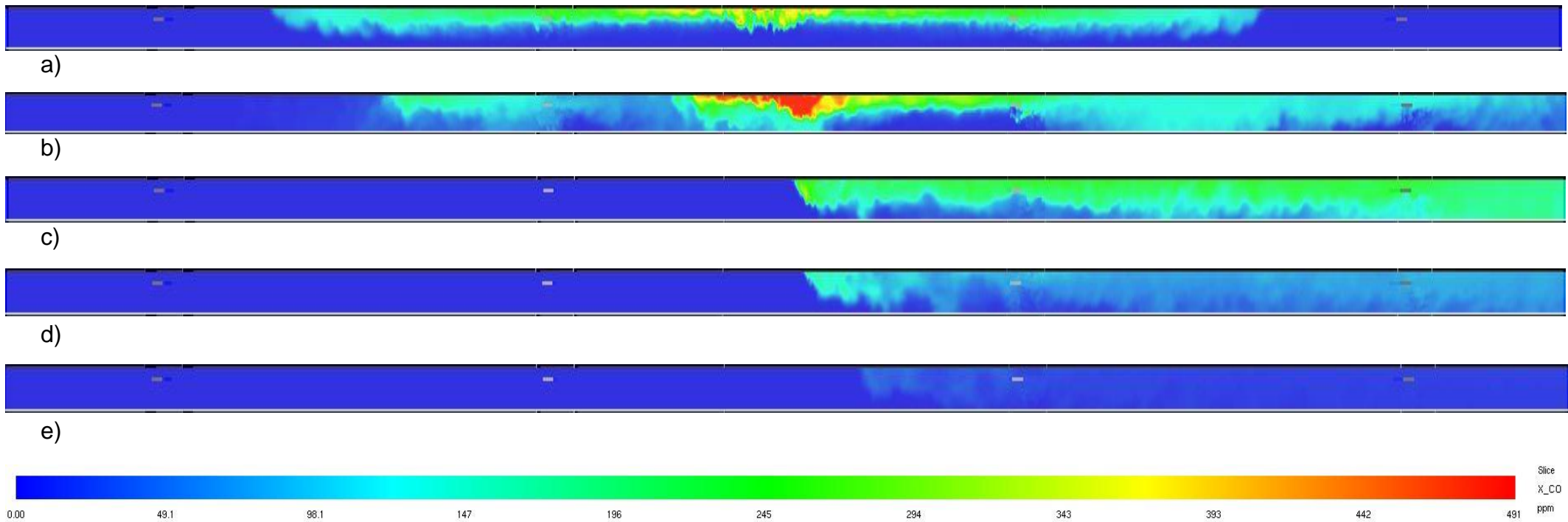
Στο παρόν κεφάλαιο, θα μελετηθεί η συγκέντρωση των βλαβερών για τον άνθρωπο ρύπων της καύσης εντός της σιδηροδρομικής σήραγγας. Τα επίπεδα ενδιαφέροντος διακρίνονται αρχικά στο επίπεδο συμμετρίας της σιδηροδρομικής σήραγγας, καθώς και στο επίπεδο διέλευσης των πεζών, που αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό αυτού του κεφαλαίου. Σκοπός είναι να αξιολογηθεί κατά πόσο η επίδραση του μηχανικού αερισμού, επηρεάζει την διάχυση του ρύπου. Με τελικό στόχο να αξιολογηθεί εκ πρώτης όψεως αν οι τιμές συγκέντρωσης μονοξειδίου αποτελούν σημαντικό κίνδυνο

Η εξέταση της συγκέντρωσης CO στο συμμετρικό επίπεδο της σιδηροδρομικής σήραγγας μελετάται σύμφωνα με το σχήμα 6-13. Τα πρώτα 200 s της προσομοίωσης διακρίνονται στο σχήμα 6-13 a όπου η ισχύς της φωτιάς αυξάνεται γραμμικά χωρίς να κορυφώνεται στην μέγιστη τιμή της. Παρατηρείται πως η μεγαλύτερη εκπομπή του ρύπου βρίσκεται στο μέσο της σήραγγας. Η αιτία στην οποία οφείλεται η υψηλή συγκέντρωση είναι η μεγάλη τιμή της θερμοκρασίας η οποία παράγει υψηλές ποσότητες μονοξειδίου. Το φαινόμενο αναστροφής του καπνού ωστόσο, είναι ικανό να μεταφέρει τις βλαβερές συγκεντρώσεις μονοξειδίου, τόσο ανάντη όσο και κατόντη της θέσης του ατυχήματος με εμφανώς μικρότερες τιμές συγκέντρωσης. Μετά από το χρονικό διάστημα 60 s σχήμα 6-13 b διακρίνεται η αλλαγή της διεύθυνσης του πλουμίου καθώς ο μηχανικός αερισμός σταδιακά κατευθύνει τον ρυπογόνο αέρα στην έξοδο της σήραγγας. Ωστόσο ένα ποσοστό της μάζας αυτής παραμένει κατόντη του σημείου πυρκαγιάς συγκεντρωμένο στην οροφή της σήραγγας. Στην συνέχεια, στο σχήμα 6-13 c απεικονίζεται εστιασμένη η χρονική στιγμή αναστροφής του καπνού. Παρατηρείται εμφανώς η πλήρης εξάλειψη υψηλών συγκεντρώσεων ρύπων κατόντη της θέσης του ατυχήματος. Κλείνοντας με το σχήμα 6-13 d, διακρίνουμε πως στο εσωτερικό της σήραγγας υπάρχουν μηδενικές συγκεντρώσεις CO σε όλο το μήκος της σιδηροδρομικής σήραγγας. Οι λόγοι για τους οποίους παρατηρούμε αυτή τη μεταβολή οφείλονται α) στην μείωση της ισχύς της φωτιάς και β) στην ικανότητα του μηχανικού αερισμού να εξαγάγει την ρυπογόνα μάζα του αέρα εκτός της σήραγγας.

Ο σχολιασμός της συγκέντρωσης CO στο επίπεδο διέλευσης των πεζών πρόκειται να γίνει με βάση το σχήμα 6-14. Στη χρονική στιγμή των 240 s σχήμα 6-14 a παρατηρούμε την μέγιστη διάχυση του μονοξειδίου στο εσωτερικό της σήραγγας. Οι ανεμιστήρες ώσης δεν έχουν ξεκινήσει την λειτουργία τους με αποτέλεσμα οι ανωστικές δυνάμεις λόγω της φωτιάς να αυξάνουν την ορμή των θερμών καυσαερίων. Έτσι η μεγαλύτερη συγκέντρωση CO παρατηρείται κυρίως στην οροφή της σήραγγας αλλά και στα χαμηλότερα ύψη της κοντά στα στόμια εισόδου-εξόδου της σήραγγας. Μετά από 60 s σχήμα 6-14 b οι ανεμιστήρες ώσης βρίσκονται στην πλήρη λειτουργία τους οπότε διακρίνεται η ανάμειξη των βλαβερών ρύπων με υψηλή διάχυση αυτών με την μεγαλύτερη να παρατηρείται στην οροφή της σήραγγας. Σημαντική είναι η συμβολή του μηχανικού αερισμού που σταδιακά εξάγει τα θερμά καυσαέρια στο στόμιο εξόδου της. Η χρονική στιγμή των 390 s σχήμα 6-14 c, αποτελεί κομβική διότι εξαλείφεται το φαινόμενο αναστροφής του καπνού. Διακρίνεται εμφανώς η απουσία υψηλής συγκέντρωσης μονοξειδίου κατάντι του σημείου της πυρκαγιάς ενώ για το υπόλοιπο μισό της σήραγγας συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Στο σχήμα 6-14 d δηλαδή σε χρονική διάρκεια 490 s από την έναρξη του ατυχήματος η κατανομή της συγκέντρωσης του CO μειώνεται ωστόσο η διάχυσή του δεν αλλάζει δραστικά. Κλείνοντας, στο πέρας της προσομοίωσης, η μεταβολή της συγκέντρωσης των βλαβερών καυσαερίων προσεγγίζει την τιμή μηδέν για όλο το μήκος της σήραγγας, με αποτέλεσμα την ασφαλή διέλευση-εκκένωση των πεζών.



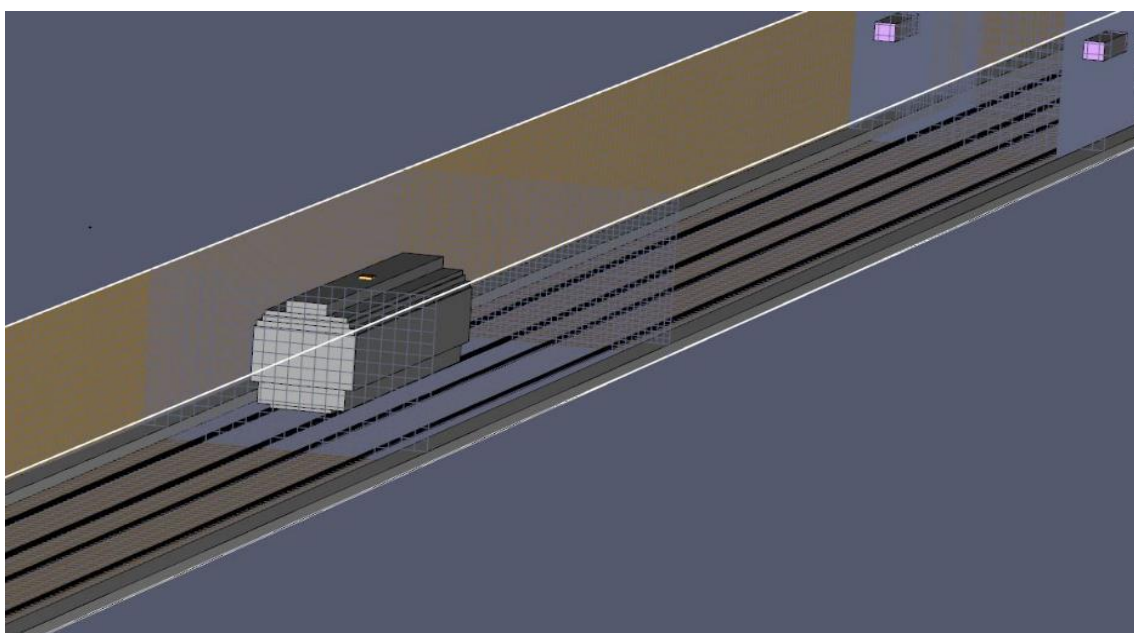
Σχήμα 6-13 Ισοϋψής κατανομή συγκέντρωσης CO στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d) 590s,e)680s



Σχήμα 6-14 Ισοϋψής κατανομή συγκέντρωσης CO στο κρηπίδωμα μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s , d) 490s,e)680s

6.4 Σενάριο πυρκαγιάς υπό την παρουσία μηχανής έλξης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε την τρίτη περίπτωση της μελέτης αυτής της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, θα μελετηθεί κατά πόσο η χρήση του μηχανικού αερισμού είναι ικανή να πραγματοποιήσει τον πλήρη αποκαπνισμό της σήραγγας, σε περίπτωση που συμπεριλαμβάνεται μια τυπική μηχανή έλξης εντός της. Το τρίτο σενάριο περιλαμβάνει την έναρξη πυρκαγιάς, ισχύος 8 MW σε απόσταση ($x=250$ m) από την είσοδό της και στην οροφή του τρένου. Η θέση του πλουμίου φωτιάς βρίσκεται στο επίπεδο της διατομής $y=7.5$ m όπου σε αυτό εξετάζονται τα βαθμωτά και τα διανυσματικά μεγέθη που περιγράφονται παρακάτω. Σημειώνεται δε πως η ισχύς της φωτιάς λίμνης είναι χρονικά μεταβαλλόμενη σύμφωνα με το σχήμα (2-1) όπου για το διάστημα 100 s διατηρεί την μέγιστη τιμή της. Το χρονικό σημείο όπου οι ανεμιστήρες ώσης ξεκινούν την λειτουργία τους είναι 240 s μετά από την έναρξη της πυρκαγιάς και η διαφορά φάσης της εκκίνησης τους είναι 5 s για κάθε ομάδα ανεμιστήρων. Στη συνέχεια, πρόκειται να εξεταστούν με τις ίδιες συνθήκες τα μεγέθη στο επίπεδο συμμετρίας καθώς και στο επίπεδο των ανεμιστήρων ώσης-κρηπιδώματος. Στόχος είναι η ποιοτική απεικόνιση και σχολιασμός των εξεταζόμενων μεγεθών υπό την επίδραση του ντιζελομηχανής εντός της διατομής της σήραγγας. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι η εκ πρώτης όψεως να διαμόρφωση κατάλληλης στρατηγικής που να εξασφαλίζει την ασφάλεια διέλευσης.



Στο σχήμα 6-15 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της εξάπλωσης του καπνού εντός της σήραγγας για χρονική διάρκεια περίπου 680 s από την έναρξη της φωτιάς συμπεριλαμβανομένου του συρμού. Στο εν λόγω σχήμα παρουσιάζονται αναλυτικά οι διακριτές χρονικές στιγμές όπου λαμβάνει χώρα ο πλήρης αποκαπνισμός της σήραγγας. Συγκεκριμένα στο σχήμα 6-15 a παρουσιάζεται η διάχυση της τέφρας στο εσωτερικό της σήραγγας χωρίς την επιρροή του μηχανικού αερισμού. Παρατηρείται πως το φαινόμενο αναστροφής καπνού (backlayering) είναι εμφανές και συγκεκριμένα καταλαμβάνει περίπου το 1/2 του μήκους της σήραγγας. Συνεχίζοντας, στο σχήμα 6-15 b παρατηρείται πως για την χρονική στιγμή των 260 s το μήκος του καπνού L_f μεγιστοποιείται εφόσον οι ανεμιστήρες ώσης της τελευταίας ομάδας μόλις ξεκινούν την λειτουργία τους. Σημαντική αναφορά χρειάζεται να γίνει στην περιοχή ανάντι της δεύτερης ομάδας ανεμιστήρων για την οποία η συγκέντρωση καπνού είναι υψηλή σε όλο το ύψος της σήραγγας. Μετά από διάρκεια 100 s σχήμα 6-15 c, διακρίνεται η ισχυρή επίδραση του μηχανικού αερισμού στο εσωτερικό της σήραγγας, ενώ μετά από το πέρας 30 s σχήμα 6-15 d παρατηρείται η εξάλειψη του φαινομένου αναστροφής καπνού. Καθώς οι ανεμιστήρες ώσης συνεχίζουν να λειτουργούν σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης, παρατηρούμε πως ο πλήρης αποκαπνισμός της σήραγγας κατάντι του σημείου πυρκαγιάς, σχήμα 6-8 e έχει πλέον επιτευχθεί με αποτέλεσμα να αυξάνονται τα επίπεδα ορατότητας. Σημαντική σημείωση είναι πως την χρονική στιγμή από 240 s έως 390 s η ισχύς της φωτιάς διατηρεί την μέγιστη τιμή της. Στην τελευταία χρονική στιγμή της προσομοίωσης (σχήμα 6-15 e) απεικονίζεται η ικανότητα του μηχανικού αερισμού να εξάγει τα καυσαέρια εκτός της σήραγγας και να διατηρήσουν υψηλότερα επίπεδα ορατότητας σε σχέση με τις προηγούμενες χρονικές στιγμές.

6.4.1 Ταχύτητα

Στο σχήμα 6-16 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή του πεδίου τιμών της ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς της σήραγγας. Για τα πρώτα 200 s από την έναρξη της φωτιάς παρατηρούμε πως έχει ήδη εμφανιστεί το φαινόμενο αναστροφής καπνού. Υπό το πρίσμα της ταχύτητας διακρίνουμε πως στην οροφή

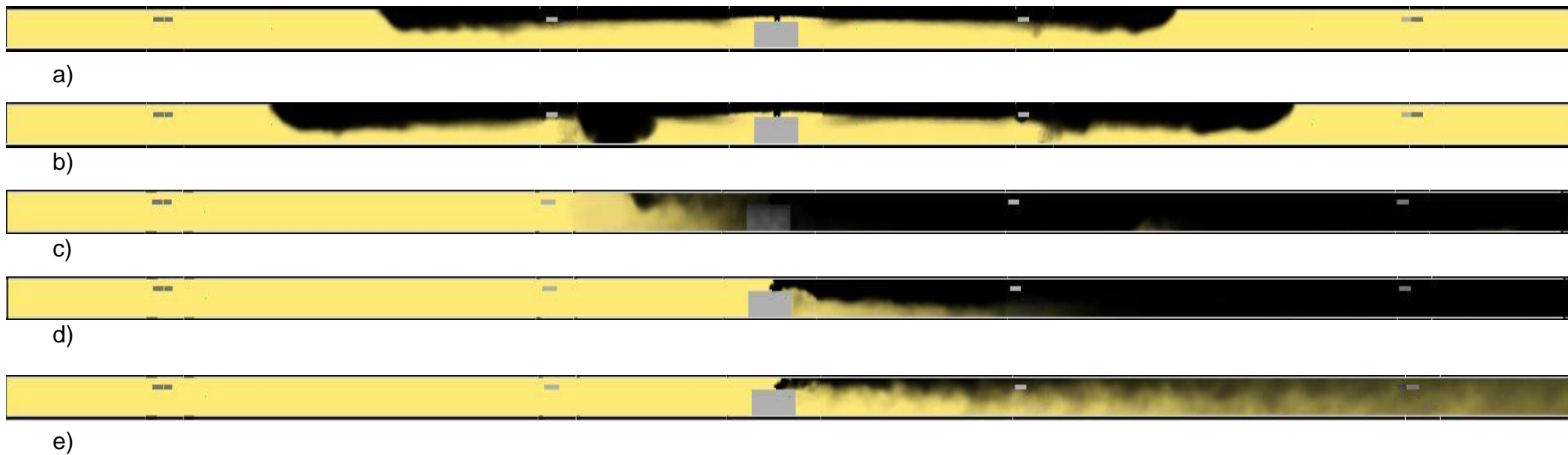
της σήραγγας το μέτρο της ταχύτητας παραμένει ίδιο ανάντι και κατάντι της φωτιάς με την διαφορά να αλλάζει στο πρόσημο της. Η αύξηση της ταχύτητας είναι αναμενόμενη εφόσον η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει την πίεση και εν τέλει την τιμή της ταχύτητας στο πεδίο ροής. Ωστόσο κάτω από το ζεστό υπόστρωμα του καπνού οι τιμές της ταχύτητας είναι σαφώς μικρότερες αφού τα στρώματα αέρα σε αυτές τις περιοχές δεν επηρεάζονται από την αύξηση της θερμοκρασίας στον ίδιο βαθμό. Συνεχίζοντας, στο χρονικό διάστημα των 260 s από την έναρξη της φωτιάς σχήμα 6-16 b), βλέπουμε πως η τιμή της ταχύτητας, μεταβάλλεται και συγκεκριμένα στις περιοχές ενδιάμεσα των ανεμιστήρων ώσης όπου δημιουργείται το φαινόμενο αναστροφής της ροής. Ωστόσο διακριτές είναι οι περιοχές στις οποίες η ταχύτητα κατευθύνεται με αρνητικό πρόσημο για παράδειγμα στην οροφή της σήραγγας. Στο σχήμα 6-15 c την χρονική στιγμή 390 s από την έναρξη της φωτιάς, εμφανίζεται κρίσιμη αλλαγή. Το φαινόμενο της αναστροφής καπνού αρχίζει να καταστέλλεται και η ταχύτητα αυξάνεται ραγδαία σε σύγκριση με τις προηγούμενες χρονικές στιγμές. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθούν κάποια από τα σημεία του πεδίου ροής, που εμφανίζουν έντονο ενδιαφέρον συζήτησης. Αρχικά η τιμή της ταχύτητας για τα πρώτα 250 m από την είσοδο της σήραγγας δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές ωστόσο στο στόμιο εισόδου της εμφανίζονται τοπικές διακυμάνσεις. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι στη θέση ($x=250$ m) όπου η ταχύτητα παίρνει την μέγιστη τιμή της. Η αιτία που προκαλεί την εν λόγω συμπεριφορά της ροής οφείλεται στη μείωση της διατομής της σήραγγας λόγω της ύπαρξης της ντιζελομηχανής. Η επίδραση της στένωσης αυξάνει την τιμή της ταχύτητας προκειμένου να ικανοποιείται η διατήρηση της μάζας. Αυτό έχει αποτέλεσμα τα θερμά καυσαέρια να αποκτούν μεγαλύτερη ορμή και να συντελούν στο απόρευμα του συρμού. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που αξίζει να αναφερθεί είναι πως το μήκος του απορεύματος του συρμού είναι περίπου 65 m και το ύψος του είναι ανάλογο του ύψους της σήραγγας. Οπότε, σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, η επιλογή του μηχανικού αερισμού ως στρατηγική ασφαλείας μπορεί να αλλάξει σε δεύτερο στάδιο σχεδιασμού του αποκαπνισμού της σήραγγας. Τέλος, στο σχήμα 6-16 d απεικονίζεται το πεδίο ροής στο πέρας του χρόνου προσομοίωσης. Σημειώνεται πως έχει η ισχύς της φωτιάς έχει φτάσει

στην ελάχιστη τιμή της, οπότε η επίδραση λόγω μεταφοράς θερμότητας στον περιβάλλοντα αέρα και τα καυσαέρια μειώνεται. Κατά την χρονική στιγμή αυτή εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της ταχύτητας στην είσοδο της σήραγγας αγγίζοντας την μέγιστη τιμή της. Συνεχίζοντας η κατανομή της ταχύτητας στο σημείο της μηχανής έλξης διατηρεί υψηλές τιμές. Ωστόσο, στην περιοχή του απορεύματος της ντιζελομηχανής παρατηρούνται υψηλότερες τιμές της ταχύτητας στην οροφή της σήραγγας, ενώ διακρίνονται περισσότερες διακυμάνσεις σε σχέση με την προηγούμενη χρονική στιγμή.

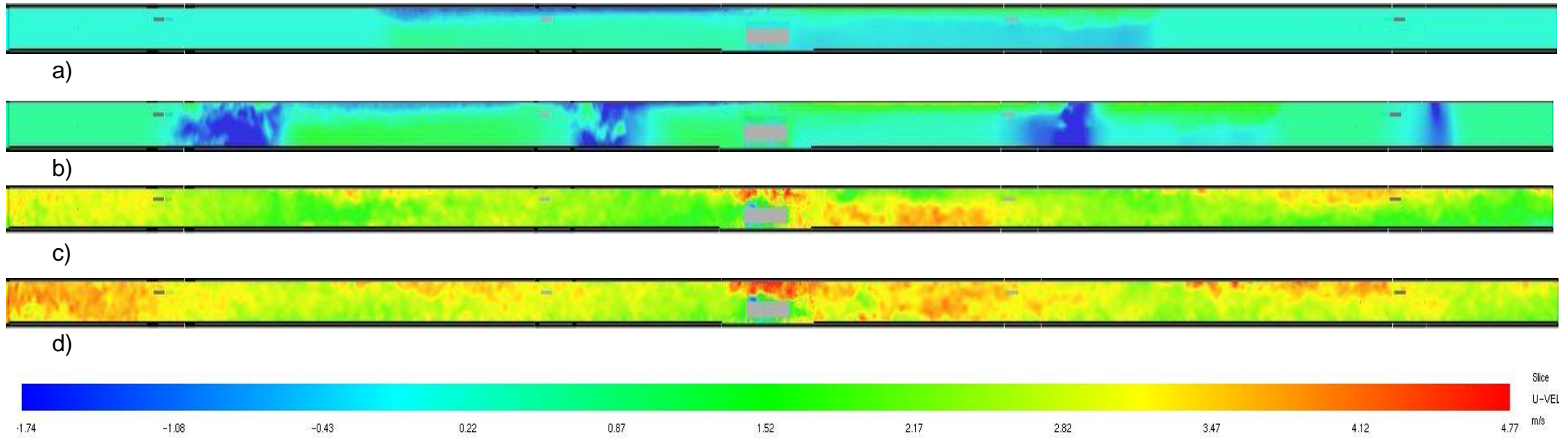
Στο σχήμα 6-17 πρόκειται να σχολιαστεί το επίπεδο συρμού. Σε 240 s από την έναρξη της φωτιάς παρατηρούμε πως η ταχύτητα στην οροφή της σήραγγας παρουσιάζει συμμετρική συμπεριφορά ως προς το πεδίο τιμών της διαφοροποιώντας τις δύο περιοχές ανάντι και κατόντι της φωτιάς μέσω του πρόσημού της. Σε αυτό το χρονικό σημείο της προσομοίωσης η τιμή της ταχύτητας είναι μικρότερη της κρίσιμης με αποτέλεσμα το φαινόμενο back layering να επηρεάζει το επίπεδο διέλευσης των πεζών. Μετά από διάστημα 60 s σχήμα 6-10 b δηλαδή 260 s από την έναρξη της φωτιάς οι ανεμιστήρες ώσης της τελευταίας ομάδας ($x=450$ m) έχουν ξεκινήσει να λειτουργούν με αποτέλεσμα να αυξήσουν την ταχύτητα της ροής. Κομβικό χρονικό σημείο αποτελεί το σχήμα 6-10 c στο οποίο η αναστροφή του καπνού έχει πλέον εξαλειφθεί. Παρατηρείται πως η ταχύτητα ροής στο επίπεδο του κρηπιδώματος τηρεί τις προδιαγραφές για την ασφαλή εκκένωση των πεζών. Επιπροσθέτως δεν παρουσιάζονται έντονες διακυμάνσεις της ταχύτητας που θα μπορούσε να δυσχεραίνει την διέλευση τους. Τέλος, στο χρονικό διάστημα των 680 s σχήμα 6-17 a και d η τιμή της ταχύτητας δεν αλλάζει δραστικά με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το πεδίο ροής με μεγαλύτερη ομοιογένεια.

Όσον αφορά το επίπεδο του κρηπιδώματος ο σχολιασμός της κατανομής της ταχύτητας πρόκειται να γίνει σύμφωνα με το σχήμα 6-18. Στο σχήμα 6-18 a για τα πρώτα 200 s της προσομοίωσης παρατηρούμε πως δεν υπάρχει κάποια σημαντική μεταβολή στο πεδίο ταχυτήτων. Την χρονική στιγμή που ξεκινούν την λειτουργία τους οι ανεμιστήρες της τελευταίας ομάδας, διακρίνεται αύξηση της ταχύτητας του πεδίου ροής μακριά από το ακροφύσιο εκροής τους σχήμα 6-18

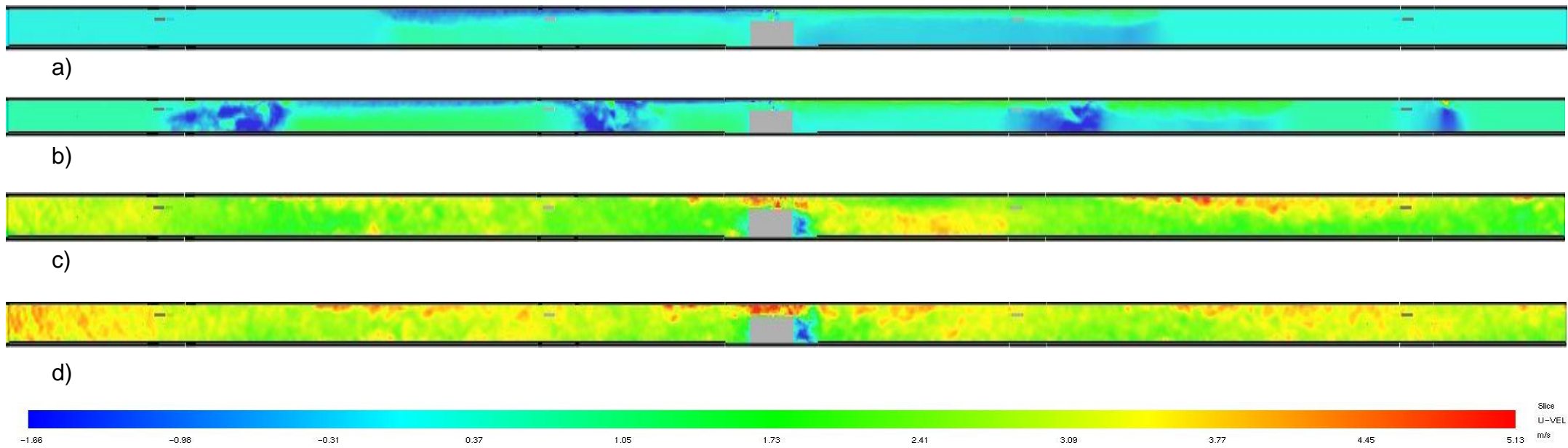
b. Όσο το φαινόμενο εξελίσσεται χρονικά και σε χρόνο 390 s από την αρχή της προσομοίωσης, το φαινόμενο αναστροφής καπνού αντιμετωπίζεται, η ταχύτητα αυξάνεται ραγδαία σχήμα 6-18 c. Στην συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η κατανομή των τιμών της ταχύτητας δεν παρουσιάζει ακραίες μεταβολές: εξαιρώντας τα σημεία της ροής όπου το πρόσσημο της γίνεται αρνητικό. Στη τελευταία χρονική στιγμή σχήμα 6-18 d, η συμπεριφορά της ροής στο επίπεδο του κρηπιδώματος, παρουσιάζει επί το πλείστον μεγαλύτερη ομοιογένεια τιμών ταχύτητας σε όλο το μήκος της σήραγγας. Οι διαφορές διακρίνονται στο στόμιο εισόδου και εξόδου αλλά και στα σημεία του ακροφυσίου εκροής των ανεμιστήρων.



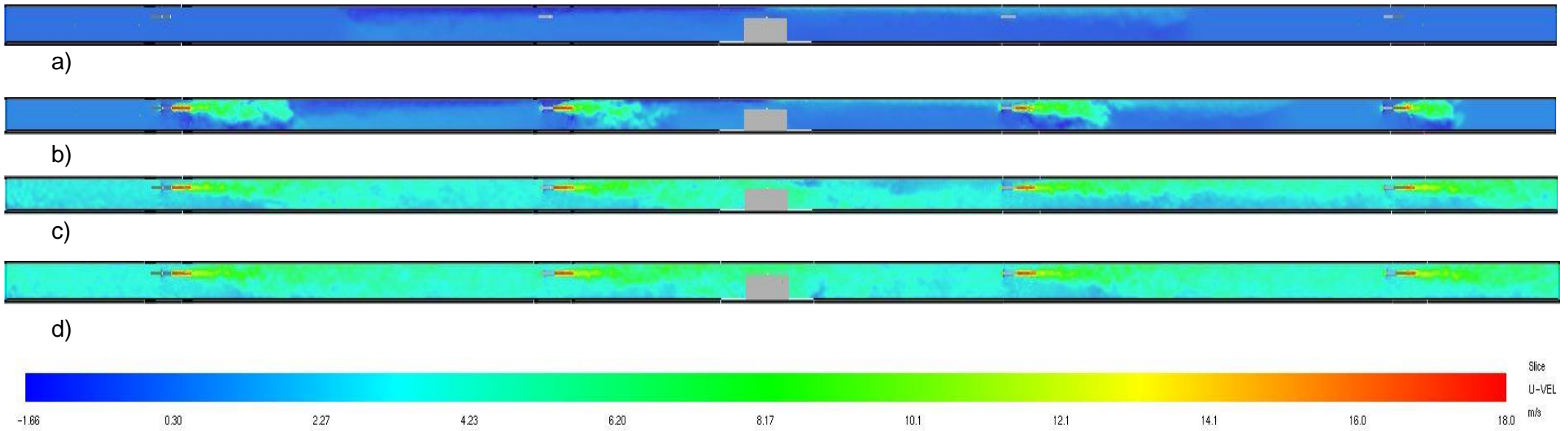
Σχήμα 6-15 Χρονική εξέλιξη της εξάπλωσης καπνού για μετά από: a) 200s ,b) 260s, c)360s) , d) 390s,e)680s



Σχήμα 6-16 Ισοϋψής κατανομή ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς της σήραγγας μετά από : a) 200s ,b) 260s, c)390s), d) 680s



Σχήμα 6-17 Ισοϋψής κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο του συρμού μετά από: a) 200s ,b) 260s, c)390s), d) 680s



Σχήμα 6-18 Ισοϋψής κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο του κρηπιδώματος μετά από: a) 200s ,b) 260s, c)390s , d) 680s

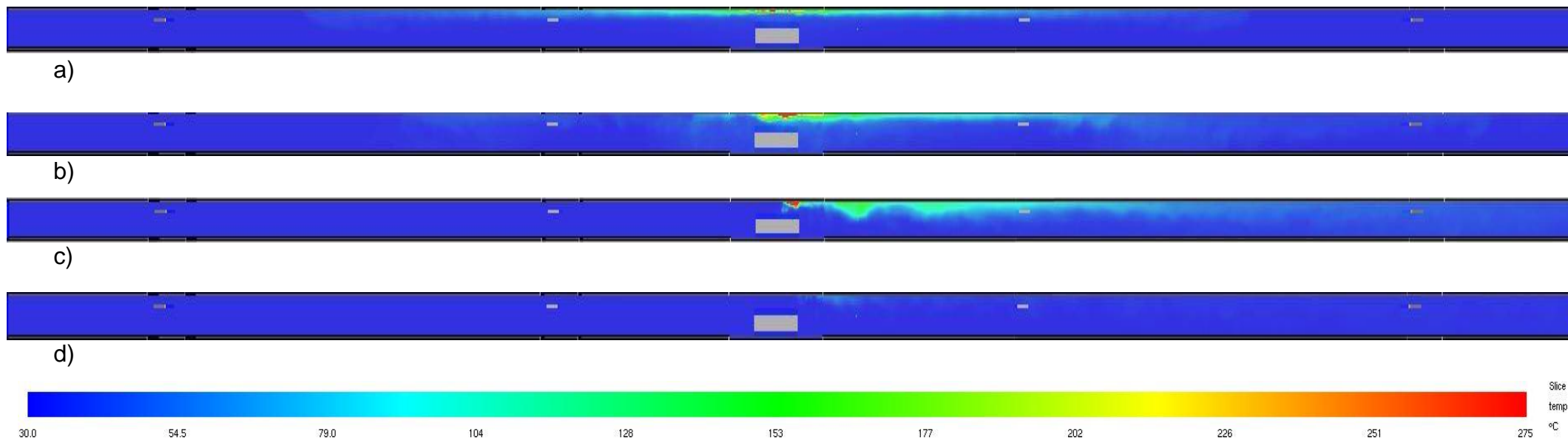
6.4.2 Θερμοκρασία

Στο παρόν κεφάλαιο, θα μελετηθεί το θερμοκρασιακό προφίλ εντός της σιδηροδρομικής σήραγγας με την παρουσία σιδηροδρομικού συρμού για διακριτές χρονικές στιγμές. Τα επίπεδα ενδιαφέροντος διακρίνονται αρχικά στο επίπεδο συμμετρίας της σιδηροδρομικής σήραγγας, στο επίπεδο διέλευσης του συρμού και στο αξονοσυμμετρικό κέντρο των ανεμιστήρων ώσης, με την παραδοχή ότι συμπίπτει του επιπέδου διέλευσης των πεζών. Ως αρχικός σκοπός είναι να αξιολογηθεί μέσω της οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων κατά πόσο η επίδραση του μηχανικού αερισμού, επηρεάζει την μεταφορά της θερμότητας σε κάθε επίπεδο ενδιαφέροντος. Τελικό στόχος είναι να αξιολογηθεί εκ πρώτης όψεως αν οι τιμές της θερμοκρασίας αποτελούν σημαντικό κίνδυνο.

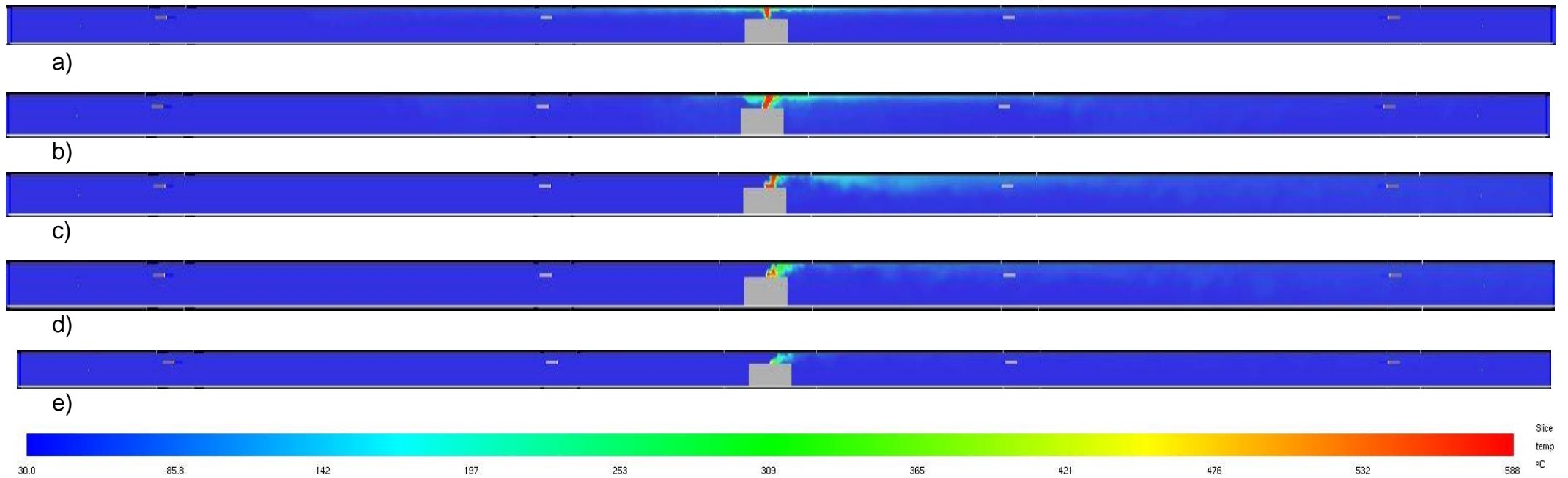
Σε πρώτο στάδιο θα εξεταστεί η ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς. Αρχικά, στο σχήμα 6-19 a η φωτιά έχει φτάσει την μέγιστη ισχύ της και παρατηρούμε πώς η τιμή της θερμοκρασίας του πλουμίου είναι η μέγιστη. Η μεταβολή της θερμοκρασίας παρατηρείται στην οροφή της σήραγγας, ειδικότερα στο σημείο της εστίας της φωτιάς. Να σημειωθεί επίσης πως μέχρι την χρονική στιγμή των 240 s οι ανεμιστήρες ώσης είναι εκτός λειτουργίας. Στην συνέχεια στο σχήμα 6-19 b παρατηρούμε πως οι τιμές της θερμοκρασίας από το στόμιο εισόδου της σήραγγας ως το μέσο της διατηρεί την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ροή είναι ήδη επηρεασμένη από την λειτουργία των ανεμιστήρων ώσης οι οποίοι εμποδίζουν την αναστροφή του καπνού και μεταφέρουν τα θερμά καυσαέρια στο στόμιο εξόδου της σήραγγας. Στο χρονικό σημείο των 340 s σχήμα 6-19 c η ισχύς της φωτιάς παρουσιάζει σημείο καμψής με αποτέλεσμα ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας να φθίνει συνεχώς. Συνεπώς σε χρονικό διάστημα 150 s (σχήμα 6-19 a και c) διακρίνεται η επίδραση του μηχανικού αερισμού στην κατανομή της θερμοκρασίας στην δυσμενέστερη συνθήκη του ατυχήματος. Όσο το φαινόμενο εξελίσσεται χρονικά, παρατηρείται πως δεν υπάρχει μεγάλη μεταβολή στο πεδίο θερμοκρασιών ανάντι και κατόντι του σημείου πυρκαγιάς σχήμα 6-19 c ως d μέχρι την λήξη της προσομοίωσης.

Μετά την περιγραφή του επιπέδου συμμετρίας, ακολουθεί ο σχολιασμός της θερμοκρασιακής κατανομής στο επίπεδο του συρμού. Στο χρονικό σημείο των 240 s, οι ανεμιστήρες ώσης είναι εκτός λειτουργίας με αποτέλεσμα να κυριαρχούν υψηλές τιμές θερμοκρασίας ιδιαίτερα στην οροφή της σήραγγας σχήμα 6-20 a. Στην συνέχεια, σχήμα 6-20 b δηλαδή σε χρονικό διάστημα 300 s από την έναρξη της προσομοίωσης, ο μηχανικός αερισμός συμβάλει στην μεταφορά των θερμών καυσαερίων. Η μείωση της διατομής στην θέση $x=250$ m αξίζει σημείωσης διότι εμφανίζονται υψηλές θερμοκρασίες που αποτελούν κίνδυνο εξαιτίας της αποφλοίωσης του τσιμέντου. Στο σχήμα 6-20 c) η ισχύς της φωτιάς παύει να διατηρεί την μέγιστη τιμή της ενώ η αναστροφή του καπνού πλέον δεν υφίσταται. Υπό το πρίσμα της θερμοκρασίας διακρίνεται μείωση των τιμών της συγκεκριμένα στην οροφή της. Τέλος στα (σχήματα 6-19 d και e) δεν παρατηρούνται σημαντικές θερμοκρασιακές αλλαγές στο υπόλοιπο πεδίο ροής. Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται κυρίως στο μέσο της σήραγγας με την διακριτή διαφορά να έγκειται στην πτώση της θερμοκρασίας στο μέγιστο ύψος της σήραγγας.

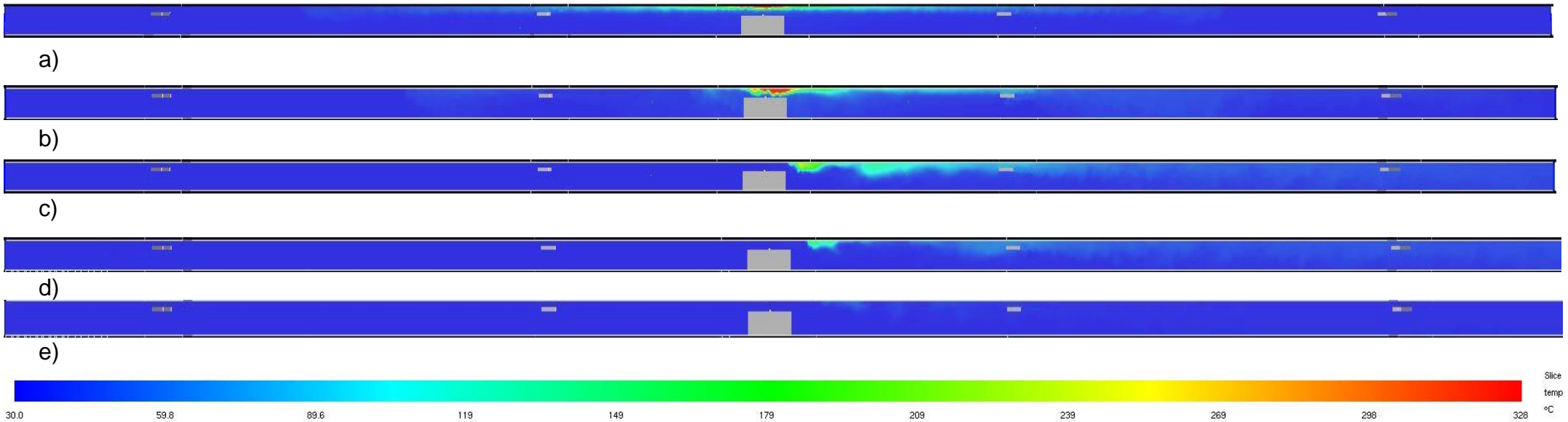
Το επόμενο επίπεδο αναφοράς είναι εκείνο του διαζώματος διέλευσης των πεζών και των συνεργείων συντήρησης. Η απεικόνιση του φαίνεται στο σχήμα 6-20. Για χρονική διάρκεια 240 s από την έναρξη της προσομοίωσης, παρατηρούμε πως η θερμοκρασία είναι υψηλότερη στην οροφή της σήραγγας, ενώ στο ύψος του διαζώματος παραμένει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ύστερα από 60 s σχήμα 6-21 b διακρίνεται πως το θερμοκρασιακό προφίλ στο επίπεδο του κρηπιδώματος μειώνεται κατάντι της φωτιάς και αυξάνεται ανάντη της ιδιαίτερα στην οροφή της σήραγγας. Συνεχίζοντας, την χρονική στιγμή 390 s από την έναρξη της προσομοίωσης η κατατομή της θερμοκρασίας πριν τη λίμνη φωτιάς δεν αλλάζει σημαντικά. Ωστόσο παρατηρείται μείωση στην τιμή της θερμοκρασίας μετά την πηγή θερμότητας και αύξηση της απόστασης στην οποία αυτή κατανέμεται. Μετά από 100 s σχήμα 6-21 d μέχρι και το τέλος της προσομοίωσης σχήμα 6-21 e δεν διακρίνεται κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή της θερμοκρασίας της σήραγγας.



Σχήμα 6-19 Ισοϋψής κατανομή θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο μετά από: a) 240s ,b) 340s, c)390s) , d) 680s



Σχήμα 6-20 Ισοϋψής κατανομή θερμοκρασίας στο επίπεδο του συρμού μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d)490s ,e)680s



Σχήμα 6-21 Ισοϋψής κατανομή θερμοκρασίας στο κρηπίδωμα μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d)490s ,e)680s

6.4.3 Συγκέντρωση μονοξειδίου

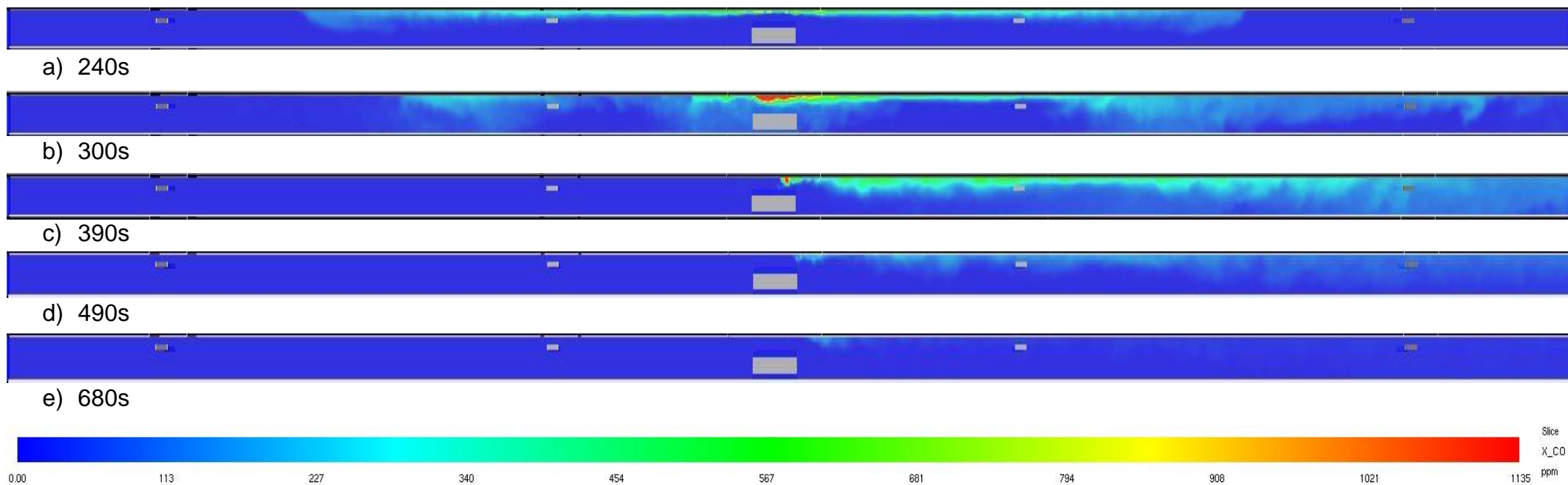
Στο παρόν κεφάλαιο, θα μελετηθεί η συγκέντρωση των βλαβερών για τον άνθρωπο ρύπων που παράγονται λόγω καύσης του $C_{12}H_{23}$ εντός της σιδηροδρομικής σήραγγας. Τα επίπεδα ενδιαφέροντος διακρίνονται αρχικά στο επίπεδο συμμετρίας της σιδηροδρομικής σήραγγας, στο επίπεδο του συρμού, καθώς και στο επίπεδο διέλευσης των πεζών, που αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό αυτού του κεφαλαίου. Σκοπός είναι να αξιολογηθεί κατά πόσο η διάχυση του ρύπου επηρεάζεται από τον μηχανικό αερισμό, με τελικό στόχο να αξιολογηθεί εκ πρώτης όψεως, αν οι τιμές συγκέντρωσης μονοξειδίου αποτελούν σημαντικό κίνδυνο.

Σε πρώτο στάδιο θα εξεταστεί η ισοϋψής συγκέντρωση μονοξειδίου στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς. Αρχικά, στο σχήμα 6-22 a η ισχύς της φωτιάς αγγίζει για πρώτη φορά την μέγιστη ισχύ της. Υπό αυτές τις συνθήκες, η διάχυση του ρύπου κατά μήκος της σήραγγας είναι η μέγιστη, εφόσον οι ανεμιστήρες ώσης δεν έχουν ενεργοποιηθεί ενώ η συγκέντρωση του παρατηρείται στην οροφή της. Συνεχίζοντας, στο σχήμα 6-22 b διακρίνεται μείωση στην συγκέντρωση του ρύπου κατάντι της φωτιάς εξαιτίας του μηχανικού αερισμού. Η αύξηση της συγκέντρωσης ωστόσο φαίνεται πως παρουσιάζεται τόσο στο σημείο όπου η στένωση της διατομής είναι εμφανής λόγω του συρμού όσο και σε μεγάλη απόσταση από την πηγή παραγωγής καυσαερίων. Συνεχίζοντας με το σχήμα 6-22 c παρατηρούμε πως το ήμισυ της σήραγγας είναι ασφαλές διότι εμφανίζονται μηδενικές συγκεντρώσεις μονοξειδίου. Ωστόσο στο υπόλοιπο μέρος της εμφανίζεται υψηλή διάχυση και συγκέντρωση του ρύπου σε διάστημα που απέχει λίγα μέτρα από την έξοδο της σήραγγας. Τέλος για την χρονική στιγμή περάτωσης της προσομοίωσης σχήμα 6-22 d το πεδίο ροής δεν εμφανίζει υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων. Αιτία για την εν λόγω μεταβολή είναι η ελαχιστοποίηση της τιμής ισχύος της φωτιάς καθώς κι η επίδραση το μηχανικού αερισμού που κατεύθυνε τους ρύπους στο στόμιο εξόδου της σήραγγας.

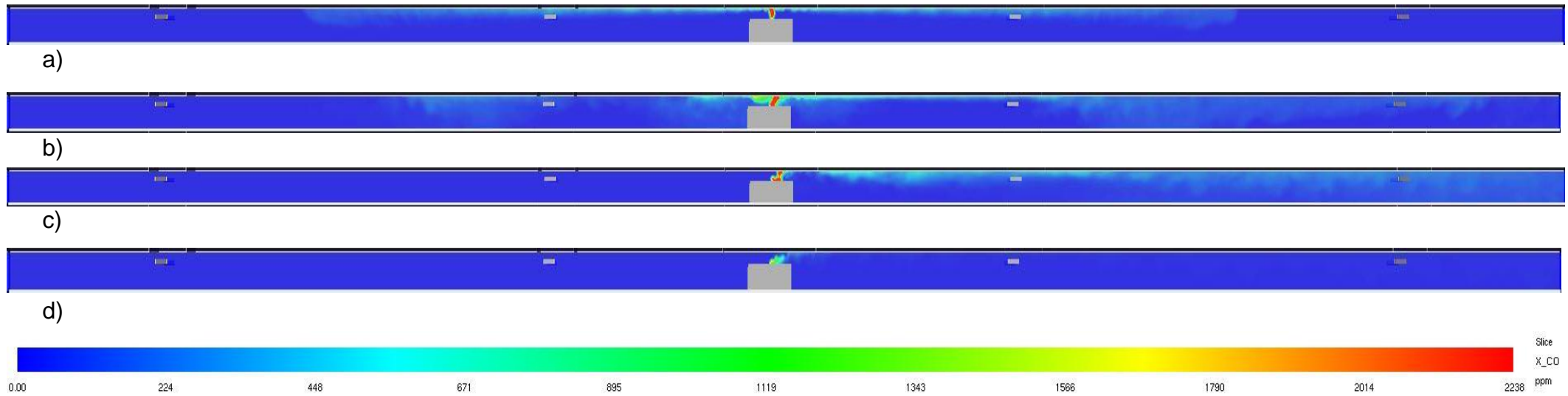
Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή του επιπέδου του συρμού. Ξεκινώντας με το σχήμα 6-22 a παρατηρείται πως η υψηλότερη συγκέντρωση του ρύπου εμφανίζεται στην οροφή της σήραγγας. Σημειώνεται πως η κατανομή του

καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μήκος της και σε μεγάλη απόσταση από την πηγή της φωτιάς. Μετά από 60 s σχήμα 6-22 b ο μηχανικός αερισμός βρίσκεται ήδη στην πλήρη λειτουργία του, με αποτέλεσμα να συμβάλει στην μείωση της συγκέντρωσης του ρύπου κατάντι της φωτιάς. Ωστόσο η συγκέντρωση του αυξάνεται στο σημείο της διατομής της σήραγγας όπου δημιουργείται απομάστευση της ροής λόγω του συρμού. Την χρονική στιγμή που ο μηχανικός αερισμός καταστέλλει το φαινόμενο αναστροφής του καπνού σχήμα 6-22 c, η συγκέντρωση του CO μειώνεται, στο σημείο της στένωσης της σήραγγας και διατηρεί σταθερή τιμή στην οροφή, ανάντη της λίμνης φωτιάς καθώς τα καυσαέρια κατευθύνονται στην έξοδο της σήραγγας. Στο πέρας της προσομοίωσης, δηλαδή σε χρονικό διάστημα 680 s σχήμα 6-22 d από την έναρξη της, παρατηρείται πως η συγκέντρωση του μονοξειδίου διατηρεί χαμηλές τιμές ανάντη και κατάντη της φωτιάς. Ωστόσο στο μέσο της σήραγγας η συγκέντρωση μονοξειδίου διατηρεί σταθερά υψηλότερη τιμή εφόσον η ισχύς της φωτιάς διατηρείται σταθερή και η συνθήκη του μηχανικού αερισμού επίσης.

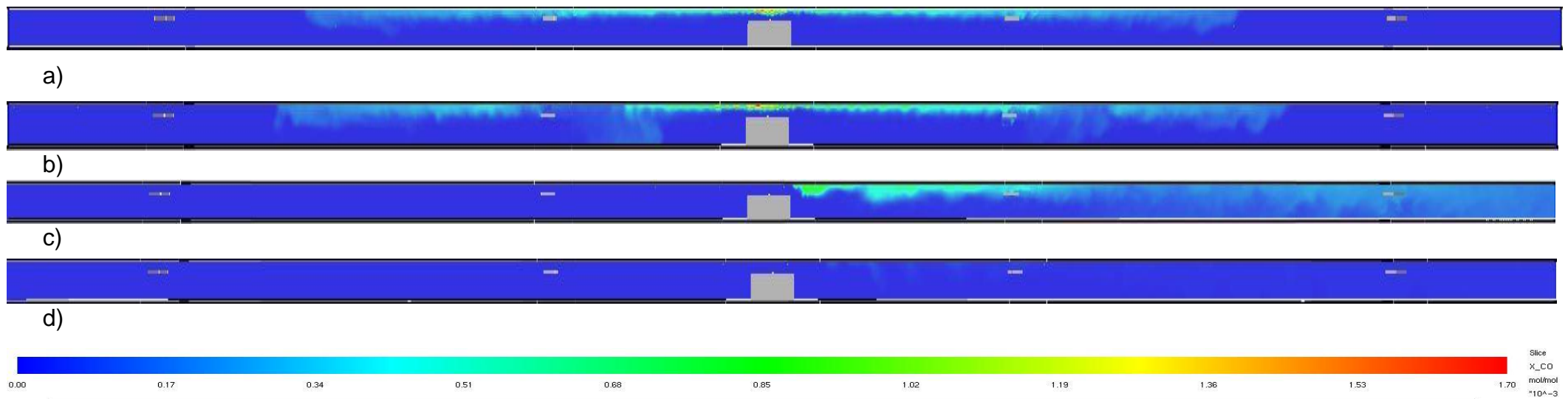
Ως η τελευταία περιγραφή του πεδίου συγκέντρωσης του CO ορίζεται το επίπεδο του κρηπιδώματος. Στο σχήμα 6-23 a, εμφανίζεται υψηλή συγκέντρωση μονοξειδίου στην οροφή της σήραγγας η οποία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της, ωστόσο η τιμή της μειώνεται όσο η απόσταση αυξάνεται από την πηγή παραγωγής του ρύπου. Σε αυτή την περίπτωση διακρίνεται η μέγιστη διάχυση του CO εντός της σήραγγας διότι οι ανεμιστήρες ώσης είναι εκτός λειτουργίας. Στο σχήμα 6-23 b ο μηχανικός αερισμός βρίσκεται ήδη στην πλήρη λειτουργία του με αποτέλεσμα τα βλαβερά καυσαέρια να κατευθύνονται στην έξοδο της σήραγγας. Η μείωση της συγκέντρωσης κατάντι της φωτιάς είναι εμφανής ενώ παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης του ρύπου στο σημείο στένωσης της διατομής. Σε χρονικό διάστημα 390 s από την έναρξη της προσομοίωσης, η τιμές της συγκέντρωσης του ρύπου μειώνονται, ωστόσο η διάχυση του ρύπου αυξάνεται κατά μήκος σήραγγας. Σημαντική παρατήρηση είναι πως οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου καταλαμβάνουν το μέγιστο ύψος της σήραγγας μόλις λίγα μέτρα πριν από το στόμιο εξόδου της. Η συμπεριφορά αυτή παύει να ισχύει καθώς στο πέρας της προσομοίωσης, η συγκέντρωση του ρύπου σε όλο το μήκος της σιδηροδρομικής σήραγγας διατηρεί πολύ χαμηλές τιμές.



Σχήμα 6-22 Ισοψής κατανομή CO στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d)490s ,e)680s



Σχήμα 6-23 Ισοϋψής κατανομή CO στο επίπεδο του συρμού μετά από: a) 240s ,b) 300s, c)390s) , d)680 s



Σχήμα 6-24 Ισοϋψής κατανομή CO στο κρηπίδωμα μετά από: a) 240s ,b) 260s, c)390s , d) 680s

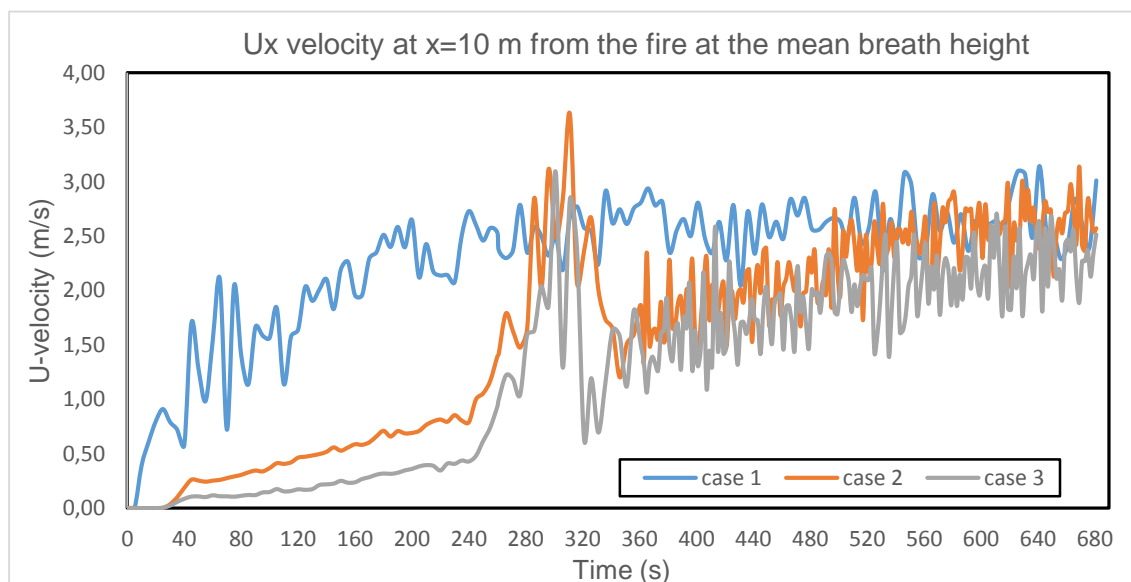
6.5 Αριθμητικά αποτελέσματα

Μετά την ποιοτική ανάλυση των σεναρίων που εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ακολουθεί η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων για τα ίδια εξεταζόμενα μεγέθη ροής. Συγκεκριμένα, θα σχολιαστούν η ταχύτητα, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση μονοξειδίου και για τα τρία σενάρια μελέτης σε διακριτά σημεία εντός της σήραγγας. Ως case 1 ορίζεται η περίπτωση που δεν εξετάζεται κάποιο ατύχημα φωτιάς λίμνης. Το δεύτερο σενάριο με όνομα case 2, αφορά την επίδραση του μηχανικού αερισμού κατά την έναρξη πυρκαγιάς. Τέλος, ως case 3 αναφερόμαστε στο σενάριο όπου εξετάζεται το ατύχημα μιας μηχανής έλξης. Τα εν λόγω σημεία απέχουν 10 m, 50 m και 100 m αντίστοιχα από την θέση του ατυχήματος για το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς και για το επίπεδο διέλευσης των πεζών στο μέσο ύψος αναπνοής του ανθρώπου (1.6 m).

6.5.1 Ταχύτητα

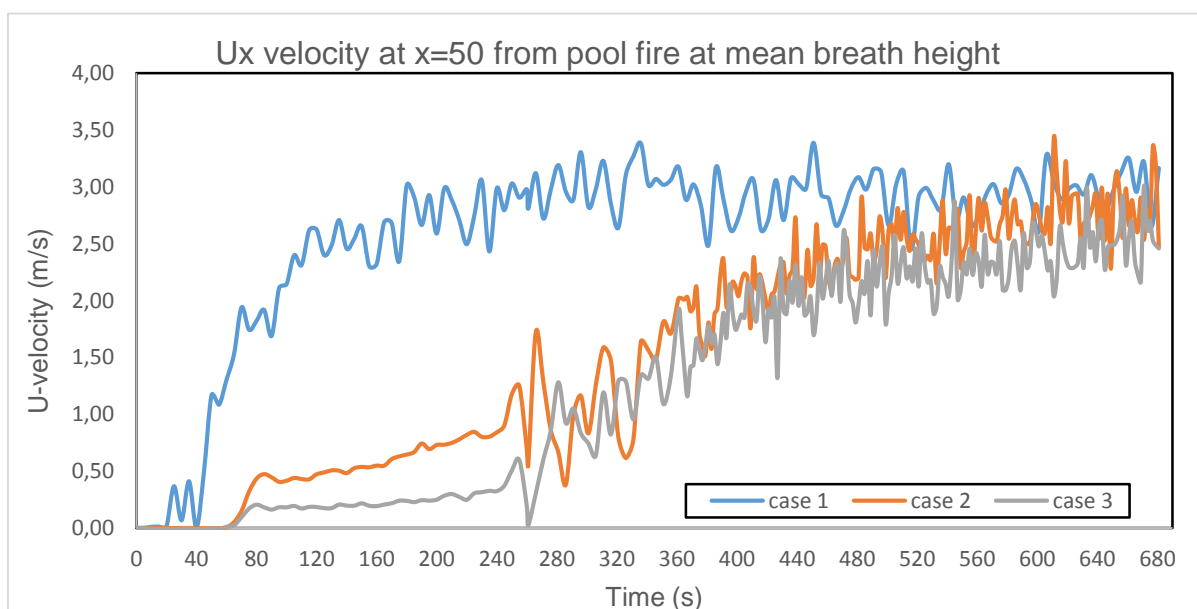
Στο παρόν κεφάλαιο, πρόκειται να παρουσιαστεί η χρονική κατανομή της U_x στο επίπεδο εκκένωσης των πεζών καθώς και του συμμετρικού επιπέδου αναφοράς.

Συμμετρικό επίπεδο αναφοράς



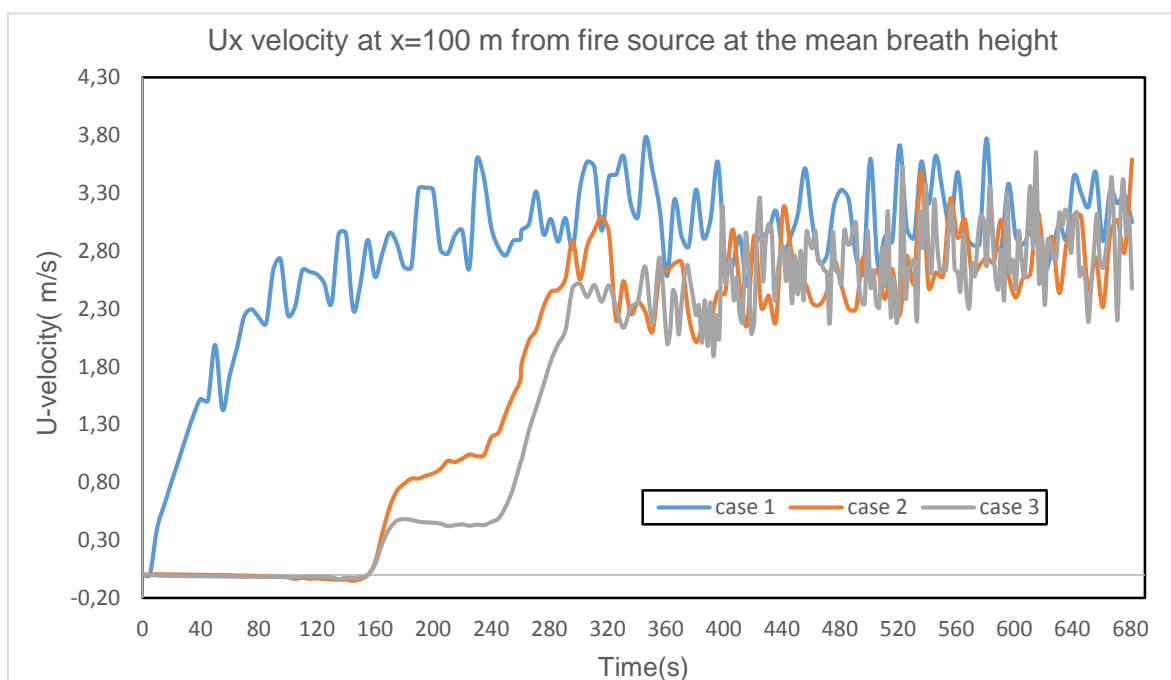
Σχήμα 6-25 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.

Στο σχήμα 6-25 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας στην θέση $x=10$ m από την εστία της φωτιάς για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς. Στο case 1, παρατηρείται πως η τιμή της κρίσιμης ταχύτητας, επιτυγχάνεται σε 250 s της προσομοίωσης ενώ στο case 2 και 3 επιτυγχάνεται στα 300 s. Ο λόγος είναι ότι οι ανεμιστήρες ώσης για το case 2 και 3 ξεκινούν την λειτουργία στο χρονικό διάστημα από 240 s μέχρι τα 255 s. Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης παρατηρείται μείωση της τιμής της ταχύτητας στα 330 s ενώ κατά την εξάλειψη της αναστροφής καπνού ($t=390$ s) η τιμή της αυξάνεται. Συγκεκριμένα, η μεταβολή της μπορεί να παρουσιαστεί μέσω της μέσης στατιστικής τιμής της ταχύτητας για το πρώτο σενάριο, όπου αγγίζει την τιμή 2.28 m/s ενώ 1.86 m/s στο δεύτερο και 1.53 m/s στο τρίτο σενάριο. Η αιτία στην οποία οφείλεται η μεταβολή της ταχύτητας μεταξύ των σεναρίων 2 και 3, είναι η ανάμειξη των θερμών αερίων στρωμάτων που συνεχώς αυξάνουν την τιμή της ταχύτητας με την εξής διαφορά. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του σεναρίου 2 η διάχυση της θερμότητας είναι μεγαλύτερη σε όλο το ωφέλιμο ύψος της σήραγγας, ενώ η διάχυση της θερμότητας στο σενάριο 3, είναι εντονότερη στην οροφή της σήραγγας.



Σχήμα 6-26 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς 50 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.

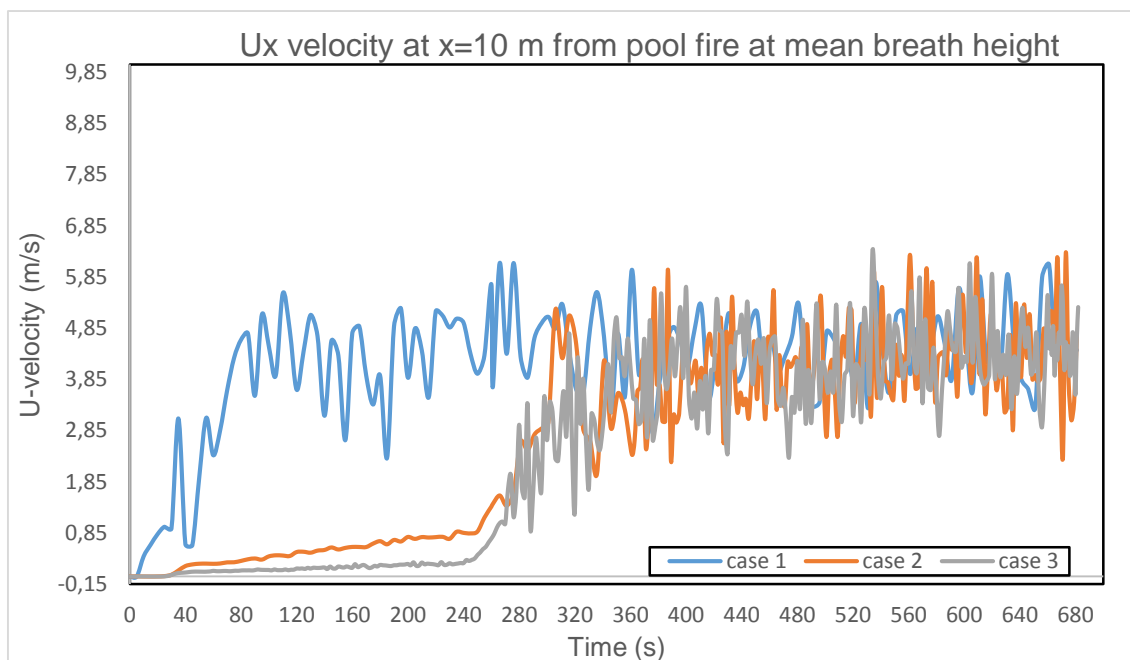
Συνεχίζοντας, στο σχήμα 6-26 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της ταχύτητας σε απόσταση 50 m από την εστία της φωτιάς. Όσον αφορά το πρώτο σενάριο παρατηρούμε πως η τιμή της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης ταχύτητας όσο πλησιάζουμε το στόμιο εισόδου της σήραγγας. Η μέση στατιστική τιμή της x-συνιστώσας της ταχύτητας του πρώτου σεναρίου λαμβάνει την τιμή 2.59 m/s ενώ 1.9 m/s για το δεύτερο σενάριο και 1.63 m/s του τρίτου σεναρίου. Την χρονική στιγμή των 240 s όπου οι ανεμιστήρες ώσης ξεκινούν την λειτουργία τους, η τιμή της ταχύτητας αυξάνεται ραγδαία και στα δύο σενάρια μελέτης (case 2, case 3). Σημαντική αναφορά χρήζει η χρονική στιγμή των 390 s όπου καταστέλλεται το φαινόμενο αναστροφής του καπνού. Η τιμή της x-συνιστώσας την ταχύτητας αγγίζει προσεγγιστικά την τιμή των 1.5 m/s στα σενάρια 2 και 3 και συνεχώς αυξάνεται μέχρι το πέρας της προσομοίωσης. Στο χρονικό διάστημα των 680 s, δηλαδή στον πλήρη αποκαπνισμό της σήραγγας κατάντι της λίμνης φωτιάς, η τιμές της ταχύτητας στο σενάριο 1 και 2 παρουσιάζουν μικρή απόκλιση μεταξύ τους ενώ του σεναρίου 3 είναι η μικρότερη εκ των δύο πρώτων.



Σχήμα 6-27 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς 100 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.

Στο σχήμα 6-27 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της ταχύτητας 100 m από την θέση της φωτιάς. Ξεκινώντας με το σενάριο 1 παρατηρούμε πως η τιμή της κρίσιμης ταχύτητας εμφανίζεται για πρώτη φορά στα 80 s από την έναρξη του ατυχήματος. Η τιμή της στην συνέχεια παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις γύρω από την κρίσιμη ταχύτητα (2.5 m/s) και για χρονικό διάστημα 600 s η τιμή της ταχύτητας κυμαίνεται από 3.8 m/s ως 2.55 m/s. Όσον αφορά τα σενάρια 2 και 3 παρατηρείται πως η τιμή της x-συνιστώσας της ταχύτητας για τα πρώτα 160 s εμφανίζει πολύ μικρές αρνητικές τιμές που προσεγγίζουν την τιμή μηδέν. Ο λόγος στον οποίο οφείλεται αυτή η συμπεριφορά είναι η χρονική διάρκεια που χρειάζονται τα θερμά καυσαέρια να διανύσουν τα πρώτα 100 m από την θέση της φωτιάς. Ωστόσο, μετά από αυτήν την χρονική στιγμή, η ταχύτητα ροής στο μέσο ύψος αναπνοής αυξάνεται ραγδαία στην περίπτωση του σεναρίου 2, ενώ στην περίπτωση του σεναρίου 3 η ταχύτητα διατηρεί σταθερή την τιμή της για ακόμη περίπου 80 s. Η αιτία που προκαλεί αυτή την μεταβολή της ταχύτητας στα δύο σενάρια (case 2, case 3) αφορά την ορμή που έχουν τα θερμά καυσαέρια του σεναρίου 3 λόγω των ανωστικών δυνάμεων με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται επί το πλείστον στην οροφή της σήραγγας. Κατά την ενεργοποίηση του μηχανικού αερισμού ($t=240$ s) και έπειτα η το πεδίο τιμών της ταχύτητας αυξάνεται ακαριαία. Στο χρονικό διάστημα από την χρονική στιγμή των 320 s, μέχρι την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, η τιμή της ταχύτητας στα σενάρια 2 και 3 έχουν μικρή απόκλιση μεταξύ τους με έντονες διακυμάνσεις γύρω από την κρίσιμη ταχύτητα αποκαπνισμού.

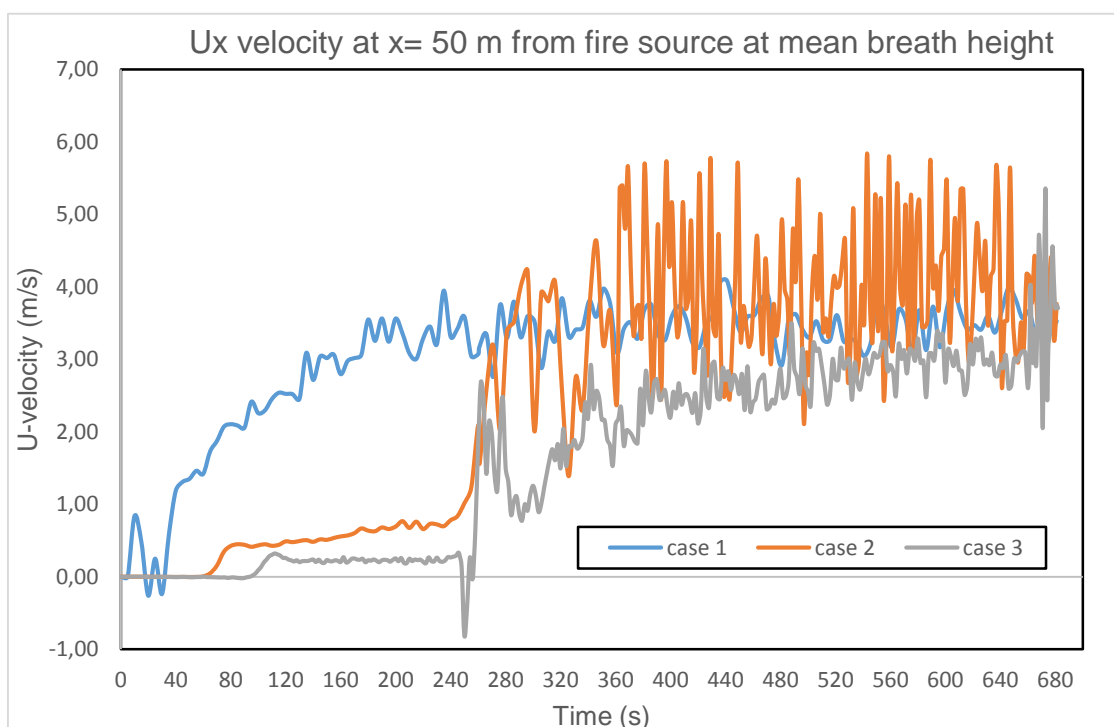
Επίπεδο διέλευσης πεζών.



Σχήμα 6-28 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο επίπεδο διέλευσης 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς.

Στο σχήμα 6-28 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας στην θέση $x=10$ m από την εστία της φωτιάς για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις στο επίπεδο διέλευσης των πεζών. Στο πρώτο σενάριο (case 1), παρατηρείται πως η τιμή της ταχύτητας, αυξάνεται ακαριαία για τα πρώτα δευτερόλεπτα της προσομοίωσης, καθώς όλες οι ομάδες των ανεμιστήρων ώσης ξεκινούν την λειτουργία τους την ίδια χρονική στιγμή ($t=0$ s). Στην συνέχεια η κατανομή της ταχύτητας διατηρείται σταθερή και κυμαίνεται γύρω από τη μέση στατιστική τιμή της των 4.14 m/s. Όσον αφορά την περίπτωση των case 2 και 3 η τιμή της ταχύτητας είναι εμφανώς μικρότερη από την περίπτωση του case 1. Για τα πρώτα 240 s της προσομοίωσης η τιμή της ταχύτητας είναι μικρότερη της κρίσιμης καθώς ο μηχανικός αερισμός βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Μετά από 20 s οι ανεμιστήρες ώσης είναι σε πλήρη λειτουργία με αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της τιμής της ταχύτητας. Η τιμή αυτή κατά μέσο όρο αγγίζει τα 3.22 m/s στο case 2 και 2.49 m/s στο case 3 αντίστοιχα. Η αιτία για την οποία παρατηρείται υψηλότερη τιμή της ταχύτητας στο κρηπίδωμα είναι η επίδραση του μηχανικού αερισμού. Συγκεκριμένα το αξονοσυμμετρικό κέντρο των ανεμιστήρων, συμπίπτει με το

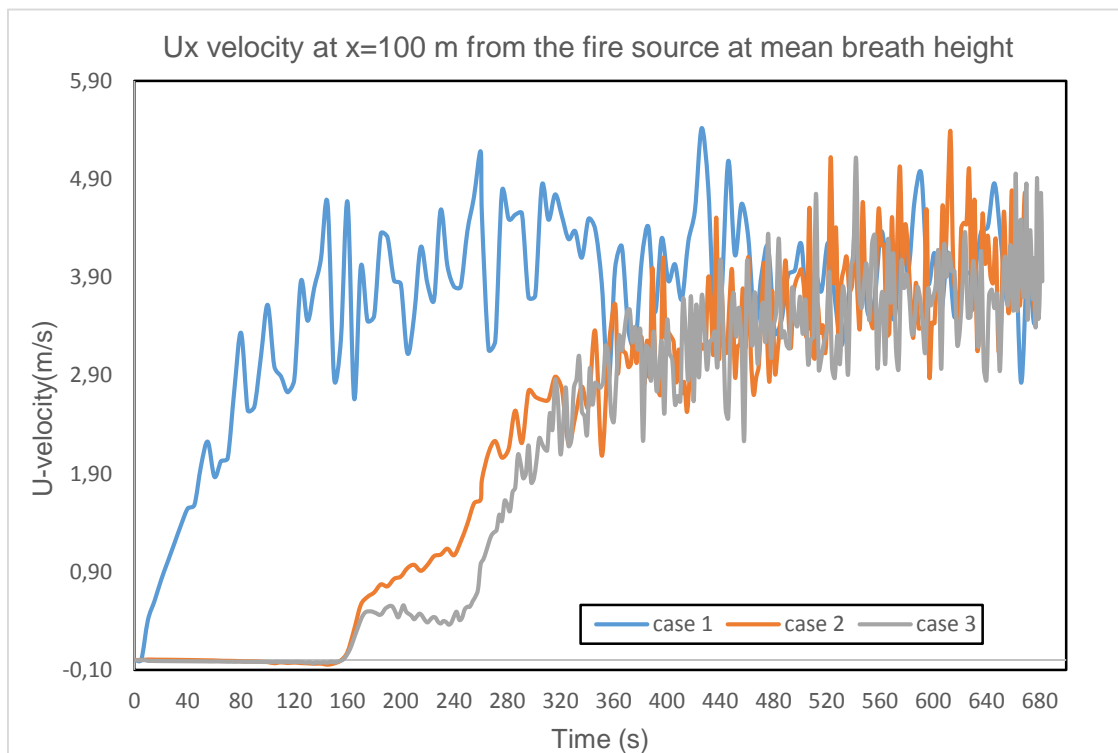
επίπεδο διέλευσης των πεζών κατά τον άξονα y , με αποτέλεσμα να επηρεάζει άμεσα το πεδίο τιμών ταχύτητας. Αναλυτικότερα, ο κινούμενος αέρας που εξέρχεται από τα jet fans χάνει την ορμή του όσο απομακρύνεται από το στόμιο εξόδου του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να κατευθύνεται σε χαμηλότερες μονάδες ύψους της σήραγγας όπου ο αέρας έχει σαφώς μικρότερη τιμή. Υπό το πρίσμα της αριθμητικής επίλυσης, η πρόλεξη της ταχύτητας στο επίπεδο των ανεμιστήρων λόγω του μήκους διακριτοποίησης δίδει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με εκείνου που βρίσκεται στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς.



Σχήμα 6-29 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο επίπεδο διέλευσης των πεζών 50 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

Στο σχήμα 6-29 απεικονίζεται η μεταβολή της ταχύτητας στην θέση $x=50$ m από την εστία της φωτιάς για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις στο επίπεδο διέλευσης των πεζών. Στο case 1, στη μελέτη μόνο του μηχανικού αερισμού, χωρίς την αντιμετώπιση κάποιου ατυχήματος, η ταχύτητα παρουσιάζει μια αυξανόμενη συμπεριφορά μέχρι τη χρονική των 130 s όπου και επιτυγχάνεται η τιμή της κρίσιμης ταχύτητας. Να σημειωθεί πως η σημαντικότερη επίδραση της χρονικής κατανομής της οφείλεται κυρίως από τις πρώτες δύο ομάδες ανεμιστήρων ώσης όπως αυτές απεικονίζονται στο σχήμα 2-2. Στη συνέχεια της

προσομοίωσης μέχρι και τη τελευταία χρονική στιγμή, η τιμή της ταχύτητας διατηρείται μεγαλύτερη της κρίσιμης με μέση στατιστική τιμή 3 m/s. Όσον αφορά τη μελέτη των case 2 και case 3 η το πεδίο τιμών της ταχύτητας εμφανίζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις σε σχέση με το case 1. Στην περίπτωση του case 2 οι διακυμάνσεις της ταχύτητας οφείλονται λόγω της υψηλής διάχυσης θερμότητας η οποία αυξάνει την ορμή των θερμών καυσαερίων τα οποία εγκλωβίζονται από το κέλυφος της σήραγγας με αποτέλεσμα να ολισθαίνουν σε αυτό και να επηρεάζουν σημαντικά την τιμή της ταχύτητας στο επίπεδο διέλευσης. Στην περίπτωση του case 3 παρατηρείται μια μείωση της μέσης στατιστικής τιμή της x-συνιστώσας της ταχύτητας κατά 46% σε σχέση με του σεναρίου 2 (3.1 m/s) όπου λαμβάνει την τιμή 1.7 m/s. Η μεταβολή αυτή έγκειται στο γεγονός ότι στο σενάριο 3, τα θερμά καυσαέρια καταλαμβάνουν κυρίως την οροφή της σήραγγας αφού λόγω της ύπαρξης του συρμού εντός της, η εστία της φωτιάς βρίσκεται σε υψηλότερη θέση στον άξονα z. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συναλλαγή θερμότητας μεταξύ θερμών και ψυχρότερων αέριων στρωμάτων να είναι λιγότερο έντονη στα χαμηλότερα ύψη της σήραγγας.



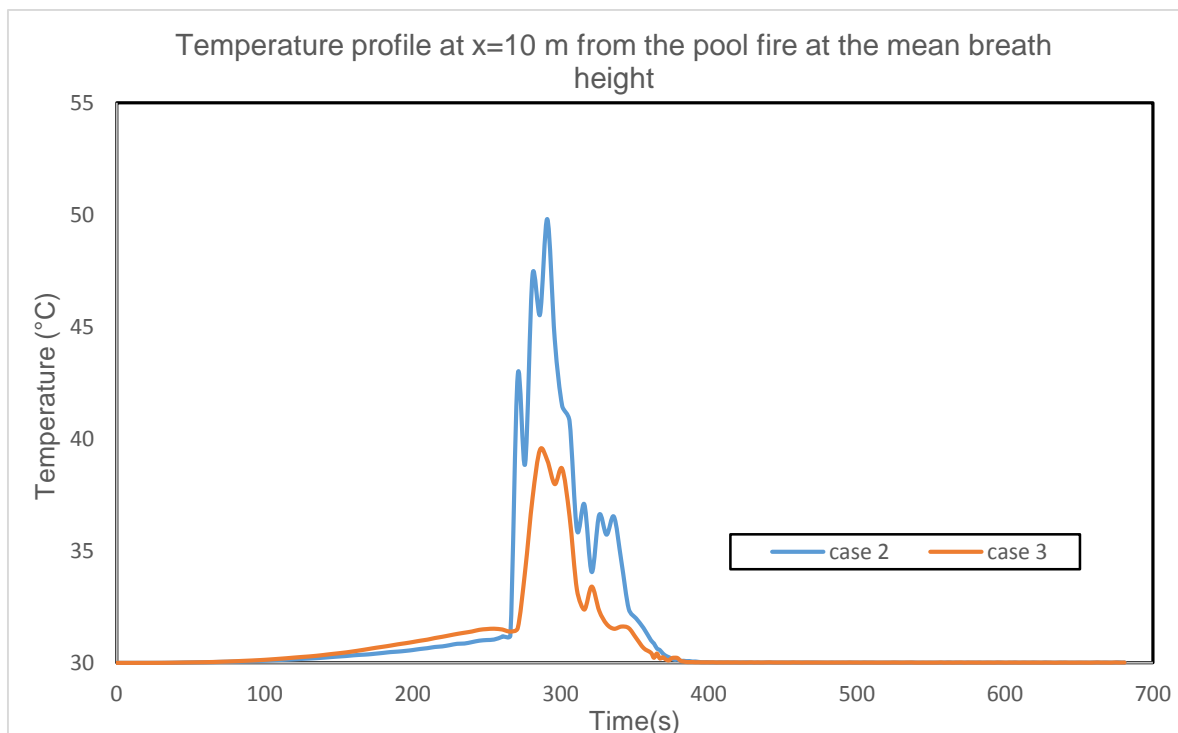
Σχήμα 6-30 Χρονική μεταβολή της x-συνιστώσας της ταχύτητας στο επίπεδο διέλευσης των πεζών 100 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

Κλείνοντας, στο σχήμα 6-30 απεικονίζεται το πεδίο τιμών της ταχύτητας και για τα τρία σενάρια μελέτης σε απόσταση 100 m από την λίμνη φωτιάς. Στην περίπτωση αυτή, οι τιμές της ταχύτητας είναι σαφώς μικρότερες όσο πλησιάζουμε το στόμιο εισόδου της σήραγγας σε σύγκριση με τις προηγούμενες περιπτώσεις ($x=10$ m, $x=50$ m). Ως την μεγαλύτερη μέση στατιστική τιμή της ταχύτητας δεχόμαστε τα 3.65 m/s όπου αναφέρονται στο case 1. Στην συνέχεια ακολουθούν οι τιμές των 2.8 m/s και 2.1 m/s των case 2 και 3 αντίστοιχα. Για την περίπτωση case 2 και case 3 είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε αυτή την απόσταση από την εστία της φωτιάς η συνεισφορά στην κατανομή της ταχύτητας από τον μηχανικό αερισμό οφείλεται μόνο από την πρώτη ομάδα ανεμιστήρων. Όσον αφορά την κατανομή των ταχυτήτων, στις περιπτώσεις 2 και 3 παρουσιάζονται έντονες ομοιότητες ως προς την μορφή αλλά και ως προς την συχνότητα των διακυμάνσεων. Ωστόσο στο σενάριο 3 κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ 160 s και 240 s η τιμή της ταχύτητας μεταβάλλεται ελάχιστα διότι τα θερμά καυσαέρια δεν ανταλλάσσουν υψηλά ποσά θερμότητας με τα ψυχρότερα. Επιπροσθέτως, η αύξηση της απόστασης από τη πηγή παραγωγής θερμότητας δεν συνεισφέρει στην διατήρηση της ορμής τους, εφόσον εμπεριέχονται τόσο οι παράγοντες των γραμμικών απωλειών όσο και η μείωση της θερμοκρασίας τους. Μολαταύτα, το σημείο καμψής της στα σενάρια 2 και 3 εμφανίζεται την χρονική στιγμή των 240 s όπου ενεργοποιείται η πρώτη ομάδα του μηχανικού αερισμού. Μετά από περίπου 80 s η τιμή της κρίσιμης ταχύτητας αποκαπνισμού επιτυγχάνεται και συνεχώς αυξάνεται σταδιακά μέχρι το τέλος της προσομοίωσης

6.5.2 Θερμοκρασία

Στο παρόν κεφάλαιο, πρόκειται να παρουσιαστεί η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο επίπεδο διέλευσης του ανθρώπινου δυναμικού καθώς και του συμμετρικού επιπέδου αναφοράς της σιδηροδρομικής σήραγγας.

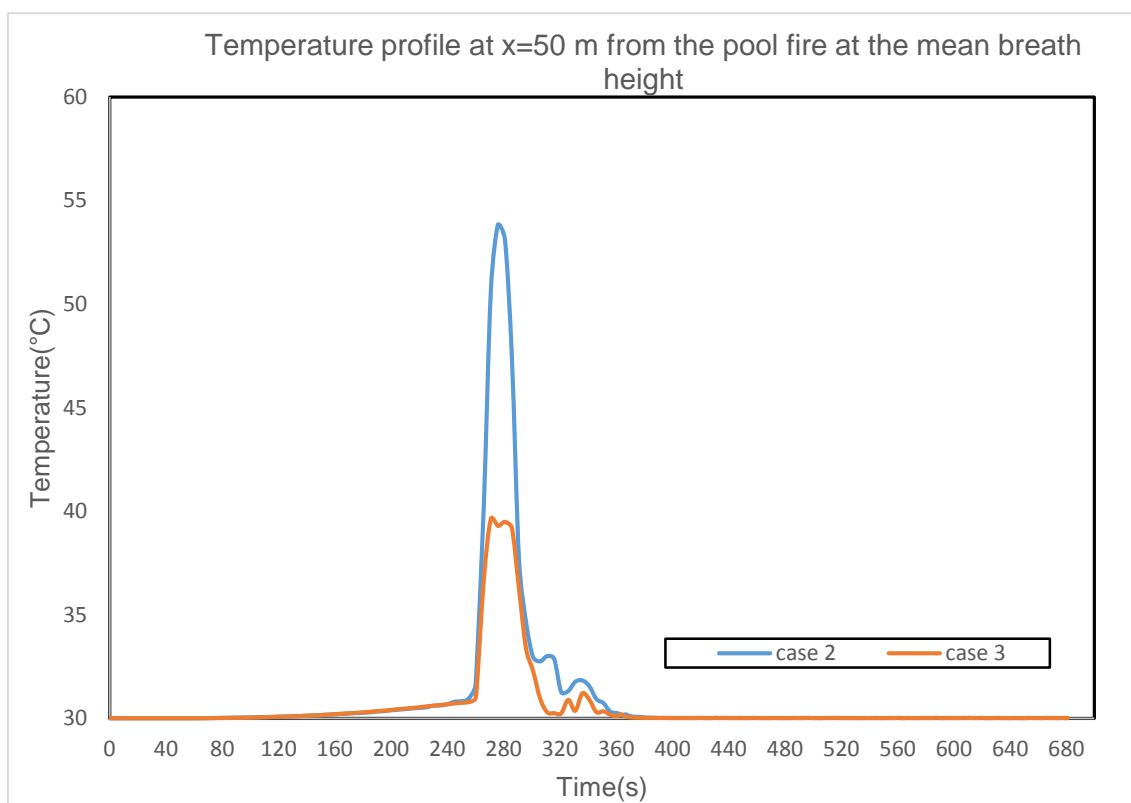
Συμμετρικό επίπεδο αναφοράς



Σχήμα 6-31 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

Στο σχήμα 6-31 παρουσιάζεται το προφίλ θερμοκρασιών για τα σενάρια 2 και 3 αντίστοιχα σε απόσταση 10 m από την εστία της φωτιάς. Κατά την έναρξη της προσομοίωσης, η τιμή της θερμοκρασίας στο case 2 και 3 παρουσιάζει γραμμική αύξηση με σημείο καμπής την χρονική στιγμή των 270 s και 290 s αντίστοιχα. Σε αυτό το χρονικά διακριτό σημείο της προσομοίωσης, η ισχύς της παραγωγής θερμότητας διατηρεί ήδη την μέγιστη τιμή της ($t=240$ s). Για το σενάριο 2 η αύξηση της θερμοκρασίας από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, αντιστοιχεί στο 42% της τελευταίας. Όσο το φαινόμενο εξελίσσεται χρονικά η τιμή της θερμοκρασίας φτάνει στην μέγιστη τιμή της μετά από 30 s ($t=300$ s). Στη συνέχεια η τιμή της θερμοκρασίας μειώνεται σημαντικά. Η αιτία στην οποία οφείλεται αυτή η μείωση είναι η επίδραση του μηχανικού αερισμού. Συγκεκριμένα, αυξάνει την ταχύτητα ροής αλλά και τον συντελεστή συναγωγής θερμότητας παρόλο που η ισχύς της φωτιάς διατηρείται σταθερή στο χρονικό διάστημα ($t=240-390$ s). Όσον αφορά το case 3 παρατηρείται πως η κατανομή της θερμοκρασίας παρουσιάζει ομοιότητες σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Ωστόσο η αιτία που παρατηρείται χαμηλότερο θερμοκρασιακό προφίλ αφορά την υψηλή διάχυση

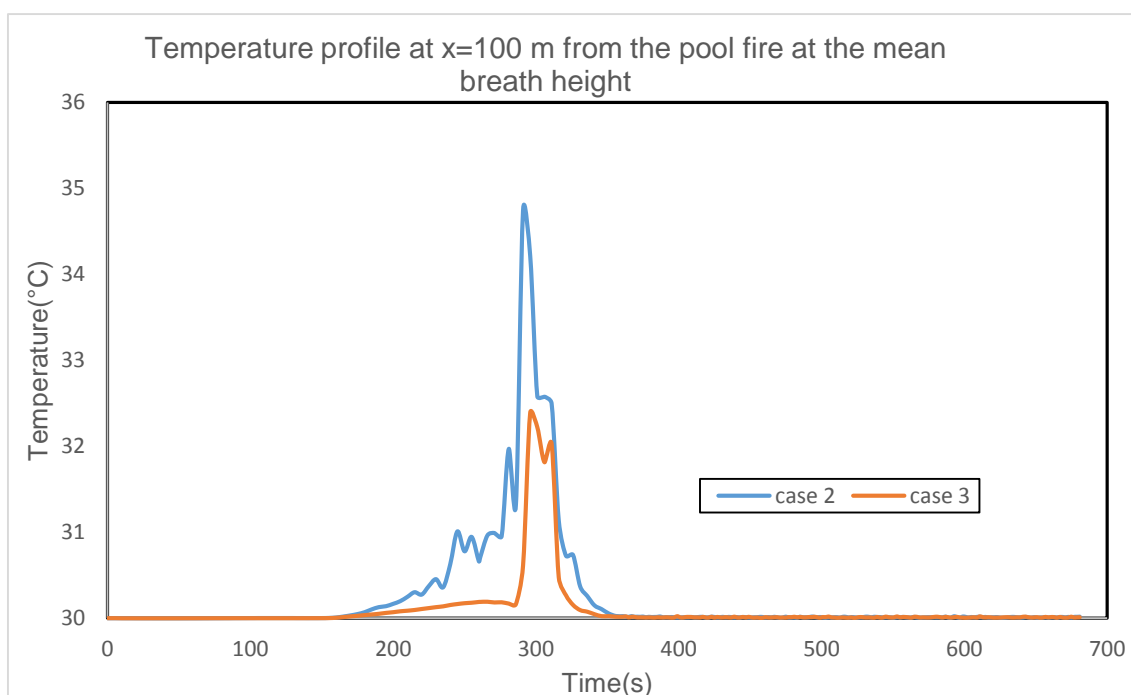
θερμότητας κυρίως στην οροφή της σήραγγας. Η εστία της φωτιάς βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος της σήραγγας σε σχέση με το case 2. Επιπροσθέτως, η μείωση της διατομής λόγω του συρμού αυξάνει την ορμή των θερμών καυσαερίων που και έχουν την τάση να ολισθαίνουν στην οροφή της σήραγγας. Συν τοις άλλοις η εν λόγω μεταβολή στο θερμοκρασιακό προφίλ εμφανίζεται διότι ένα ποσοστό της εκλυόμενης θερμότητας απορροφάται από τα υλικά κατασκευής της ντιζελομηχανής πίνακας 2-2 και της σήραγγας πίνακας 2-1. Τέλος, κατά το χρονικό διάστημα των 390 s μέχρι και το πέρας της προσομοίωσης η ισχύς της φωτιάς μειώνεται γραμμικά σχήμα 2-1 και η τιμή της θερμοκρασίας αγγίζει την θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 6-32 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο 50 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

Στο σχήμα 6-32 απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στην θέση $x=50$ m από την εστία της φωτιάς. Στο σενάριο 2 και 3 το θερμοκρασιακό προφίλ διατηρεί χαμηλές τιμές κοντά στην θερμοκρασία περιβάλλοντος για τα πρώτα 240 s της προσομοίωσης. Η κύρια αιτία που οφείλεται αυτή η συμπεριφορά είναι η αύξηση

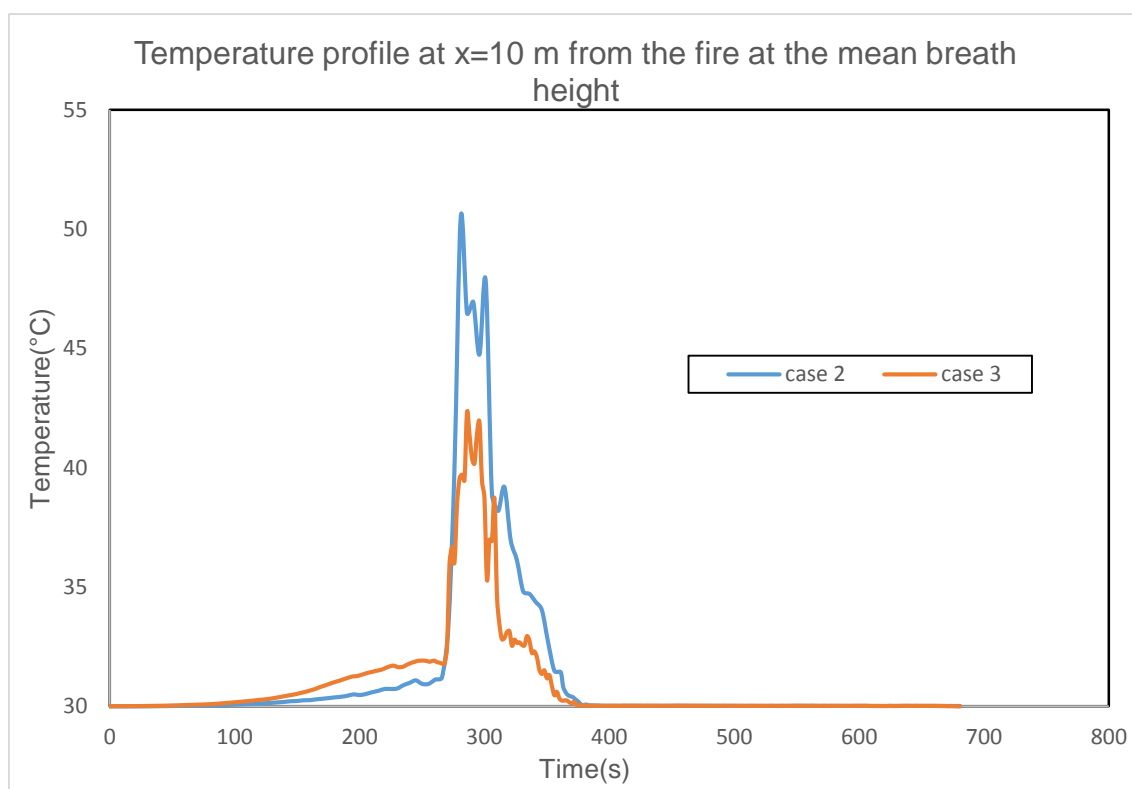
της απόστασης από την πηγή θερμότητας. Ωστόσο τόσο στο case 2 όσο και στο case 3 η τιμή της θερμοκρασίας αυξάνεται ακαριαία. Στο σενάριο 2 η τιμή της θερμοκρασίας αγγίζει την τιμή των 55 °C και μειώνεται ακαριαία ενώ στο σενάριο 3 τους 40 °C και διατηρείται για χρονικό διάστημα 10 s. Η αιτία αυτής της ραγδαίας μείωσης οφείλεται στην επίδραση του μηχανικού αερισμού που αυξάνει την τιμή της ταχύτητας στα χαμηλότερα στρώματα της σήραγγας. Ως αποτέλεσμα έχει να μεταφέρει τα θερμά ποσά ενέργειας στην έξοδο στόμιο εξόδου της και να μειώνεται η τιμή της θερμοκρασίας σε αυτό το χωρικό σημείο. Στην περίπτωση του case 3 η τιμή της θερμοκρασίας είναι σαφώς μειωμένη διότι τα θερμά καυσαέρια συγκεντρώνονται κυρίως στην οροφή της σήραγγας λόγω του συρμού. Ως αποτέλεσμα έχει να μην ανταλλάσσουν τα ίδια ποσά θερμότητας με τα ψυχρότερα που βρίσκονται σε χαμηλότερα ύψη της σήραγγας. Σημαντική επίδραση αναλαμβάνει ο μηχανικός αερισμός αφού μειώνει την θερμοκρασία στους 30 °C πιο σύντομα σε σχέση με το case 3.



Σχήμα 6-33 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο 100 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

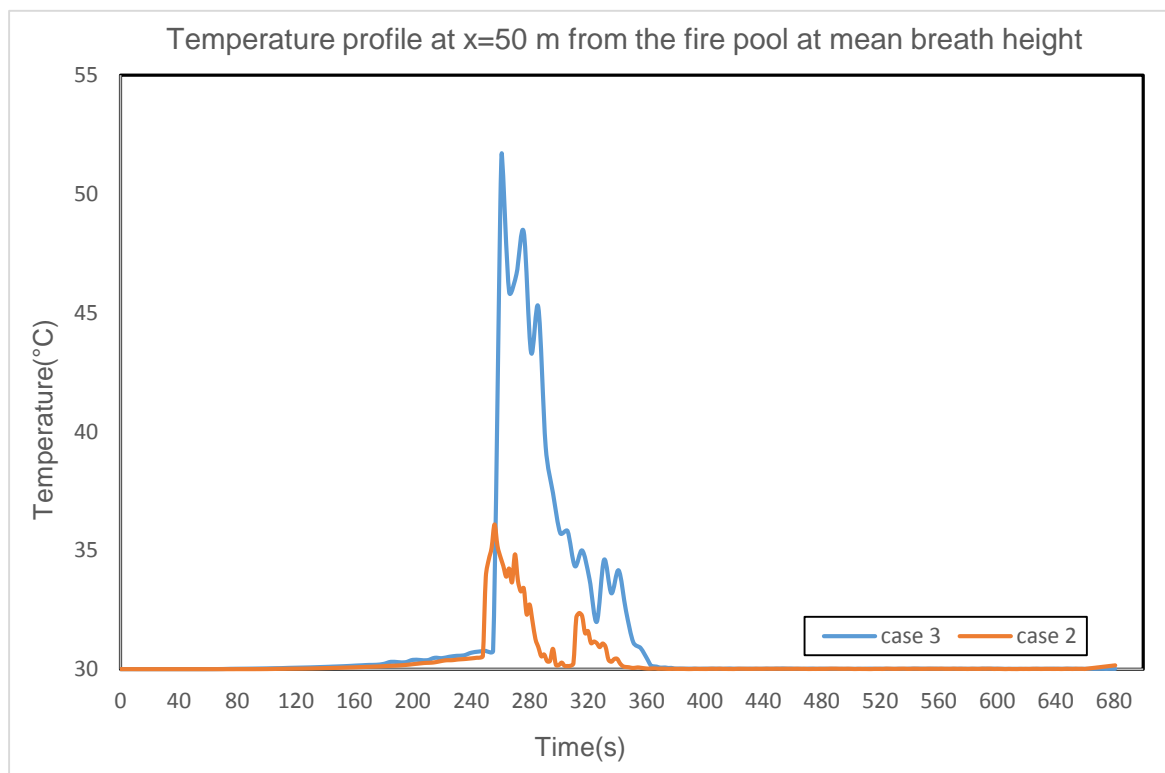
Κλείνοντας με το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς, στο σχήμα 6-34 παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή κατανομή 100 m από την εστία της φωτιάς. Οι τιμές της θερμοκρασίας είναι εμφανώς χαμηλότερες σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Οι μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας εμφανίζονται μετατοπισμένες χρονικά σε σχέση με τα σενάρια ($x=10$ m , $x=50$ m). Η κύρια αιτία αφορά την απομάκρυνση από την πηγή θερμότητας με αποτέλεσμα τα θερμά καυσαέρια που προπορεύονται να χάνουν την ορμή τους αλλά και την θερμική τους δυναμική. Ωστόσο στο case 2 ,τη χρονική στιγμή των 290 s, η μεταφορά θερμότητας λόγω της μέγιστης ισχύς της φωτιάς είναι ικανή να αυξήσει την τιμή της θερμοκρασίας 5 °C από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στο σενάριο 3 η μέγιστη μεταβολή της θερμοκρασίας είναι μόλις 2 °C από την θερμοκρασία περιβάλλοντος και παρατηρείται εξίσου το χρονικό διάστημα στο οποίο η φωτιά παράγει τα μέγιστα ποσά θερμότητας.

Επίπεδο διέλευσης πεζών



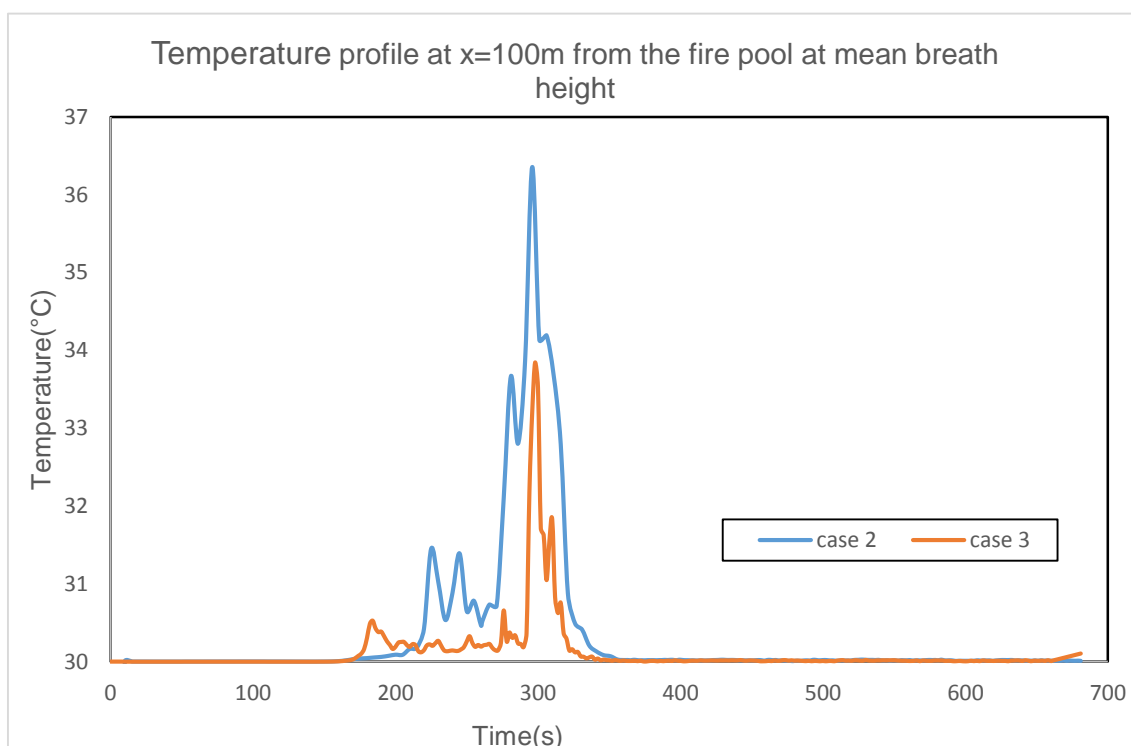
Σχήμα 6-34 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο επίπεδο διέλευσης 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

Στο σχήμα 6-34 απεικονίζεται η θερμοκρασιακή μεταβολή της θερμοκρασίας στο επίπεδο διέλευσης των πεζών 10 m από την θέση του ατυχήματος. Στην χρονική στιγμή των 270 s παρατηρείται η ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας τόσο για το case 2 όσο και για το case 3. Αξίζει να αναφερθεί πως η θερμοκρασιακή κατανομή παρουσιάζει πολλές ομοιότητες ωστόσο διακρίνεται η εμφανής διαφορά τους ως προς τις τιμές τους. Μετά από 10 s η τιμή της θερμοκρασίας στο case 2 αγγίζει την μέγιστη τιμή της δηλαδή τους 55 °C ενώ αντίστοιχα στο case 3 τους 41 °C. Την χρονική στιγμή των 300 s, οι τιμές της θερμοκρασίας και για τις δύο περιπτώσεις μειώνονται ακαριαία και μετά από 15 s οι τιμές της λαμβάνουν τις ελάχιστες τιμές τους. Η αιτία στην οποία οφείλεται η εν λόγω μεταβολή είναι η επίδραση του μηχανικού αερισμού που απομακρύνει τα θερμά καυσαέρια εκτός της σήραγγας. Μετά από 390 s από τη έναρξη του ατυχήματος, κατά την εξάλειψη αναστροφής του καπνού οι θερμοκρασίες στα case 2 και 3 μειώνεται στην θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.



Σχήμα 6-35 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο επίπεδο διέλευσης 50 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

Στο σχήμα 6-35 απεικονίζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στα 50 m από την θέση του ατυχήματος. Στην χρονική στιγμή των 260 s στο case 2 και case 3 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας με διαφορά 20 °C. Ωστόσο, μετά από αυτή την χρονική στιγμή εμφανίζεται ραγδαία μείωση της θερμοκρασίας. Ο λόγος αυτής της μεταβολής οφείλεται στην απομάκρυνση του σημείου από την θέση του ατυχήματος. Συγκεκριμένα τα ποσά θερμότητας τα οποία διαχέονται εξαιτίας της ανάμιξης των θερμών στρωμάτων στα ψυχρότερα είναι μικρότερα σε χαμηλότερα ύψη της σήραγγας. Στην χρονική στιγμή των 390 s η θερμοκρασία αγγίζει την θερμοκρασία περιβάλλοντος για το case 2 και case 3 η οποία μένει σταθερή μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.



Σχήμα 6-36 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο επίπεδο διέλευσης 100 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

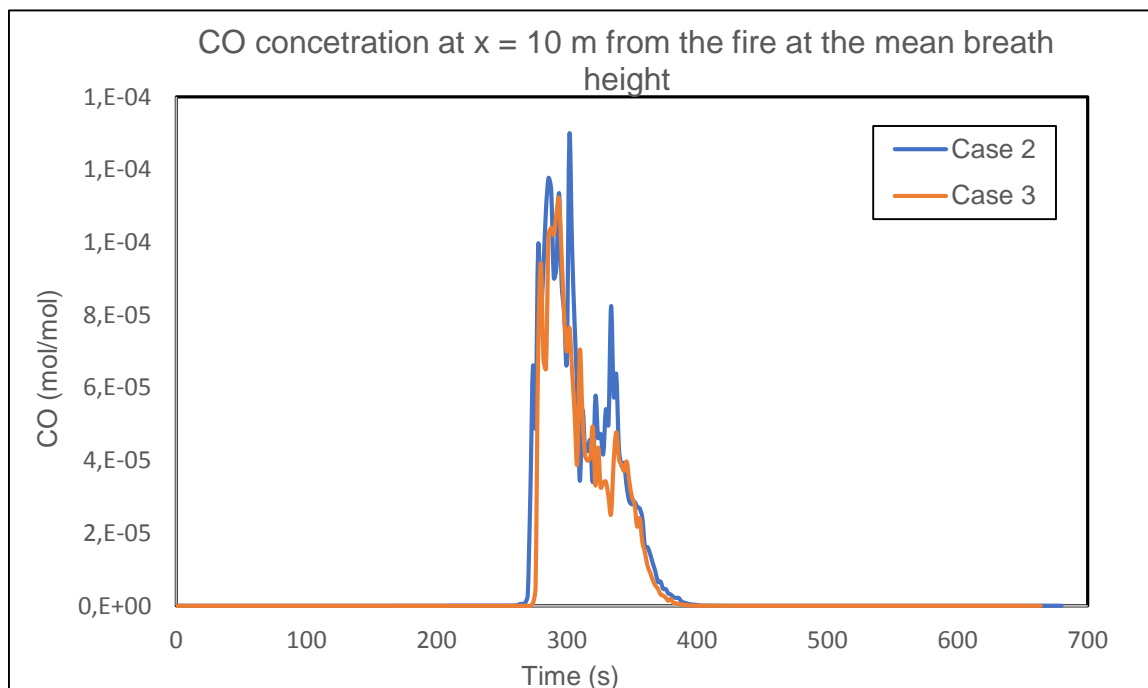
Στο σχήμα 6-36 παρουσιάζεται η χρονική κατανομή της θερμοκρασίας 100 m από την θέση του ατυχήματος. Το θερμοκρασιακό προφίλ παρουσιάζει σαφώς μικρότερες τιμές αφού η διάχυση θερμότητας είναι μικρότερη όσο απομακρυνόμαστε από την λίμνη φωτιάς. Οι μέγιστες τιμές στα σενάρια case 2 και case 3 δεν μεταβάλλονται δραστικά σε σχέση με την θερμοκρασία

περιβάλλοντος, ωστόσο η θερμοκρασιακή τους κορύφωση διακρίνεται την χρονική στιγμή των 300 s από την έναρξη του ατυχήματος και λαμβάνει την τιμή των 36 °C για το case 2 και 33 για το case 3 αντίστοιχα. Συνοπτικά η πορεία προς της έξοδο διαφυγής στο επίπεδο διέλευσης δεν παρουσιάζει σημαντικό κίνδυνο για τους πεζούς.

6.5.3 Συγκέντρωση CO

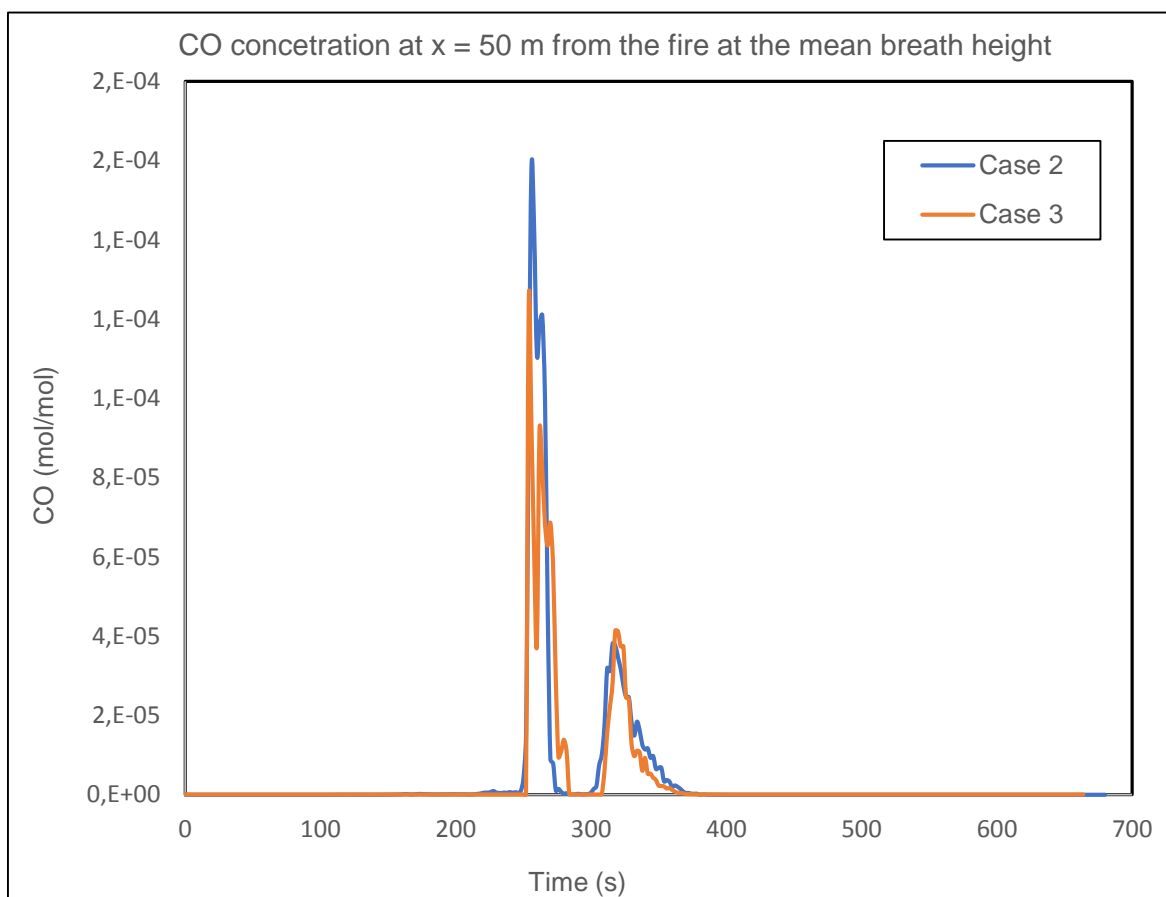
Στο παρόν κεφάλαιο, πρόκειται να παρουσιαστεί η χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης του μονοξειδίου στο επίπεδο διέλευσης του ανθρώπινου δυναμικού καθώς και του συμμετρικού επιπέδου αναφοράς της σιδηροδρομικής σήραγγας. Σκοπός είναι να γίνει έλεγχος επικινδυνότητας με βάση τα πρότυπα της ACGIH (Η Επαγγελματική Οργάνωση των Βιομηχανικών Υγειονολόγων των ΗΠΑ) (Αθανάσιος Βαλαβανίδης 2012), (Harte 2006). Για την περίπτωση των σιδηροδρομικών σιδηροδρόμων έδειξε πως οι συγκεντρώσεις 0.0001 mol/mol είναι οι πιο συνηθισμένες. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως ο χρόνος έκθεσης στο CO ανέρχεται στις 8 ώρες.

Συμμετρικό επίπεδο αναφοράς



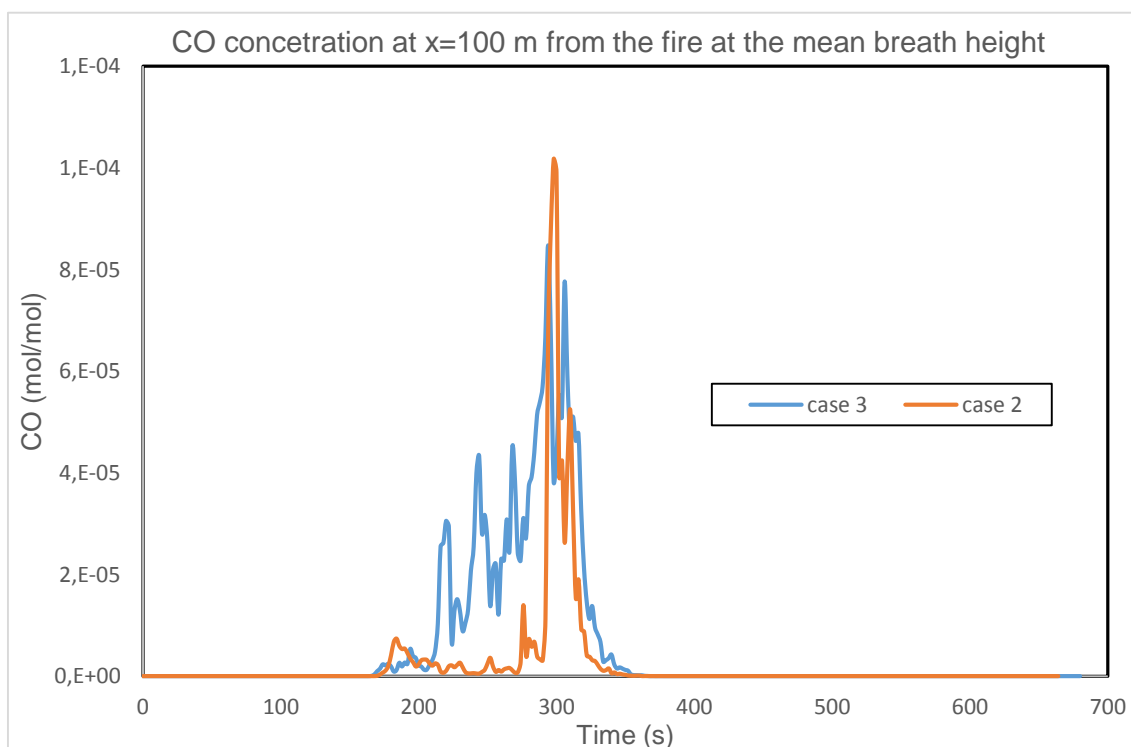
Σχήμα 6-37 Χρονική συγκέντρωση του CO στο συμμετρικό επίπεδο 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

Στο σχήμα 6-37 απεικονίζεται η χρονική συγκέντρωση του CO στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς σε απόσταση 10 m από την θέση του ατυχήματος. Την χρονική στιγμή των 270 s παρατηρείται η ξαφνική αύξηση της συγκέντρωσης του μονοξειδίου και συνεχώς αυξάνεται. Η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης εμφανίζεται στα 302 s για το case 2 και στα 295 s από την έναρξη του ατυχήματος. Οι εν λόγω συγκεντρώσεις λαμβάνουν την τιμή των 0.00021 mol/mol και 0.00014 mol/mol αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα πρότυπα ασφαλείας της ACGIH οι τιμές αυτές κρίνονται επικίνδυνες για την δημόσια υγιεινή ελαφριές ζαλάδες και κόπωση. Στη συνέχεια η επίδραση του μηχανικού αερισμού καθώς και η μείωση της έντασης της φωτιάς συμβάλουν στην απομάκρυνση των βλαβερών αέριων μαζών από εκείνο το σημείο.



Σχήμα 6-38 Χρονική συγκέντρωση του CO στο συμμετρικό επίπεδο 50 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

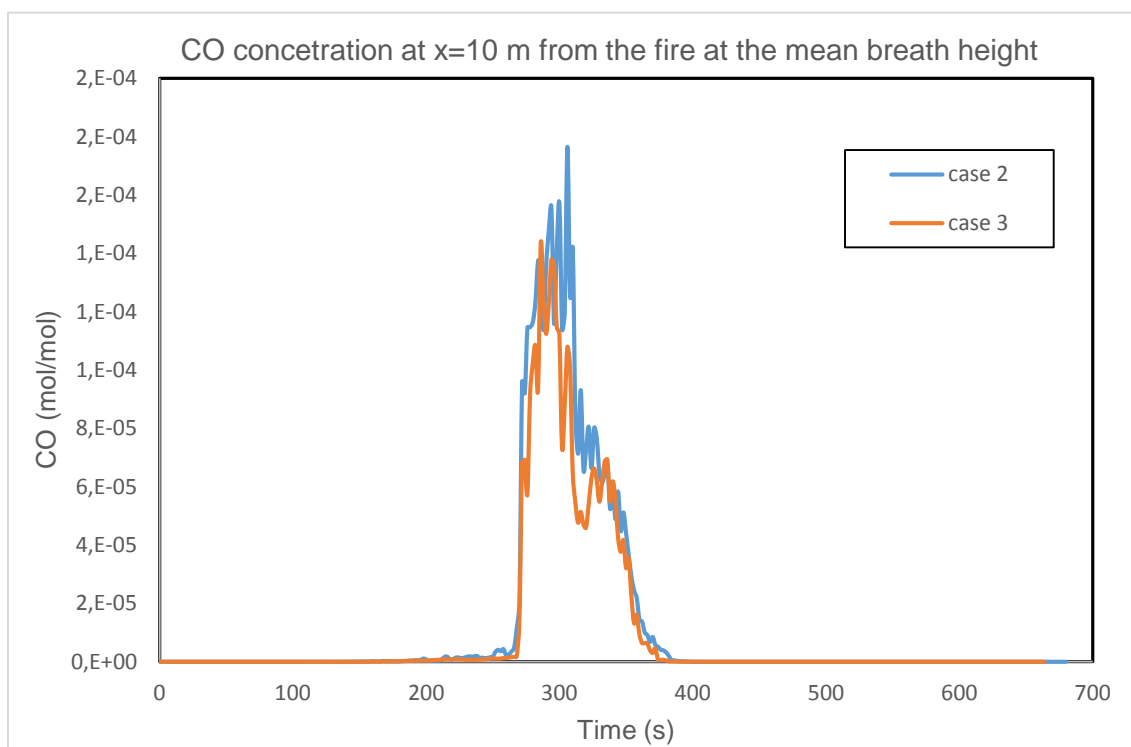
Στο σχήμα 6-38 παρουσιάζεται η χρονική συγκέντρωση του μονοξειδίου σε απόσταση 50 m από τη θέση του ατυχήματος. Κατά την χρονικό διάστημα από 0 ως 240 εμφανίζονται μηδενικές τιμές συγκέντρωσης CO. Ο λόγος αυτής της συμπεριφοράς είναι η υψηλή συγκέντρωση του ρύπου στην οροφή της σήραγγας όπως φαίνεται στο σχήμα 6-14 και 6-22. Ωστόσο κατά την ενεργοποίηση των ανεμιστήρων ώσης οι αέρινες μάζες αναμειγνύονται με μεγάλη ένταση με αποτέλεσμα την υψηλή συγκέντρωση CO την χρονική στιγμή των 250 s. Η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης του μονοξειδίου για το case 2 είναι 0.000158 mol/mol ενώ του case 3 0.00012 mol/mol. Οι τιμές τους υπερβαίνουν το επιτρεπτό όριο, ωστόσο μετά την από αυτή την χρονική στιγμή παρατηρούνται ραγδαίες μειώσεις της συγκέντρωσης μονοξειδίου όπου διατηρούνται εντός νομοθετικών ορίων και θεωρούνται ασφαλείς.



Σχήμα 6-39 Χρονική συγκέντρωση του CO στο συμμετρικό επίπεδο 100 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

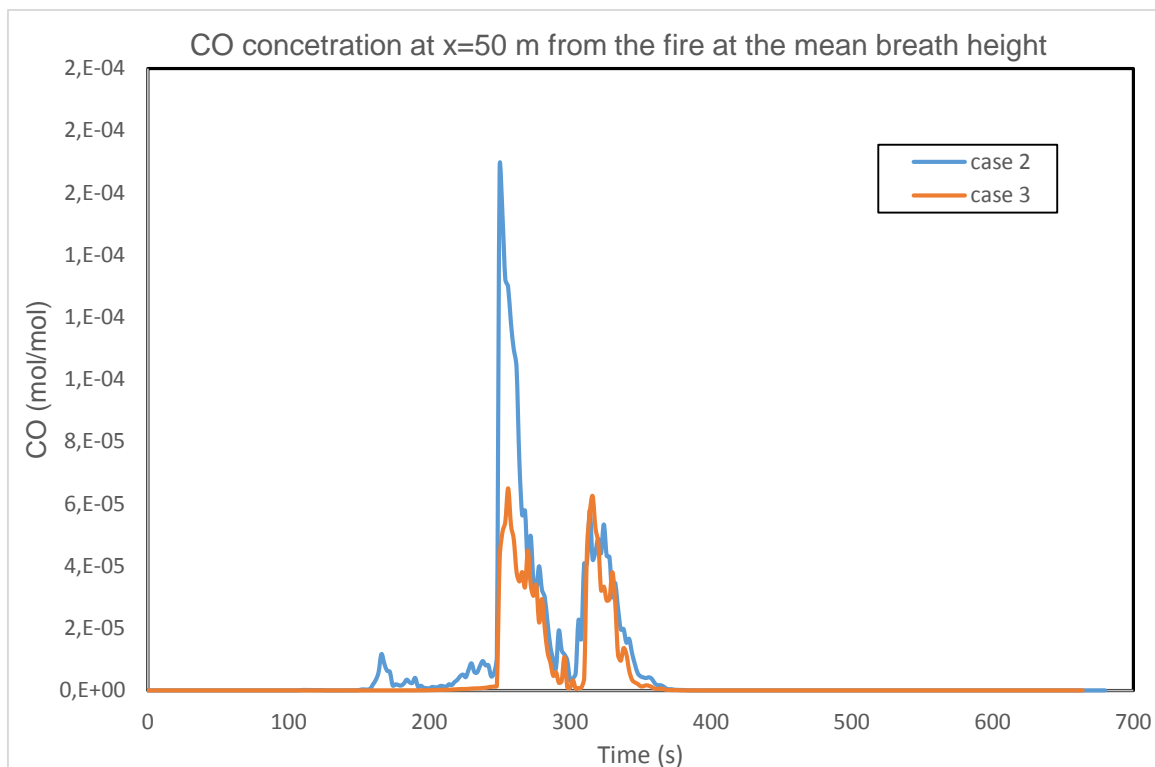
Κλείνοντας, στο σχήμα 6-40 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης του CO 10 m από την θέση του ατυχήματος. Την χρονική στιγμή των 200 s παρατηρούμε ότι στο case 3 η τιμή της συγκέντρωσης του μονοξειδίου αυξάνεται σταδιακά. Ωστόσο στο case 2 σημαντική αύξηση της διακρίνεται 100 s μετέπειτα. Η αιτία στην οποία οφείλεται αυτή η διαφορά είναι η υψηλή συγκέντρωση του ρύπου στην οροφή της σήραγγας λόγω της ύπαρξης της μηχανής έλξης. Οι μέγιστες τιμές και για τα δύο σενάρια εμφανίζονται στα 300 s από την έναρξη του ατυχήματος με 0.00007 mol/mol για το case 2 και 0.00008 mol/mol για το case 3. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε πως σε αυτή την απόσταση από την θέση της πυρκαγιάς, οι τιμές της συγκέντρωσης του CO είναι εντός των ορίων και διατηρούνται σε αυτό το επίπεδο μέχρι το τέλος της υπολογιστικής προσομοίωσης.

Επίπεδο διέλευσης πεζών



Σχήμα 6-40 Χρονική συγκέντρωση του CO στο επίπεδο διέλευσης 10 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

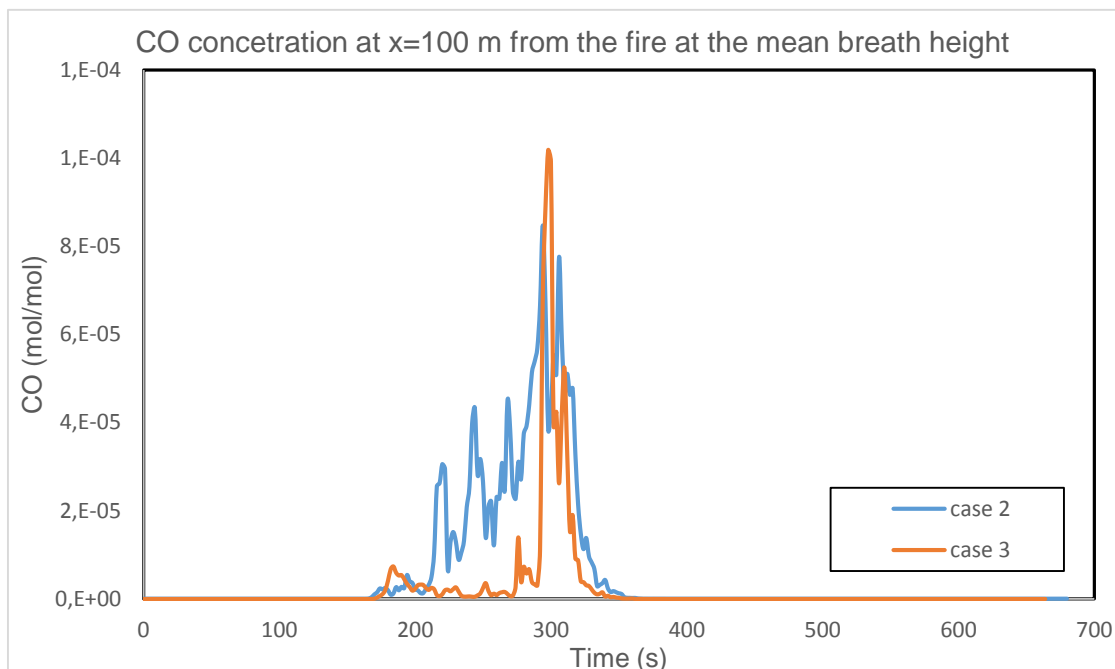
Στο σχήμα 6-40 παρουσιάζεται η χρονική συγκέντρωση του μονοξειδίου στα 10 m από την θέση της πυρκαγιάς για το επίπεδο διέλευσης των πεζών. Στην χρονική στιγμή των 270 s διακρίνεται η ραγδαία αύξηση της συγκέντρωσης μονοξειδίου και για τα δύο σενάρια. Η αιτία στην οποία οφείλεται η εν λόγω μεταβολή είναι λόγω της πλήρους εκκίνησης του μηχανικού αερισμού που συμβάλει στην ανάμιξη του ρύπου στα χαμηλότερα στρώματα της σήραγγας. Στην χρονική στιγμή των 305 s εμφανίζεται η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης για το case 2 (0.0002 mol/mol) και στα 286 s (0.00014 mol/mol) για το case 3. Οι αιτίες που οφείλεται αυτή η συμπεριφορά εντός του πεδίου ροής είναι: α) Ο υψηλός συντελεστής διάχυσης του μονοξειδίου καθώς το μονοξείδιο του άνθρακα έχει περίπου το ίδιο βάρος με τον αέρα και διαχέεται σε όλα τα ύψη της σήραγγας. β) Στο επίπεδο διέλευσης ο ρυπογόνος αέρας ολισθαίνει στο κέλυφος και τα τοιχώματα της σήραγγας. γ) Η μέγιστη ισχύς της φωτιάς λίμνης η οποία συμβάλει συνεχώς στην παραγωγή του ρύπου. Οι τιμές συγκέντρωσης που αναφέρθηκαν, είναι εκτός ορίων των κανονισμών ασφαλείας, με χρονική διάρκεια έκθεσης των πεζών σε αυτές το χρονικό διάστημα από 276 s ως 310 s. Ως αποτέλεσμα κρίνεται η ανάγκη άμεσης διάσωσης των πεζών μέσω σωστικών συνεργειών σε αυτό το διάστημα. Ωστόσο από την χρονική στιγμή των 310 s μέχρι την πλήρη αντιμετώπιση του ατυχήματος οι τιμές συγκέντρωσης του μονοξειδίου διατηρούνται κάτω από το επιτρεπτό όριο.



Σχήμα 6-41 Χρονική συγκέντρωση του CO στο επίπεδο διέλευσης 50 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

Στο σχήμα 6-41 απεικονίζεται η χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης του μονοξειδίου 50 m από την θέση του ατυχήματος. Στα πρώτα 250 s από την έναρξη της υπολογιστικής προσομοίωσης η τιμή της συγκέντρωσης του μονοξειδίου διατηρείται εντός των επιτρεπτών ορίων και για τα δύο case. Ωστόσο μετά από αυτή την χρονική στιγμή εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της συγκέντρωσης CO με υψηλότερη αυτή του case 2. Συγκεκριμένα η τιμή της είναι περίπου διπλάσια της τιμής του επιτρεπτού ορίου (0.00018 mol/mol) ενώ στο case 3 βρίσκεται εντός των νομοθετικών ορίων με τιμή 0.000065 mol/mol. Στην συνέχεια διακρίνεται ξαφνική μείωση της συγκέντρωσης του CO τόσο στο case 2 όσο και στο case 3. Η εν λόγω μεταβολή οφείλεται στην πλήρη λειτουργία του μηχανικού αερισμού η οποία αυξάνοντας την ορμή του αέρα επιτυγχάνει στιγμιαία την τοπική μείωση του μονοξειδίου κάτω από τα επιτρεπτά όρια. Κλείνοντας, παρατηρούμε πως οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου στο case 2 και case 3, εμφανίζουν την ίδια κατανομή μετά από την χρονική στιγμή των 300 s και

οι τιμές της συγκέντρωσης CO δεν αποτελούν κίνδυνο για την διέλευση των πεζών



Σχήμα 6-42 Χρονική συγκέντρωση του CO στο επίπεδο διέλευσης 100 m κατάντι της λίμνης φωτιάς

Με την περιγραφή του σχήματος 6-42 κλείνει η αριθμητική ανάλυση των μεγεθών που μελετήθηκαν σε αυτή την διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα αναφερόμαστε στην συγκέντρωση του CO 100 m από την θέση του ατυχήματος στο επίπεδο διέλευσης των πεζών. Στην χρονική στιγμή των 200 s εμφανίζεται η σταδιακή αύξηση της συγκέντρωσης του μονοξειδίου όσον αφορά το case 2. Ο λόγος στον οποίο οφείλεται αυτή η μεταβολή είναι ο υψηλός συντελεστής διάχυσης με αποτέλεσμα να καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μήκος της σήραγγας σχήμα 615 a. Ωστόσο στο case 3 δεν παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά. Η ύπαρξη της μηχανής έλξης εντός της σήραγγας έχει ως αποτέλεσμα την υψηλότερη συγκέντρωση του μονοξειδίου στην οροφή της σήραγγας όπως αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 6-25. Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης μονοξειδίου εμφανίζεται την χρονική στιγμή των 300 s, όπου οι ανεμιστήρες ώσης δημιουργούν υψηλή διάχυση του ρύπου στα χαμηλότερα στρώματα της σήραγγας τόσο για το case 2 όσο και για το case 3. Μετά από αυτή την χρονική

στιγμή, η ταχύτητα που επιτυγχάνεται λόγω του μηχανικού αερισμού στο επίπεδο διέλευσης, απομακρύνει τον ρυπογόνο αέρα στην έξοδο της σήραγγας με αποτέλεσμα να μειώνεται η συγκέντρωση CO 100 m από την θέση της λίμνης φωτιάς. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε πως και στα δύο σενάρια ατυχήματος, οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου παραμένουν κάτω από το νομοθετικό όριο σε όλη την διάρκεια της υπολογιστικής προσομοίωσης.

7 Συμπεράσματα

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ελέγχοντας εάν οι αρχικοί της στόχοι επιτεύχθηκαν. Αρχικά τέθηκε το ερώτημα της ικανότητας του μηχανικού αερισμού να αντιμετωπίσει τον πλήρη αποκαπνισμό της σιδηροδρομικής σήραγγας για διαφορετικά σενάρια φωτιάς. Στα σχήματα 6-9 και 6-15 παρουσιάζεται ο πλήρης αποκαπνισμός της σιδηροδρομικής σήραγγας σε διάρκεια 680 s από την έναρξη του ατυχήματος. Η επιλογή των χαρακτηριστικών μεγεθών των ανεμιστήρων ώσης καθώς και η διάταξη κατά την οποία τοποθετήθηκαν κρίθηκαν εν τέλει ικανά να αντιμετωπίσουν τα σενάρια πυρκαγιάς με επιτυχία.

Στη συνέχεια, ακολούθησε η διερεύνηση της ικανότητας του μηχανικού αερισμού, να επιτύχει την τιμή της κρίσιμη ταχύτητας αναστροφής του καπνού, όπως αυτή ορίζεται σύμφωνα με την νέα μέθοδο υπολογισμού της με βάση τον NFPA του 2020. Στα σχήματα του κεφαλαίου 6.5.1 παρουσιάζεται αναλυτικά η επίτευξη αυτού του στόχου σε όλα τα επίπεδα ενδιαφέροντος και στα δύο σενάρια ατυχήματος εντός της σιδηροδρομικής σήραγγας.

Ως τρίτος στόχος ορίστηκε η μελέτη της βέλτιστης υπολογιστικής μοντελοποίησης των ανεμιστήρων ώσης ώστε να συγκριθεί με τα χαρακτηριστικά μεγέθη ροής του κατασκευαστή τους. Η διερεύνηση της χρήσης διαφορετικών μοντέλων υπολογισμού της τύρβης, καθώς και του μήκους διακριτοποίησης, επιβεβαιώνει πως η επιλογής της χρήσης δυναμικού συντελεστή Smagorinsky με μήκος κελιού $\delta x=0.125$ m δίδει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τις ονομαστικές τιμές της ταχύτητας εξόδου και δύναμης ώσης τους.

Κλείνοντας, τέθηκε το ερώτημα αν η συγκέντρωση του μονοξειδίου σε ατύχημα φωτιάς χαμηλής ισχύος κρίνεται επικίνδυνη κατά την διέλευση των πεζών σε περίπτωση εκκένωσης. Σύμφωνα με τα αριθμητικά αποτελέσματα και στα δύο σενάρια μελέτης, παρατηρήθηκε πως στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς σε απόσταση 10 m και 50 m από την θέση του ατυχήματος τόσο για το case 2 και 3 τα επίπεδα τοξικότητας είναι εκτός ορίων. Ωστόσο ο χρόνος έκθεσης στον ρυπογόνο αέρα είναι πολύ μικρός με αποτέλεσμα την εμφάνιση ελαφρών συμπτωμάτων. Εν αντιθέσει με το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς, στο επίπεδο διέλευσης των πεζών οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου παρουσιάζουν μεγαλύτερη επικινδυνότητα τόσο στο case 2 όσο και στο case 3 10 m και 50 m από τη θέση του ατυχήματος. Σημαντική αναφορά είναι πως στο επίπεδο διέλευσης των πεζών παρατηρείται πως η χρονική διάρκεια που οι συγκεντρώσεις των ρύπων βρίσκονται πάνω από τα επιτρεπτά όρια είναι περίπου 30 s. Αυτή η παρατήρηση δίδει την ικανότητα ως μελετητές την καλύτερη συνεργασία με τα σωστικά συνεργεία εκκένωσης ιδιαίτερα σε δυσμενέστερες περιπτώσεις ατυχημάτων.

8 Μελλοντική εργασία- έρευνα

Η ανάγκη για περισσότερη εμβάθυνση τόσο στα θέματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής όσο και της ασφάλειας σε διάφορα σενάρια πυρκαγιάς ωθεί την περαιτέρω αναζήτηση νέων μεθόδων και προβλημάτων επίλυσης. Αρχικά η μελέτη σιδηροδρομικής σήραγγας μεγαλύτερου μήκους και διαφορετικής γεωμετρίας είναι ο πρώτος και ανερχόμενος μελλοντικός μου στόχος. Επιπροσθέτως σημαντικό θα ήταν να μελετηθούν σενάρια πυρκαγιάς μεγαλύτερης ισχύος, που να συνδυάζουν τόσο την διέλευση κινούμενων συρμών εντός της ή την ύπαρξη στατικών συρμών με μεγαλύτερο πλήθος βαγονιών. Τέλος η αναζήτηση μου που πρόκειται να μελετηθεί μελλοντικά αφορά την προσομοίωση της εκκένωσης των ανθρώπων με χρήση κατάλληλου λογισμικού καθώς και της βέλτιστης πορείας εξόδου με βάση τα επίπεδα τοξικότητας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Awbi, H. B. (2004). Ventilation of Buildings, CRC Press.
- [2]. Gonzalez, M. A. (1984). "On the aerodynamics of natural ventilators." Building and Environment **19**(3): 179-189.
- [3]. Haack, A. (1998). "Fire protection in traffic tunnels: General aspects and results of the EUREKA project." Tunnelling and Underground Space Technology **13**(4): 377-381.
- [4]. Harte, J., Holdren, Cheryl, Schneider, Richard, Shirley, Christine (2006). "TOXICS A TO Z: A GUIDE TO EVERYDAY POLLUTION HAZARDS." 535.
- [5]. Holmes, M. J. (1973). "Fundamentals of industrial ventilation— Third enlarged edition V. V. BATURIN 486 pp." Building Science **8**: 95-96.
- [6]. Ingason, H., Y. Z. Li and A. Lönnemark (2014). Tunnel Fire Dynamics, Springer New York.
- [7]. Kümmel, W. (2004). Technische Strömungsmechanik.
- [8]. McGrattan, K., et al. (2013). "PYROSIM MANUAL."
- [9]. McGrattan, K., S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott and M. Vanella (2020). Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Sixth Edition, NIST: 365.
- [10]. McGrattan, K. B. (2006).
- [11]. McGrattan, K. B. and G. P. Forney (2004).
- [12]. Roache, P. J. (1994). "Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies." Journal of Fluids Engineering **116**(3): 405-413.
- [13]. States, U., C. H. C. o. E. United States, C. S. o. Oversight, I. Staff, U. S. C. H. C. o. Energy, C. S. o. Oversight and Investigations (2006). A Review of the NRC's Reactor Oversight Process: Hearing Before the Subcommittee on Oversight and Investigations of the Committee on Energy and Commerce, House of Representatives, One Hundred Ninth Congress, Second Session, June 19, 2006, U.S. Government Printing Office.
- [14]. Tarada, F. (2010). New Perspectives on the Critical Velocity for Smoke Control.
- [15]. Thomas, P. H. (1968). "The movement of smoke in horizontal passages against an air flow." Fire Safety Science **vol. 723**: p. 1.

- [16]. Tunnel, N. F. P. A. T. C. o. R. and H. F. Protection (2020). NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, NFPA.
- [17]. v.d.Giesen, B. J. M., S. H. A. Penders, M. G. L. C. Loomans, P. G. S. Rutten and J. Hensen (2011). "Modelling and simulation of a jet fan for controlled air flow in large enclosures." Environmental Modelling & Software **26**: 191–200.
- [18]. v.d.Giesen, B. J. M., S. H. A. Penders, M. G. L. C. Loomans, P. G. S. Rutten and J. L. M. Hensen (2011). "Modelling and simulation of a jet fan for controlled air flow in large enclosures." Environmental Modelling & Software **26**(2): 191-200.
- [19]. Αθανάσιος Βαλαβανίδης, Θ. Β. (2012). "Πράσινη Χημεία και Πράσινη Τεχνολογία. Από την Θεωρία στην Πράξη για την Προστασία του Περιβάλλοντος και την Αειφόρο Ανάπτυξη." 244.
- [20]. Δοκουμετζίδη, Γ. Γ., Δ. Δ. Κ. Κούσιου and Α. Δ. Μαλασπίνα (1954). "ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΕΡΓΑ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΟΙ-ΑΕΡΟΛΙΜΕΝΕΣ." 310.