



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμήμα ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ακαδημαϊκό Έτος: 2019-2020

ΜΠΑΤΣΟΥΛΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

Έλεγχος πυρκαγιάς και αποκαπνισμού σήραγγας τρένου με κατακόρυφους αξονικούς ανεμιστήρες σε περίπτωση φωτιάς με την μέθοδο υπολογιστικών μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

Επιβλέπων: ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ  
Επιβλέπων: ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2020

© UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
2020. All rights reserved. No part of this publication may be  
reproduced without the written permission of the copyright owner.

## **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. Two dual vertical axial fan groups with an air supply of 30 m<sup>3</sup> .

A diesel pool fire accident was examined which located in the middle of a railway tunnel corresponding to 10 MW. A fire validation process was conducted in order to maintain a comparative difference between empirical equations and FDS predictions.

Purpose of this research is to accomplish the critical velocity after four minutes from fire ignition for two hypothetical scenarios. Both two different cases were examined at a time a) a 10 MW accident case in the middle of tunnel, b) an accident with a 10 MW fire with a immobile train in the middle of the tunnel

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασιλόπουλο Κωνσταντίνο για την ανάθεση της πτυχιακής ,αυτής, εργασίας σε εμένα αλλά κυρίως για την καθοδήγηση και την πολύ σημαντική βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον κ. Σαρρή Ιωάννη, η συνεισφορά του οποίου ήταν καταλυτική κατά την διαδικασία ανάθεσης της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας στο πρόσωπο μου. Τέλος, αξίζει να αναφερθώ στην πολύτιμη βοήθεια που είχα από όλους τους συμφοιτητές μου, με τους οποίους εργαζόμασταν παράλληλα καθώς και σε όλους τους υπεύθυνους του εργαστηρίου αεροδυναμικής που μας παρείχαν τον χώρο τους και τον εξοπλισμό τους ώστε να εργαζόμαστε αναπόσπαστοι.

Κλείνοντας, θα ήθελα να κάνω μια ξεχωριστή αναφορά σε όλους τους δικούς μου ανθρώπους και κυρίως στην οικογένεια μου που με στήριξαν σε οικονομικό αλλά και σε ψυχολογικό επίπεδο σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Τους ευχαριστώ θερμά.

## Περιεχόμενα

ABSTRACT .....	1
Ευχαριστίες .....	2
Κατάλογος Σχημάτων .....	5
Κατάλογος Πινάκων .....	8
Κατάλογος Εξισώσεων .....	9
1 Οι σήραγγες στο ευρωπαϊκό δίκτυο μεταφορών .....	10
1.1 Κίνδυνοι ατυχημάτων .....	10
1.2 Είδη συστημάτων αερισμού σήραγγας .....	11
1.3 Φυσικός αερισμός .....	12
1.4 Μηχανικός αερισμός .....	14
1.4.1 Διαμήκη συστήματα .....	14
1.4.2 Εγκάρσια συστήματα .....	16
1.5 Στόχος πτυχιακής εργασίας .....	18
2 Προγράμματα προσομοίωσης και εκκένωσης πυρκαγιάς .....	20
2.1 Γενικά .....	20
2.2 Ο Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής FDS στην λειτουργία του PYROSIM .....	21
2.2.1 Εισαγωγή .....	22
2.2.2 Θεμελιώδεις εξισώσεις .....	23
2.2.3 Μοντέλο τύρβης στον κώδικα FDS .....	26
2.2.4 Διαδικασία επίλυσης .....	27
3 Προμελέτη .....	29
3.1 Περιγραφή .....	29
3.2 Γεωμετρικά στοιχεία της σήραγγας .....	29
3.3 Γενικά Δεδομένα – Παραδοχές .....	31
3.4 Χαρακτηριστικά της Φωτιάς .....	32
3.5 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Τρένου .....	34
3.6 Υπολογισμοί .....	35
3.7 Θεωρητικός υπολογισμός απωλειών στο εσωτερικό της σήραγγας .....	39
3.8 Υπολογισμός κρίσιμης ταχύτητας $U_{crit}$ .....	42
3.9 Συμπέρασμα .....	43
4 Σενάριο της μελέτης .....	44
4.1 Γεωμετρία σήραγγας .....	44
4.2 Υπολογιστικό πλέγμα .....	45
4.3 Χαρακτηριστικά φωτιάς .....	47
4.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά κατακόρυφων ανεμιστήρων .....	48
4.5 Υπολογιστικοί παράμετροι .....	50
5 Αποτελέσματα Παραμετρικής Μελέτης .....	51
5.1 Σενάριο 1: Φωτιά σε κενή σήραγγα .....	51

5.1.1	Θερμοκρασία.....	51
5.1.2	Μονοξείδιο του Άνθρακα .....	55
5.1.3	Οριζόντια ταχύτητα.....	59
5.1.4	Κατακόρυφη ταχύτητα .....	62
5.2	Σενάριο 2 : Φωτιά κατά την διέλευση τρένου από την σήραγγα.....	65
5.2.1	Θερμοκρασία.....	65
5.2.2	Μονοξείδιο του άνθρακα .....	68
5.2.3	Οριζόντια ταχύτητα.....	71
5.2.4	Κατακόρυφη ταχύτητα .....	74
6	Σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με την ημι-εμπειρική σχέση ..	77
6.1	Μεθοδολογία.....	77
6.2	Θεωρητικός υπολογισμός της μέγιστης θερμοκρασίας ( $T_x$ ) στις θέσεις των αισθητηρίων .....	78
6.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	81
7	Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία.....	85
7.1	Συμπέρασμα .....	85
7.2	Μελλοντική εργασία .....	86
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	87
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ .....	89

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1 Σύστημα αερισμού από πύλη σε πύλη.....	13
Σχήμα 1-2 Χαρακτηριστικά φυσικού αερισμού .....	14
Σχήμα 1-3 Σύστημα έγχυσης νωπού αέρα .....	15
Σχήμα 1-4 Σύστημα με χρήση ανεμιστήρων ώσης ( Jet Fans ) .....	15
Σχήμα 1-5 Σύστημα προσαγωγής - απαγωγής αέρα.....	16
Σχήμα 1-6 Πλήρως εγκάρσιο σύστημα αερισμού .....	17
Σχήμα 1-7 Ημι-εγκάρσιο σύστημα αερισμού με ανεμιστήρα απαγωγής .....	18
Σχήμα 2-1 Προσομοίωση εκκένωσης με την χρήση του λογισμικού Pathfinder 2016.....	21
Σχήμα 2-2 Κώδικας FDS σχεδιασμένος ειδικά για την παρούσα μελέτη .....	23
Σχήμα 3-1 Απεικόνιση της γεωμετρίας της σήραγγας μέσω του λογισμικού Pyrosim.....	30
Σχήμα 3-2 Απεικόνιση της όψης της διατομής της σήραγγας .....	31
Σχήμα 3-3 Ορισμός των χαρακτηριστικών της φωτιάς στο λογισμικό Pyrosim. 33	
Σχήμα 3-4 Καθορισμός των υπό-προϊόντων της φωτιάς.....	34
Σχήμα 3-5 Σχηματική διάταξη συρμού DESIRO .....	35
Σχήμα 3-6 Υπολογισμός απωλειών στην σήραγγα .....	38
Σχήμα 3-7 Υπολογισμός κρίσιμης ταχύτητας ( $U_{crit}$ ) .....	43
Σχήμα 4-1 Τμηματοποίηση πλέγματος στο Pyrosim .....	45
Σχήμα 4-2 Πλέγμα περιοχής φωτιάς .....	46
Σχήμα 5-1 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας μετά από : a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων ( $Y = 3,5 \text{ m}$ ).....	53
Σχήμα 5-2 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας μετά από : a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας ( $Y = 5,5 \text{ m}$ ) .....	54
Σχήμα 5-3 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης του CO μετά από a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων ( $Y = 3,5 \text{ m}$ ) .....	57
Σχήμα 5-4 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης του CO μετά από a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας ( $Y = 5,5 \text{ m}$ ) .....	58

- Σχήμα 5-5 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της οριζόντιας ταχύτητας ( U-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  )..... 60
- Σχήμα 5-6 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της οριζόντιας ταχύτητας ( U-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  )..... 61
- Σχήμα 5-7 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της κατακόρυφης ταχύτητας ( V-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  )..... 63
- Σχήμα 5-8 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της κατακόρυφης ταχύτητας ( V-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  )..... 64
- Σχήμα 5-9 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας μετά από : a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός της σήραγγας..... 66
- Σχήμα 5-10 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας μετά από : a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός αυτής..... 67
- Σχήμα 5-11 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης του CO μετά από : a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός της σήραγγας ..... 69
- Σχήμα 5-12 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης του CO μετά από : a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός αυτής..... 70
- Σχήμα 5-13 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της οριζόντιας ταχύτητας ( U-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός της σήραγγας..... 72
- 5-14 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της οριζόντιας ταχύτητας ( U-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός αυτής ..... 73
- Σχήμα 5-15 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της κατακόρυφης ταχύτητας ( V-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός της σήραγγας..... 75
- Σχήμα 5-16 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της κατακόρυφης ταχύτητας ( V-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός αυτής ..... 76



Σχήμα 6-1 Γραφική παράσταση θεωρητικών τιμών της μέγιστης θερμοκρασίας σε ένα σημείο της σήραγγας.....	80
Σχήμα 6-2 Γραφική παράσταση θεωρητικών και πειραματικών τιμών της μέγιστης θερμοκρασίας στο σημείο $X = 10$ m κατάντι της φωτιάς .....	81
Σχήμα 6-3 Γραφική παράσταση θεωρητικών και πειραματικών τιμών της μέγιστης θερμοκρασίας στο σημείο $X = 30$ m κατάντι της φωτιάς .....	82
Σχήμα 6-4 Γραφική παράσταση θεωρητικών και πειραματικών τιμών της μέγιστης θερμοκρασίας στο σημείο $X = 50$ m κατάντι της φωτιάς .....	83
Σχήμα 6-5 Γραφική παράσταση θεωρητικών και πειραματικών τιμών της μέγιστης θερμοκρασίας στο σημείο $X = 100$ m κατάντι της φωτιάς .....	84

## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 3-1 Παραμέτρων και συντελεστών.....	32
Πίνακας 3-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του Τρένου .....	34
Πίνακας 3-3 Δεδομένα Υπολογισμού .....	36
Πίνακας 3-4 Υπολογισμός απωλειών μέσω του ειδικού υπολογιστικού φύλλου (Excel) .....	37

## Κατάλογος Εξισώσεων

(2-1).....	24
(2-2).....	24
(2-3).....	24
(2-4).....	25
(2-5).....	25
(2-6).....	26
(2-7).....	26
(2-8).....	27
(2-9).....	27
(2-10).....	27
(2-11).....	28
(3-1).....	39
(3-2).....	40
(3-3).....	40
(3-4).....	41
(3-5).....	41
(3-6).....	42
(4-1).....	46
(6-1).....	78
(6-2).....	79
(6-3).....	79
(6-4).....	79
(6-5).....	80

# 1 Οι σήραγγες στο ευρωπαϊκό δίκτυο μεταφορών

## 1.1 Κίνδυνοι ατυχημάτων

Η εκσυγχρόνιση των δικτύων μεταφορών έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλων τεχνικών έργων όπως είναι οι σύνθετοι ανισόπεδοι κόμβοι οι μεγάλες και υψηλές γέφυρες και οι σήραγγες [1] [2]. Όλα αυτά τα χρόνια, η συνεχής παρακολούθηση και διαχείριση ποικίλων δικτύων ανά τον κόσμο έχει δείξει ότι σε τα απρόβλεπτα συμβάντα και ατυχήματα στα πολύπλοκα αυτά τμήματα αποφέρουν δυσμενέστερες συνέπειες απ' ό,τι στα συνήθη τμήματα. Ειδικά στις σήραγγες η πρόκληση ατυχημάτων συχνά οδηγεί σε απρόβλεπτες καταστάσεις που σχετίζονται με εκδήλωση φωτιάς και εμφάνιση καπνού. Τα τελευταία έτη έχει σημειωθεί η ύπαρξη σοβαρών ατυχημάτων σε γνωστές σήραγγες που είχαν ως αντίκτυπο την ύπαρξη πολλών καταστροφών και θυμάτων. Σε χώρες της ΕΕ σε τρία μόλις ατυχήματα με εκδήλωση φωτιάς, στο εσωτερικό σήραγγας, υπήρξαν 62 νεκροί. Το συνολικό άμεσο κόστος των ατυχημάτων αυτών έφθασε τα 210 εκ € ανά έτος. Πρέπει να σημειωθεί ότι και στις τρεις αυτές περιπτώσεις οι σήραγγες είχαν μήκος μεγαλύτερο από 400 μέτρα, μήκος το οποίο αποτελεί και το όριο για τον διαχωρισμό των σηράγγων σε μικρές και μεγάλες. Το μήκος της σήραγγας καθορίζει τον εξοπλισμό της αλλά και την ύπαρξη ή μη στελεχωμένου κέντρου ελέγχου. Όπως είναι προφανές, ο βαθμός δυσκολίας αντιμετώπισης ενός ατυχήματος και των συνεπειών του, αυξάνεται όσο αυξάνεται το μήκος της σήραγγας αλλά επηρεάζεται άμεσα και από τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της, όπως είναι το είδος της σήραγγας (μονής / διπλής κατεύθυνσης), η ύπαρξη διαπλατυνσεων, η ύπαρξη ή μη συστήματος αερισμού κλπ. καθώς και από τον φόρτο κυκλοφορίας. Τα τελευταία έτη η ασφαλής λειτουργία των σηράγγων έχει απασχολήσει πολλά αρμόδια όργανα και οργανισμούς στην Ευρώπη αλλά και τις υπηρεσίες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής έχοντας ως αποτέλεσμα την έγκριση αρκετών κονδυλίων για την χρηματοδότηση αρκετών έργων έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης που στοχεύουν στην αντιμετώπιση διαφόρων ζητημάτων. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται τα θέματα ομογενοποίησης των προδιαγραφών σχεδιασμού

των σηράγγων, του καθορισμού του ελάχιστου εξοπλισμού ανάλογα με το είδος και τις συνθήκες λειτουργίας της σήραγγας, της προτυποποίησης της σήμανσης και σηματοδότησης καθώς και του τρόπου οργάνωσης διαχείρισης των σηράγγων αλλά και του ελέγχου της ασφάλειάς τους. Το κυριότερο πρόβλημα είναι η ταυτόχρονη συνύπαρξη νέων και παλαιών σηράγγων που έχουν σχεδιασθεί και κατασκευασθεί με διαφορετικά πρότυπα τόσο σε ότι αφορά αυτή καθαυτή την κατασκευή όσο και σε ότι αφορά τον εξοπλισμό τους. Ευχάριστο γεγονός είναι ότι προσφάτως εγκρίθηκε από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο στα πλαίσια της Πολιτικής της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την Ασφάλεια των Σηράγγων σχετική Οδηγία που αφορά πολλά από τα ανωτέρω ζητήματα [3]. Επιπρόσθετα, με το πέρασμα των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας, έχουν εξελιχθεί σημαντικά τα συστήματα αερισμού και αποκαπνισμού, στις σήραγγες, τα οποία αποτελούν τον κυριότερο παράγοντα πρόληψης και αντιμετώπισης των ατυχημάτων που οφείλονται στην ύπαρξη φωτιάς και στην διασπορά του καπνού αυτής [4]. Στην συνέχεια θα αναφερθούν αναλυτικά τα κυριότερα είδη συστημάτων αερισμού σήραγγας.

## **1.2 Είδη συστημάτων αερισμού σήραγγας**

Με τον όρο «αερισμός» εννοούμε την , εξαναγκασμένη ή μη , κυκλοφορία του αέρα. Ο αερισμός μπορεί να επιτευχθεί είτε με τη χρήση μηχανικών συσκευών, όπως είναι η χρήση ανεμιστήρων, είτε με φυσικό τρόπο [5].

Από αυτόν τον απλό ορισμό του αερισμού, προχωρούμε στην συνέχεια στον αερισμό των σηράγγων. Η χρήση των σηράγγων χρονολογείται από τους πρώτους πολιτισμούς, όπως και ο αερισμός με τη μορφή του φυσικού αερισμού [6]. Με το πέρασμα των χρόνων όμως, ο αερισμός των σηράγγων έχει αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία, λόγω της ευρείας χρήσης ατμομηχανών και κινητήρων εσωτερικής καύσης, στον κλάδο των μεταφορών, η οποία έχει αυξήσει σημαντικά τις ποσότητες των προϊόντων καύσης και συνεπώς την παραγόμενη θερμότητα , με αποτέλεσμα να επηρεάζεται το επιβατικό κοινό. Εξαιτίας της μεγάλης, αυτής, αύξησης ορυκτών καυσίμων, έχουν γραφτεί αρκετά βιβλία και άρθρα, σχετικά με τις μεθόδους αερισμού των σιδηροδρομικών σηράγγων τα τελευταία χρόνια [7-10].

Συνεπώς , τονίζεται η αναγκαιότητα επαρκούς αερισμού , που θα εξασφαλίζει την συνεχή παροχή καθαρού αέρα , στο εσωτερικό της. Ο καθαρός – φρέσκος αέρας, είναι απαραίτητος επίσης και για την βελτίωση των επιπέδων ορατότητας εντός της σήραγγας.

Με τον όρο «σήραγγα» στο παρόν κεφάλαιο, αναφερόμαστε σε όλα τα είδη σηράγγων που σχετίζονται με τις μεταφορές, όπως είναι οι οδικές σήραγγες , οι σήραγγες διέλευσης αστικών σιδηροδρομικών γραμμών (μετρό, ηλεκτρικός, κ.α.) καθώς και οι σήραγγες των μεγάλων σιδηροδρομικών δικτύων.

Στις περισσότερες σιδηροδρομικές σήραγγες ο αερισμός είναι υποχρεωτικός για την διασφάλιση της αποτελεσματικής απομάκρυνσης της θερμότητας που παράγεται από τα μέρη της ατμομηχανής αλλά και για την ανακύκλωση του αέρα εντός της σήραγγας, απομακρύνοντας έτσι τους ρύπους των καυσαερίων [11]. Υπάρχουν δύο βασικά είδη αερισμού στις σήραγγες : ο φυσικός αερισμός και ο αερισμός με την χρήση μηχανικών μέσων.

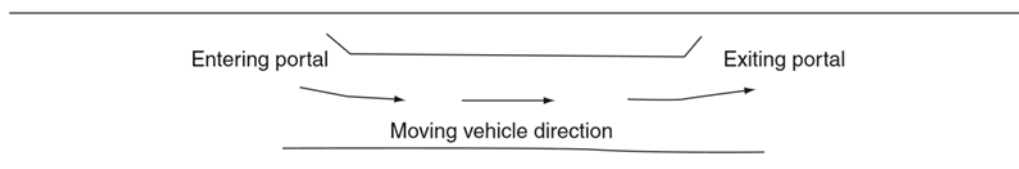
### **1.3 Φυσικός αερισμός**

Η διατήρηση ικανοποιητικών περιβαλλοντικών συνθηκών, στις σήραγγες με φυσικό αερισμό, βασίζεται κυρίως στις μετεωρολογικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής και στα κινούμενα μέσα μεταφοράς (τρένα) εντός της σήραγγας, που λειτουργούν ως «έμβολα» και κινούν τον αέρα (φαινόμενο εμβόλου) [12]. Οι κυριότερες περιβαλλοντικές συνθήκες που επηρεάζουν τις σήραγγες είναι η διαφορά πίεσης μεταξύ των δυο πυλών (είσοδος – έξοδος) της, που δημιουργείται από την διαφορά του υψομέτρου, της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος ή του ανέμου εκατέρωθεν αυτής [13]. Δυστυχώς, κανένας από αυτούς τους παράγοντες δεν παραμένει σταθερός. Μια ξαφνική αλλαγή στην κατεύθυνση ή την ταχύτητα του ανέμου μπορεί να αναιρέσει πολύ γρήγορα όλα τα παραπάνω. Συνεπώς όλες αυτές οι φυσικές επιδράσεις, στην πλειονότητα

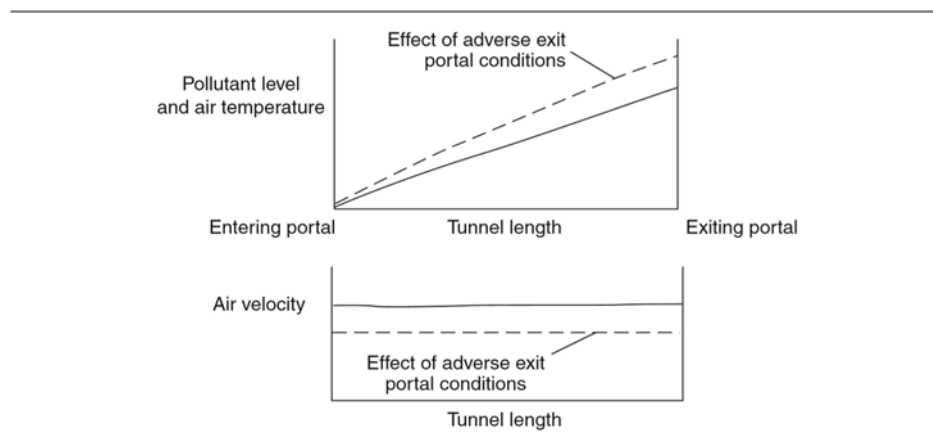
των περιπτώσεων, δεν είναι επαρκώς αξιόπιστες ώστε να λαμβάνονται υπόψη σε περίπτωση αερισμού έκτακτης ανάγκης, όπως είναι για παράδειγμα μία πυρκαγιά.

Οι φυσικά αεριζόμενες σήραγγες μπορούν να διαμορφωθούν με ροή αέρα από πύλη σε πύλη (Βλ. Σχήμα 1-1), από πύλη σε άξονα ή από άξονα σε άξονα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-2 η ταχύτητα του αέρα στο οδόστρωμα είναι ομοιόμορφη και η θερμοκρασία και το επίπεδο ρύπων αυξάνονται κατά μήκος της σήραγγας, προσεγγίζοντας την μέγιστη τιμή τους κοντά στην πύλη εξόδου. Σε περίπτωση εμφάνισης αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες, η ταχύτητα μειώνεται και η θερμοκρασία και οι ρύποι αυξάνονται.

Σε πολλές, αρχικά φυσικά αεριζόμενες, αστικές οδικές σήραγγες απαιτείται συχνά κάποιο μηχανικό σύστημα, για την εκκαθάριση του καπνού και των θερμών αερίων που παράγονται κατά τη διάρκεια μιας έκτακτης ανάγκης (πυρκαγιά). Το μηχανικό αυτό σύστημα τοποθετείται επίσης, για την απομάκρυνση των μολυσμένων και θερμών αερίων ή της ομίχλης κατά τη διάρκεια δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών ή κατά την διάρκεια των ωρών χαμηλής κυκλοφορίας στην σήραγγα.



**Σχήμα 1-1 Σύστημα αερισμού από πύλη σε πύλη**



**Σχήμα 1-2 Χαρακτηριστικά φυσικού αερισμού**

## 1.4 Μηχανικός αερισμός

Η αξιοπιστία των συστημάτων φυσικού αερισμού των σηράγγων θα πρέπει να αξιολογείται προσεκτικά και διεξοδικά, ιδίως κατά την επίδραση δυσμενών περιβαλλοντικών και λειτουργικών συνθηκών. Εάν ο φυσικός τρόπος αερισμού δεν είναι επαρκής, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μηχανικό σύστημα αερισμού με χρήση ανεμιστήρων. Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι μηχανικών συστημάτων αερισμού : τα διαμήκη συστήματα και τα εγκάρσια συστήματα.

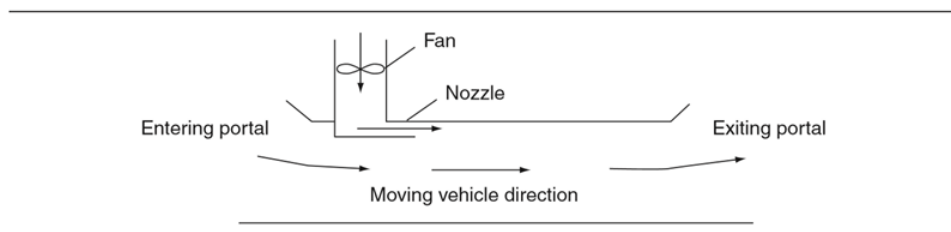
### 1.4.1 Διαμήκη συστήματα

Στα διαμήκη συστήματα αερισμού, ο αέρας εισάγεται ή απομακρύνεται από το την σήραγγα σε συγκεκριμένο αριθμό σημείων, δημιουργώντας έτσι μια ροή αέρα κατά μήκος της σήραγγας. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι τέτοιων συστημάτων αερισμού [14] :

- Το σύστημα έγχυσης νωπού αέρα (Βλ. Σχήμα 1-3). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται εκτενώς σε σιδηροδρομικές σήραγγες αλλά εφαρμόζεται επίσης και σε οδικές. Ο αέρας εγχέεται, μέσω ενός αγωγού, στο ένα άκρο της σήραγγας, όπου αναμιγνύεται με τον αέρα που κυκλοφορεί εξαιτίας του

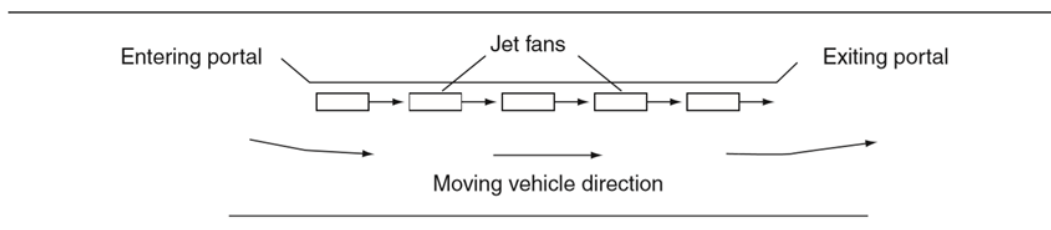


φαινομένου του εμβόλου που δημιουργεί η εισερχόμενη κυκλοφορία. Η ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό της σήραγγας είναι ομοιόμορφη σε όλο το μήκος της ενώ η συγκέντρωση των ρύπων και η θερμοκρασία του αέρα αυξάνονται όσο ο αέρας κινείται από την πύλη εισόδου προς την πύλη εξόδου. Οι δυσμενείς εξωτερικές ατμοσφαιρικές συνθήκες μπορούν να μειώσουν την αποτελεσματικότητα αυτού του συστήματος. Τα επίπεδα συγκέντρωσης των ρύπων και η θερμοκρασία αυξάνονται καθώς μειώνεται η ροή του αέρα ή το μήκος της σήραγγας αυξάνεται.



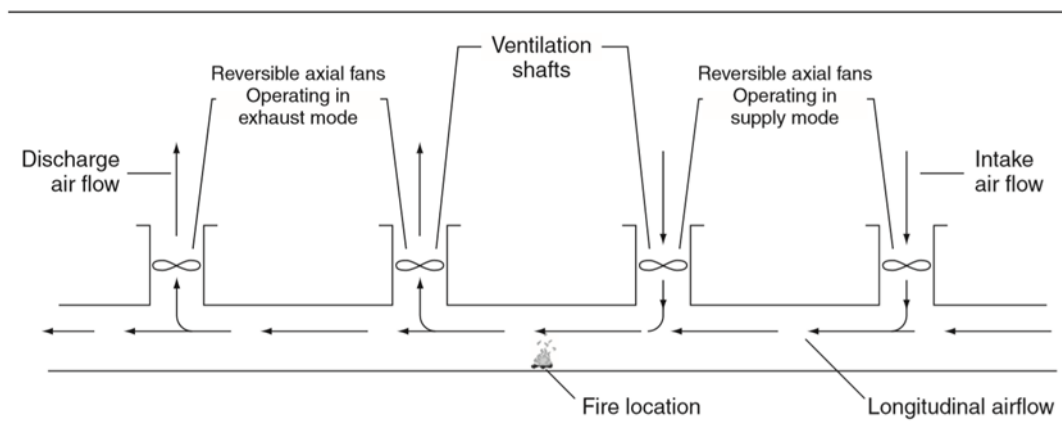
**Σχήμα 1-3 Σύστημα έγχυσης νωπού αέρα**

- Το σύστημα με χρήση ανεμιστήρων ώσης (Jet Fans). Το σύστημα αυτό βασίζεται στην εγκατάσταση μιας σειράς αξονικών ανεμιστήρων ροής, κατά μήκος της σήραγγας, συνήθως τοποθετημένη στην οροφή ή στις πλευρές της. (Βλ. Σχήμα 1-4). Οι ανεμιστήρες αυτοί ωθούν τον αέρα με τόσο υψηλή ταχύτητα που πρακτικά προσθέτουν μια επιπλέον ροή αέρα κατά μήκος της σήραγγας. Αν και τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως σε οδικές σήραγγες, έχουν χρησιμοποιηθεί και σε σήραγγες ειδικής διέλευσης (μετρό).



**Σχήμα 1-4 Σύστημα με χρήση ανεμιστήρων ώσης ( Jet Fans )**

- Το σύστημα με αγωγούς προσαγωγής – απαγωγής αέρα. Το σύστημα αυτό εφαρμόζεται κυρίως σε σήραγγες του μετρό, όπου κατασκευάζεται μια σειρά αγωγών αερισμού που συνδέουν το εσωτερικό της σήραγγας με το περιβάλλον (Βλ. Σχήμα 1-5). Στους αγωγούς εγκαθίστανται ανεμιστήρες που λειτουργούν με κατάλληλη φορά ώστε να δημιουργηθεί μια διαμήκης ροή αέρα στο τμήμα της σήραγγας που βρίσκεται ανάμεσα στους δυο αγωγούς. Η κύρια χρήση αυτού του συστήματος έχει να κάνει με τον έλεγχο της εξάπλωσης του καπνού στη σήραγγα κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς.



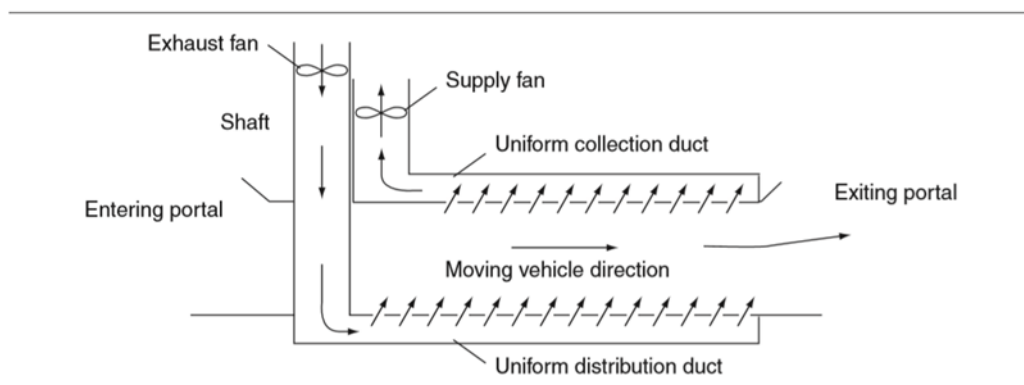
**Σχήμα 1-5 Σύστημα προσαγωγής - απαγωγής αέρα**

### 1.4.2 Εγκάρσια συστήματα

Εγκάρσιο σύστημα αερισμού αποτελεί το σύστημα που έχει ομοιόμορφη προσαγωγή καθαρού αέρα και ομοιόμορφη απαγωγή του «μολυσμένου» αέρα σε όλο το μήκος του [16]. Υπάρχουν δυο κύρια είδη τέτοιων συστημάτων που χρησιμοποιούνται :

- τα πλήρως εγκάρσια συστήματα. Σε σήραγγες με μεγάλο μήκος ( $> 1000\text{m}$ ) είναι προτιμότερη η εγκατάσταση συστήματος πλήρους εγκάρσιου

αερισμού (Βλ. Σχήμα 1-6). Σε αυτό το σύστημα η προσαγωγή και η απαγωγή του αέρα δεν πραγματοποιείται από τις πύλες εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Η είσοδος και η έξοδος του αέρα, αντικαθίστανται πλέον από αγωγούς προσαγωγής και απαγωγής καθ' όλο το μήκος της σήραγγας [15].



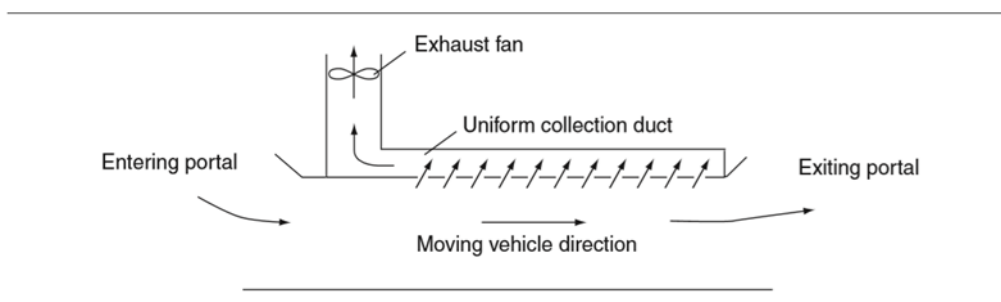
**Σχήμα 1-6 Πλήρως εγκάρσιο σύστημα αερισμού**

- τα ημι-εγκάρσια συστήματα. Το κύριο χαρακτηριστικό του ημι-εγκάρσιου αερισμού είναι η ομοιόμορφη διανομή αέρα στο εσωτερικό της σήραγγας. Η συγκεκριμένη διάταξη δημιουργεί ένα ομοιόμορφο επίπεδο συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα μιας και ο αέρας και οι ρύποι των οχημάτων εισέρχονται στη σήραγγα με τον ίδιο ρυθμό.

Η καλύτερη θέση για την εισαγωγή νωπού αέρα είναι στη στάθμη της εξάτμισης των οχημάτων ώστε να δημιουργούνται συνθήκες για την άμεση διάλυση των παραγόμενων ρύπων. Για να ολοκληρωθεί η διανομή αέρα, θα πρέπει να παραχθεί ένα επαρκές διαφορικό πιέσεων μεταξύ του αγωγού προσαγωγής (Βλ. Σχήμα 1-7) και του οδοστρώματος για την εξουδετέρωση της επίδρασης του φαινομένου εμβόλου και των μετεωρολογικών συνθηκών.

Το δίκτυο απόρριψης αέρα σε σύστημα ημι-εγκάρσιου αερισμού σε σήραγγα μονής κατεύθυνσης, θα προκαλέσει μέγιστη συγκέντρωση ρύπων στο στόμιο

εξόδου. Σε σήραγγα διπλής κατεύθυνσης, θα δημιουργηθεί μια περιοχή μηδενικού νωπού αέρα στο μέσο της σήραγγας, η οποία θα συμβάλλει στη περαιτέρω μεγιστοποίηση της συγκέντρωσης ρύπων [17].



**Σχήμα 1-7 Ημι-εγκάρσιο σύστημα αερισμού με ανεμιστήρα απαγωγής**

## 1.5 Στόχος πτυχιακής εργασίας

Η συγκεκριμένη εργασία, στοχεύει στην μελέτη ενός λειτουργικού και αποτελεσματικού συστήματος αερισμού σιδηροδρομικής σήραγγας, το οποίο θα διασφαλίζει διαρκώς τόσο την ποιότητα του αέρα στο εσωτερικό της σήραγγας όσο και την αποτελεσματική απομάκρυνση του καπνού που θα προκληθεί από την ύπαρξη φωτιάς λόγω κάποιου ατυχήματος [18]. Συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία επιδιώκει τα εξής σημαντικά :

- Την μοντελοποίηση συστήματος αερισμού, αποτελούμενο από κατακόρυφους ανεμιστήρες κατά μήκος της σιδηροδρομικής σήραγγας, το οποίο θα έχει ως κύρια λειτουργία την απομάκρυνση του καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς, στο εσωτερικό της σήραγγας, ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή και ασφαλής εκκένωση της [19]
- Την αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος αυτού, δηλαδή κατά πόσο θα μπορέσει ένα σύστημα αποκλειστικά με κατακόρυφους αξονικούς ανεμιστήρες να απομακρύνει αποτελεσματικά τον καπνό

σε μια τόσο μεγάλης διαμέτρου σήραγγα ή εάν θα πρέπει να προτιμηθεί κάποιο μεικτό σύστημα με εγκάρσιο και κατακόρυφο αερισμό.

- Την παρουσίαση προμελέτης που θα προβλέπει τα χαρακτηριστικά και το μέγεθος του εξοπλισμού (κατακόρυφοι ανεμιστήρες) που θα χρησιμοποιηθεί, βάσει των απωλειών στο εσωτερικό της σήραγγας
- Και τέλος την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, του μοντέλου της εργασίας, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση συγκεκριμένων εμπειρικών εξισώσεων, που έχουν αναπτυχθεί με το πέρασμα των χρόνων και προσφέρουν σωστά και ασφαλή συμπεράσματα που αναγνωρίζονται από όλους τους επιστήμονες του κλάδου.

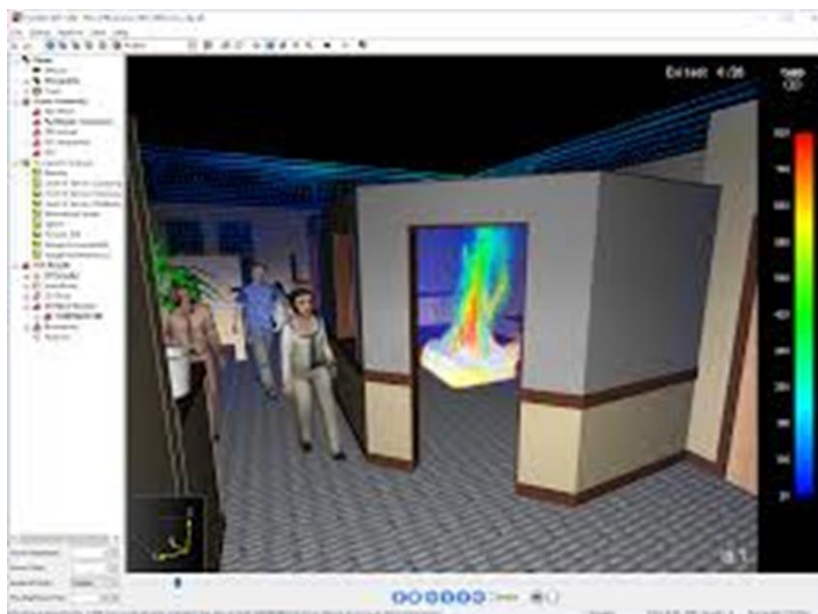
## 2 Προγράμματα προσομοίωσης και εκκένωσης πυρκαγιάς

### 2.1 Γενικά

Εδώ και αρκετά χρόνια, αναπτύσσονται και σχεδιάζονται συνεχώς, προγράμματα προσομοίωσης πυρκαγιών σε κλειστούς και ανοιχτούς χώρους καθώς και προγράμματα προσομοίωσης της εκκένωσης των χώρων αυτών. Σκοπός αυτών των προγραμμάτων είναι η πραγματοποίηση της μελέτης αερισμού και εκκένωσης, κλειστών χώρων κατά κύριο λόγο, υπό την δυσμενέστερη συνθήκη (worst case scenario) ύπαρξης και εξάπλωσης πυρκαγιάς στο εσωτερικό των χώρων αυτών. Τέτοιου είδους χώροι μπορεί να είναι οι εξής :

- Εμπορικά κέντρα
- Καταστήματα
- Κατοικίες
- Γήπεδα
- Σιδηροδρομικές και οδικές σήραγγες, κ.α.

Υπάρχουν διάφορα προγράμματα και εταιρείες που ασχολούνται με το συγκεκριμένο κομμάτι. Τα κυριότερα είναι το FDS ( Fire Dynamics Simulator ) της εταιρείας NIST [20], το Pyrosim της Thunderhead Engineering και το Pathfinder επίσης της Thunderhead Engineering, το οποίο χρησιμοποιείται για το κομμάτι της εκκένωσης χώρων ( evacuation ) .



**Σχήμα 2-1 Προσομοίωση εκκένωσης με την χρήση του λογισμικού Pathfinder 2016**

Η παρούσα μελέτη – πτυχιακή εργασία, μελετά τον αερισμό και τον αποκαπνισμό σιδηροδρομικής σήραγγας, τα στοιχεία της οποίας αναφέρονται στο κεφάλαιο 2, με την χρήση του Pyrosim, το οποίο αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα και επιτυχημένα προγράμματα στον χώρο του, βάση του οποίου αποτελεί ο κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (FDS) ο οποίος αποτελεί την θεμελιακή δομή όλων των προγραμμάτων προσομοίωσης πυρκαγιών και προφανώς η γνώση του αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εκτέλεση οποιουδήποτε μοντέλου προσομοίωσης.

## **2.2 Ο Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής FDS στην λειτουργία του PYROSIM**

Το πρόγραμμα PyroSim είναι ένα γραφικό περιβάλλον για τον χρήστη (Graphical User Interface), το οποίο τρέχει το πρόγραμμα FDS [21], δίνοντας έτσι την δυνατότητα να προβλεφθούν οι συγκεντρώσεις του καπνού, του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και άλλων ουσιών κατά την διάρκεια μιας

πυρκαγιάς, όπως επίσης και τα προφίλ των θερμοκρασιών για έναν χώρο [22]. Το πρόγραμμα PyroSim [23], έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Thunderhead Engineering ενώ το FDS έχει αναπτυχθεί από το NIST (National Institute of Standards and Technology).

### 2.2.1 Εισαγωγή

Ο κώδικας FDS επιλύει αριθμητικά τις εξισώσεις Navier-Stokes, με έμφαση σε θερμικές ροές χαμηλών ταχυτήτων, στην παραγωγή καπνού και την μεταφορά μάζας και θερμότητας [24-26]. 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 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 (Large Eddy Simulation) [27]. 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.

```

File Edit Format View Help
tounel18_5.fds
Generated by Pyrosim - version 2016.1.0425
31 Δεκ 2008 11:14:14 μμ

&HEAD CHID='tounel18_5'/
&TIME T_END=400.0/
&DUMP RENDER_FILE='tounel18_5.gel', COLUMN_DUMP_LIMIT=.TRUE., DT_DEVC=2.0, DT_RESTART=300.0, DT_SL3D=0.25/

&MESH ID='tounel-b-a-c', IJK=486,22,14, XB=211.0,454.0,0.0,11.0,0.0,7.0/
&MESH ID='tounel-b-a-a', IJK=469,22,14, XB=-54.0,180.5,0.0,11.0,0.0,7.0/
&MESH ID='fire', IJK=61,22,14, XB=180.5,211.0,0.0,11.0,0.0,7.0/
&MESH ID='freatiodk', IJK=16,14,44, XB=396.0,400.0,1.5,5.0,7.0,18.0/
&MESH ID='freatiodp', IJK=16,14,44, XB=396.0,400.0,6.0,9.5,7.0,18.0/
&MESH ID='freatioap', IJK=16,14,44, XB=0.0,4.0,6.0,9.5,7.0,18.0/
&MESH ID='freatioak', IJK=16,14,44, XB=0.0,4.0,1.5,5.0,7.0,18.0/

&BREC ID='reaction1',
FUEL='REAC_FUEL',
C=1.0,
M=2.20209,
O=0.622494,
SOOT_Y_FRACTION=0.0,
CO_YIELD=0.04,
SOOT_YIELD=0.07,
HEAT_OF_COMBUSTION=2.0E4/

&DEVC ID='10-uv', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=205.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='10-wv', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=205.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='10-vv', QUANTITY='V-VELOCITY', XYZ=205.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='10-carb mono', QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', XYZ=205.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='30-uv', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=225.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='30-wv', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=225.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='30-vv', QUANTITY='V-VELOCITY', XYZ=225.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='30-carb mono', QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', XYZ=225.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='50-uv', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=245.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='50-wv', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=245.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='50-vv', QUANTITY='V-VELOCITY', XYZ=245.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='50-carb mono', QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', XYZ=245.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='100-uv', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=295.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='100-wv', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=295.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='100-vv', QUANTITY='V-VELOCITY', XYZ=295.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='100-carb mono', QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', XYZ=295.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='10-T', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=205.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='30-T', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=225.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='50-T', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=245.0,5.5,6.5/
&DEVC ID='100-T', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=295.0,5.5,6.5/

&SURF ID='fire',
COLOR='RED',
HRRPUA=1.0E4/

```

Σχήμα 2-2 Κώδικας FDS σχεδιασμένος ειδικά για την παρούσα μελέτη

## 2.2.2 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 συνέχειας της μάζας:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2-1)$$

**β) Εξίσωση της Διατήρησης Ορμής**

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_{d,i} + \dot{m}_b''' u_{b,i} \quad (2-2)$$

Οι Rehm και Baum [28] 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):

$$\bar{p} = \rho T R \sum_a \frac{Z_a}{W_a} = \frac{\rho R T}{\bar{W}} \quad (2-3)$$

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.

### γ) Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

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 ενθαλπίας,  $h_s$ :

$$\frac{\partial(\rho h_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \dot{q}'' \quad (2-4)$$

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 :

$$\dot{q}'' = -k\nabla T - \sum_a h_{s,a} \rho D_a \nabla Y_a + \dot{q}_r'' \quad (2-5)$$

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

Η απόκλιση της ταχύτητας από την εξίσωση Eq. (2.8) υπολογίζεται ως εξής:

$$\nabla \cdot u = \frac{1}{\rho h_s} \left[ \frac{D}{Dt} (\bar{p} - \rho h_s) + \dot{q}''' + \dot{q}_r''' - \dot{q}_r''' - \nabla \cdot \dot{q}'' \right] \quad (2-6)$$

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  $\rho$ ,  $Z_\alpha$  και  $\rho$ . Όπως θα φανεί παρακάτω, ο τρόπος προώθησης της ταχύτητας ροής στο ο 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 εγγωηθεί ότι η απόκλιση της τρέχουσας ταχύτητας είναι ίδια σε αυτό που υπολογίζεται μόνο από τις θερμοδυναμικές μεταβλητές

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

$$\frac{\partial(\rho Z_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Z_\alpha u) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Z_\alpha) + \dot{m}_a''' \quad (2-7)$$

### 2.2.3 Μοντέλο τύρβης στον κώδικα FDS

Ο FDS επιλύει τις εξισώσεις ρευστομηχανικής Navier-Stokes με χρήση της μεθόδου Προσομοίωση Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation-LES), στην οποία οι μεγάλης κλίμακας δίνες υπολογίζονται άμεσα και οι μικρότερες κλίμακες μοντελοποιούνται με χρήση υποπλεγματικών μοντέλων. Η προσομοίωση των τυρβωδών φαινομένων γίνεται με τη μέθοδο Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (LES) χρησιμοποιώντας το μοντέλο Smagorinsky. Ο άμεσος υπολογισμός των διαδικασιών καύσης και μεταφοράς είναι δυνατός (προς το παρόν) σε μικρής κλίμακας πειράματα καύσης.

## Στην εξίσωση της Διατήρησης Ορμής

$$\frac{\partial(\overline{\rho u_i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b'' u_{b,i}} \quad (2-8)$$

εφαρμόζετε το Favre filter,  $\bar{\varphi} = \frac{\overline{\rho \varphi}}{\bar{\rho}}$ , και η εξίσωση της ορμής αποκτά την μορφή:

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b''} \tilde{u}_{b,i} \quad (2-9)$$

όπου ο όρος δύναμης  $\bar{f}_{d,i}$  αντιπροσωπεύει τις εξωτερικές δυνάμεις όπως π.χ. η οπισθέλκουσα.

Ο ορος  $\tau_{ij}$  αναφέρεται στον τανυστή τάσεων ο οποίος ισούται με:

$$\tau_{ij} = \mu \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \bar{u}) \right) \quad (2-10)$$

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

$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  είναι ο τανυστής παραμόρφωσης και  $\mu$  είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

### 2.2.4 Διαδικασία επίλυσης

Ο κώδικας FDS χρησιμοποιεί ένα ημίπεπλεγμένο σχήμα επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων για κάθε ένα από τα αριθμητικά πλέγματα που μπορεί

να αποτελούν το χωρίο επίλυσης του κάθε προβλήματος. Οι μεταβλητές της ροής ανανεώνονται στο χρόνο χρησιμοποιώντας ένα ρητό σχήμα Runge-Kutta δεύτερης τάξης. Για την πίεση χρησιμοποιείται σχήμα πεπλεγμένων διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης.

Ο αλγόριθμος επίλυσης ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογισμός του μέσου ροικού πεδίου  $\bar{u}^n$

2. Εκτίμηση των  $\rho$ ,  $Y_\alpha$  και  $\bar{p}_m$  στο επόμενο χρονικό βήμα με χρήση ρητού σχήματος Euler. Για παράδειγμα η πυκνότητα εκτιμάται μέσω της σχέσης:

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\delta t} + \nabla \cdot \rho^n \bar{u}^n = 0 \quad (2-11)$$

3. Ανταλλαγή των τιμών  $\rho^*$  και  $Y_\alpha^*$  στα όρια των πλεγμάτων.

4. Εφαρμογή οριακών συνθηκών για  $\rho^*$  και  $Y_\alpha^*$ .

5. Υπολογισμός της απόκλισης,  $\nabla \cdot \bar{u}^*$ , με χρήση της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας. Σε αυτό το στάδιο το πεδίο ταχύτητας δεν έχει εκτιμηθεί για το επόμενο χρονικό βήμα, μόνο η απόκλιση της.

## 3 Προμελέτη

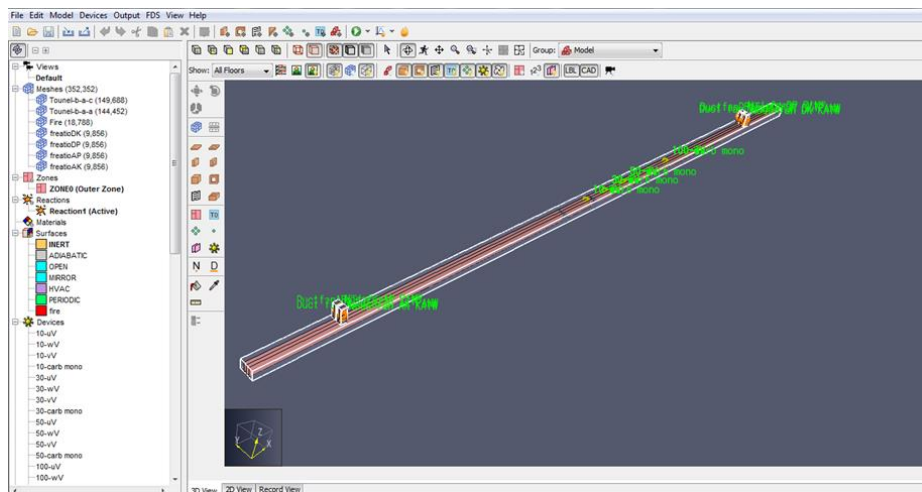
### 3.1 Περιγραφή

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί μια πρώτη προσέγγιση υπολογισμού της κατάλληλης παροχής φρέσκου αέρα, που πρέπει να εισέρχεται στην σήραγγα, ώστε να απομακρύνεται αποτελεσματικά ο καπνός σε περίπτωση πυρκαγιάς στο εσωτερικό της και να διευκολύνεται η εκκένωση της [29]. Με τον όρο παροχή εννοείται η ποσότητα του φρέσκου αέρα που εισέρχεται στην σήραγγα μέσω των αξονικών ανεμιστήρων. Στην παρούσα εργασία δεν θα χρησιμοποιηθούν ανεμιστήρες ώσης (Jet fans) , τοποθετημένοι παράλληλα με την ροή του αέρα, αλλά αξονικοί ανεμιστήρες τοποθετημένοι κατακόρυφα κατά μήκος της σήραγγας. Ο αέρας εισέρχεται κάθετα, από τους αξονικούς ανεμιστήρες που θα βρίσκονται μέσα σε αγωγούς (φρεάτια) εισαγωγής , στο εσωτερικό της σήραγγας, προσκρούει στο έδαφος με αποτέλεσμα να αναστρέφεται και να διαχέεται κατά μήκος της σήραγγας προς και τις δύο κατευθύνσεις [30, 31]. Συνεπώς σε αυτό το στάδιο της μελέτης υπολογίζοντας το σύνολο των απωλειών στη σήραγγα, μπορούμε να έχουμε μια πρώτη εκτίμηση για την απαιτούμενη παροχή του φρέσκου αέρα που θα πρέπει να εισέρχεται στην σήραγγα ώστε να επιτευχθεί η κρίσιμη ταχύτητα ( $V_{crit}$ ) απαγωγής του μολυσμένου αέρα και του καπνού. Άρα, πριν ακόμα την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας, θα υπάρχει μια ένδειξη του απαιτούμενου μεγέθους των ανεμιστήρων που θα πρέπει να τοποθετηθούν.

### 3.2 Γεωμετρικά στοιχεία της σήραγγας

Η σήραγγα της προμελέτης αποτελεί σήραγγα του σιδηροδρομικού δικτύου, είναι διπλής διέλευσης (δύο αμαξοστοιχίες) και έχει τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά :

- Μήκος ( L ) : 500 m
- Ύψος ( H ) : 7 m
- Πλάτος ( Z ) : 11 m
- Μέση κλίση : 0%



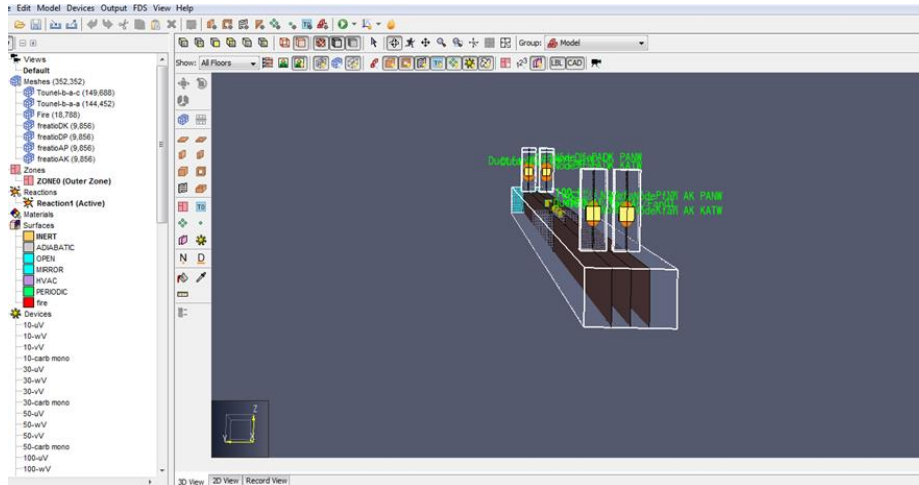
**Σχήμα 3-1** Απεικόνιση της γεωμετρίας της σήραγγας μέσω του λογισμικού Pyrosim

Η διατομή της σήραγγας έχει ορθογώνια μορφή και διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά :

- Επιφάνεια διατομής σήραγγας ( A ) : 77 m<sup>2</sup>



- Περίμετρος διατομής σήραγγας (  $\Pi$  ) : 36 m
- Υδραυλική διάμετρος σήραγγας (  $D_h$  ) : 8,55 m



**Σχήμα 3-2** Απεικόνιση της όψης της διατομής της σήραγγας

Κατά μήκος της σήραγγας, προβλέπεται η τοποθέτηση κατακόρυφου συστήματος αερισμού, που θα καλύπτει τόσο την κανονική – ομαλή λειτουργία της σήραγγας όσο και την αποτελεσματική απομάκρυνση του καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς ισχύος 10 MW.

### 3.3 Γενικά Δεδομένα – Παραδοχές

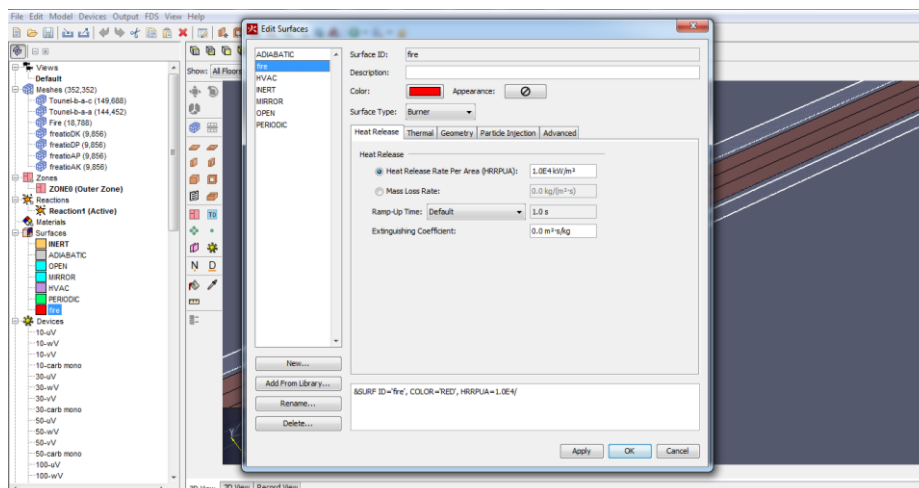
Στον Πίνακας 3-1 καταγράφονται οι τιμές ορισμένων παραμέτρων και συντελεστών, οι οποίες θεωρούνται σταθερές και αμετάβλητες καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης :

**Πίνακας 3-1 Παραμέτρων και συντελεστών**

AA	Παράμετροι - Συντελεστές	Τιμή
1.	Θερμική ισχύς πυρκαγιάς (Q)	10 MW
2.	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (T)	20 °C
3.	Συντελεστής τριβών ( $\lambda$ )	0,02
4.	Πυκνότητα αέρα ( $\rho$ )	1,20 kg/m <sup>3</sup>
5.	Ταχύτητα αέρα ( $v_{air}$ )	4 m/s
6.	Ταχύτητα ανέμου στις πύλες εισόδου και εξόδου της σήραγγας	7,5 m/sec

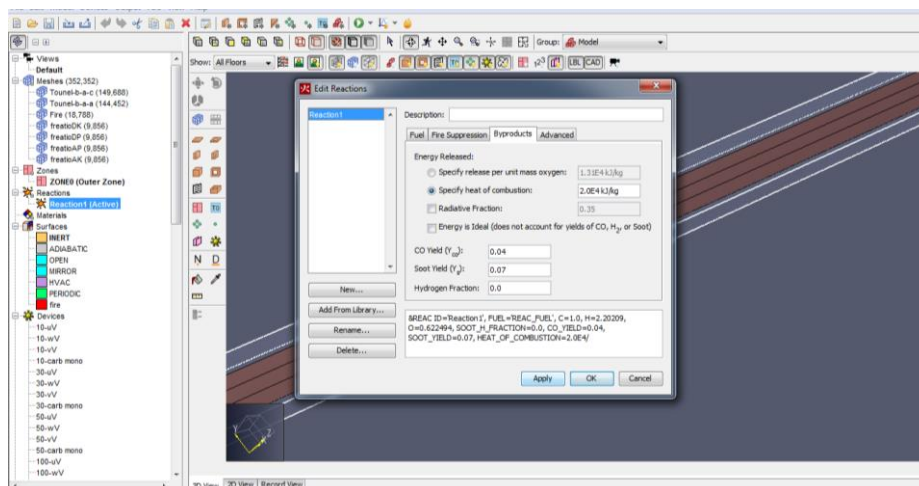
### **3.4 Χαρακτηριστικά της Φωτιάς**

Στο παρών μοντέλο προσομοίωσης, μελετάται το σενάριο εξάπλωσης πυρκαγιάς σε αμαξοστοιχία που κινείται εντός σήραγγας, της οποίας τα χαρακτηριστικά έχουν αναφερθεί λεπτομερώς στο κεφάλαιο 2.2. Συγκεκριμένα, με την χρήση του λογισμικού Pyrosim, μελετάται η εξάπλωση και η διασπορά του καπνού στην περίπτωση ύπαρξης φωτιάς στην αμαξοστοιχία ενώ εκείνη βρίσκεται στο μέσο της σήραγγας ( 200 m ). Εξαιτίας των ρευμάτων του αέρα που υπάρχουν στο εσωτερικό της σήραγγας, λόγω του συνεχούς αερισμού της μέσω κατάλληλων φρεατίων με ανεμιστήρες, ο καπνός εξαπλώνεται παντού και κάνει δύσκολη την ασφαλή εκκένωση της. Η θερμογόνο δύναμη που αποδόθηκε στο σενάριο υπολογισμού ήταν φωτιά ισχύος 10MW κάτι το οποίο αντιστοιχεί σε ισοδύναμη φωτιά τριών Ι.Χ. οχημάτων.



**Σχήμα 3-3 Ορισμός των χαρακτηριστικών της φωτιάς στο λογισμικό Pyrosim**

Κατά την χρήση του προγράμματος προσομοίωσης, εισήχθησαν επιπρόσθετα στοιχεία για την πυρκαγιά όπως η χημική σύνθεση του καιώμενου καυσίμου, η εκλυόμενη θερμότητα του καυσίμου και η απόδοση παραγωγής καπνού και μονοξειδίου του άνθρακα. Έτσι, σχηματίστηκε μια νέα επιφάνεια (surface) στο πρόγραμμα με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του καυσίμου και για την πραγματοποίηση της φωτιάς αντίδραση (reaction) και ενός αγωγού (Vent) τύπου καυστήρα (burner). Η επιφάνεια της εστίας της φωτιάς είναι  $1 \text{ m}^2$  και βρίσκεται  $195 \text{ m}$  από την πύλη εισόδου της σήραγγας.



Σχήμα 3-4 Καθορισμός των υπό-προϊόντων της φωτιάς

### 3.5 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Τρένου

Για τους υπολογισμούς της συγκεκριμένης μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά αμαξοστοιχίας της Γερμανικής εταιρείας SIEMENS, με ονομασία μοντέλου DESIRO, το οποίο αποτελείται από δύο κινητήρια βαγόνια και τρία ρυμουλκούμενα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-5 και έχει τα χαρακτηριστικά που αναγράφονται στον Πίνακας 3-2:

Πίνακας 3-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του Τρένου

Τροφοδοσία	25 kV/ 50Hz
Συνολικό Μήκος	149.340 mm
Βαγόνια ανά Συρμό	5
Καθίσματα ανά αμαξοστοιχία	313
Βάση Τροχών	9.900 mm
Αριθμός Αξόνων/Διαρύθμιση	4/Bo'Bo'
Μέση Ισχύς	5000.00 KW
Συνολικό Πλάτος	4000.00 mm
Συνολικό Ύψος	4600,00 mm
Μέγιστη Ταχύτητα	160 km/h

Ο συρμός DESIRO χρησιμοποιείται στην Ελληνικό Σιδηροδρομικό δίκτυο, κατά κύριο λόγο στην γραμμή του Προαστιακού Αθήνα – Κιάτο.



Σχήμα 3-5 Σχηματική διάταξη συρμού DESIRO

### 3.6 Υπολογισμοί

Για τον υπολογισμό των απωλειών, εντός της σήραγγας, χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω υπολογιστικό αρχείο Excel, το οποίο αποτελεί υπαρκτό μοντέλο υπολογισμού απωλειών σε σήραγγες και χρησιμοποιείται από ευρέως από εταιρείες του χώρου στην φάση της προμελέτης. Το συγκεκριμένο αρχείο έχει δημιουργηθεί από την Mosen Ltd. και έχει προσαρμοστεί σύμφωνα με τα δεδομένα της παρούσας μελέτης και υπολογίζει τα παρακάτω :

**Πίνακας 3-3 Δεδομένα Υπολογισμού**

Ισχύς Φωτιάς	10 MW
Ταχύτητα σχεδιασμού της Ροής του Αέρα στο άνω μέρος της Φωτιάς	3 m/sec
Ταχύτητα Ανέμου που μπλοκάρει την έξοδο του Αέρα	4 m/sec
Πυκνότητα του Αέρα	1.2 kg/m <sup>3</sup>
Δυναμική Πίεση του Αέρα στην Σήραγγα	5.4 Pa
Μήκος Σήραγγας	400 m
Απόσταση Φωτιάς – Στομίου Εξόδου Σήραγγας	200 m
Πλάτος Σήραγγας	11 m
Ύψος Σήραγγας	7 m
Εμβαδόν Σήραγγας	77 m <sup>2</sup>
Υδραυλική Διάμετρος Σήραγγας	12.5 m
Συντελεστής Οπισθέλκουσας τρένου (C <sub>d</sub> )	0.4
Συντελεστής Τριβής Σήραγγας ( f )	0.02

**Πίνακας 3-4 Υπολογισμός απωλειών μέσω του ειδικού υπολογιστικού φύλλου (Excel)**

Μέση Θερμοκρασία κατάντι της φωτιάς	673 K
Μέση Θερμοκρασία Σήραγγας	293 K
Πυκνότητα του Αέρα	0.52 kg/m <sup>3</sup>
Ταχύτητα	6.89 m/s
Απώλειες λόγω ταχύτητας εισόδου του Αέρα	5.4 Pa
Απώλειες λόγω ταχύτητας εξόδου του Αέρα	12.4 Pa
Απώλειες εξόδου	12.4 Pa
Απώλειες εισόδου	2.7 Pa
Απώλειες λόγω τριβής στο τμήμα χωρίς φωτιά	2.07 Pa
Απώλειες λόγω τριβής στο τμήμα με φωτιά	4.76 Pa
Απώλειες λόγω Αμαξοστοιχίας	1.06 Pa
Απώλειες λόγω παροχής του αέρα	9.6 Pa
Απώλειες στην έξοδο της Σήραγγας	12.4 Pa
Απώλειες λόγω ύπαρξης φωτιάς	7.98 Pa
Απώλειες λόγω αποκλεισμού από την φωτιά	1.65 Pa
<b><u>Συνολικές Απώλειες</u></b>	<b><u>42.23 Pa</u></b>

Στο Σχήμα 3-6 παρουσιάζεται η απεικόνιση του ειδικού υπολογιστικού φύλλου (Excel), κατά την διάρκεια του υπολογισμού των απωλειών της συγκεκριμένης μελέτης, με σκοπό την κατανόηση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε.

**Mosen Ltd**

**Preliminary tunnel fire ventilation calculations**

Version 1, 25-10-2017  
 For illustration purposes only - not for design. No responsibility for the use of this spreadsheet will be accepted by Mosen Ltd, to the maximum extent permissible by law.  
 Please contact us for your project design requirements: [www.mosen.global](http://www.mosen.global) [info@mosen.global](mailto:info@mosen.global)

11	Project:	XXX Tunnel		
12	Subject:			
13	Date:			
17	<b>Data:</b>			
18	Fire Size	=	10	MW
19	Design airflow velocity upstream of fire	=	3	m/s
20	Adverse wind speed against exit portal	=	4	m/s
21	Density of Air	=	1.2	kg/m <sup>3</sup>
22	Tunnel Air Dynamic Pressure	=	5.4	Pa
23	Length of Tunnel	=	400	m
24	Fire location (before exit portal)	=	200	m
25	Width of Tunnel	=		m
26	Drag factor Cd	=	0.4	
27	Tunnel Height	=	7	m
28	Tunnel Area A	=	77	m <sup>2</sup>
29	Tunnel Hydraulic Diameter	=	12.50	m
30	Tunnel friction factor 'f'	=	0.024	-
31	<b>Aerodynamic Calculations</b>			
32	Avg temperature downstream of fire	=		673 K
33	Tunnel Temperature	=		293 K
34	Density of Air	=		0.522437 kg/m <sup>3</sup>
35	Velocity m/s	=		6.890785 m/s
36	Inlet velocity head	=		5.4 Pa
37	Exit velocity head	=		12,40341 Pa
38	Outlet Loss	=		12,40341 Pa
39	<b>Losses With Fire</b>			
40	Inlet Losses	=		2.7 Pa
41	Frictional loss, section without fire	=		2,0736 Pa
42	Frictional loss, section with fire	=		4,762911 Pa
43	Vehicular Losses	=		0 Pa
44	Wind Allowance	=		9,6 Pa
45	Loss at Tunnel Outlet	=		12,40341 Pa
46	Fire buoyancy pressure	=		0 Pa
47	Blockage due to fire	=		1,65 Pa
48	Overall Losses	=		33,18992 Pa

Σχήμα 3-6 Υπολογισμός απωλειών στην σήραγγα



### 3.7 Θεωρητικός υπολογισμός απωλειών στο εσωτερικό της σήραγγας

Ο θεωρητικός υπολογισμός των απωλειών στο εσωτερικό της σήραγγας γίνεται με την χρήση των παρακάτω τύπων :

#### α) Απώλειες λόγω τρένου

$$\Delta p_{\text{τρενου}} = C_{br} C_D N \left( \frac{A_{\text{τρενου}}}{A_{\text{tunnel}}} \right) \rho_{\text{air}} \frac{V_{ox}^2}{2} \quad (3-1)$$

- N αριθμός συρμών
- $C_{br}$  Συντελεστής Μείωσης Οπισθέλκουσας τρένου
- $C_D$  Συντελεστής Οπισθέλκουσας τρένου
- $A_{\text{τρενου}}$  Επιφάνεια Πρόσπτωσης τρένου
- $A_{\text{tunnel}}$  επιφάνειας τομής σήραγγας
- $\rho_{\text{air}}$  πυκνότητα αέρα στη σήραγγα
- $V_{\text{critical}}$  Σχετική ταχύτητα οχημάτων ως προς την ταχύτητα κίνησης του αέρα στη σήραγγα

### **β) Απώλειες τριβών**

$$\Delta p_{\text{τριβων}} = \left( \zeta_1 + \zeta_2 + \lambda \cdot \frac{L}{D} \right) \cdot \rho_{\text{air}} \cdot \frac{u_u^2}{2} \quad (3-2)$$

- $\zeta_1$  συντελεστής απώλειας εισόδου Α' αγωγού εισαγωγής, Β' αγωγού εισαγωγής και εισόδου σήραγγας (1,8)
- $\zeta_2$  συντελεστής απώλειας εξόδου Α' αγωγού εξαγωγής, Β' αγωγού εξαγωγής και εξόδου σήραγγας (3)
- $\lambda$  συντελεστής απωλειών τριβών
- L μήκος σήραγγας (m)
- D υδραυλική διάμετρος σήραγγας
- $u_u$  η ταχύτητα αέρα στη σήραγγα ανάλογα την περίπτωση ανάντη ή κατάντη της φωτιάς

### **γ) Απώλειες λόγω ελκυσμού**

$$\Delta p_{\text{ελκυσμου}} = \Delta H \cdot \rho_{\text{air}} \cdot g \cdot \frac{(T_t - T_0)}{(T_t + 273)} \quad (3-3)$$

- $\Delta H$  υψομετρική διαφορά στομίων εισόδου – εξόδου σήραγγας
- g επιτάχυνση βαρύτητας
- $T_t$  μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό της σήραγγας (C)
- $T_0$  Εξωτερική θερμοκρασία (C)

#### δ) Απώλειες λόγω της πίεσης του ανέμου

$$\Delta p_{\text{ανεμο πιεσης}} = \frac{v_{\text{air}}^2}{2} \rho_{\text{air}} \quad (3-4)$$

- $v_{\text{air}}$  η ταχύτητα του ανέμου (η ταχύτητα που μπλοκάρει την έξοδο του αέρα).

#### ε) Απώλειες λόγω της φωτιάς στη σήραγγα

$$\Delta p_{\text{φωτιας}} = \frac{0,00009 \cdot Q \cdot 1000000}{u \cdot D^2} \quad (3-5)$$

- Q Θερμική ισχύς πυρκαγιάς (W)
- u ταχύτητα αέρα αμέσως πριν τη φωτιά
- D υδραυλική διάμετρος σήραγγας

Πρακτικά, στο ειδικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στο Excel, υπολογίζονται αυτοματοποιημένα οι απώλειες που αναφέρονται στους παραπάνω τύπους. Συνεπώς ο υπολογισμός των απωλειών και με τους δύο τρόπους αποτελεί τον ορθότερο τρόπο επαλήθευσης, των αποτελεσμάτων που υπολογίστηκαν.

### 3.8 Υπολογισμός κρίσιμης ταχύτητας $U_{crit}$

Ως κρίσιμη ταχύτητα ορίζεται η ελάχιστη ταχύτητα που επιτυγχάνεται μέσω διαμήκους αερισμού στο εσωτερικό της σήραγγας για την οποία αποφεύγεται η αναστροφή καπνού ανάντι του σημείου πυρκαγιάς [32]. Η εμπειρική σχέση για την κρίσιμη ταχύτητα δίδεται από τη σχέση :

$$U_{crit} = k1kg \left[ \frac{gQcH}{\rho0CpTfA} \right]^{1/3} \quad (3-6)$$

ώπου :

- $H$  = το ύψος της σήραγγας [m]
- $Qc$  = η μεταφερόμενη ισχύς μέσω συναγωγής [KW]
- $A$  = διατομή της σήραγγας [m<sup>2</sup>]
- $Cp$  = ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα [kJ/kg°C]
- $P$  = πυκνότητα αέρα σε κανονικές συνθήκες [kg/m<sup>3</sup>]
- $Tf$  = θερμοκρασία καυσαερίων [°C]
- $g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας [m/s<sup>2</sup>]
- $k1 = (Frc)^{-1/3}$  [Σταθερά εξισώσεων Kennedy]
- $Frc = 4.5$  [αριθμός Froude]
- $kg = 1 + 0.0374(-s)^{0.8}$  [Σταθερά εξισώσεων Kennedy]

Με την χρήση εξειδικευμένου υπολογιστικού φύλλου του Excel, που διατίθεται ελεύθερα στο διαδίκτυο, και βασίζεται στην εξίσωση

(3-6), υπολογίστηκε η κρίσιμη ταχύτητα της σήραγγας του πειράματος βάσει πάντα της γεωμετρίας και των παραμέτρων της παρούσας μελέτης. Στο Σχήμα 3-7 παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία υπολογισμού της κρίσιμης ταχύτητας και προκύπτει ότι  **$U_{CRIT} = 1,662 \text{ m/s}$** .

	B	C	D
Convective fire heat release rate ( $Q_c$ )		10.000.000	W
Tunnel Area ( $A_T$ )		77	$m^2$
Ambient Temperature ( $T_a$ )		20	$^{\circ}C$
Ambient Pressure ( $P_a$ )		101000	Pa
Gas Constant ( $R_g$ )		287	J / (kg K)
Specific heat at constant pressure ( $C_p$ )		1003	J / (kg K)
Grade		0	%
Acceleration due to gravity (g)		9,81	$m/s^2$
Tunnel height ( $H_T$ )		7	m
Check: $Q_{crit}$		275.841.934	W
(Formula is valid for this application)			
Ambient Temperature ( $T_a$ )		293,15	K
Density ( $\rho$ )		1,200	$kg / m^3$
Froude Number ( $Fr_m$ )		4,500	
a		0,368	
c		-5,615	
$R_n$		2,800	
$Q_n$		-0,015	
$S_n$		1,776	
$T_n$		0,008	
Critical Velocity ( $V_c$ )		1,662	m/s

Σχήμα 3-7 Υπολογισμός κρίσιμης ταχύτητας ( $U_{crit}$ )

### 3.9 Συμπέρασμα

Έχοντας υπολογίσει τις απώλειες πίεσης ( $\Delta p$ ) μέσα στην σήραγγα, κατά την διέλευση του τρένου, στην φάση προμελέτης, αλλά και την κρίσιμη ταχύτητα που πρέπει να επιτευχθεί, μπορούμε να έχουμε μια πρώτη εκτίμηση για το μέγεθος και την παροχή αέρα των ανεμιστήρων που θα τοποθετηθούν κατακόρυφα, στην οροφή της σιδηροδρομικής σήραγγας. Συνεπώς στην φάση της επιλογής των ανεμιστήρων στο πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, θα πρέπει να επιλεγθούν ανεμιστήρες με παροχή αέρα που θα υπερνικά τις απώλειες, που υπολογίσθηκαν στην προμελέτη. Έτσι με την ολοκλήρωση της υπολογιστικής διαδικασίας θα συγκριθεί η απόκλιση των

υπολογιστικών τιμών συγκριτικά με αυτών της προμελέτης και θα σχολιαστεί κατάλληλα.

## **4 Σενάριο της μελέτης**

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αναλυτικά η παρουσίαση του σεναρίου πυρκαγιάς που θα μελετηθεί, με την χρήση του λογισμικού Pyrosim. Θα μελετηθούν δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο θα μελετηθεί το σενάριο φωτιάς στο εσωτερικό της σήραγγας ενώ αυτή είναι κενή, ενώ στο δεύτερο θα μελετηθεί σενάριο φωτιάς, με τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά, αλλά πλέον θα υπάρχει αμαξοστοιχία στο εσωτερικό της σήραγγας (ακινητοποιημένη) κατά την διάρκεια αυτής. Παρακάτω θα παρουσιαστούν αναλυτικά η γεωμετρία της σήραγγας, καθώς και τα χαρακτηριστικά της φωτιάς και των ανεμιστήρων που θα χρησιμοποιηθούν.

### **4.1 Γεωμετρία σήραγγας**

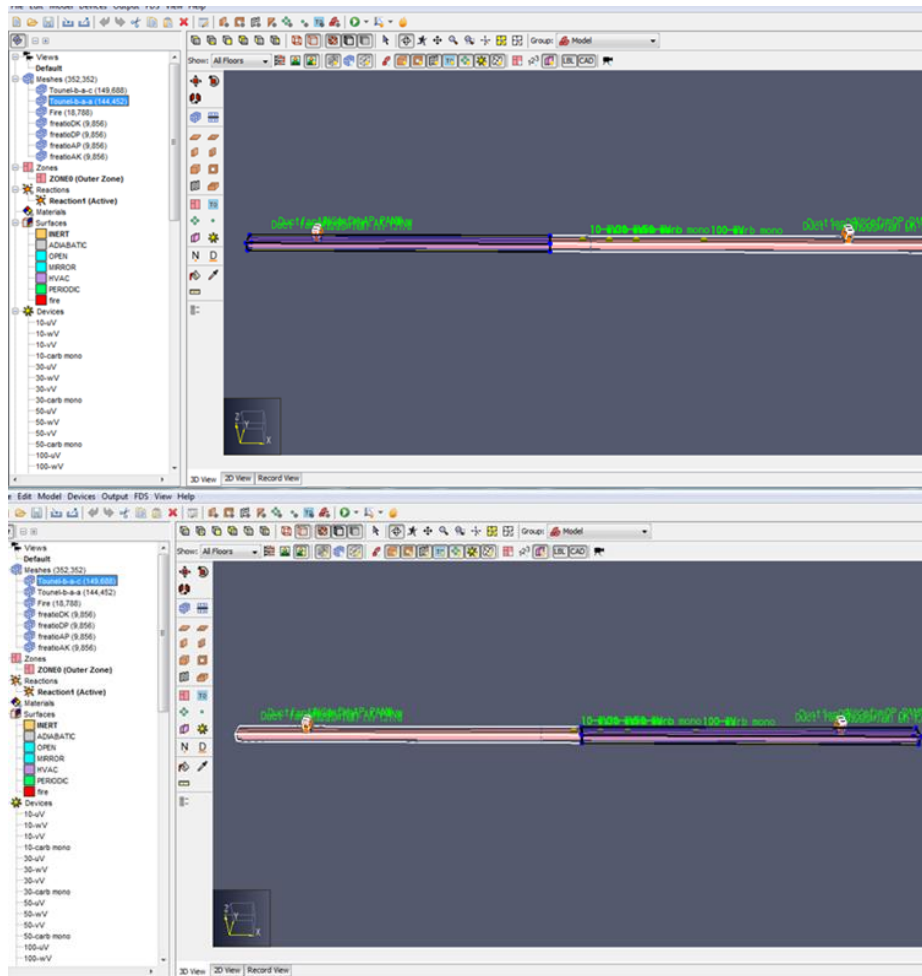
Στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε σήραγγα ορθογωνικής διατομής με τις εξής διαστάσεις :

- Μήκος (L) : 500 m
- Ύψος (H) : 7 m
- Πλάτος (D) : 11 m

Πρόκειται για σήραγγα του σιδηροδρομικού δικτύου, διπλής κατεύθυνσης, με πύλη εισόδου και πύλη εξόδου, χωρίς να υπάρχει υψομετρική διαφορά μεταξύ τους (κλίση = 0 %),

## 4.2 Υπολογιστικό πλέγμα

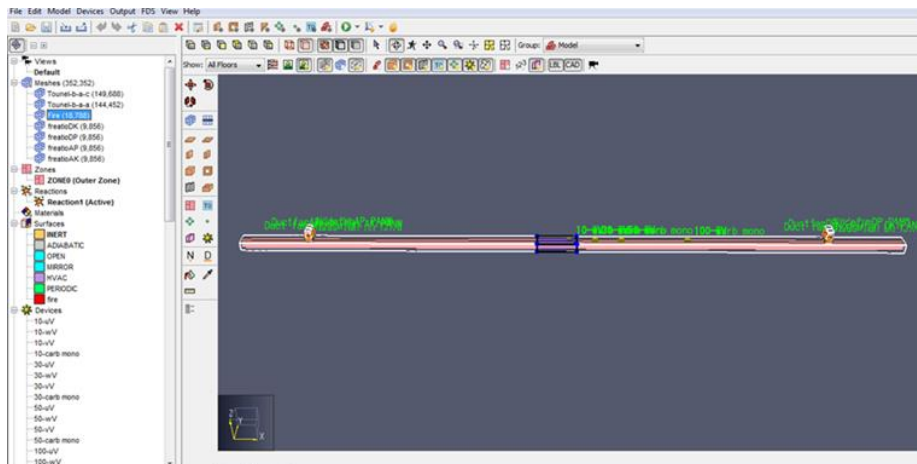
Για την μελέτη του συγκεκριμένου προβλήματος, χρησιμοποιήθηκε τετραγωνικό πλέγμα  $0,5 \times 0,5 \text{ m}$  σε όλη την επιφάνεια του μοντέλου της σήραγγας. Όμως για μεγαλύτερη ακρίβεια και μεγαλύτερη ταχύτητα στους υπολογισμούς το πλέγμα διαχωρίστηκε σε τρία ξεχωριστά υπό - πλέγματα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-1.



Σχήμα 4-1 Τμηματοποίηση πλέγματος στο Pyrosim

Σκοπός ήταν να χωριστεί η σήραγγα σε δύο ισομεγέθη πλέγματα, ώστε να γίνουν ταχύτερα τα “τρέξιματα” του Pyrosim και να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Μετά από αρκετές δοκιμές όμως, προτιμήθηκε ένα μικρό μέρος, πριν και μετά την περιοχή της φωτιάς, να διαθέτει ξεχωριστό πλέγμα, το οποίο θα καταλαμβάνει αρκετά μικρότερη επιφάνεια στον χώρο από τα άλλα

δυο και θα έχει υπό-διπλάσιο μέγεθος (0,25 x 0,25 m), προσφέροντας ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα σε μια περιοχή η οποία ουσιαστικά αποτελεί και την ουσία του προβλήματος, όπως φαίνεται και Σχήμα 4-2.



**Σχήμα 4-2 Πλέγμα περιοχής φωτιάς**

Προκειμένου να μειώσουμε το υπολογιστικό σφάλμα επίλυσης εξαιτίας του μικρού αριθμού κελιών στο υπολογιστικό πεδίο, εφαρμόσαμε την σχέση

(4-1) ώστε, να ορίσουμε ένα καταλληλότερο μέγεθος πλέγματος, στην περιοχή της φωτιάς, εξασφαλίζοντας ακριβέστερα αποτελέσματα :

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

D = μέγεθος κελιού πλέγματος (m)

Q = ισχύς φωτιάς (KW)

$\rho$  = πυκνότητα του αέρα (kg/m<sup>3</sup>)

C<sub>p</sub> = θερμοχωρητικότητα του αέρα (KJ/K)

T = θερμοκρασία του αέρα (K)

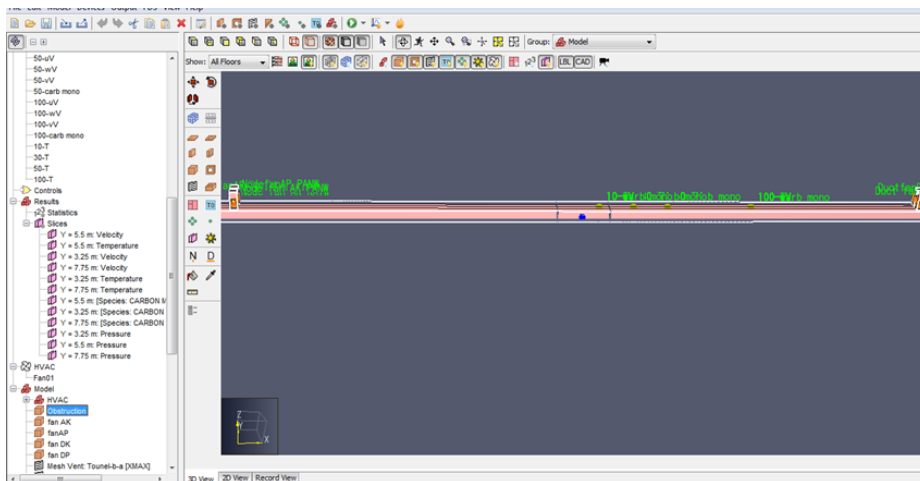
g = επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s<sup>2</sup>)



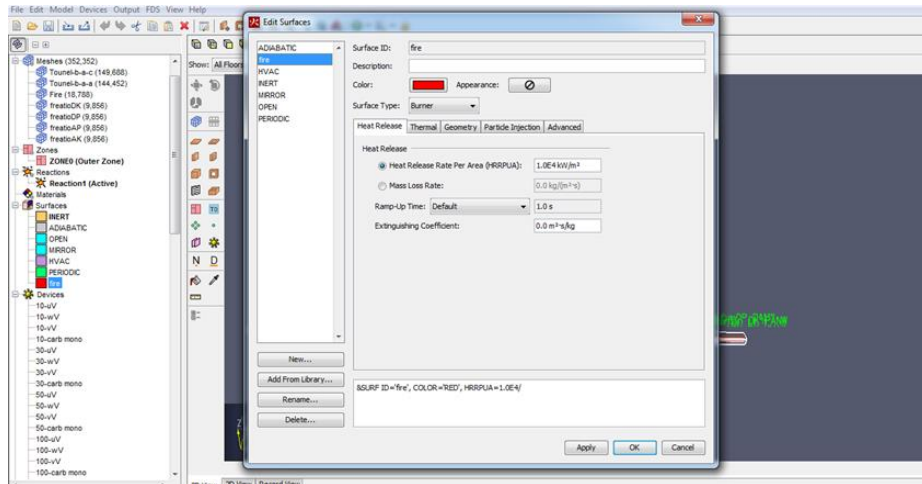
Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της αριθμητικής επίλυσης, για το συγκεκριμένο πλέγμα που επιλέχθηκε, συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα της ημι-εμπειρικής σχέσης, όπως αυτά περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2.

### 4.3 Χαρακτηριστικά φωτιάς

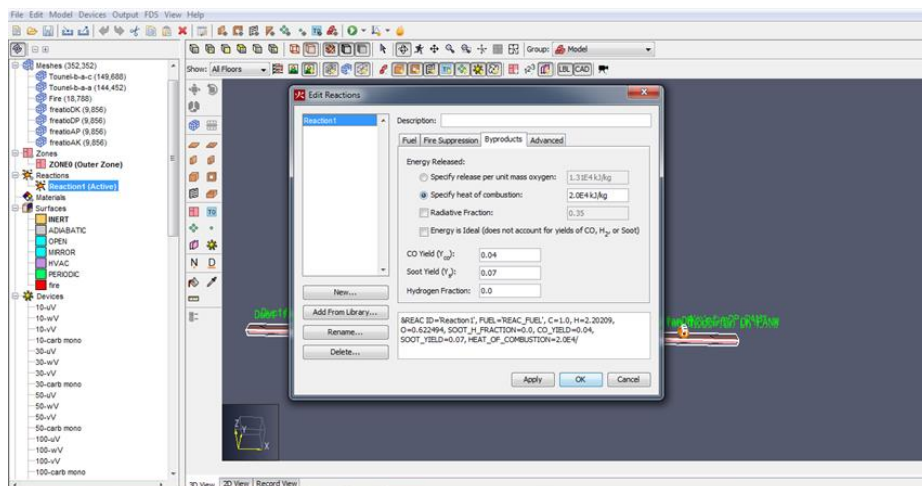
Στην συγκεκριμένη μελέτη, η φωτιά βρίσκεται σε απόσταση  $x = 250$  m από την είσοδο της σήραγγας. Δηλαδή η φωτιά τοποθετήθηκε στο μέσο της σήραγγας, πράγμα που αποτελεί το δυσμενέστερο σενάριο, καθώς ο καπνός θα πρέπει να διανύσει μεγάλη απόσταση για να απομακρυνθεί. Μέγιστη ισχύς της φωτιάς, που θα μελετηθεί, είναι τα 10 MW και η χρονική εξέλιξη της πραγματοποιήθηκε μέσω των εντολών RAMP.



Σχήμα 4-3 Θέση του συμβάντος του ατυχήματος της φωτιάς



Σχήμα 4-4 Ορισμός της ισχύος της φωτιάς στο λογισμικό Pyrosim

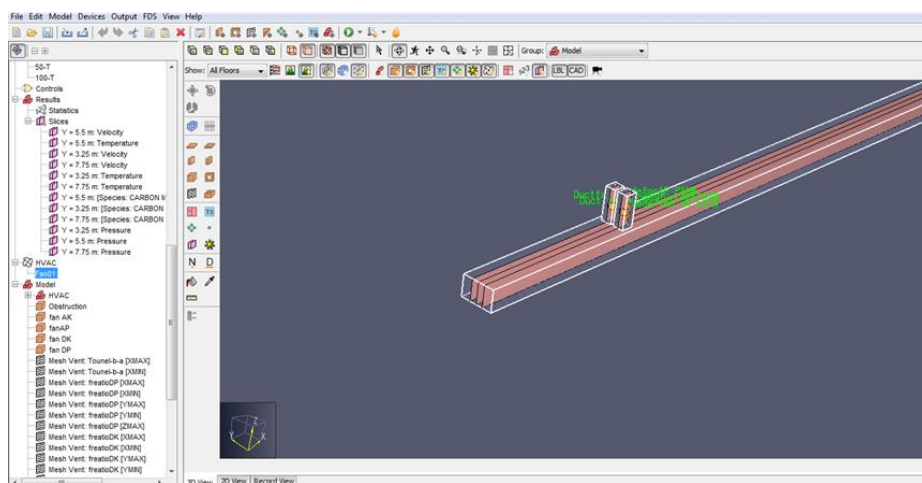


Σχήμα 4-5 Ορισμός των αέριων προϊόντων της φωτιάς

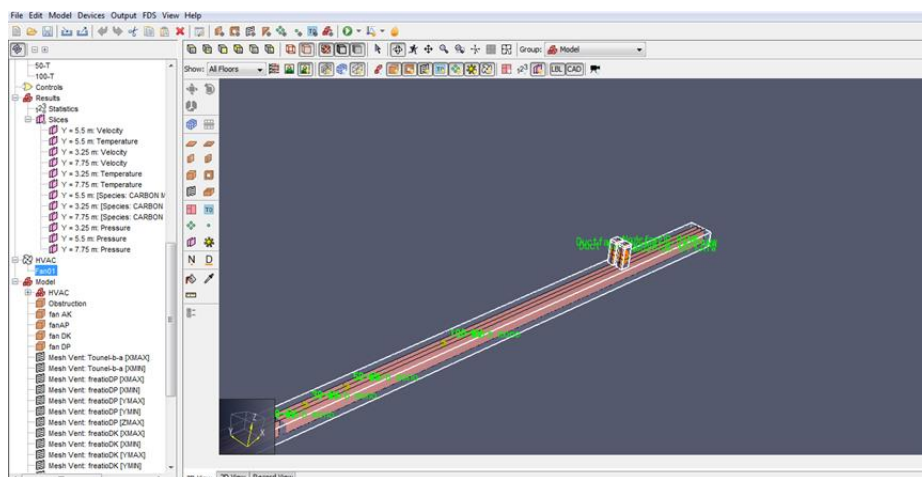
#### 4.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά κατακόρυφων ανεμιστήρων

Η εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό της σήραγγας βασίζεται στην ύπαρξη τεσσάρων κατακόρυφων ανεμιστήρων, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι κατά μήκος της οροφής της σήραγγας. Πρόκειται για δύο

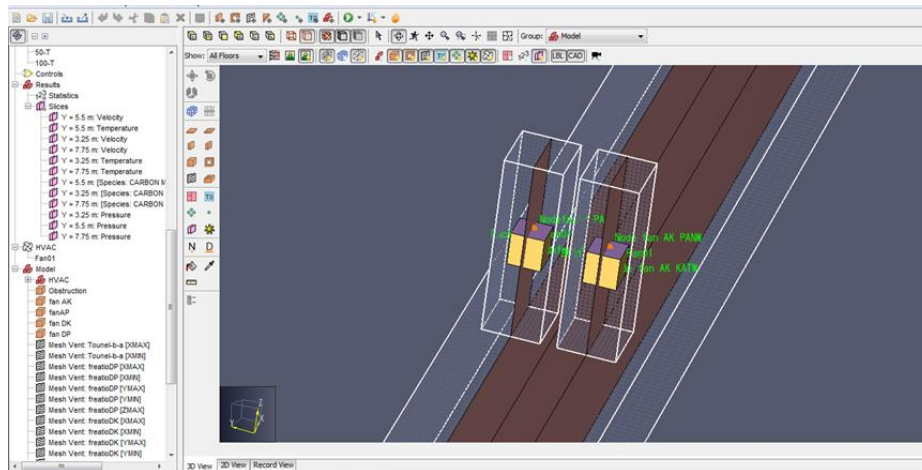
ζευγάρια ανεμιστήρων, ένα ζευγάρι προσαγωγής νωπού αέρα, από το εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό της σήραγγας και ένα ζευγάρι απαγωγής αέρα, από το εσωτερικό της σήραγγας προς το εξωτερικό περιβάλλον. Οι ανεμιστήρες είναι τοποθετημένοι στο εσωτερικό των κατακόρυφων φρεατύων, που τέμνουν την οροφή της σήραγγας. Το ζευγάρι προσαγωγής βρίσκεται σε απόσταση  $x = 56$  m από την είσοδο της σήραγγας, ενώ το ζευγάρι απαγωγής σε απόσταση  $x = 398$  m από την είσοδο της σήραγγας. Τα φρεάτια έχουν διαστάσεις  $4,00 \times 3,50 \times 11,00$  m και οι ανεμιστήρες στο εσωτερικό τους έχουν παροχή  $90,00 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Σχήμα 4-1 Ανεμιστήρες προσαγωγής



Σχήμα 4-2 Ανεμιστήρες απαγωγής



**Σχήμα 4-3 Φρεάτια ανεμιστήρων**

## 4.5 Υπολογιστικοί παράμετροι

Ο χρόνος προσομοίωσης του πειράματος στο λογισμικό Pyrosim διαρκεί 600,0 sec . Κατά μήκος τη σήραγγας και συγκεκριμένα στις θέσεις 10,30,50 και 100 m κατάντι της φωτιάς, έχουν τοποθετηθεί αισθητήρια τα οποία ανά 2 sec, μετρούν και αποθηκεύουν, σε αρχείο δεδομένων, τις τιμές της θερμοκρασίας, της οριζόντιας και κατακόρυφης ταχύτητας του αέρα και της συγκέντρωσης του μονοξειδίου του άνθρακα (C) στην συγκεκριμένη θέση. Δηλαδή θα καταγραφθούν συνολικά 300 μετρήσεις, για κάθε μία μεταβλητή, κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

## 5 Αποτελέσματα Παραμετρικής Μελέτης

Στόχος του κεφαλαίου αυτού, είναι η απεικόνιση της εξέλιξης της φωτιάς στην σήραγγα, παρουσιάζοντας ισουψεις από το λογισμικό smokeview, για διακριτά χρονικά διαστήματα. Επίσης, θα απεικονιστεί η εξέλιξη του θερμοκρασιακού πεδίου (T), της οριζόντιας ταχύτητας (U-Velocity), της κατακόρυφης ταχύτητας (Y-Velocity) και της συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα (CO Volume) στο εσωτερικό της σήραγγας. Κατά την δημιουργία του υπολογιστικού μοντέλου έχουν τοποθετηθεί κάποιες ισουψεις καμπύλες (slices), που περιγράφουν την ροή στο επίπεδο του χώρου, απεικονίζοντας την εξέλιξη και την μεταβολή των παραπάνω μεταβλητών. Έχουν τοποθετηθεί slices στον άξονα των εξωτερικών ανεμιστήρων (Y=3,5 m) και στο σημείο συμμετρίας μεταξύ εξωτερικών και εσωτερικών ανεμιστήρων, δηλαδή στο κέντρο του πλάτους της σήραγγας (Y=5,5 m). Τα slices εκτείνονται σε όλο το μήκος της σήραγγας δίνοντας έτσι συγκεκριμένες πληροφορίες για κάθε περιοχή της. Η απεικόνιση των slices θα είναι ξεχωριστή για κάθε ένα από τα δύο σενάρια της μελέτης, τα οποία έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 4.

### 5.1 Σενάριο 1: Φωτιά σε κενή σήραγγα

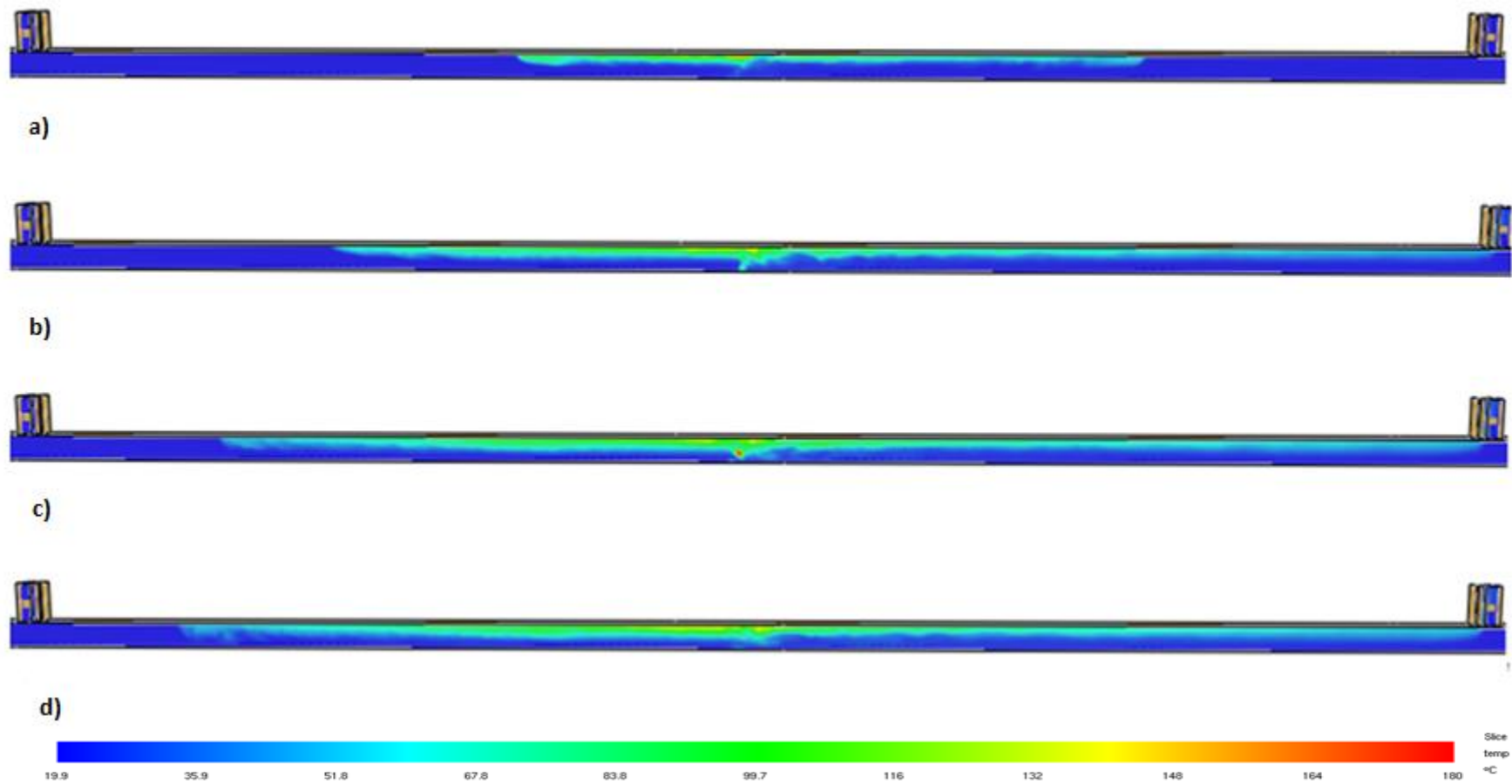
#### 5.1.1 Θερμοκρασία

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα μελετηθεί το προφίλ της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της σιδηροδρομικής σήραγγας για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, από την αρχή ως το πέρας της προσομοίωσης. Τα επίπεδα που θα μελετηθούν είναι δύο. Αρχικά το επίπεδο συμμετρίας των αξόνων, του εξωτερικού ζεύγους των κατακόρυφων ανεμιστήρων της σιδηροδρομικής σήραγγας, με την παραδοχή ότι συμπίπτει του επιπέδου διέλευσης των πεζών, καθώς και το κέντρο συμμετρίας της ίδιας της σήραγγας. Στόχος η αξιολόγηση της επίδρασης του μηχανικού αερισμού, στην διάχυση της θερμότητας σε κάθε επίπεδο ενδιαφέροντος, έτσι ώστε να αξιολογηθεί κατά πόσο οι τιμές της θερμοκρασίας, που αναπτύσσονται, μπορούν να αποτελέσουν κίνδυνο.

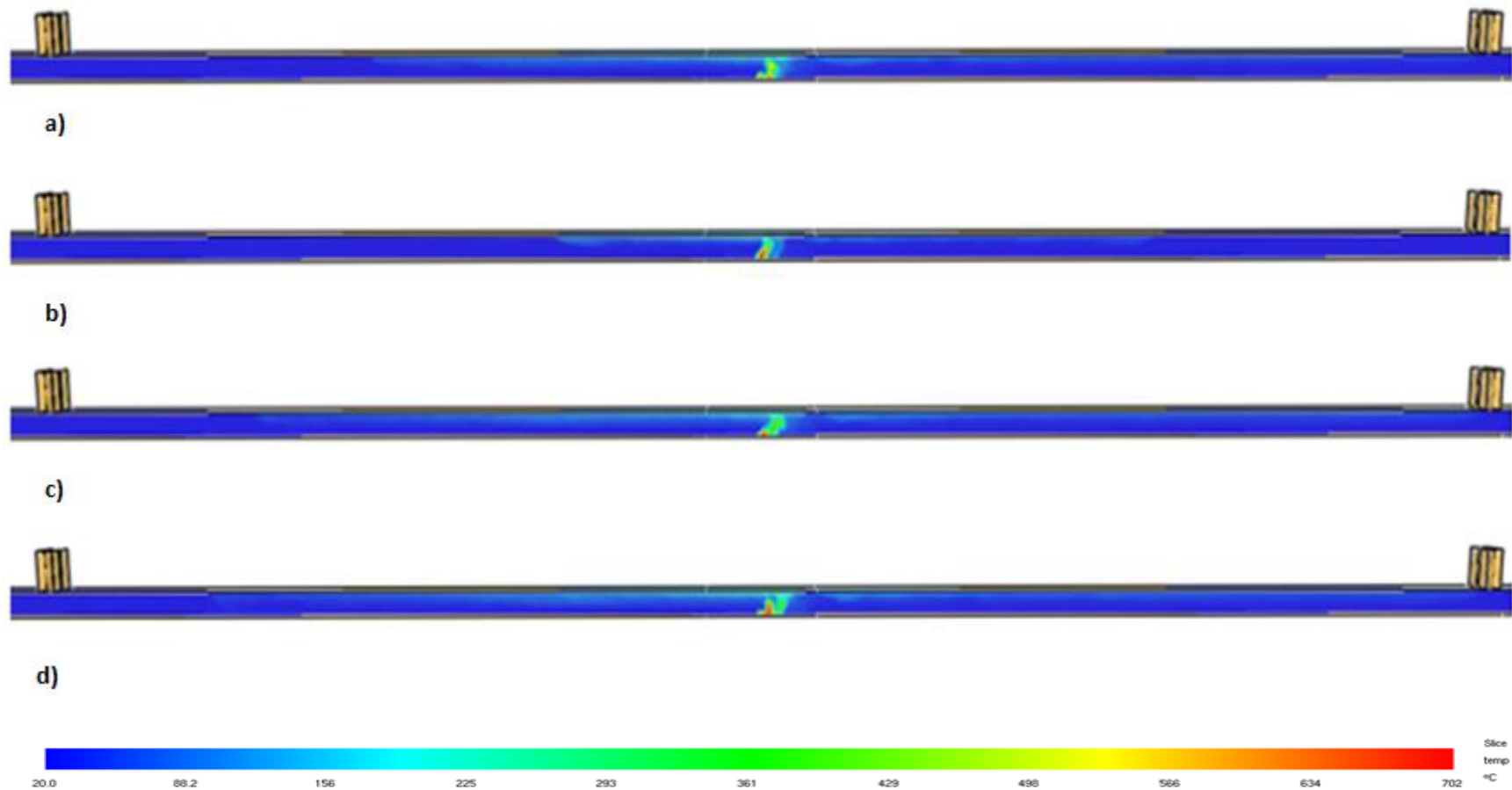
Αρχικά, στο Σχήμα 5-1 παρατηρούμε ότι η φωτιά έχει φτάσει στο σημείο μέγιστης ισχύος σε χρόνο 150 sec μετά από την έναυση της και παρατηρούμε πώς η τιμή της θερμοκρασίας της γίνεται μέγιστη 150 sec αργότερα. Παρατηρούμε ότι μετά την έναυση της φωτιάς, η θερμοκρασία αυξάνεται στα σημεία της οροφής που βρίσκονται κοντά στην εστία και όσο απομακρύνεται από αυτήν, με την βοήθεια των ανεμιστήρων, τόσο μειώνεται. Παρατηρούμε επίσης, ότι στην είσοδο της σήραγγας, η οποία θα αποτελέσει την έξοδο των των επιβατών, κατά το σενάριο της πυρκαγιάς, στην προσπάθεια εκκένωσης της, η θερμοκρασία έχει διατηρηθεί στο επίπεδο της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, πράγμα πολύ σημαντικό καθώς αυτό σημαίνει ότι ο ανθρώπινος παράγοντας δεν κινδυνεύει από υψηλή θερμοκρασία. Επίσης παρατηρούμε ότι η αναστροφή του καπνού σταματάει στα πρώτα 150 m της σήραγγας. Αυτό σημαίνει ότι θα διευκολυνθεί η απομάκρυνση των ατόμων από αυτήν, καθώς όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η είσοδος της αμαξοστοιχίας στη σήραγγα θα χρησιμοποιηθεί ως έξοδος κινδύνου των επιβατών, επειδή κατά την λειτουργία τους οι ανεμιστήρες έχουν ροή από την είσοδο προς την έξοδο.

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

Παρατηρούμε από το σχήμα 5.2 ότι στο κέντρο συμμετρίας της σήραγγας η αύξηση της θερμοκρασίας είναι ελάχιστη. Αυτό συμβαίνει επειδή λόγω των εκατέρωθεν ανεμιστήρων από τα επίπεδα των ανεμιστήρων, η κίνηση του καπνού και συνεπώς της θερμότητας, περιορίζεται σε αυτά.



Σχήμα 5-1 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας μετά από : a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  )



Σχήμα 5-2 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας μετά από : a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  )



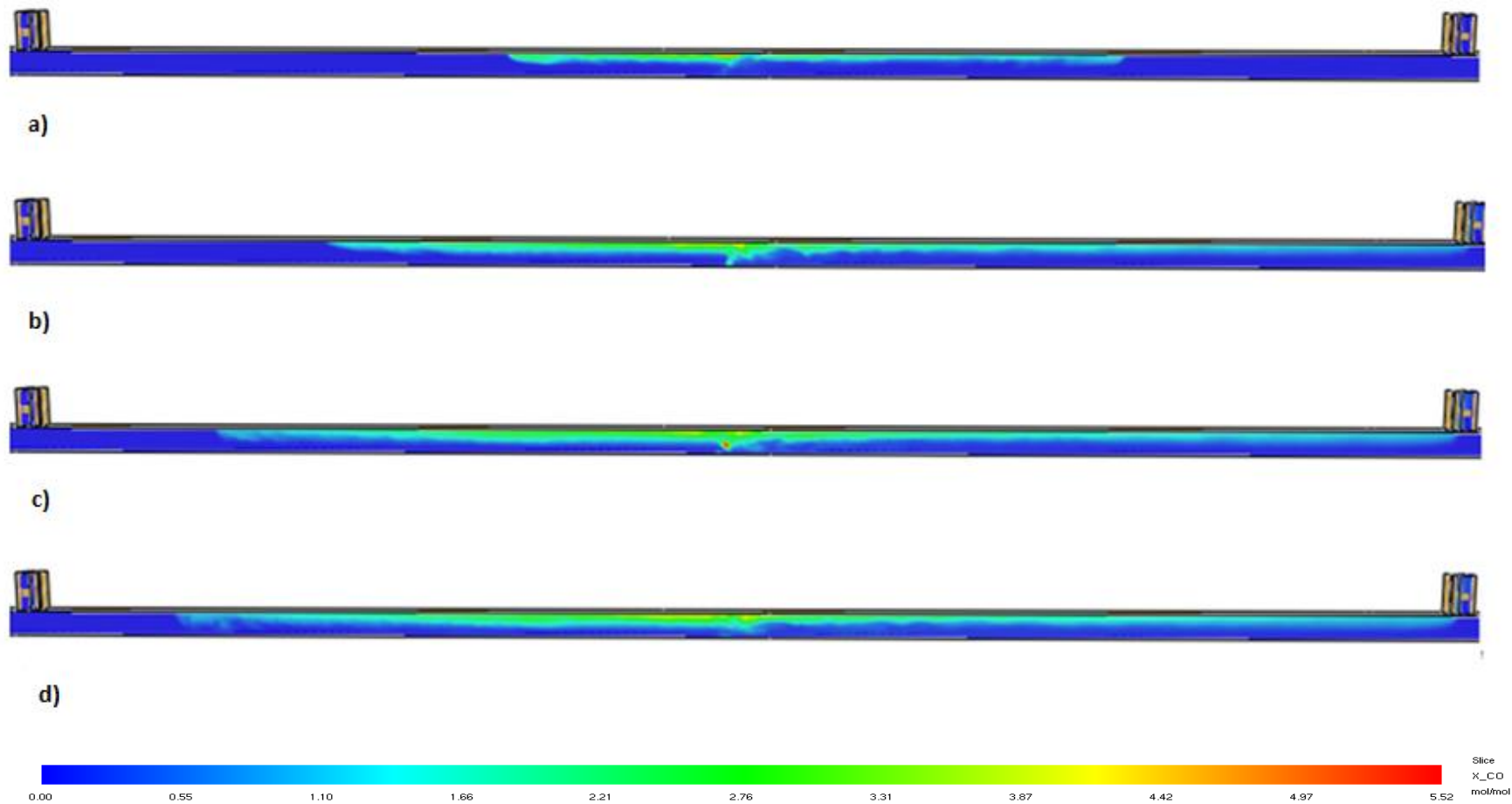
### 5.1.2 Μονοξειδίο του Άνθρακα

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί το προφίλ των συγκεντρώσεων του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στο εσωτερικό της σιδηροδρομικής σήραγγας για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, από την αρχή ως το πέρας της προσομοίωσης. Τα επίπεδα που θα μελετηθούν είναι δύο και είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά του προηγούμενου κεφαλαίου, έτσι ώστε να τονιστούν τα τμήματα της σήραγγας τα οποία μπορεί να αποτελούν κίνδυνο για την υγεία των ατόμων. Υπάρχουν μια σειρά πρότυπα και κατευθύνσεις των πιο σημαντικών οργανισμών επαγγελματικής υγιεινής και ασφάλειας για την έκθεση στο μονοξειδίο του άνθρακα [33]. Η OSHA (Διεύθυνση Επαγγελματικής Υγιεινής και Ασφάλειας των ΗΠΑ) έχει σε ισχύ σαν νομικό πρότυπο το PEL (Επιτρεπόμενο Όριο Έκθεσης), για την κατά μέσο όρο έκθεση σε χρονικό διάστημα 8 ωρών, που είναι σήμερα για το μονοξειδίο του άνθρακα 50 ppm (0,00005 mol/mol). Στη χώρα μας ισχύει επίσης η αντίστοιχη προς το PEL, οριακή τιμή έκθεσης, που είναι όπως αναφέρεται στο ΠΔ 90/99, 50 ppm. Γενικά, η για λίγες ώρες έκθεση σε συγκέντρωση CO 100 ppm (0,0001 mol/mol) (0,01% κ.ο.) δεν θεωρείται επιβλαβής, η συγκέντρωση όμως κορυφής δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα 400 ppm (0,0004 mol/mol).

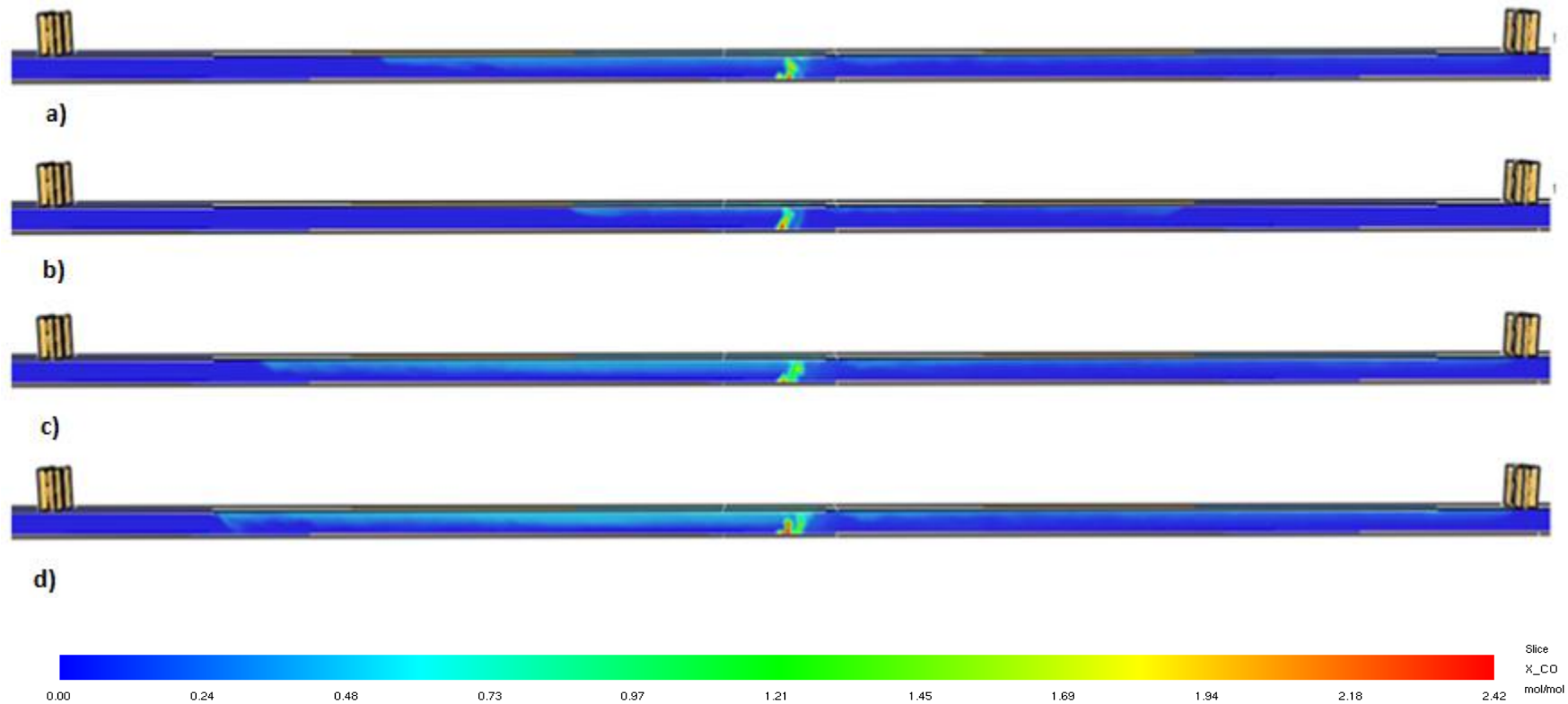
Αρχικά, στο Σχήμα 5-3 παρατηρούμε ότι, στο επίπεδο των αξόνων των ανεμιστήρων, η συγκέντρωση του μονοξειδίου είναι υψηλή αλλά μειώνεται αισθητά όσο ο καπνός απομακρύνεται από την εστία της φωτιάς και κατευθύνεται προς τα φρεάτια των ανεμιστήρων. Η συνεχής λειτουργία των ανεμιστήρων, όμως, έχει ως αποτέλεσμα την συγκράτηση των επιπέδων του μονοξειδίου σε ανεκτά όρια καθ' όλη την διάρκεια της φωτιάς και σε όλα τα τμήματα της σήραγγας.

Αντιθέτως από το Σχήμα 5-4 παρατηρούμε ότι στο κέντρο συμμετρίας της σήραγγας οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου είναι ελάχιστες, πράγμα που

φαντάζει λογικό δεδομένου ότι σχεδόν ολόκληρη η μάζα του καπνού κινείται κατά μήκος των αξόνων των ανεμιστήρων, όσο αυτοί είναι σε λειτουργία.



Σχήμα 5-3 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης του CO μετά από a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  )



Σχήμα 5-4 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης του CO μετά από a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  )

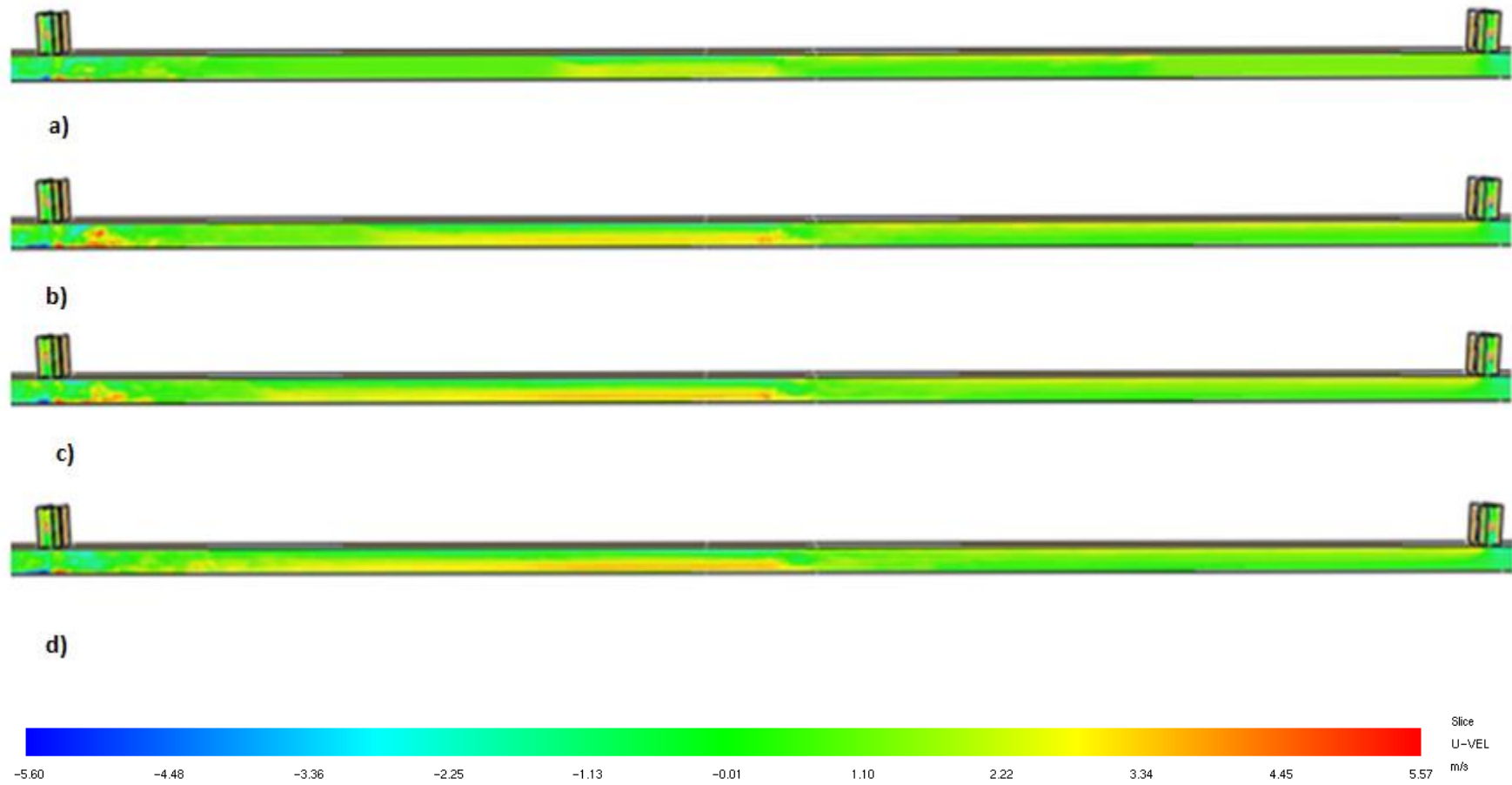
### 5.1.3 Οριζόντια ταχύτητα

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί το προφίλ της οριζόντιας ταχύτητας (U-Velocity) κατά μήκος της σήραγγας, η οποία ουσιαστικά είναι αυτή που καθορίζει τον ρυθμό της απομάκρυνσης του καπνού από την σήραγγα. Στο

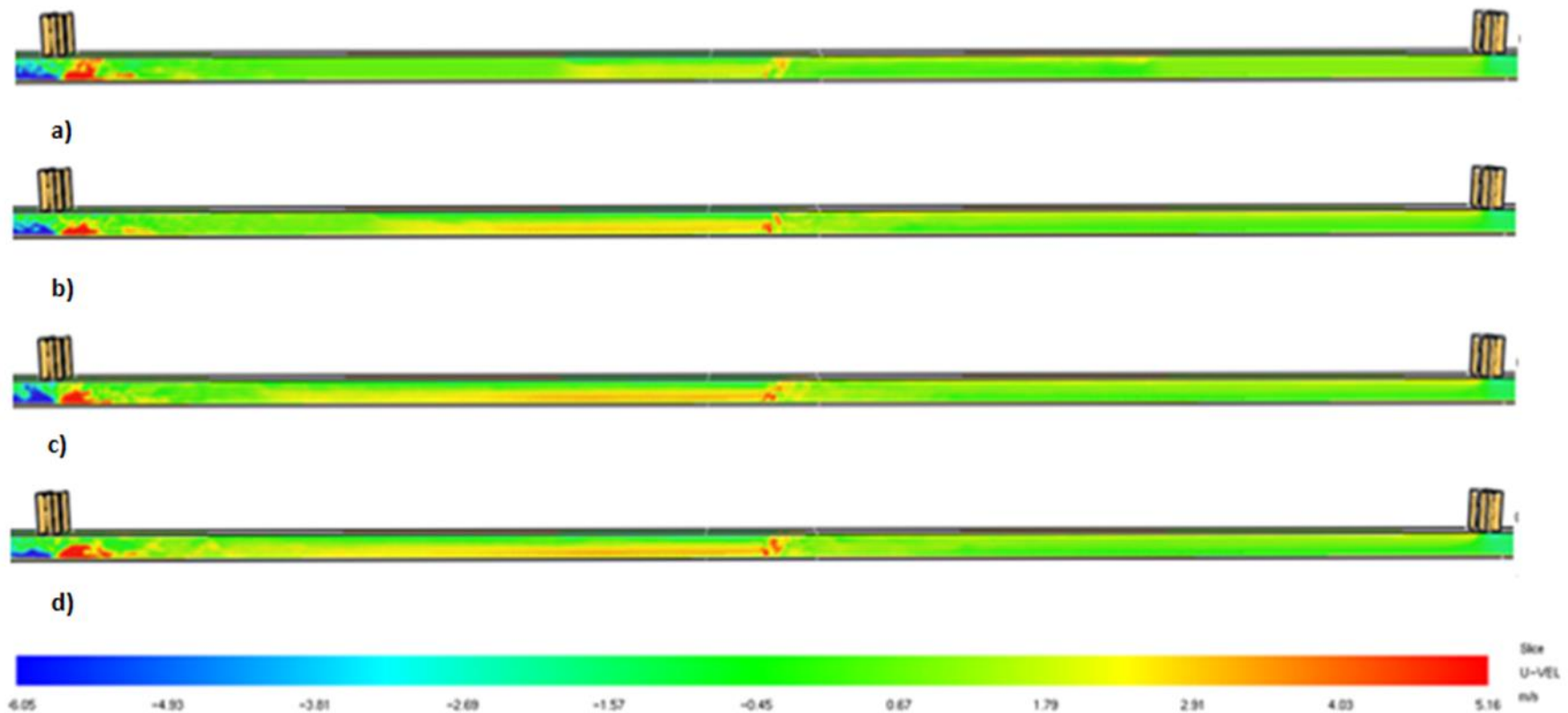
Σχήμα 5-5 παρουσιάζεται το προφίλ της οριζόντιας ταχύτητας στο επίπεδο των αξόνων των ανεμιστήρων.

Φαίνεται ότι, η οριζόντια ταχύτητα μεγαλώνει όσο πλησιάζουμε στο ανάντι της φωτιάς ζευγάρι ανεμιστήρων, πράγμα αναμενόμενο καθώς είναι το ζευγάρι προσαγωγής νωπού αέρα στην σήραγγα. Αντιθέτως, όσο κινούμαστε προς το κατάντι της φωτιάς ζεύγος ανεμιστήρων, η οριζόντια ταχύτητα μειώνεται χωρίς όμως να υπάρχει αλλαγή στην κατεύθυνσή της. Ουσιαστικά, επιβεβαιώνεται η φορά και η διεύθυνση, του αερισμού της σήραγγας, που έχει επιλεγεί κατά την δημιουργία του πειραματικού μοντέλου.

Στο Σχήμα 5-6 το οποίο παρουσιάζει την οριζόντια ταχύτητα στο επίπεδο συμμετρίας της σήραγγας, όπως φαίνεται προκύπτουν ελάχιστες διαφορές σε σχέση με το Σχήμα 5-5. Κυριότερη διαφορά είναι ότι σε αυτό το επίπεδο, η οριζόντια ταχύτητα κάτω ακριβώς από τους ανεμιστήρες προσαγωγής είναι μέγιστη σε αντίθεση με το επίπεδο των αξόνων των ανεμιστήρων που ήταν σχεδόν μηδενική. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι σε αυτό το επίπεδο προσπίπτει αέρας και από τους δύο παράλληλους ανεμιστήρες (  $Y=3,5 \text{ m}$  &  $Y=8,5 \text{ m}$  ).



Σχήμα 5-5 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της οριζόντιας ταχύτητας ( U-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  )



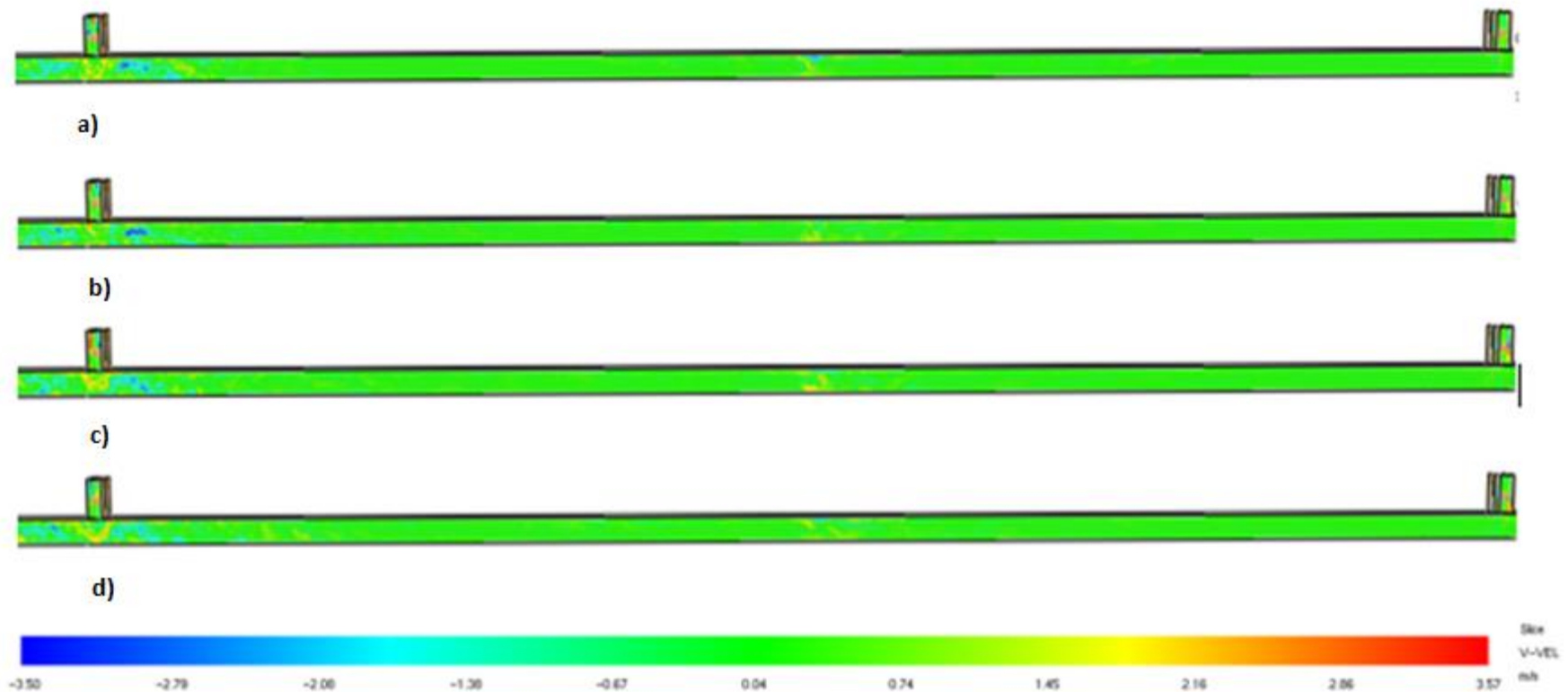
Σχήμα 5-6 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της οριζόντιας ταχύτητας ( U-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  )

#### **5.1.4 Κατακόρυφη ταχύτητα**

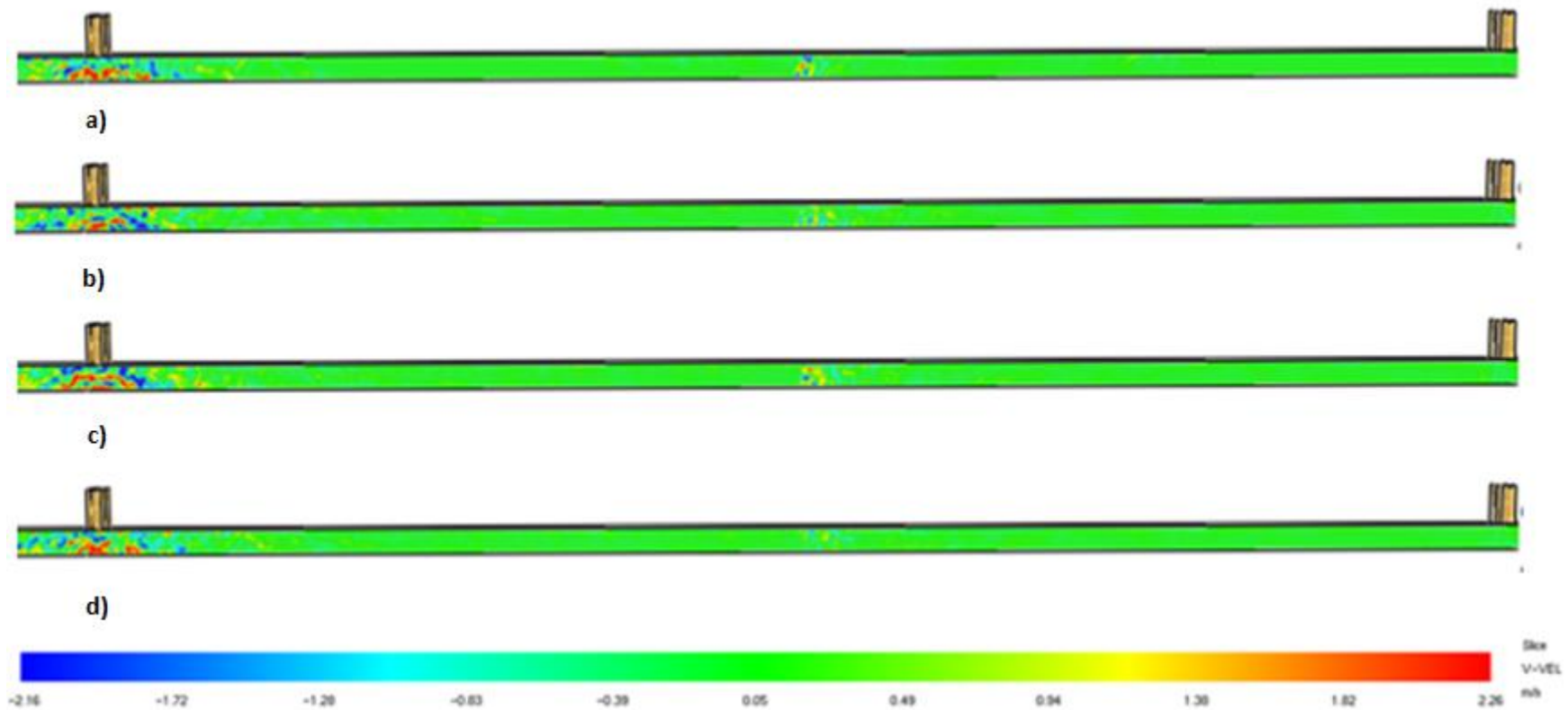
Στην συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζεται το προφίλ της κατακόρυφης ταχύτητας (V-Velocity) στο εσωτερικό της σήραγγας. Κατακόρυφη ταχύτητα, προφανώς, υπάρχει κυρίως στα σημεία που βρίσκονται οι ανεμιστήρες, λόγω της κατακόρυφης πρόσπτωσης του αέρα σε αυτά τα σημεία και στην περιοχή που βρίσκεται πάνω από την φλόγα της φωτιάς, όπου εμφανίζονται δυνάμεις άνωσης λόγω της μεγάλης διαφοράς θερμοκρασιών (buoyancy) στην συγκεκριμένη περιοχή.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-7 , όσον αφορά το επίπεδο των ανεμιστήρων, κατακόρυφη ταχύτητα παρουσιάζεται κατά κύριο λόγο στους ανεμιστήρες προσαγωγής στην περιοχή πλησίον της φωτιάς. Οι τιμές των ταχυτήτων που αναπτύσσονται είναι αρκετά μικρές σε αντίθεση με τις αντίστοιχες που αναπτύσσονται στο επίπεδο συμμετρίας της σήραγγας όπου υπάρχει παράλληλη πρόσπτωση αέρα και από τους δύο αξονικούς ανεμιστήρες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-8.





Σχήμα 5-7 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της κατακόρυφης ταχύτητας ( V-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  )



Σχήμα 5-8 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της κατακόρυφης ταχύτητας ( V-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  )

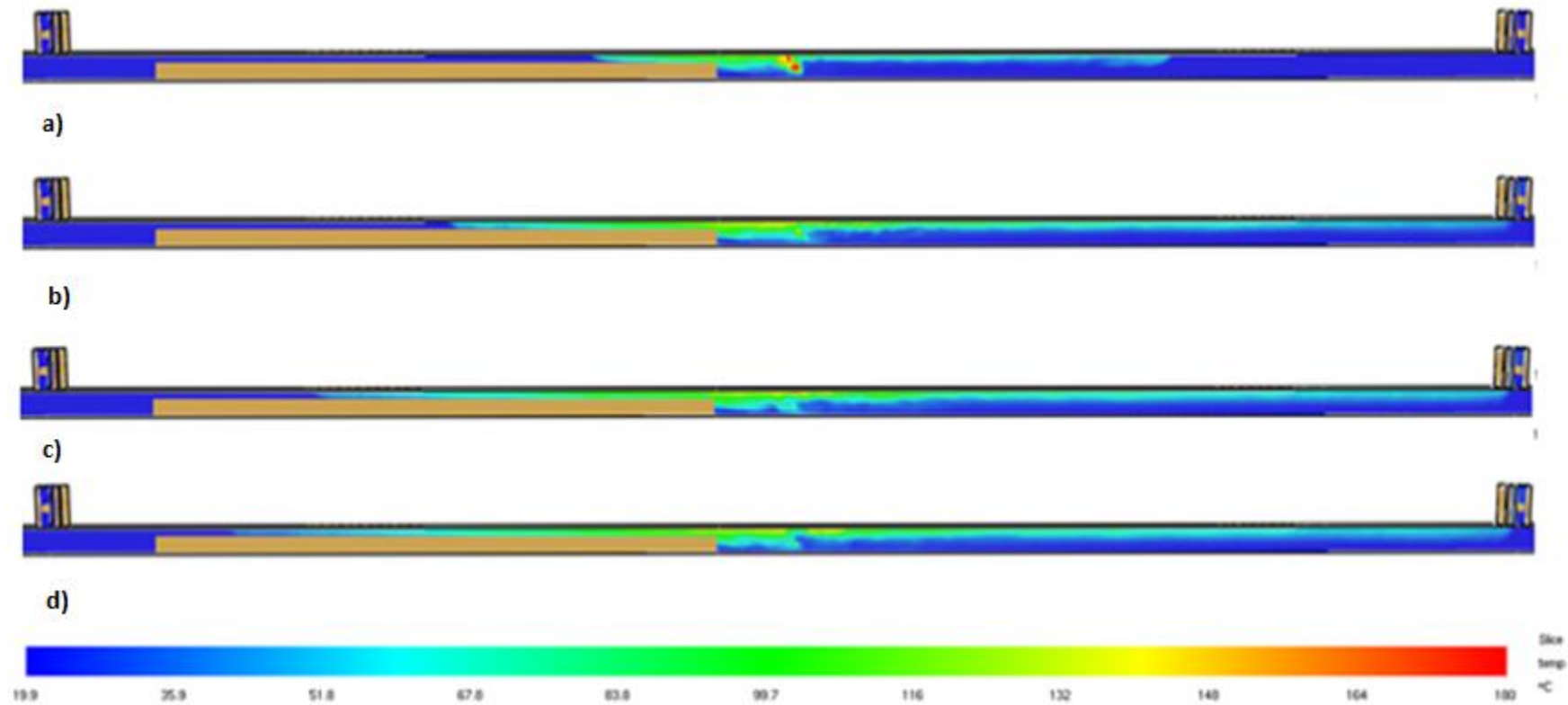
## **5.2 Σενάριο 2 : Φωτιά κατά την διέλευση τρένου από την σήραγγα**

### **5.2.1 Θερμοκρασία**

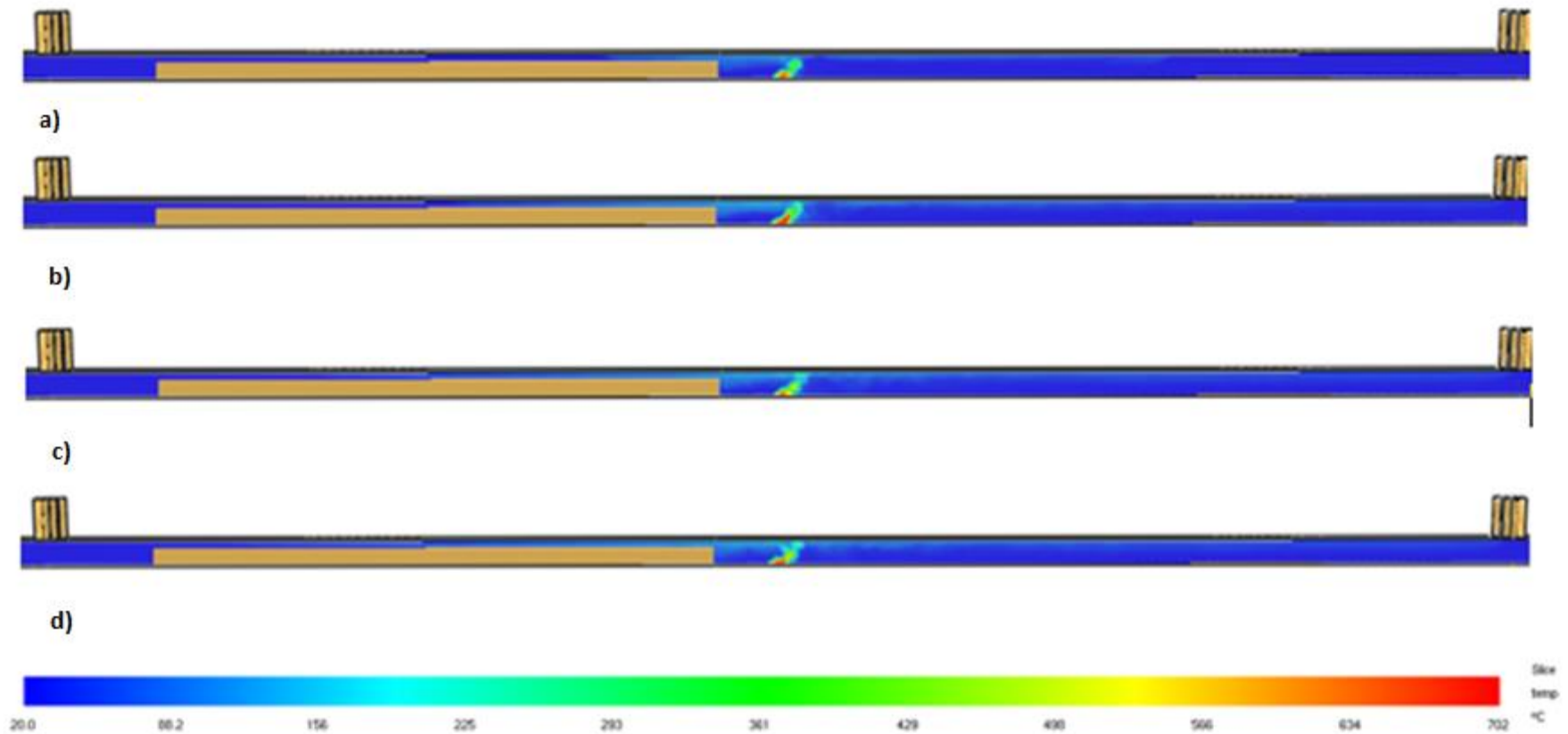
Παρακάτω θα παρουσιαστεί το θερμοκρασιακό προφίλ της σήραγγας για τα δυο επίπεδα της μελέτης, με την ύπαρξη τρένου το οποίο θα παραμένει ακινητοποιημένο πλησίον της εστίας της φωτιάς.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5-9 στο επίπεδο των αξόνων των ανεμιστήρων παρατηρούμε ότι οι υψηλότερες τιμές της θερμοκρασίας εμφανίζονται στα σημεία που βρίσκονται πολύ κοντά στην εστία της φωτιάς. Όσο ο καπνός απομακρύνεται, παρατηρούμε ότι μειώνονται και οι τιμές της θερμοκρασίας. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι σε κανένα σημείο της σήραγγας η θερμοκρασία δεν φτάνει σε πολύ υψηλά επίπεδα ώστε να αποτελούν κίνδυνο για τον άνθρωπο.

Αντιθέτως, από το Σχήμα 5-10 παρατηρούμε ότι στο επίπεδο συμμετρίας της σήραγγας, δηλαδή ουσιαστικά στο μέσο των δυο γραμμών διέλευσης των συρμών, η αύξηση της θερμοκρασίας είναι σχεδόν μηδενική καθώς ο καπνός ακολουθεί την διαδρομή του επιπέδου των αξόνων των ανεμιστήρων.



Σχήμα 5-9 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας μετά από : a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός της σήραγγας



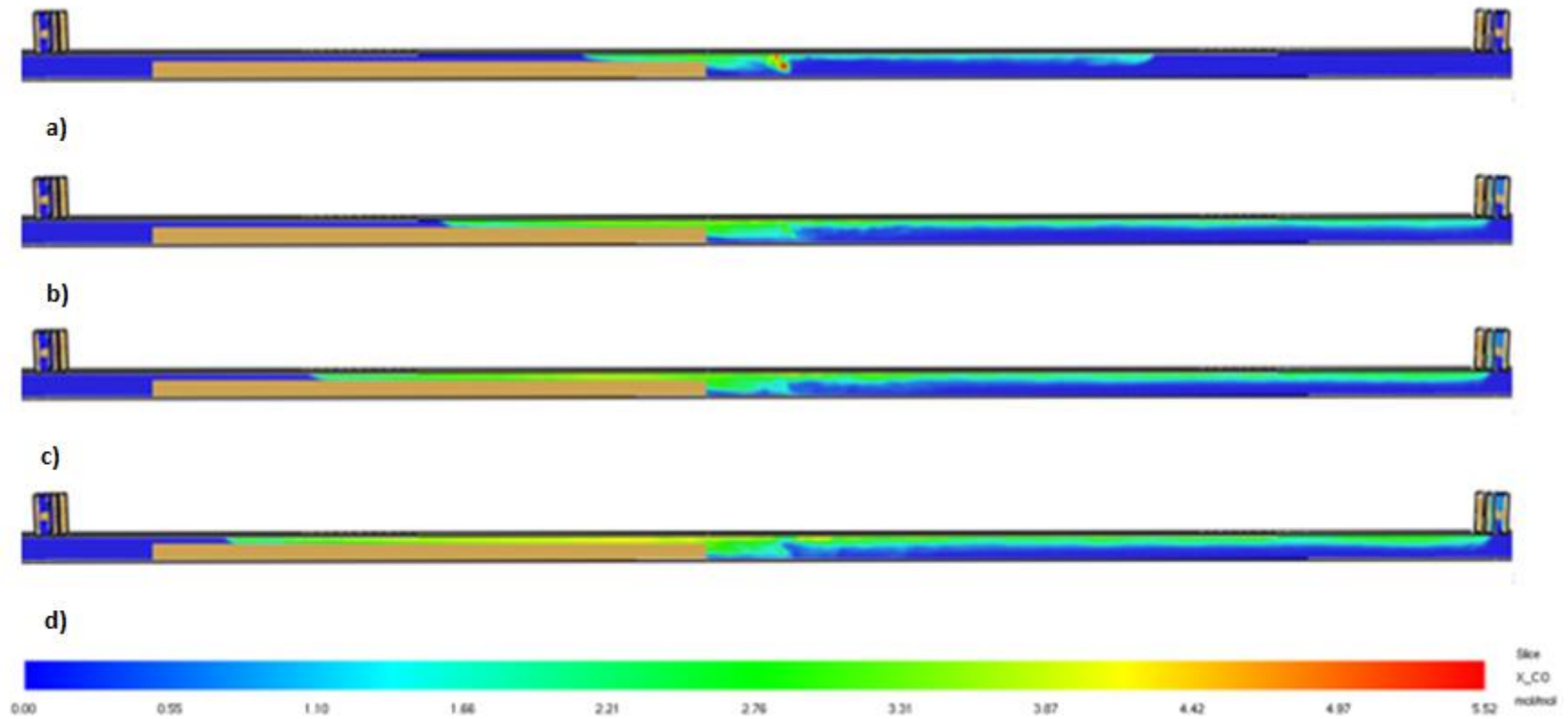
Σχήμα 5-10 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της θερμοκρασίας μετά από : a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός αυτής

### **5.2.2 Μονοξειδίο του άνθρακα**

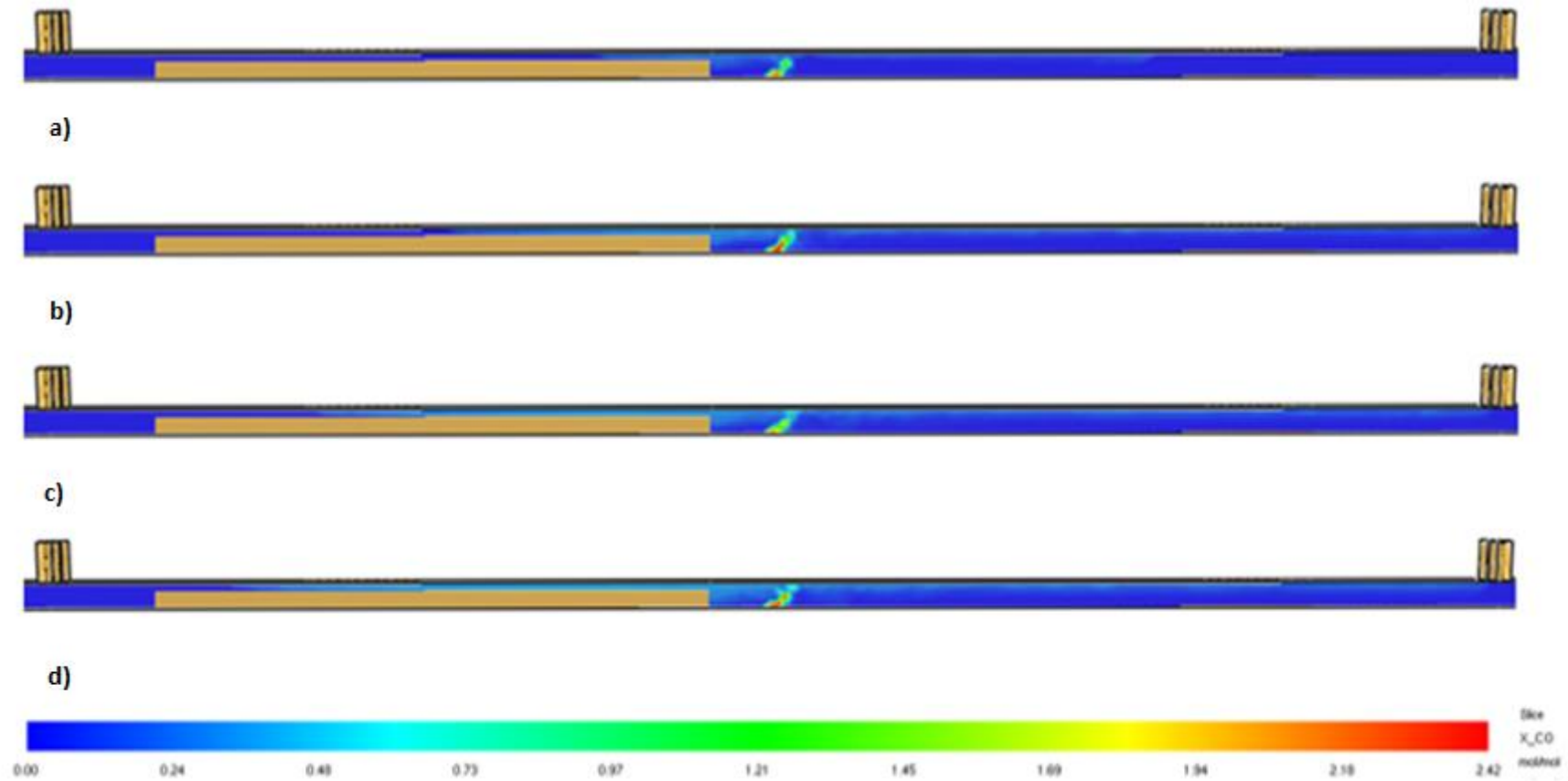
Στο συγκεκριμένο σενάριο που το τρένο βρίσκεται ακινητοποιημένο μέσα στην σήραγγα, παρατηρούμε από το Σχήμα 5-11 ότι στο επίπεδο των ανεμιστήρων, οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου αυξάνονται στα σημεία που βρίσκονται κοντά στην εστία της φωτιάς, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτή τόσο μειώνονται και τα επίπεδα του αέριου αυτού ρύπου.

Αντίθετα, στο επίπεδο συμμετρίας της σήραγγας, όπως είναι αναμενόμενο η συγκέντρωση του μονοξειδίου θεωρείται αμελητέα καθώς ο καπνός απομακρύνεται από την διαδρομή του επιπέδου των αξόνων των ανεμιστήρων, όπως προκύπτει και από το Σχήμα 5-12.

Τα ασφαλή, για τον άνθρωπο, όρια συγκέντρωσης μονοξειδίου αναφέρονται αναλυτικά στην παράγραφο 5.1.2 του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 5-11 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης του CO μετά από : a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκους του άξονα των των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός της σήραγγας



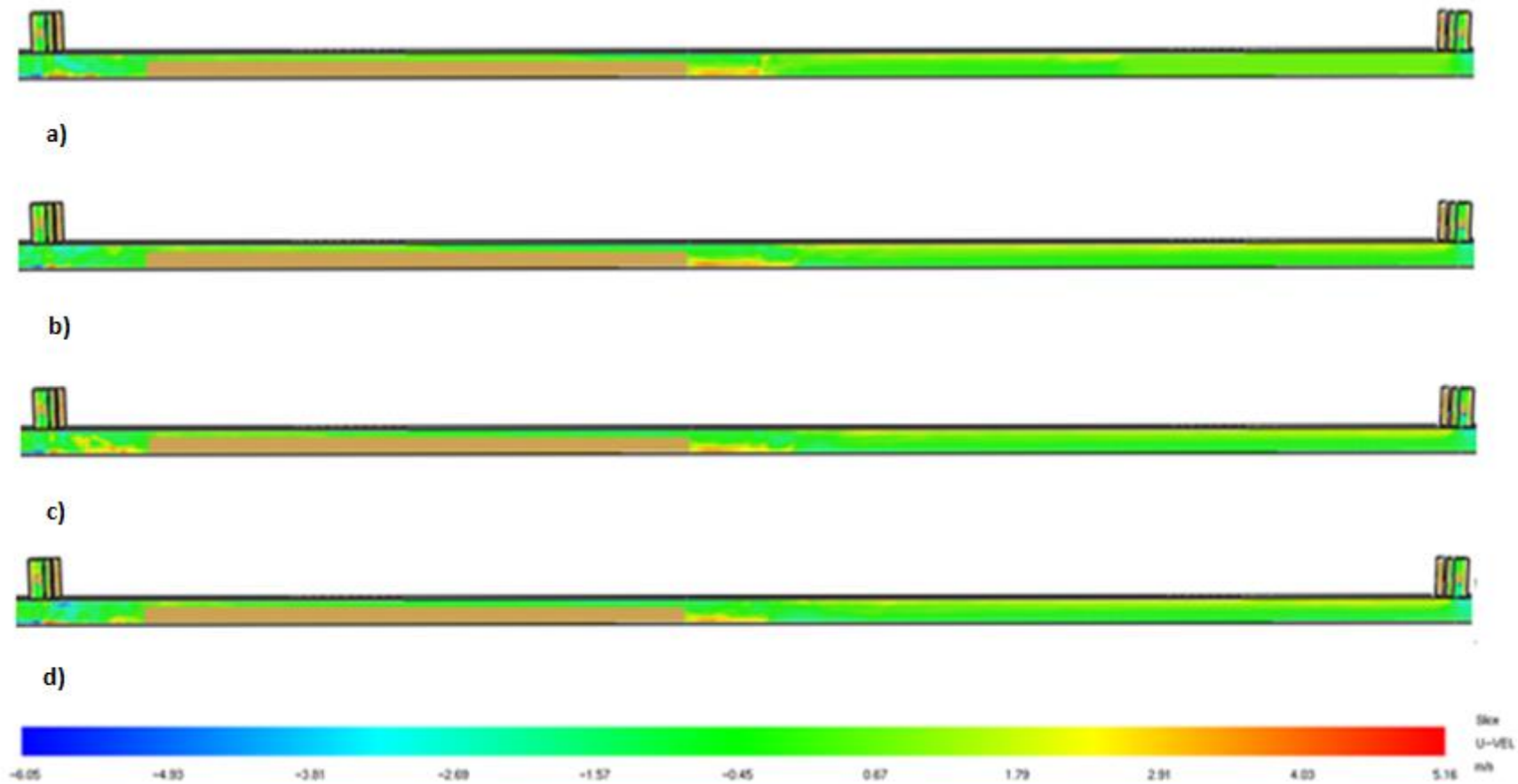
Σχήμα 5-12 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης του CO μετά από : a) 50, b) 150, c) 300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός αυτής



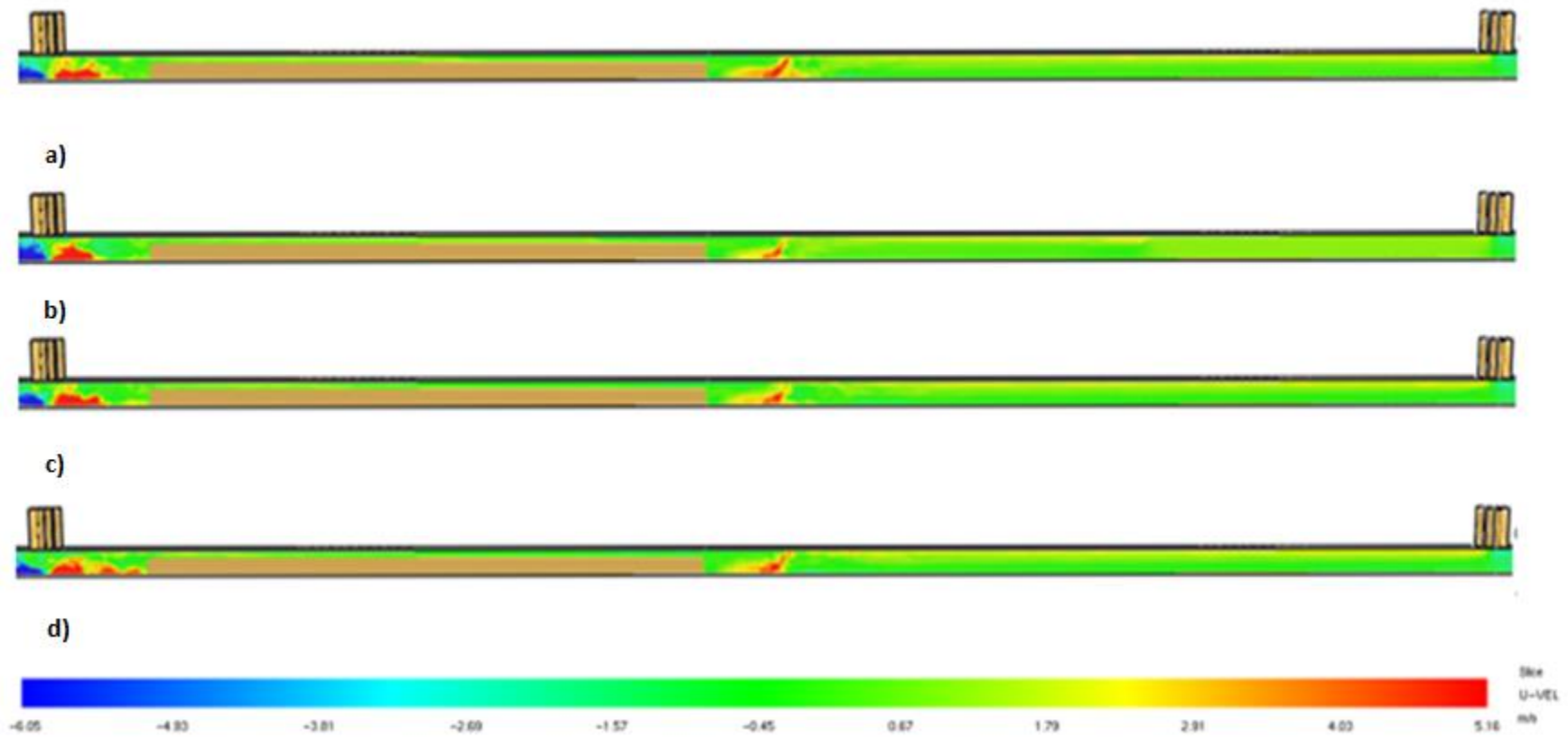
### 5.2.3 Οριζόντια ταχύτητα

Στο σενάριο αυτό, παρατηρούμε από το Σχήμα 5-13 ότι στο επίπεδο των αξόνων των ανεμιστήρων η οριζόντια ταχύτητα είναι σταθερή στο μεγαλύτερο της σήραγγας. Υπάρχει μια μικρή αύξηση της ταχύτητας κοντά στην εστία της φωτιάς και επίσης όσο πλησιάζουμε τους ανεμιστήρες προσαγωγής αυξάνεται και τότε η ταχύτητα χωρίς όμως να φτάνει σε αρκετά μεγάλες τιμές. Μεγάλη αύξηση, της οριζόντιας ταχύτητας, παρατηρείται στο τμήμα μεταξύ του τρένου και της οροφής της σήραγγας. Η αύξηση αυτή ωφείλεται στο γεγονός πως στο συγκεκριμένο τμήμα έχει μειωθεί πολύ η διατομή διέλευσης του αέρα , ενώ η ταχύτητα εισόδου του στο εσωτερικό της σήραγγας, μέσω των ανεμιστήρων προσαγωγής, παραμένει σταθερή.

Στο επίπεδο συμμετρίας της σήραγγας, παρατηρούμε ότι και εδώ υπάρχει αύξηση της ταχύτητας στα ίδια ακριβώς σημεία που υπήρχε και στο επίπεδο των ανεμιστήρων, μόνο που εδώ οι τιμές των ταχυτήτων είναι σημαντικά μεγαλύτερες καθώς συμβάλουν και οι δυο παράλληλοι ανεμιστήρες σε αυτό. Στο 5-14 παρατηρείται το εν λόγω συμπέρασμα.



Σχήμα 5-13 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της οριζόντιας ταχύτητας ( U-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός της σήραγγας

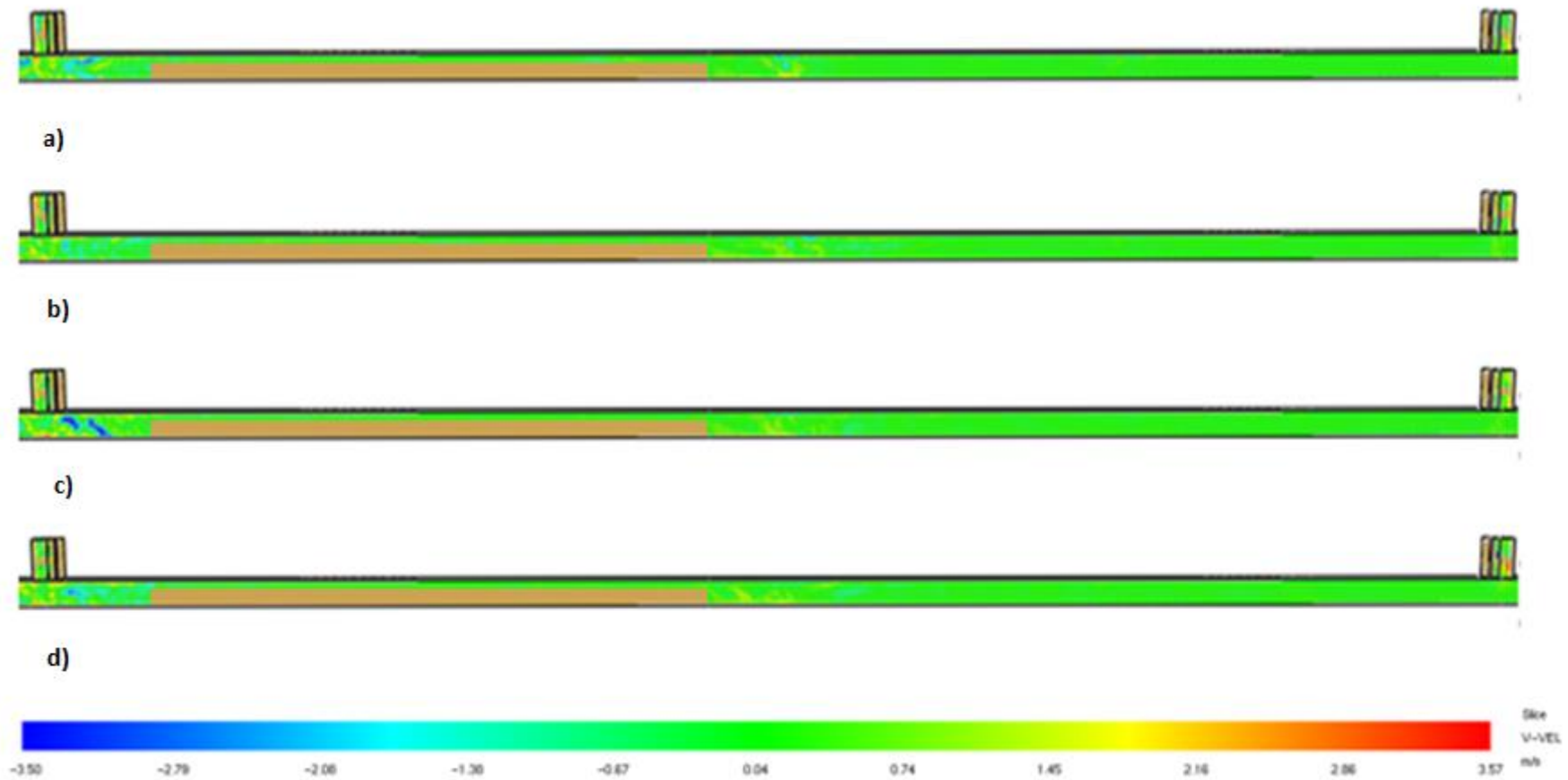


5-14 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της οριζόντιας ταχύτητας ( U-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκους του άξονα συμμετρίας της σήραγγας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός αυτής

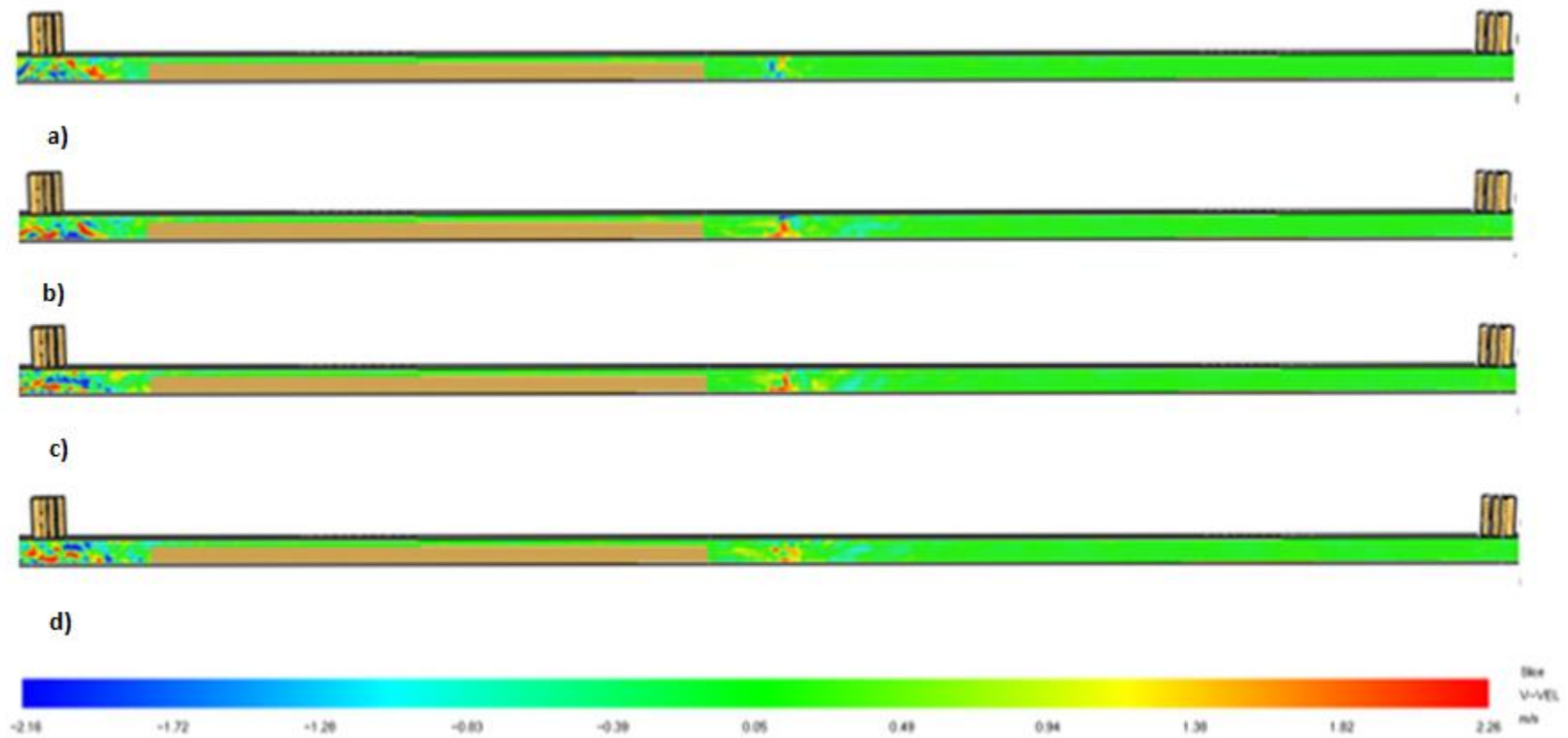
#### **5.2.4 Κατακόρυφη ταχύτητα**

Από την μελέτη της κατακόρυφης ταχύτητας σε αυτό το σενάριο, παρατηρούμε από το Σχήμα Σχήμα 5-15 ότι στο επίπεδο των αξόνων των ανεμιστήρων η αύξηση της κατακόρυφης ταχύτητας είναι ελάχιστη. Η αύξηση αυτή παρατηρείται κυρίως στα σημεία που βρίσκονται κοντά στους ανεμιστήρες προσαγωγής.

Αντίθετα, στο Σχήμα 5-16 φαίνεται ότι στο επίπεδο συμμετρίας της σήραγγας η αύξηση της ταχύτητας παρατηρείται στα ίδια ακριβώς σημεία αλλά είναι πολύ μεγαλύτερη.



Σχήμα 5-15 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της κατακόρυφης ταχύτητας ( V-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα των ανεμιστήρων (  $Y = 3,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός της σήραγγας



Σχήμα 5-16 Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης της κατακόρυφης ταχύτητας ( V-Velocity ) μετά από a) 50, b) 150, c)300 και d) 500 sec, κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της σήραγγας (  $Y = 5,5 \text{ m}$  ) με την ύπαρξη τρένου εντός αυτής

## **6 Σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με την ημι-εμπειρική σχέση**

Σε αυτό το κεφάλαιο της μελέτης, θα γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής διαδικασίας με τα αντίστοιχα αποτελέσματα μιας ημι – εμπειρικής μελέτης η οποία εφαρμόζεται, από εταιρείες του κλάδου, για να αποδειχθεί κατά πόσο η εκάστοτε υπολογιστική μελέτη μπορεί να θεωρηθεί έγκυρη. Η θεωρητική μελέτη συγκρίνει τις μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας σε καθορισμένα σημεία του επιπέδου της οροφής της σήραγγας, οι οποίες προκύπτουν έπειτα από την επίλυση συγκεκριμένων τύπων με την χρήση των κατάλληλων παραμέτρων, με τις αντίστοιχες τιμές που καταγράφηκαν, στα ίδια σημεία, από τα αισθητήρια όργανα που έχουν τοποθετηθεί στο επίπεδο της οροφής της σήραγγας, όπως αναφέρεται αναλυτικά στην παράγραφο Υπολογιστικοί παράμετροι 4.5 .

### **6.1 Μεθοδολογία**

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται μέσω των αντίστοιχων γραφικών παραστάσεων. Πρακτικά, μετά την ολοκλήρωση του τρεξίματος του προβλήματος από το λογισμικό Pyrosim, δημιουργείται αυτόματα ένα αρχείο excel στο οποίο αποθηκεύονται όλες οι μετρήσεις της θερμοκρασίας από τα αισθητήρια που έχουν τοποθετηθεί. Συγκεκριμένα, στην παρούσα μελέτη έχουν τοποθετηθεί αισθητήρια, κοντά στην οροφή της σήραγγας, στις θέσεις  $x = 10, 30, 50$  και  $100$  m, κατάντι του σημείου της φωτιάς, τα οποία παίρνουν μετρήσεις της θερμοκρασίας κάθε δύο δευτερόλεπτα και τις αποθηκεύουν στο αρχείο excel που αναφέρθηκε προηγουμένως. Στην συνέχεια δημιουργείται μια γραφική παράσταση η οποία έχει στον άξονα των  $X$  τις χρονικές στιγμές που καταγράφηκαν οι μετρήσεις της θερμοκρασίας και στον άξονα των  $Y$  οι αντίστοιχες μετρήσεις της . Μία τέτοια γραφική παράσταση δημιουργείται για κάθε ένα από τα τέσσερα σημεία (  $10, 30, 50, 100$  m ) που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Στο τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της κάθε γραφικής παράστασης με τα αποτελέσματα της αντίστοιχης που έχει δημιουργηθεί με

τιμές που έχουν προκύψει από την επίλυση των εμπειρικών εξισώσεων. Από την σύγκριση αυτή και κυρίως από τη σύγκριση της μορφολογίας των γραφικών παραστάσεων, μπορούμε να διακρίνουμε το μέγεθος του σφάλματος μεταξύ των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής διαδικασίας και των ημι-εμπειρικών αποτελεσμάτων και εν τέλει να κρίνουμε εάν η μελέτη μπορεί να θεωρηθεί έγκυρη ή όχι.

## **6.2 Θεωρητικός υπολογισμός της μέγιστης θερμοκρασίας (T<sub>x</sub>) στις θέσεις των αισθητηρίων**

Η ημι-εμπειρική συσχέτιση που χρησιμοποιείται, για τη σύγκριση που παρουσιάζεται στην παρούσα μελέτη, αναπτύχθηκε συγχωνεύοντας μια θεωρητική μελέτη σχετικά με τη μέγιστη θερμοκρασία αερίου κάτω από την οροφή της σήραγγας με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από δοκιμές πυρκαγιάς σε σήραγγες κλίμακας πειραματικού μοντέλου αλλά και σε σήραγγες πλήρους κλίμακας. Ο εμπειρικός τύπος που προκύπτει δίνει τις τιμές θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση από την θέση της πυρκαγιάς και εκφράζεται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$\frac{\Delta T(x)}{\Delta T_{MAX}} = 0.55 \exp\left(-0.143 \frac{X - X_v}{H}\right) + 0.45 \exp\left(-0.024 \frac{X - X_v}{H}\right) \quad (6-1)$$

όπου X είναι η απόσταση από την πηγή πυρκαγιάς, H είναι το ύψος της σήραγγας και X<sub>v</sub> είναι η εικονική προέλευση, η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με :



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

όπου  $L_f$  είναι το μήκος της φλόγας (m). Η μέγιστη θερμοκρασία του αερίου εξαρτάται από τη μέγιστη τιμή της στην οροφή ( $\Delta T_{max}$ ), η οποία με τη σειρά της υπολογίστηκε καθορίζοντας δύο διαφορετικές περιοχές, ανάλογα με την αδιάστατη ταχύτητα εξαερισμού  $V'$  :

$$\Delta T_{max} = \begin{cases} 17.5 \frac{Q^{2/3}}{Hef^{5/3}} - 10H, & V' \leq 0.19 \\ \frac{Q}{u_0 b f_0^{1/3} Hef^{5/3}}, & V' > 0.19 \end{cases} \quad (6-3)$$

όπου  $Q$  είναι ο συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (kW),  $Hef$  είναι το πραγματικό ύψος της σήραγγας (m),  $u_0$  είναι η ταχύτητα εξαερισμού,  $bf_0$  είναι η ακτίνα της εστίας πυρκαγιάς (m) και  $V'$  ορίζεται ως :

$$V' = \frac{u_0}{w^*} \quad (6-4)$$

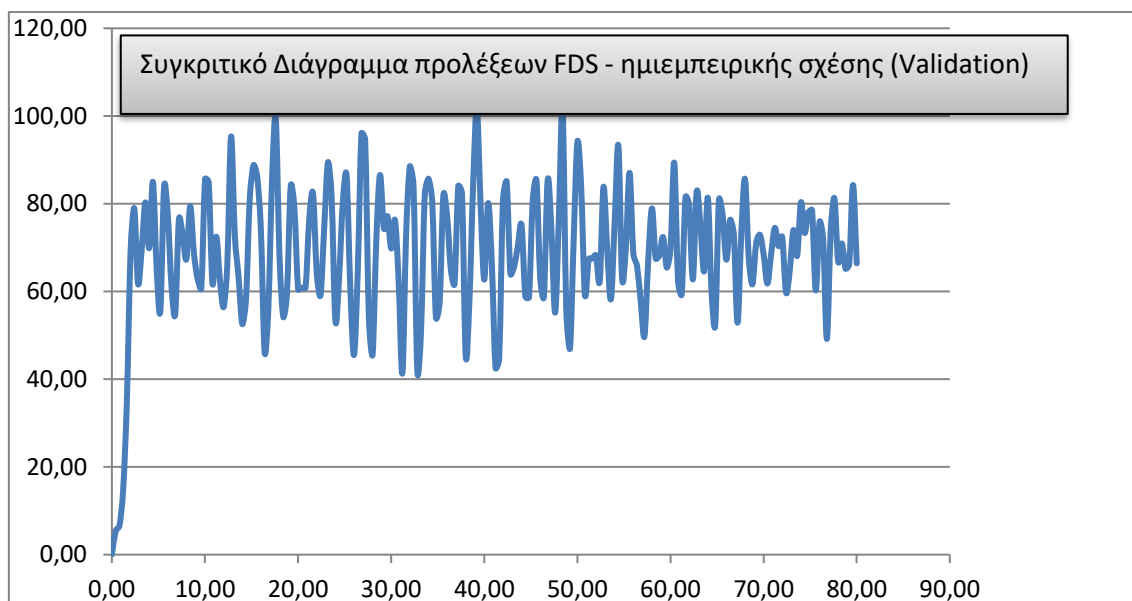
όπου  $w^*$  είναι η χαρακτηριστική ταχύτητα του λοφίου, και εκφράζεται από την σχέση :

$$w^* = \left( \frac{gQ}{bf_0\rho_0c_pT_0} \right) \quad (6-5)$$

στην οποία  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/s^2$ ),  $bf_0$  είναι η ακτίνα της εστίας πυρκαγιάς ( $m$ ),  $\rho_0$  είναι η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα ( $kg/m^3$ ),  $c_p$  είναι η θερμική ικανότητα ( $kJ/kgK$ ),  $T_0$  είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $K$ ).

Λύνοντας όλες τις παραπάνω σχέσεις και λύνοντας την σχέση

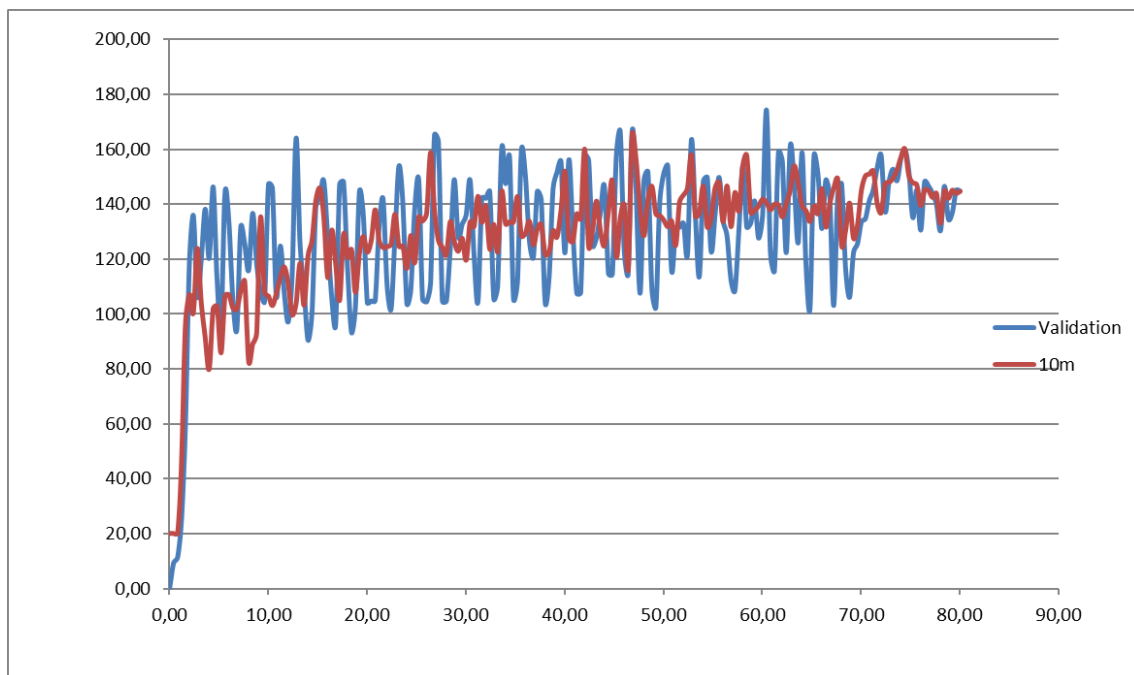
(6-1) ως προς  $\Delta T(x)$  προκύπτει μια συνάρτηση που υπολογίζει θεωρητικά την μέγιστη θερμοκρασία, σε κάθε θέση των αισθητήριων οργάνων, συναρτήσει της χρονικής στιγμής της καταγραφής της. Από την αποτύπωση της συνάρτησης αυτής σε γραφική παράσταση, με την βοήθεια του excel, προκύπτει μια γραφική παράσταση τέτοιας μορφής :



**Σχήμα 6-1** Γραφική παράσταση θεωρητικών τιμών της μέγιστης θερμοκρασίας σε ένα σημείο της σήραγγας

### 6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

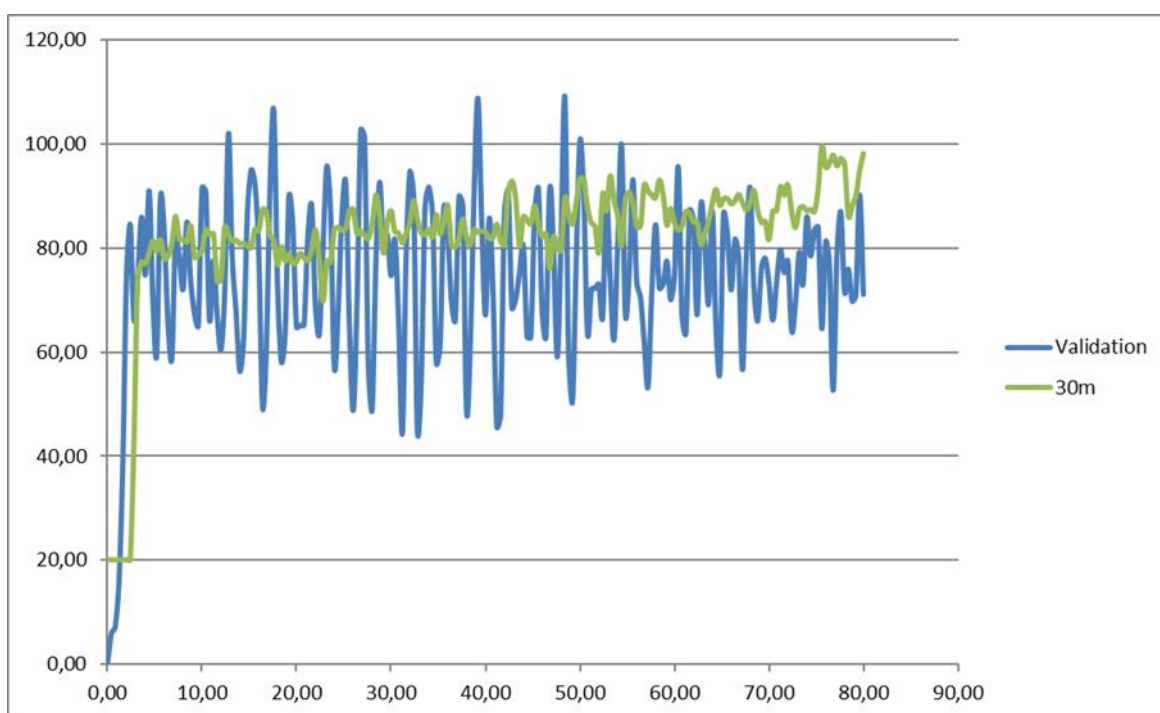
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων, της παρούσας μελέτης, θα αφορά μόνο το σενάριο 1, δηλαδή κενή σήραγγα την ώρα της εξάπλωσης της πυρκαγιάς, διότι στο σενάριο 2 παρουσιάστηκαν σημαντικές αλλαγές λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας. Θα παρατεθούν τέσσερις γραφικές παραστάσεις, όσα και τα σημεία που έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες, σε κάθε μια από τις οποίες θα αποτυπώνεται η θεωρητική καμπύλη της μέγιστης θερμοκρασίας, σε αυτό το σημείο, παράλληλα με την καμπύλη που έχει προκύψει από τις τιμές που μετρήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία [34]. Οι γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν με την βοήθεια του excel είναι οι παρακάτω :



**Σχήμα 6-2** Γραφική παράσταση θεωρητικών και πειραματικών τιμών της μέγιστης θερμοκρασίας στο σημείο  $X = 10$  m κατάντι της φωτιάς

Παρατηρούμε ότι στην θέση  $x = 10$  m ,κατάντι της φωτιάς, η θερμοκρασίες που καταγράφονται είναι αρκετά υψηλές και συγκεκριμένα ξεπερνούν τους 170 βαθμούς κελσίου. Αυτό συμβαίνει καθώς, οι μετρήσεις λαμβάνουν χώρα σε

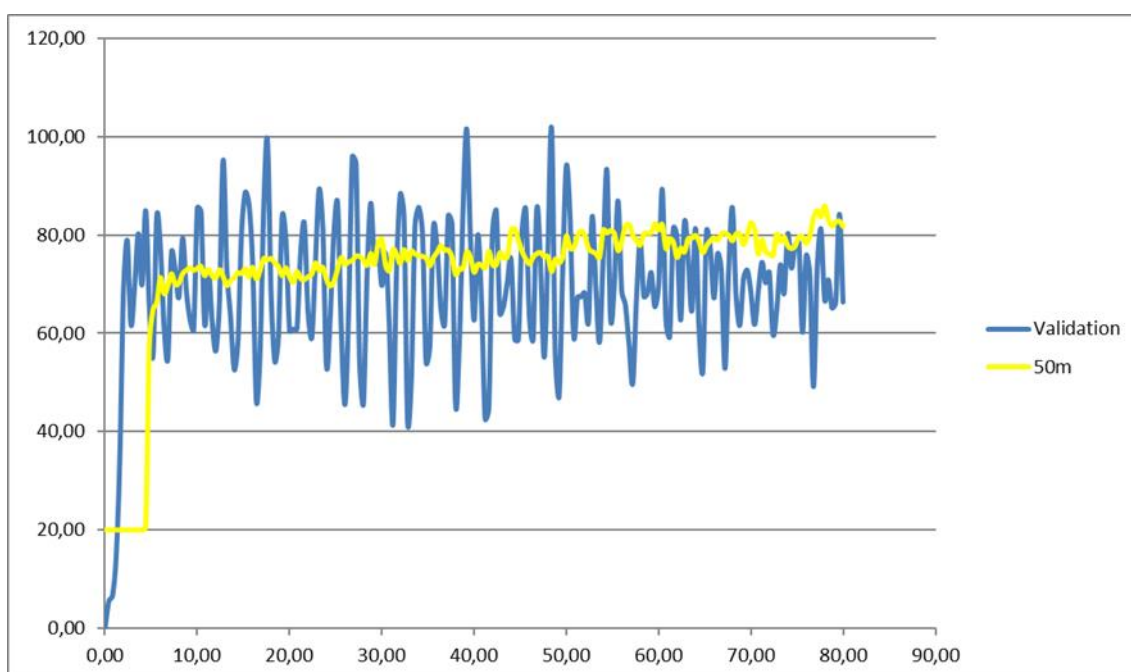
σημείο πολύ κοντά στην εστία της φωτιάς. Παρόλα αυτά παρατηρούμε ότι η καμπύλη που σχηματίζεται από τις μετρήσεις των αισθητηρίων (κόκκινο χρώμα) πλησιάζει πάρα πολύ τόσο σε μορφή όσο και σε τιμές την αντίστοιχη θεωρητική καμπύλη (μπλε χρώμα). Αυτό πρακτικά σημαίνει, πως στην συγκεκριμένη θέση, τόσο η επιλογή του πλέγματος όσο και η επιλογή όλων των υπολοίπων παραμέτρων, κατά την εκτέλεση του πειράματος, ήταν σωστή. Δηλαδή, στην παρούσα θέση, η πειραματική διαδικασία κρίνεται ως έγκυρη.



**Σχήμα 6-3** Γραφική παράσταση θεωρητικών και πειραματικών τιμών της μέγιστης θερμοκρασίας στο σημείο  $X = 30$  m κατάντι της φωτιάς

Παρομοίως με το Σχήμα 6-2, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει ότι τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας στην συγκεκριμένη θέση είναι έγκυρα. Στην συγκεκριμένη θέση όμως, παρατηρούμε ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες που σημειώθηκαν είναι αρκετά χαμηλότερες από αυτές στην προηγούμενη θέση. Αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό και αναμενόμενο

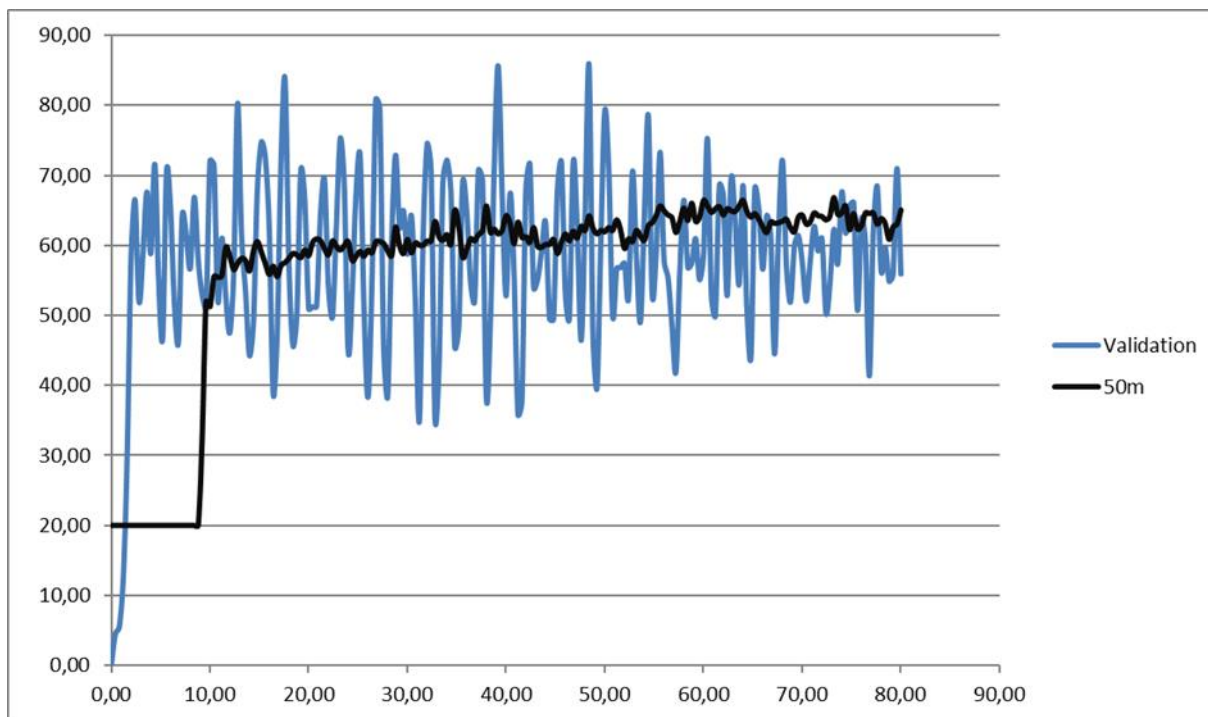
δεδομένου ότι το σημείο των μετρήσεων είναι πλέον 20 μέτρα μακρύτερα από πριν. Αξίζει να σημειωθεί πως η καμπύλη των αποτελεσμάτων τείνει να ταυτίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια στα υψηλότερα σημεία της θεωρητικής καμπύλης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το πλέγμα στην συγκεκριμένη περιοχή δεν έχει την ιδανική πυκνότητα ή μπορεί να οφείλεται στην όχι και τόσο μεγάλη ακρίβεια των αποτελεσμάτων της θεωρητικής – εμπειρικής σχέσης από την οποία προκύπτει και η αντίστοιχη καμπύλη.



**Σχήμα 6-4** Γραφική παράσταση θεωρητικών και πειραματικών τιμών της μέγιστης θερμοκρασίας στο σημείο  $X = 50 \text{ m}$  κατάντι της φωτιάς

Στην συγκεκριμένη θέση παρατηρούμε ότι η μορφολογία των δύο καμπύλων είναι αρκετά παρόμοια, άρα τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας μπορούν να θεωρηθούν έγκυρα. Αντιθέτως παρατηρείται απόκλιση στις μέγιστες και στις ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας. Αυτό, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη θέση, οφείλεται στο γεγονός ότι ίσως θα έπρεπε να έχει επιλεγθεί πυκνότερο πλέγμα στην συγκεκριμένη περιοχή. Τέλος, παρατηρούμε

και εδώ ότι οι μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας μειώνονται και οι ελάχιστες αυξάνονται, όσο απομακρυνόμαστε ακόμα πιο πολύ από την εστία της φωτιάς.



**Σχήμα 6-5** Γραφική παράσταση θεωρητικών και πειραματικών τιμών της μέγιστης θερμοκρασίας στο σημείο  $X = 100$  m κατάντι της φωτιάς

Στην τελευταία και πιο απομακρυσμένη, από την εστία της φωτιάς, θέση παρατηρούμε το ίδιο φαινόμενο που υπήρχε κατά την αύξηση της απόστασης των αισθητήριων οργάνων από την εστία της φωτιάς. Δηλαδή παρατηρούμαι μεν ότι η μορφολογία των δύο καμπυλών είναι παρόμοια αλλά και πάλι παρατηρούμε ότι η απόκλιση των θερμοκρασιών αυξάνεται. Συμπεραίνουμε, ότι αυτή η απόκλιση οφείλεται κυρίως στην πυκνότητα του πλέγματος. Θα έπρεπε όσο απομακρυνόμαστε από την εστία της φωτιάς τόσο πιο πυκνό να ήταν το πλέγμα ώστε να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματά μας.

## 7 Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία

### 7.1 Συμπέρασμα

Ο σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας ήταν να ελεγχθεί κατά πόσο μπορεί ένα σύστημα αερισμού σιδηροδρομικής σήραγγας, αποτελούμενο αποκλειστικά από κατακόρυφους αξονικούς ανεμιστήρες, να απομακρύνει αποτελεσματικά τον καπνό που θα προκληθεί από μια πυρκαγιά ισχύος 10 MW στο εσωτερικό μιας σιδηροδρομικής σήραγγας, διπλής κατεύθυνσης και αρκετά μεγάλης διατομής.

Έπειτα από την ολοκλήρωση της μελέτης αυτής και τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων της, προκύπτει το συμπέρασμα ότι για την συγκεκριμένη διατομή σήραγγας και για φωτιά σταθερής ισχύος, καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος, θα ήταν προτιμότερο να πάμε σε μια λύση ενός συστήματος που θα συνδυάζει διαμήκη και κατακόρυφο αερισμό προκειμένου να διασφαλιστεί σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό η ασφαλής εκκένωση της σήραγγας. Το σύστημα κατακόρυφου αερισμού από μόνο του είναι μεν ικανό να εμποδίσει την εξάπλωση του καπνού σε όλο το μήκος της σήραγγας, αδυνατεί όμως να απομακρύνει τον καπνό από το εσωτερικό της. Προσφέρει δηλαδή κάποια ασφάλεια στα άτομα που βρίσκονται εγκλωβισμένα μέσα στην σήραγγα, όμως όταν πρόκειται για ανθρώπινες ζωές το ρίσκο επιβάλλεται να είναι μηδενικό. Συνεπώς καταλήγουμε ότι ένα μεικτό σύστημα που θα συνδυάζει κατακόρυφο και εγκάρσιο αερισμό, το οποίο θα αποτελείται από κατακόρυφους αξονικούς ανεμιστήρες και από εγκάρσιους ανεμιστήρες ώσης Jet Fans, είναι το ιδανικό για σήραγγες με αρκετά μεγάλο μήκος και αρκετά έως πολύ μεγάλη διατομή, όπως είναι αυτή που στην οποία έλαβε χώρα η παρούσα μελέτη. Έτσι θα μπορεί να διασφαλιστεί η ασφαλής και αποτελεσματική εκκένωση της σήραγγας.

## **7.2 Μελλοντική εργασία**

Σε επόμενη φάση προτείνεται να μελετηθεί η πιθανή δημιουργία ενός μεικτού μοντέλου αερισμού, το οποίο θα στοχεύει στην αξιολόγηση των περιπτώσεων που θα πρέπει να προτιμηθεί από τα απλούστερα συστήματα αερισμού παρουσιάζοντας μια τεχνοοικονομική ανάλυση που θα το αποδεικνύει. Θα παρουσιάζεται εμπειριστικά δηλαδή πιο σύστημα αερισμού θα πρέπει να επιλεγεί σε μία σήραγγα, λαμβάνοντας υπόψη το είδος της σήραγγας, το μέγεθος της, την τοποθεσία της και πάνω από όλα την ασφάλεια όσων την χρησιμοποιούν ανά πάσα ώρα και στιγμή.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Εξαδάκτυλος, Γ. and Μ. Σταυροπούλου, Κατασκευή και Μηχανική των σιδηρόδρομων και των υπογείων έργων. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2006.
2. Wang, H.-Y., Prediction of soot and carbon monoxide production in a ventilated tunnel fire by using a computer simulation. *Fire safety journal*, 2009. 44(3): p. 394-406.
3. Rockett, J.A., Fire induced gas flow in an enclosure. *Combustion Science and Technology*, 1976. 12(4-6): p. 165-175.
4. Cigada, A., D. Ruggieri, and E. Zappa. Road and railway tunnel fire hazard: a new measurement method for risk assessment and improvement of transit safety. in *Proceedings of the 2005 IEEE International Workshop on Measurement Systems for Homeland Security, Contraband Detection and Personal Safety Workshop, 2005.(IMS 2005)*. 2005. IEEE.
5. Ingason, H., Y.Z. Li, and A. Lönnemark, *Tunnel Fire Dynamics*. 2014: Springer New York.
6. Chow, W., On smoke control for tunnels by longitudinal ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1998. 13(3): p. 271-275.
7. Jianren, S.Y.Y.C.L., Modelling Test for Two-way Railway Tunnel Ventilation [J]. *JOURNAL OF HUNAN UNIVERSITY (NATURAL SCIENCES)*, 1994. 6.
8. LAHCHAVA, O. and N. ILIAS, Calculation of railway tunnels ventilation. *Technical Sciences*, 2020. 5(1): p. 69-86.
9. Yijian, Y.C.S., Study on the Aerodynamic Characteristics for Two way Railway Tunnel Ventilation [J]. *JOURNAL OF HUNAN UNIVERSITY (NATURAL SCIENCES)*, 1997. 2.
10. Vuilleumier, F., A. Weatherill, and B. Crausaz, Safety aspects of railway and road tunnel: example of the Lötschberg railway tunnel and Mont-Blanc road tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2002. 17(2): p. 153-158.
11. Pope, S.B., *Turbulent flows*. 2001, IOP Publishing.
12. Beale, C.J., Recent railway industry accidents: learning points for the process industries. *Process safety and environmental protection*, 2002. 80(1): p. 25-32.
13. Kuesel, T.R., E.H. King, and J.O. Bickel, *Tunnel engineering handbook*. 2012: Springer Science & Business Media.
14. Kwa, G.S., Fire and life safety provisions for a long vehicular tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004. 19(4): p. 316.
15. Colella, F., et al., Multiscale modeling of transient flows from fire and ventilation in long tunnels. *Computers & Fluids*, 2011. 51(1): p. 16-29.
16. Ronchi, E., et al., The evaluation of different evacuation models for assessing road tunnel safety analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012. 30: p. 74-84.
17. Carvel, R.O., *Fire size in tunnels*. 2004.
18. Patankar, S., *Numerical heat transfer and fluid flow*. 2018: Taylor & Francis.
19. Αλεβίζος, Θ.Δ., Υπολογιστική μελέτη της κίνησης καπνού κατά την εκδήλωση πυρκαγιάς σε αεριζόμενη σήραγγα. 2011.
20. Carvel, R. and G. Marlair, *A history of fire incidents in tunnels*. 2005.
21. Hostikka, S., et al., Development and validation of FDS+ Evac for evacuation simulations. *VTT RESEARCH*, 2007. 13: p. 18.
22. Liu, C., et al., Study on emergency ventilation for train fire environment in metro interchange tunnel. *Building and Environment*, 2019. 147: p. 267-283.

23. Dolan, D.H., Pyrometry simulator (pyrosim) for diagnostic design. 2011, Technical Report SAND2011-7778, Sandia National Laboratories.
24. Mouilleau, Y. and A. Champassith, CFD simulations of atmospheric gas dispersion using the Fire Dynamics Simulator (FDS). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009. 22(3): p. 316-323.
25. Roh, J.S., et al., CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009. 24(4): p. 447-453.
26. Jang, Y.-J. and W.-H. Park, The Applicability Analysis of FDS code for Fire-Driven Flow Simulation in Railway Tunnel. *Journal of the Korean Society for Railway*, 2007. 10(2): p. 224-230.
27. McGrattan, K., *Fire Dynamics Simulator (Version 4)—Technical Reference Guide*. 2005.
28. McGrattan, K.B., H.R. Baum, and R.G. Rehm, Large eddy simulations of smoke movement. *Fire Safety Journal*, 1998. 30(2): p. 161-178.
29. Valasek, L. and J. Glasa. Simulation of the course of evacuation in tunnel fire conditions by FDS+ Evac. in *Proceedings of the 2013 International Conference on Applied Mathematics and Computational Methods in Engineering*, July 16. 2013.
30. Meng, N., et al., Numerical study on the optimization of smoke ventilation mode at the conjunction area between tunnel track and platform in emergency of a train fire at subway station. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014. 40: p. 151-159.
31. Jevtić, R., The safety in tunnels: An example of simulated evacuation from a railway tunnel. *Bezbednost, Beograd*, 2017. 59(1): p. 98-114.
32. Tarada, F. New perspectives on the critical velocity for smoke control. in *Proceedings 4th International Symposium on Tunnel Safety and Security*. 2010.
33. Astrup, P., Some physiological and pathological effects of moderate carbon monoxide exposure. *British Medical Journal*, 1972. 4(5838): p. 447.
34. Smardz, P. and V. Novozhilov, Validation of Fire Dynamics Simulator (FDS) for forced and natural convection flows. *University of Ulster*, 2006: p. 16-20.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

**Παράρτημα Α** : Αναλυτική παρουσίαση του κώδικα του FDS για το πρώτο σενάριο

```
&HEAD CHID='tounel21_7'/
```

```
&TIME T_END=600.0/
```

```
&DUMP RENDER_FILE='tounel21_7.ge1', COLUMN_DUMP_LIMIT=.TRUE., DT_DEVC=2.0,  
DT_RESTART=300.0, DT_SL3D=0.25/
```

```
&MESH ID='Tounel-b-a-c', IJK=486,22,14, XB=211.0,454.0,0.0,11.0,0.0,7.0/
```

```
&MESH ID='Tounel-b-a-a', IJK=469,22,14, XB=-54.0,180.5,0.0,11.0,0.0,7.0/
```

```
&MESH ID='Fire', IJK=61,22,14, XB=180.5,211.0,0.0,11.0,0.0,7.0/
```

```
&MESH ID='freatioDK', IJK=16,14,44, XB=396.0,400.0,1.5,5.0,7.0,18.0/
```

```
&MESH ID='freatioDP', IJK=16,14,44, XB=396.0,400.0,6.0,9.5,7.0,18.0/
```

```
&MESH ID='freatioAP', IJK=16,14,44, XB=0.0,4.0,6.0,9.5,7.0,18.0/
```

```
&MESH ID='freatioAK', IJK=16,14,44, XB=0.0,4.0,1.5,5.0,7.0,18.0/
```

```
&REAC ID='Reaction1',
```

```
    FUEL='REAC_FUEL',
```

```
    C=1.0,
```

```
    H=2.20209,
```

```
    O=0.622494,
```

```
    SOOT_H_FRACTION=0.0,
```

```
    CO_YIELD=0.04,
```

SOOT\_YIELD=0.07,

HEAT\_OF\_COMBUSTION=2.0E4/

&DEVC ID='10-uV', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=205.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='10-wV', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=205.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='10-vV', QUANTITY='V-VELOCITY', XYZ=205.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='10-carb mono', QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE',  
XYZ=205.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='30-uV', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=225.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='30-wV', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=225.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='30-vV', QUANTITY='V-VELOCITY', XYZ=225.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='30-carb mono', QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE',  
XYZ=225.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='50-uV', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=245.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='50-wV', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=245.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='50-vV', QUANTITY='V-VELOCITY', XYZ=245.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='50-carb mono', QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE',  
XYZ=245.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='100-uV', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=295.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='100-wV', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=295.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='100-vV', QUANTITY='V-VELOCITY', XYZ=295.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='100-carb mono', QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE',  
XYZ=295.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='10-T', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=205.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='30-T', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=225.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='50-T', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=245.0,5.5,6.5/

&DEVC ID='100-T', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=295.0,5.5,6.5/

&SURF ID='fire',

COLOR='RED',

HRRPUA=1.0E4/

&OBST ID='Obstruction', XB=195.0,196.0,5.0,6.0,0.0,0.1, SURF\_ID='INERT'/

&OBST ID='fan AK', XB=1.0,3.0,2.25,4.25,11.0,13.0, SURF\_ID='INERT'/

&OBST ID='fanAP', XB=1.0,3.0,6.75,8.75,11.0,13.0, SURF\_ID='INERT'/

&OBST ID='fan DK', XB=397.0,399.0,2.25,4.25,11.0,13.0, SURF\_ID='INERT'/

&OBST ID='fan DP', XB=397.0,399.0,6.75,8.75,11.0,13.0, SURF\_ID='INERT'/

&VENT ID='Mesh Vent: Tounel-b-a [XMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=454.0,454.0,0.0,11.0,0.0,7.0/

&VENT ID='Mesh Vent: Tounel-b-a [XMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=-54.0,-54.0,0.0,11.0,0.0,7.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDP [XMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=400.0,400.0,6.0,9.5,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDP [XMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,396.0,6.0,9.5,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDP [YMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,9.5,9.5,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDP [YMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,6.0,6.0,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDP [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,6.0,9.5,18.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDK [XMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=400.0,400.0,1.5,5.0,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDK [XMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,396.0,1.5,5.0,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDK [YMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,5.0,5.0,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDK [YMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,1.5,1.5,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDK [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,1.5,5.0,18.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioAP [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,4.0,6.0,9.5,18.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioAK [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,4.0,1.5,5.0,18.0,18.0/

&VENT ID='vent fwtia', SURF\_ID='fire', XB=195.0,196.0,5.0,6.0,0.1,0.1/

&VENT ID='anoigmaorofhsAK', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,4.0,1.5,5.0,7.0,7.0/  
&VENT ID='anoigma fan AK', SURF\_ID='HVAC', XB=1.0,3.0,2.25,4.25,13.0,13.0/  
&VENT ID='patos fan AK', SURF\_ID='HVAC', XB=1.0,3.0,2.25,4.25,11.0,11.0/  
&VENT ID='anoigmaorofhsAP', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,4.0,6.0,9.5,7.0,7.0/  
&VENT ID='anoigmafanaP', SURF\_ID='HVAC', XB=1.0,3.0,6.75,8.75,13.0,13.0/  
&VENT ID='patosfanaP', SURF\_ID='HVAC', XB=1.0,3.0,6.75,8.75,11.0,11.0/  
&VENT ID='anoigmaorofhsDK', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,1.5,5.0,7.0,7.0/  
&VENT ID='anoigma fan DK', SURF\_ID='HVAC', XB=397.0,399.0,2.25,4.25,13.0,13.0/  
&VENT ID='patos fan DK', SURF\_ID='HVAC', XB=397.0,399.0,2.25,4.25,11.0,11.0/  
&VENT ID='patosfanaDP', SURF\_ID='HVAC', XB=397.0,399.0,6.75,8.75,11.0,11.0/  
&VENT ID='anoigmafanaDP', SURF\_ID='HVAC', XB=397.0,399.0,6.75,8.75,13.0,13.0/  
&VENT ID='anoigmaorofhsDP', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,6.0,9.5,7.0,7.0/  
  
&HVAC ID='Node fan AK KATW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='Duct fan AK', VENT\_ID='patos fan AK'/  
&HVAC ID='Node fan AK PANW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='Duct fan AK', VENT\_ID='anoigma fan AK'/  
&HVAC ID='Duct fan AK', TYPE\_ID='DUCT', AREA=8.0, PERIMETER=8.0, FAN\_ID='Fan01', NODE\_ID='Node fan AK PANW','Node fan AK KATW', ROUGHNESS=0.001, LENGTH=2.0/  
&HVAC ID='NodefanAP KATW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='DuctfanAP', VENT\_ID='patosfanaP'/  
&HVAC ID='NodefanAP PANW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='DuctfanAP', VENT\_ID='anoigmafanaP'/  
&HVAC ID='DuctfanAP', TYPE\_ID='DUCT', AREA=8.0, PERIMETER=8.0, FAN\_ID='Fan01', NODE\_ID='NodefanAP KATW','NodefanAP PANW', REVERSE=.TRUE., ROUGHNESS=0.001, LENGTH=2.0/  
&HVAC ID='Node fan DK KATW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='Duct fan DK', VENT\_ID='patos fan DK'/

&HVAC ID='Node fan DK PANW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='Duct fan DK', VENT\_ID='anoigma fan DK'/

&HVAC ID='Duct fan DK', TYPE\_ID='DUCT', AREA=8.0, PERIMETER=8.0, FAN\_ID='Fan01', NODE\_ID='Node fan DK KATW','Node fan DK PANW', ROUGHNESS=0.001, LENGTH=2.0/

&HVAC ID='DuctfanDP', TYPE\_ID='DUCT', AREA=8.0, PERIMETER=8.0, FAN\_ID='Fan01', NODE\_ID='NodefanDP KATW','NodefanDP PANW', ROUGHNESS=0.001, LENGTH=2.0/

&HVAC ID='NodefanDP PANW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='DuctfanDP', VENT\_ID='anoigmafanDP'/

&HVAC ID='NodefanDP KATW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='DuctfanDP', VENT\_ID='patosfanDP'/

&HVAC ID='Fan01', TYPE\_ID='FAN', VOLUME\_FLOW=90.0/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=5.5/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=3.25/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=7.75/

&SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE', PBY=5.5/

&SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE', PBY=3.25/

&SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE', PBY=7.75/

&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBY=5.5/

&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBY=3.25/

&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBY=7.75/

&SLCF QUANTITY='V-VELOCITY', PBY=3.25/

&SLCF QUANTITY='V-VELOCITY', PBY=5.5/

&SLCF QUANTITY='V-VELOCITY', PBY=7.75/

&TAIL /

**Παράρτημα Β** : Αναλυτική παρουσίαση του κώδικα του FDS για το δεύτερο και τελευταίο σενάριο

&HEAD CHID='tounel27\_7'/

&TIME T\_END=600.0/

&DUMP RENDER\_FILE='tounel27\_7.ge1', COLUMN\_DUMP\_LIMIT=.TRUE., DT\_DEVC=2.0,  
DT\_RESTART=300.0, DT\_SL3D=0.25/

&MESH ID='Tounel-b-a-c', IJK=486,22,14, XB=211.0,454.0,0.0,11.0,0.0,7.0/

&MESH ID='Tounel-b-a-a', IJK=469,22,14, XB=-54.0,180.5,0.0,11.0,0.0,7.0/

&MESH ID='Fire', IJK=61,22,14, XB=180.5,211.0,0.0,11.0,0.0,7.0/

&MESH ID='freatioDK', IJK=16,14,44, XB=396.0,400.0,1.5,5.0,7.0,18.0/

&MESH ID='freatioDP', IJK=16,14,44, XB=396.0,400.0,6.0,9.5,7.0,18.0/

&MESH ID='freatioAP', IJK=16,14,44, XB=0.0,4.0,6.0,9.5,7.0,18.0/

&MESH ID='freatioAK', IJK=16,14,44, XB=0.0,4.0,1.5,5.0,7.0,18.0/

&REAC ID='Reaction1',

FUEL='REAC\_FUEL',

C=1.0,

H=2.20209,

O=0.622494,

SOOT\_H\_FRACTION=0.0,

CO\_YIELD=0.04,

SOOT\_YIELD=0.07,

HEAT\_OF\_COMBUSTION=2.0E4/



&DEVC ID='10-uV', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=205.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='10-wV', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=205.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='10-vV', QUANTITY='V-VELOCITY', XYZ=205.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='10-carb mono', QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE',  
XYZ=205.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='30-uV', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=225.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='30-wV', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=225.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='30-vV', QUANTITY='V-VELOCITY', XYZ=225.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='30-carb mono', QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE',  
XYZ=225.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='50-uV', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=245.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='50-wV', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=245.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='50-vV', QUANTITY='V-VELOCITY', XYZ=245.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='50-carb mono', QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE',  
XYZ=245.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='100-uV', QUANTITY='U-VELOCITY', XYZ=295.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='100-wV', QUANTITY='W-VELOCITY', XYZ=295.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='100-vV', QUANTITY='V-VELOCITY', XYZ=295.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='100-carb mono', QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE',  
XYZ=295.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='10-T', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=205.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='30-T', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=225.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='50-T', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=245.0,5.5,6.5/  
&DEVC ID='100-T', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=295.0,5.5,6.5/  
  
&SURF ID='fire',

COLOR='RED',

HRRPUA=1.0E4/

&OBST ID='Obstruction', XB=195.0,196.0,5.0,6.0,0.0,0.1, SURF\_ID='INERT'/

&OBST ID='fan AK', XB=1.0,3.0,2.25,4.25,11.0,13.0, SURF\_ID='INERT'/

&OBST ID='fanAP', XB=1.0,3.0,6.75,8.75,11.0,13.0, SURF\_ID='INERT'/

&OBST ID='fan DK', XB=397.0,399.0,2.25,4.25,11.0,13.0, SURF\_ID='INERT'/

&OBST ID='fan DP', XB=397.0,399.0,6.75,8.75,11.0,13.0, SURF\_ID='INERT'/

&OBST ID='Train', XB=30.0,180.0,3.5,7.5,0.0,4.6, SURF\_ID='INERT'/

&VENT ID='Mesh Vent: Tounel-b-a [XMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=454.0,454.0,0.0,11.0,0.0,7.0/

&VENT ID='Mesh Vent: Tounel-b-a [XMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=-54.0,-54.0,0.0,11.0,0.0,7.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDP [XMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=400.0,400.0,6.0,9.5,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDP [XMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,396.0,6.0,9.5,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDP [YMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,9.5,9.5,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDP [YMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,6.0,6.0,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDP [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,6.0,9.5,18.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDK [XMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=400.0,400.0,1.5,5.0,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDK [XMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,396.0,1.5,5.0,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDK [YMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,5.0,5.0,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDK [YMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,1.5,1.5,17.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioDK [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,1.5,5.0,18.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioAP [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,4.0,6.0,9.5,18.0,18.0/

&VENT ID='Mesh Vent: freatioAK [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,4.0,1.5,5.0,18.0,18.0/

&VENT ID='vent fwtia', SURF\_ID='fire', XB=195.0,196.0,5.0,6.0,0.1,0.1/

&VENT ID='anoigmaorofhsAK', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,4.0,1.5,5.0,7.0,7.0/

&VENT ID='anoigma fan AK', SURF\_ID='HVAC', XB=1.0,3.0,2.25,4.25,13.0,13.0/  
&VENT ID='patos fan AK', SURF\_ID='HVAC', XB=1.0,3.0,2.25,4.25,11.0,11.0/  
&VENT ID='anoigmaorofhsAP', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,4.0,6.0,9.5,7.0,7.0/  
&VENT ID='anoigmafanaP', SURF\_ID='HVAC', XB=1.0,3.0,6.75,8.75,13.0,13.0/  
&VENT ID='patosfanaP', SURF\_ID='HVAC', XB=1.0,3.0,6.75,8.75,11.0,11.0/  
&VENT ID='anoigmaorofhsDK', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,1.5,5.0,7.0,7.0/  
&VENT ID='anoigma fan DK', SURF\_ID='HVAC', XB=397.0,399.0,2.25,4.25,13.0,13.0/  
&VENT ID='patos fan DK', SURF\_ID='HVAC', XB=397.0,399.0,2.25,4.25,11.0,11.0/  
&VENT ID='patosfanaDP', SURF\_ID='HVAC', XB=397.0,399.0,6.75,8.75,11.0,11.0/  
&VENT ID='anoigmafanaDP', SURF\_ID='HVAC', XB=397.0,399.0,6.75,8.75,13.0,13.0/  
&VENT ID='anoigmaorofhsDP', SURF\_ID='OPEN', XB=396.0,400.0,6.0,9.5,7.0,7.0/

&HVAC ID='Node fan AK KATW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='Duct fan AK', VENT\_ID='patos fan AK'/

&HVAC ID='Node fan AK PANW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='Duct fan AK', VENT\_ID='anoigma fan AK'/

&HVAC ID='Duct fan AK', TYPE\_ID='DUCT', AREA=8.0, PERIMETER=8.0, FAN\_ID='Fan01', NODE\_ID='Node fan AK PANW','Node fan AK KATW', ROUGHNESS=0.001, LENGTH=2.0/

&HVAC ID='NodefanaP KATW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='DuctfanaP', VENT\_ID='patosfanaP'/

&HVAC ID='NodefanaP PANW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='DuctfanaP', VENT\_ID='anoigmafanaP'/

&HVAC ID='DuctfanaP', TYPE\_ID='DUCT', AREA=8.0, PERIMETER=8.0, FAN\_ID='Fan01', NODE\_ID='NodefanaP KATW','NodefanaP PANW', REVERSE=.TRUE., ROUGHNESS=0.001, LENGTH=2.0/

&HVAC ID='Node fan DK KATW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='Duct fan DK', VENT\_ID='patos fan DK'/

&HVAC ID='Node fan DK PANW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='Duct fan DK', VENT\_ID='anoigma fan DK'/

&HVAC ID='Duct fan DK', TYPE\_ID='DUCT', AREA=8.0, PERIMETER=8.0, FAN\_ID='Fan01',  
NODE\_ID='Node fan DK KATW','Node fan DK PANW', ROUGHNESS=0.001, LENGTH=2.0/

&HVAC ID='DuctfanDP', TYPE\_ID='DUCT', AREA=8.0, PERIMETER=8.0, FAN\_ID='Fan01',  
NODE\_ID='NodefandP KATW','NodefandP PANW', ROUGHNESS=0.001, LENGTH=2.0/

&HVAC ID='NodefandP PANW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='DuctfanDP',  
VENT\_ID='anoigmafandP'/

&HVAC ID='NodefandP KATW', TYPE\_ID='NODE', DUCT\_ID='DuctfanDP',  
VENT\_ID='patosfandP'/

&HVAC ID='Fan01', TYPE\_ID='FAN', VOLUME\_FLOW=90.0/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=5.5/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=3.25/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=7.75/

&SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE', PBY=5.5/

&SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE', PBY=3.25/

&SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC\_ID='CARBON MONOXIDE', PBY=7.75/

&SLCF QUANTITY='V-VELOCITY', PBY=3.25/

&SLCF QUANTITY='V-VELOCITY', PBY=7.75/

&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBY=5.5/

&SLCF QUANTITY='V-VELOCITY', PBY=5.5/

&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBY=3.25/

&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', PBY=7.75/

&TAIL

© UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
2020. All rights reserved. No part of this publication may be  
reproduced without the written permission of the copyright owner