

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΒΑΡΘΟΛΟΜΑΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ
ΣΤΑΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΑΓΩΓΗ ΚΑΠΝΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ
ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2022 - 2023

Επιβλέπων: Δρ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
Επιβλέπων: Δρ. ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Αιγάλεω, Ιούνιος 2023

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΒΑΡΘΟΛΟΜΑΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ
ΣΤΑΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΑΓΩΓΗ ΚΑΠΝΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ
ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ακαδημαϊκό Έτος: 2022 - 2023

Επιβλέπων: Δρ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
Επιβλέπων: Δρ. ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Αιγάλεω, Ιούνιος 2023

© UNIVERSITY OF WEST ATTICA
2023. All rights reserved. No part of this publication may be
reproduced without the written permission of the copyright owner.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Υπολογισμός συστήματος αερισμού σιδηροδρομικού σταθμού για την απαγωγή καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Δρ. Ιωάννης Σαρρής	Καθηγητής	
2	Δρ. Κωνσταντίνος Ιωάννης Βασιλόπουλος	Διδάκτορας ΕΣΠΑ	
2	Δρ. Καρβέλας Ευάγγελος	Διδάκτορας ΕΣΠΑ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

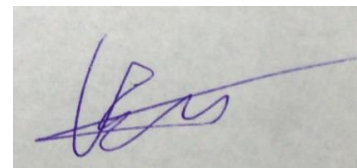
Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Βαρθολομαίος Ιωάννης του Ευαγγέλου, με αριθμό μητρώου 46145263 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Βαρθολομαίος Ιωάννης



ABSTRACT

Ensuring safety in underground transportation systems is paramount, especially when it comes to fire incidents. Advanced fire simulation programs like Fire Dynamics Simulator (FDS) and PyroSim play a crucial role in evaluating fire scenarios, designing effective safety measures, and improving emergency response strategies within underground stations. Fire Dynamics Simulator (FDS) is a powerful computational fluid dynamics (CFD) tool widely used to model and simulate fire behaviour in complex environments, including underground stations.

In this study focused on fire safety in an underground station, we incorporated the use of Fire Dynamics Simulator (FDS) software. The station we are studying is 150 meters in length, 8 meters in width, and 7 meters in height. Also there are two vertical axial fans in the ventilation shafts with an air supply of 29 m^3 .

By inputting the parameters of a diesel pool of fire corresponding to 15 MW, the location of the fire is 5.2m in the x-axis and 22m in the z-axis from the center of the station, FDS accurately models the fire's development and spread within the station.

In this study, three different fire scenarios were considered to calculate the critical velocity and temperature within the underground station in the first 500 sec from the fire ignition. The first scenario examines a) a 15Mw fire with no ventilation, b) a 15Mw fire with one exhaust fan and one in suction fan, finally c) a 15Mw fire with both fans running in suction mode.

Keywords:

FDS, Subway train fire, Smoke spread, fire dynamic simulation, LES method.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Κωνσταντίνο Βασιλόπουλο για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας σε εμένα, για την πολύ σημαντική καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της και την υπομονή που επέδειξε πάρα τις δυσκολίες. Η βοήθειά του ήταν πολύτιμη στην ολοκλήρωση της διπλωματικής και η προθυμία του στο να επικοινωνήσει και να μου λύσει τις όποιες απορίες ήταν καθοριστική. Τον Δρ. Σαρρή Ιωάννη για την ανάθεση και επίβλεψη του θέματος, αλλά και την παροχή υπολογιστικών πόρων. Επίσης την οικογένεια μου, που παρά τις δυσκολίες ήταν εκεί να με στηρίξουν, τόσο στο οικονομικό, όσο και στο ψυχολογικό κομμάτι και πίστεψαν σε εμένα. Τέλος, τους φίλους, εντός και εκτός της σχολής, αλλά και την σύντροφό μου, που με την συμπαράσταση και την κατανόηση τους με βοήθησαν να ξεπεράσω τα όποια εμπόδια συνάντησα κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Τους ευχαριστώ θερμά.

Περιεχόμενα

ABSTRACT	i
Ευχαριστίες	ii
Κατάλογος Σχημάτων	v
Κατάλογος Πινάκων	viii
Κατάλογος Εξισώσεων	ix
1 Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας	2
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	3
2.1 Σταθμοί τρένων	3
2.2 Περιγραφή συστημάτων αερισμού	5
2.2.1 Φαινόμενο αναστροφής του καπνού (backlayering).....	6
2.2.2 Συστήματα φυσικού αερισμού	7
2.2.3 Συστήματα μηχανικού αερισμού.....	8
2.3 Μελέτη φωτιάς σε σταθμό.....	11
2.3.1 Γενικά	11
2.3.2 Πειραματικές Μελέτες.....	12
2.3.3 Υπολογιστικές Μελέτες.....	14
3 Υπολογιστική προσομοίωση	16
3.1 Γενικά.....	16
3.2 Εισαγωγή	17
3.3 Μαθηματικό μοντέλο	18
3.4 Μοντέλο Τύρβης στον κώδικα FDS.....	21
3.5 Διαδικασία Επίλυσης	22
4 Σενάριο Μελέτης.....	23
4.1 Περιγραφή γεωμετρικών χαρακτηριστικών σταθμού.....	23
4.1.1 Υλικά κατασκευής σιδηροδρομικού σταθμού	25
4.2 Χαρακτηριστικά της φωτιάς.....	27
4.3 Υπολογιστικό πλέγμα.....	29
4.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος αερισμού.....	32
4.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά Τρένου.....	34
4.6 Υπολογισμός κρίσιμης ταχύτητας U_{crit}	36
5 Αποτελέσματα	39
5.1 Σενάριο 1: Φωτιά χωρίς την ύπαρξη μηχανικού αερισμού	39
5.1.1 Οριζόντια ταχύτητα.....	40
5.1.2 Κατακόρυφη ταχύτητα	47
5.1.3 Θερμοκρασία.....	49
5.2 Σενάριο 2: Φωτιά υπό την παρουσία μηχανικού αερισμού (Με αναρρόφηση και κατάθλιψη εντός του σταθμού)	55

5.2.1 Οριζόντια ταχύτητα.....	55
5.2.1 Κατακόρυφη ταχύτητα	61
5.2.2 Θερμοκρασία.....	64
5.3 Σενάριο 3: Φωτιά υπό την παρουσία μηχανικού αερισμού (Με λειτουργία σύγχρονης αναρρόφησης).....	69
5.3.1 Οριζόντια ταχύτητα.....	69
5.3.1 Κατακόρυφη ταχύτητα	75
5.3.1 Θερμοκρασία.....	77
6 Συμπεράσματα	82
6.1 Μελλοντική εργασία	83

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Κεντρικός Σιδηροδρομικός Σταθμός Αθηνών «Σταθμός Λαρίσης» (Station exaples 1).....	3
Σχήμα 2-2 Εμπορευματικό κέντρο Θριασίου (Station exaples 1).	4
Σχήμα 2-3 Υπόγειος σταθμός μετρό Σύνταγμα (Station exaples 1).....	5
Σχήμα 2-4 Απεικόνιση του φαινομένου αναστροφής του καπνού σε μια σήραγγα (a-c) και (d) της κρίσιμης ταχύτητας αερισμού για διαφορετικές τιμές θερμικής ισχύος (Chen, Yuen et al. 2022).	6
Σχήμα 2-5 Σύστημα μηχανικού αερισμού με ανοίγματα πάνω από τις ράγες (Zhao, Xiao et al. 2021).	9
Σχήμα 2-6 Σύστημα μηχανικού αερισμού με ανοίγματα κάτω από την πλατφόρμα (UPE) (Izadi, Mehrabian et al. 2022).	10
Σχήμα 2-7 Σύστημα μηχανικού αερισμού σε σήραγγα με χρήση ανεμιστήρων jet fans (TVF) (Zitron SA. 2023 1).	11
Σχήμα 3-1 Γραφικό περιβάλλον Pyrosim και Smokeview.....	17
Σχήμα 4-1 Πρόσοψη σιδηροδρομικού σταθμού	23
Σχήμα 4-2 Πλάγια όψη σιδηροδρομικού σταθμού	24
Σχήμα 4-3 Κάτοψη σιδηροδρομικού σταθμού	24
Σχήμα 4-4 Ορισμός των χαρακτηριστικών της φωτιάς στο Pyrosim.....	27
Σχήμα 4-5 Ορισμός της τυπικής σύστασης του καυσίμου στο Pyrosim.....	28
Σχήμα 4-6 Ορισμός των προϊόντων καύσης στο Pyrosim	28
Σχήμα 4-7 Απεικόνιση υπό-πλεγμάτων στο Pyrosim	31
Σχήμα 4-8 Πίνακας γενικών χαρακτηριστικών ανεμιστήρα	32
Σχήμα 4-9 Πίνακας χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του ανεμιστήρα	33
Σχήμα 4-10 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανεμιστήρα	34
Σχήμα 4-11 Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμού Desiro HR.....	35
Σχήμα 4-12 Σχηματική απεικόνιση συρμού Desiro HR.....	35
Σχήμα 5-1 Γραφική αναπαράσταση επιπέδων ενδιαφέροντος στο Pyrosim.....	40
Σχήμα 5-2 Χρονική εξέλιξη της εξάπλωσης καπνού για μετά από: a) 50s ,b) 150s, c)300s) , d) 450s.....	42
Σχήμα 5-3 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s 43	

Σχήμα 5-4 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) σε απόσταση 2m από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s.....	44
Σχήμα 5-5 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) σε απόσταση -2m από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s.....	45
Σχήμα 5-6 Κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο για διαφορετικές χρονικές στιγμές στο ύψος διέλευσης των επιβατών.....	46
Σχήμα 5-7 Ισοϋψής κατανομή της κατακόρυφης ταχύτητας (v-Velocity) στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s	48
Σχήμα 5-8 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s	51
Σχήμα 5-9 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση 2 m από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς ΠΡΟΣ ΠΙΑ ΠΛΕΥΡΑ μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s.....	52
Σχήμα 5-10 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση -2 m από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς ΠΡΟΣ ΠΙΑ ΠΛΕΥΡΑ μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s.....	53
Σχήμα 5-11 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς πάνω από τις σκάλες στο ύψος διέλευσης των επιβατών.	54
Σχήμα 5-12 Χρονική εξέλιξη της εξάπλωσης καπνού για μετά από: a) 50s ,b) 150s, c)300s) , d) 450s.....	57
Σχήμα 5-13 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s	58
Σχήμα 5-14 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) σε απόσταση 2m από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s.....	59
Σχήμα 5-15 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) σε απόσταση -2m από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s.....	60
Σχήμα 5-16 Κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο για διαφορετικές χρονικές στιγμές στο ύψος διέλευσης των επιβατών.....	61
Σχήμα 5-17 Ισοϋψής κατανομή της κατακόρυφης ταχύτητας (v-Velocity) στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s	63
Σχήμα 5-18 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s	65
Σχήμα 5-19 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση 2 m από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s	66

Σχήμα 5-20 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση -2 m από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s	67
Σχήμα 5-21 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς πάνω από τις σκάλες στο ύψος διέλευσης των επιβατών.	68
Σχήμα 5-22 Χρονική εξέλιξη της εξάπλωσης καπνού για μετά από: a) 50s ,b) 150s, c)300s) , d) 450s.....	70
Σχήμα 5-23 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s	71
Σχήμα 5-24 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) σε απόσταση 2m από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s.....	72
Σχήμα 5-25 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) σε απόσταση -2m από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s.....	73
Σχήμα 5-26 Κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο για διαφορετικές χρονικές στιγμές στο ύψος διέλευσης των επιβατών.	74
Σχήμα 5-27 Ισοϋψής κατανομή της κατακόρυφης ταχύτητας (v-Velocity) στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s	76
Σχήμα 5-28 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s	78
Σχήμα 5-29 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση 2 m από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a) 50s, b) 150s, c) 300s, d) 450s	79
Σχήμα 5-30 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση -2 m από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s	80
Σχήμα 5-31 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς πάνω από τις σκάλες στο ύψος διέλευσης των επιβατών.	81

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4-1 Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων σκυροδέματος	26
Πίνακας 4-2 Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων χάλυβα	26
Πίνακας 4-3 Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων ανοξείδωτου χάλυβα	26
Πίνακας 4-4 Υπολογισμός κρίσιμης ταχύτητας (U_{crit})	37

Κατάλογος Εξιιώσεων

(2-1).....	7
(3-1).....	19
(3-2).....	20
(3-3).....	20
(2-1).....	7
(3-1).....	19
(3-10).....	21
(3-11).....	22
(3-12).....	36
(3-13).....	36
(3-5).....	20
(3-6).....	21
(3-7).....	21
(3-8).....	22
(3-9).....	22
(3-10).....	21
(3-11).....	22
(3-12).....	36
(3-13).....	36

Λίστα ακρωνυμίων

CFD	Computational Fluid Dynamics
LES	Large Eddy Simulation
FDS	Fire Dynamic Simulation
HRR	Heat Release Rate
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σε όλες πλέον τις μεγάλες πόλεις του κόσμου η αστικοποίηση και η αύξηση του πληθυσμού έχει επιφέρει την ανάγκη για μείωση του χρόνου των μετακινήσεων και μείωση των αποστάσεων. Όμως, η έλλειψη χώρου, η ανάγκη για περισσότερους δημόσιους χώρους και η μείωση της ηχορύπανσης στα μεγάλα αστικά κέντρα, οδήγησε στην κατακόρυφη ανάπτυξη των υπογείων έργων. Έργα όπως το μετρό της Αθήνας, αλλά και της Θεσσαλονίκης, η υπογειοποίηση της γραμμής του ΟΣΕ στην περιοχή των Σεπολίων και η υπογειοποίηση της νέας γραμμής Ρίο-Πάτρα, είναι μόνο μερικά από αυτά που υλοποιούνται αυτή τη στιγμή στην Ελλάδα. Τα τελευταία 20 χρόνια έχουν σημειωθεί πολλά ατυχήματα σε υπόγειους σταθμούς και σήραγγες, που είχαν σαν συνέπεια 500 θανάτους και πάνω από 460 τραυματίες. Υπάρχουν πολλά καταγεγραμμένα περιστατικά πυρκαγιάς. Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η πυρκαγιά που ξέσπασε από ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα στις 28 Οκτωβρίου του 1995 στο μετρό του Μπακού, στο οποίο έχασαν την ζωή τους 289 άτομα, από τους οποίους οι 286 ήταν επιβάτες (μεταξύ αυτών 28 παιδιά) και άλλοι 3 ήταν διασώστες Chen, Guo et al. (2003), Lönnemark, Claesson et al. (2012). Επίσης, κατά την διάρκεια της φωτιάς τραυματίστηκαν 270 άτομα. Άλλο ένα περιστατικό που σημειώθηκε ήταν η εμπρηστική ενέργεια σε αμαξοστοιχία στο σταθμό Τζουνγκάγνο στο Νταεγκού της Νότιας Κορέας, όπου 192 άνθρωποι έχασαν την ζωή τους και άλλοι 151 τραυματίστηκαν (Teodosiu, Ilie et al. 2015). Τέλος, η φωτιά στο σταθμό King's cross του Λονδίνου, που ξέσπασε σε μια ξύλινη σκάλα στο σταθμό, είχε σαν αποτέλεσμα τον θάνατο 31 ανθρώπων και τον τραυματισμό άλλων 100 (Chen, Guo et al. 2003). Στα παραπάνω θα πρέπει να προστεθούν κι άλλες φωτιές μικρότερης έντασης που έχουν ξεσπάσει σε οδικές ή σιδηροδρομικές σήραγγες, χωρίς όμως να υπάρχει κάποιο θύμα. Ένα άλλο πιο πρόσφατο περιστατικό, είναι η φωτιά που ξέσπασε σε αμαξοστοιχία στο μετρό της Νέας Υόρκης το 2020, με 1 νεκρό και 16 τραυματίες. Τέλος, οι 3 σοβαρές πυρκαγιές στη σήραγγα της Μάγχης, η πρώτη το 1996, η δεύτερη το 2006 και η τρίτη το 2008 που προκάλεσαν μόνο ελαφριούς τραυματισμούς στους επιβαίνοντες και υλικές

ζημιές. Η μελέτη και η ανάλυση τέτοιων ατυχημάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD) χωρίς να απαιτείται διεξαγωγή μεγάλης κλίμακας πειραμάτων, τα οποία εμπίπτουν σε περιορισμούς κατά την διεξαγωγή τους, λόγω και του μεγάλου κόστους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θα αναλύσουμε ένα ατύχημα σε έναν υπόγειο σταθμό τρένου. Ειδικότερα, θα μελετήσουμε την εξάπλωση της φωτιάς, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση η εστία της οποίας θα έχει ισχύ 10 MW, και την εξάπλωση των προϊόντων της στο χώρο του σταθμού με το λογισμικό προσομοίωσης Pyrosim. Στη συνέχεια, θα μελετήσουμε την επίδραση που έχουν οι μηχανές έλξης, οι οποίες είναι τοποθετημένες στα φρεάτια αερισμού, ώστε να πετύχουμε αποτελεσματικό αποκαπνισμό του σταθμού.

1.2 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Η συγκεκριμένη εργασία, στοχεύει στη μελέτη ενός αποτελεσματικού συστήματος αερισμού το οποίο θα λειτουργεί σε έναν υπόγειο σταθμό τρένου. Το προς μελέτη σύστημα θα διασφαλίζει τον επαρκή αερισμό του σταθμού, τόσο υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του, όσο και κατά την διάρκεια ενός ατυχήματος. Πιο συγκεκριμένα οι κύριοι στόχοι της παρούσας εργασίας διακρίνονται στα εξής:

- a) Τη μοντελοποίηση του συστήματος αερισμού του σταθμού και την ικανότητα αυτού να αντιμετωπίσει τον πλήρη αποκαπνισμό του σιδηροδρομικού σταθμού σε περίπτωση πυρκαγιάς .
- b) Την επίτευξη κατάλληλων συνθηκών κατά την διάρκεια της φωτιάς μέσα στο σταθμό, ώστε να γίνει ασφαλέστερη η εκκένωσή του.
- c) Τον έλεγχο της ταχύτητας του αέρα, τόσο για την οριζόντια συνιστώσα, όσο και για την κατακόρυφη, αλλά και των θερμοκρασιών που επικρατούν στο επίπεδο της αποβάθρας.

2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Σταθμοί τρένων

Οι σιδηροδρομικοί σταθμοί αποτελούν ένα από τα κύρια τμήματα ενός σιδηροδρομικού δικτύου. Είναι τα σημεία στα οποία γίνεται η διακίνηση του επιβατικού κοινού και σε αυτούς φιλοξενούνται όλες οι απαραίτητες εγκαταστάσεις για την λειτουργία τους αλλά και για την εξυπηρέτηση του κοινού. Ανάλογα με την χρήση τους μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω κατηγορίες :

A) Σε επιβατικούς σταθμούς, όπου γίνεται διακίνηση επιβατών, αποσκευών και δεμάτων (χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο σταθμός Λαρίσης που αποτελεί και τον σταθμό με την μεγαλύτερη επιβατική κίνηση στην Ελλάδα).



Σχήμα 2-1 Κεντρικός Σιδηροδρομικός Σταθμός Αθηνών «Σταθμός Λαρίσης» (Station exaples 1).

B) Σε εμπορικούς σταθμούς, που εξυπηρετούν μόνο εμπορική κίνηση (παράδειγμα αποτελεί το εμπορευματικό κέντρο στο Θριάσιο).

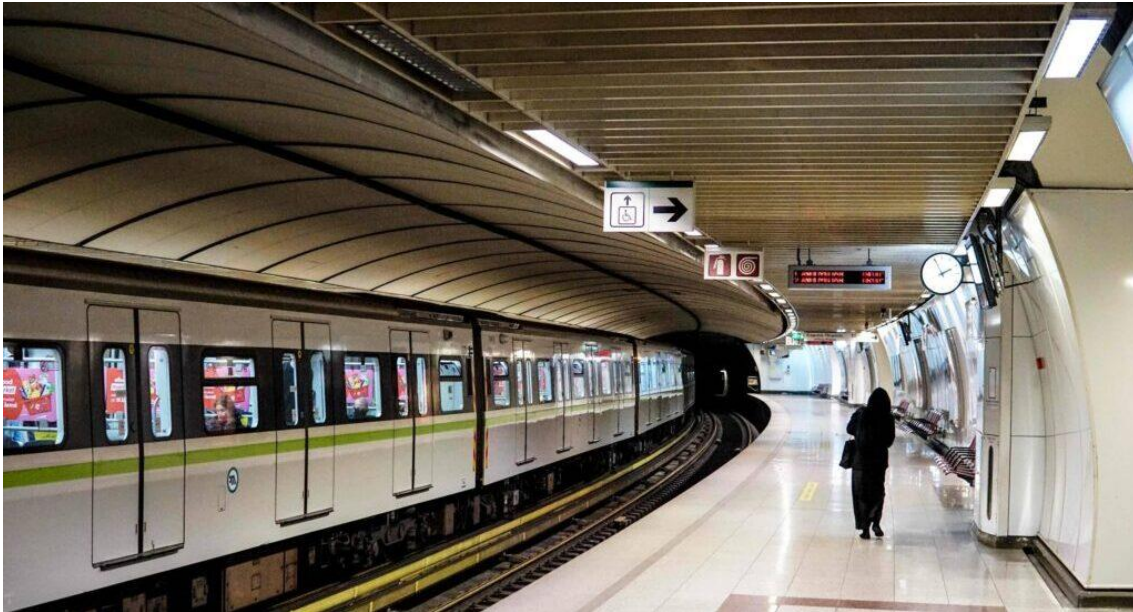


Σχήμα 2-2 Εμπορευματικό κέντρο Θριασίου (Station exaples 1).

Γ) Σε μικτούς σταθμούς, σε αυτούς τους σταθμούς εξυπηρετούνται τόσο η επιβατική όσο και η εμπορική κίνηση.

Εκτός από αυτές τις κύριες κατηγορίες σταθμών, υπάρχουν και σταθμοί λιμένων, σταθμοί βιομηχανικών ζωνών, σταθμοί εμπορευματοκιβωτίων κλπ.

Ανάλογα με το που βρίσκονται μπορεί να είναι υπόγειοι, όπως οι περισσότεροι σταθμοί του μετρό, όπως επίσης και η σχεδιαζόμενη διέλευση του σιδηρόδρομου από την Πάτρα, που θα περιλαμβάνει μεγάλα υπόγεια τμήματα. Επίσης, μπορεί να είναι υπέργειοι, όπως οι περισσότεροι υπάρχοντες σταθμοί του υφιστάμενου σιδηροδρομικού δικτύου.



Σχήμα 2-3 Υπόγειος σταθμός μετρό Σύνταγμα (Station exarples 1).

2.2 Περιγραφή συστημάτων αερισμού

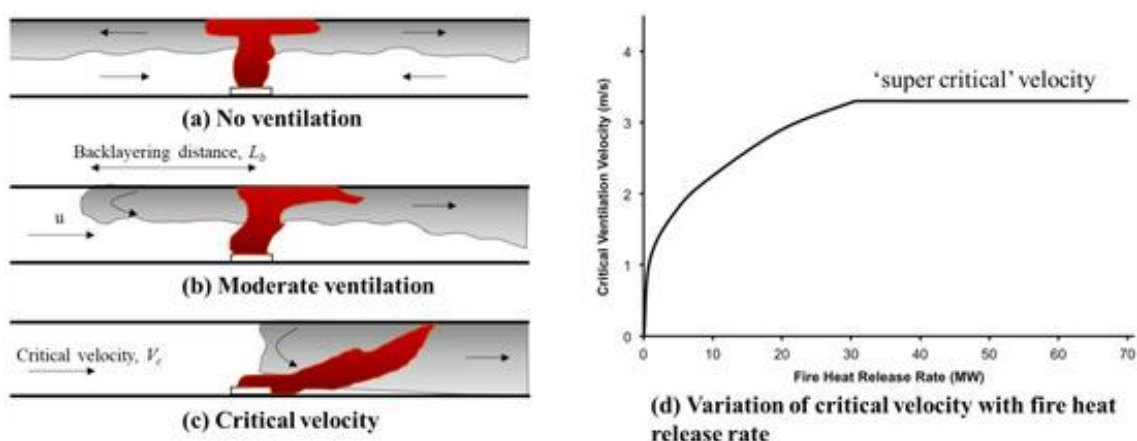
Σε όλα τα υπόγεια έργα υπάρχει η ανάγκη κατάλληλου αερισμού, τόσο σε κανονικές συνθήκες για την παροχή φρέσκου αέρα και την απομάκρυνση των αέριων ρύπων, όσο και σε έκτακτες περιπτώσεις, όπως μια πυρκαγιά, όπου ο σωστός σχεδιασμός ενός συστήματος αερισμού μπορεί να αποδειχθεί σωτήριος για τους επιβάτες που εκκενώνουν έναν υπόγειο χώρο. Στην περίπτωση των υπόγειων σταθμών, η ύπαρξη συστήματος αερισμού είναι απαραίτητη σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία, αλλά και από το πρότυπο NFPA (NFPA-130-2007). Σύμφωνα με το παραπάνω πρότυπο το σύστημα αερισμού θα πρέπει σε περίπτωση πυρκαγιάς να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε:

1. Να εξασφαλίζει τις κατάλληλες συνθήκες για την ασφαλή έξοδο, τόσο των επιβατών, όσο και των υπαλλήλων, από το σημείο της πυρκαγιάς.
2. Να παράγει ταχύτητα αέρα τέτοια ώστε να μην υπάρχει εμφάνιση του φαινομένου της αναστροφής του καπνού στα σημεία εξόδου (backlayering) .
3. Να μπορεί να φτάσει σε πλήρη λειτουργία σε χρόνο κάτω των 180 δευτερολέπτων.

4. Να φιλοξενεί τον μέγιστο αριθμό τρένων μεταξύ των κατακόρυφων φρεατίων.

2.2.1 Φαινόμενο αναστροφής του καπνού (backlayering)

Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που παρουσιάζεται σε μια μελέτη αερισμού, είναι το φαινόμενο αναστροφής του καπνού (backlayering). Κατά την διάρκεια μιας φωτιάς, όπου ο καπνός διαδίδεται μέσα σε μια σήραγγα ή σε έναν υπόγειο χώρο, υπάρχει εμφάνιση αυτού του φαινομένου, όταν ο καπνός ταξιδεύει αντίθετα από τη ροή της φωτιάς Σχήμα 2-4. Η αναστροφή του καπνού σε μια σήραγγα ή σε έναν υπόγειο χώρο επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία εκκένωσης και το έργο των σωστικών συνεργείων σε αυτούς. Ακόμα και με την ύπαρξη μηχανικού αερισμού μπορεί να εμφανιστεί αναστροφή του καπνού, εάν δεν υπάρξει ένας επαρκής ρυθμός ροής αέρα. Αυτή η επαρκής ροή αέρα είναι γνωστή ως κρίσιμη ταχύτητα αερισμού (V_c) (Chen, Yuen et al. 2022).



Σχήμα 2-4 Απεικόνιση του φαινομένου αναστροφής του καπνού σε μια σήραγγα (a-c) και (d) της κρίσιμης ταχύτητας αερισμού για διαφορετικές τιμές θερμικής ισχύος (Chen, Yuen et al. 2022).

Για τον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας αερισμού θα πρέπει να γνωρίζουμε την θερμική ισχύ της πυρκαγιάς Σχήμα 2-4(d), τις διαστάσεις της σήραγγας, την κλίση της και τον αριθμό Froude (Fr).

Από το Σχήμα 2-4(d) παρατηρούμε μια εξομάλυνση της καμπύλης (από την τιμή 3 m/s και άνω), όπου δεν χρειάζεται αύξηση της ταχύτητας αερισμού για τον έλεγχο του καπνού, ανεξάρτητα της θερμικής ισχύος της φωτιάς.

Για τον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας αερισμού με βάση το πρότυπο NFPA για την πυρασφάλεια σε οδικές σήραγγες, γέφυρες και άλλους αυτοκινητόδρομους περιορισμένης πρόσβασης Association (2011), χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος **(2-1)**. Η προσέγγιση του NFPA προσφέρει προδιαγραφές που βασίζονται στην απόδοση, επιτρέποντας μεγαλύτερη ευελιξία στα σχέδια πυρασφάλειας.

$$u_{crit} = k g k_1 \left(\frac{g Q \dot{H}}{\rho_0 c_p T A} \right)^{1/3} \quad (2-1)$$

Οι όροι της εξίσωσης θα αναλυθούν περαιτέρω σε παρακάτω κεφάλαιο.

Όταν αναφερόμαστε στον όρο «αερισμός» εννοούμε την εξαναγκασμένη ή μη κυκλοφορία του αέρα. Τα συστήματα αερισμού μπορούν να καταταχθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- 1) Συστήματα φυσικού αερισμού.
- 2) Συστήματα μηχανικού αερισμού.

2.2.2 Συστήματα φυσικού αερισμού

Συστήματα φυσικού αερισμού συναντάμε σε αστικές σήραγγες και σε υπόγειους χώρους μικρών διαστάσεων. Η απουσία μηχανολογικού εξοπλισμού είναι ένας σημαντικός παράγοντας που τα καθιστά ελκυστικά λόγω του μικρού οικονομικού κόστους εγκατάστασής τους. Στην περίπτωση των υπόγειων σταθμών, όπου υπάρχουν ελάχιστα ανοίγματα, η προσαγωγή φρέσκου αέρα και η απαγωγή των αέριων ρύπων καθίσταται αρκετά δύσκολη. Η χρήση κατακόρυφων φρεατίων, όπου το στόμιο της αναρρόφησης θα βρίσκεται εντός του σταθμού και αυτό της κατάθλιψης στον εξωτερικό χώρο, είναι ένας από τους κύριους τρόπους αερισμού (Wan, Gao et al. 2019). Ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την λειτουργία ενός συστήματος φυσικού αερισμού είναι οι μετεωρολογικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής. Οι συνθήκες αυτές είναι το αιολικό δυναμικό της περιοχής, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η υγρασία της ατμόσφαιρας κλπ. Η διαφορά πίεσης ανάμεσα στο στόμιο αναρρόφησης και κατάθλιψης εξαιτίας της

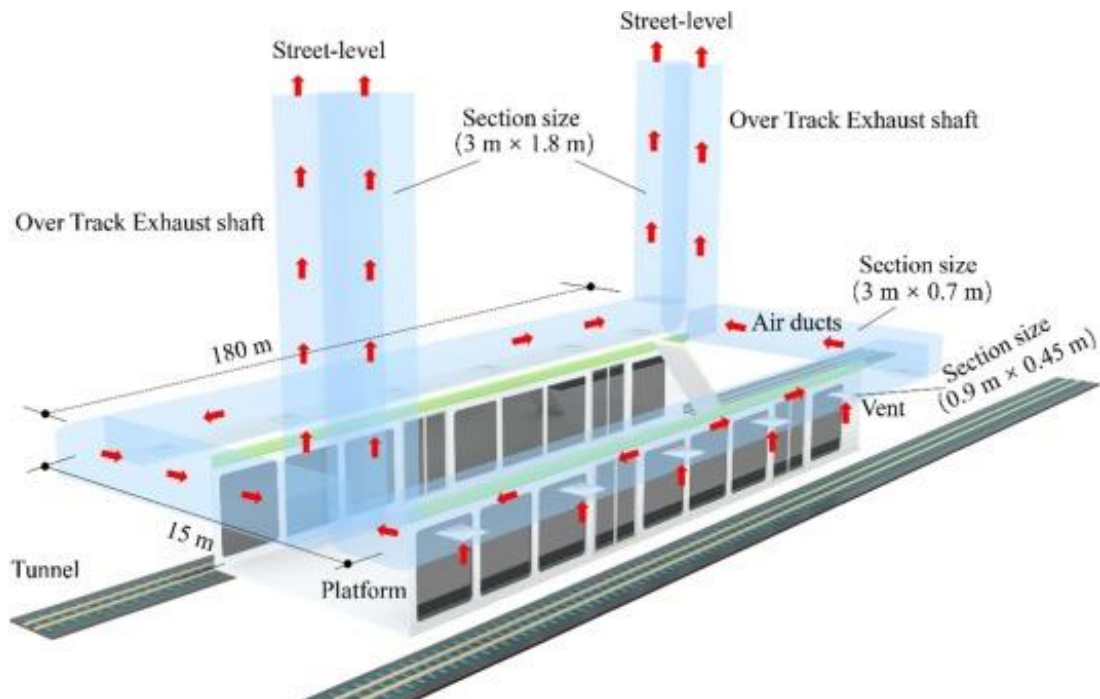
υψομετρικής διαφοράς είναι μια από τις πιο σημαντικές συνθήκες, ώστε να γίνει ο αερισμός του χώρου. Επίσης η διαφορά πίεσης, λόγω των κινούμενων μέσων (βαγονιών) εντός της σήραγγας, που λειτουργούν ως «έμβολα» και κινούν τον αέρα (φαινόμενο εμβόλου), είναι μια ακόμα συνθήκη για την επίτευξη αερισμού ενός υπόγειου σταθμού ή μίας σήραγγας. Έτσι, έχουμε σαν αποτέλεσμα μια μικρή αλλαγή στις εξωτερικές συνθήκες να μεταβάλλει εντελώς τη σχεδίασή μας.

2.2.3 Συστήματα μηχανικού αερισμού

Λόγω των περιορισμών στη χρήση φυσικών συστημάτων αερισμού, κυρίως σε υπόγειους σταθμούς, η χρήση των μηχανικών συστημάτων είναι απαραίτητη για να διασφαλιστούν οι κατάλληλες συνθήκες εντός του σταθμού. Τα κύρια συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

- Σύστημα μηχανικού αερισμού με ανοίγματα πάνω από τις ράγες (Over Track Exhaust)

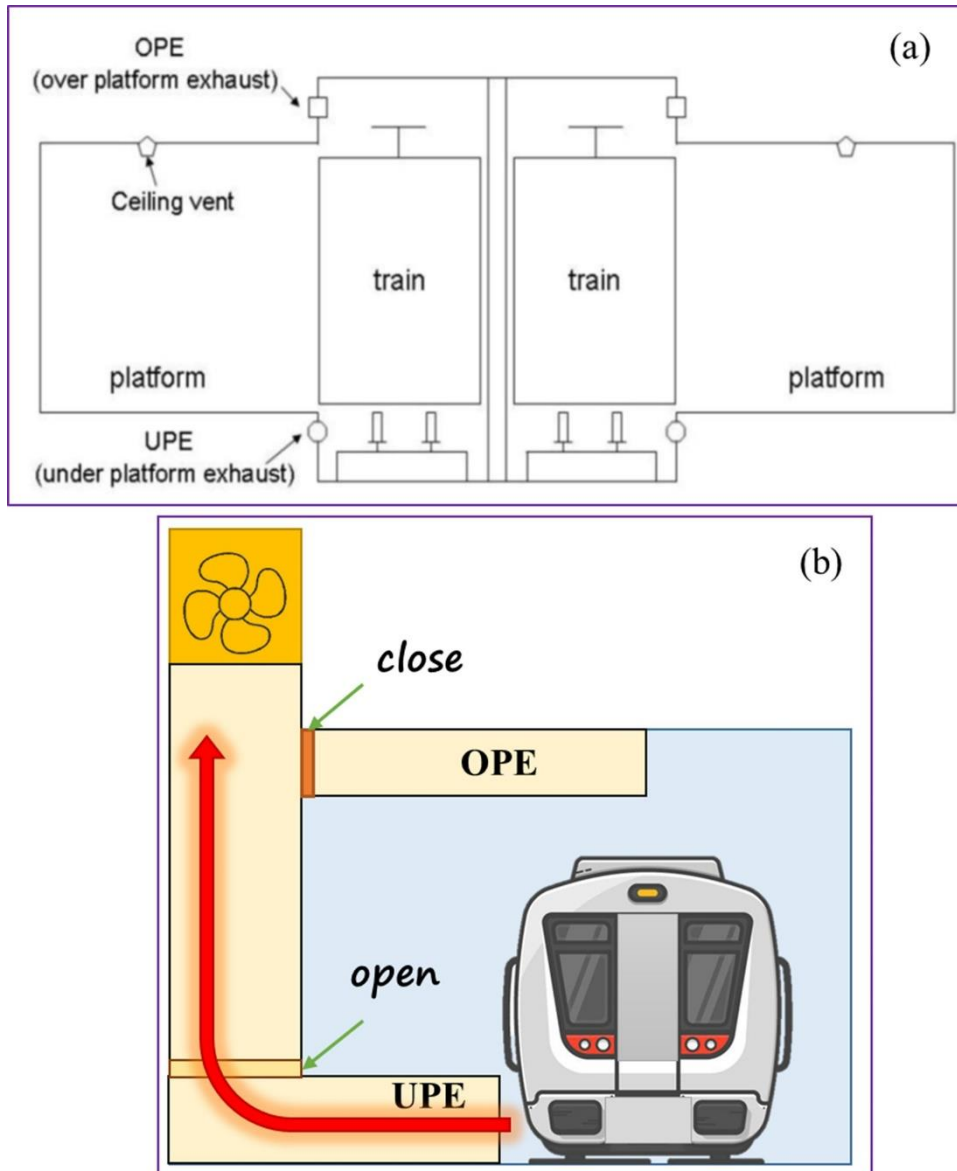
Στο σύστημα αυτό, τα ανοίγματα που υπάρχουν πάνω και κατά μήκος των ραγών απάγουν τον αέρα και μέσω αεραγωγών τον οδηγούν σε φρεάτια εξαερισμού. Εκτός από την απαγωγή καπνού σε περίπτωση πυρκαγιάς, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του σταθμού, απάγουν την θερμότητα που παράγεται από το σύστημα κλιματισμού των συρμών όση ώρα βρίσκονται εντός του σταθμού, αλλά και των διαφόρων ρύπων (Zhao, Xiao et al. 2021).



Σχήμα 2-5 Σύστημα μηχανικού αερισμού με ανοίγματα πάνω από τις ράγες (Zhao, Xiao et al. 2021).

- Σύστημα μηχανικού αερισμού με ανοίγματα κάτω από την πλατφόρμα (Under Platform Exhaust)

Κατά τον σχεδιασμό των συστημάτων αερισμού και κλιματισμού, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που λαμβάνεται υπόψιν, είναι η έκλυση θερμότητας από το σύστημα πέδησης των συρμών. Για την απομάκρυνση της θερμότητας, αλλά και των μικροσωματιδίων που παράγονται από την τριβή, υπάρχουν ανοίγματα κατά μήκος της αποβάθρας, τα οποία βρίσκονται στο ύψος των τροχών (Izadi, Mehrabian et al. 2022). Σε συνθήκες πυρκαγιάς το σύστημα έχει σαν κύριο ρόλο την απαγωγή του καπνού σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα συστήματα αερισμού του σταθμού.



Σχήμα 2-6 Σύστημα μηχανικού αερισμού με ανοίγματα κάτω από την πλατφόρμα (UPE) (Izadi, Mehrabian et al. 2022).

- Σύστημα μηχανικού αερισμού σε σήραγγα με χρήση ανεμιστήρων jet fans (Tunnel ventilation Fan)

Σε περίπτωση ατυχήματος, πχ μια πυρκαγιά, το σύστημα αερισμού της σήραγγας σε συνεργασία με τα υπόλοιπα συστήματα αερισμού του σταθμού απομακρύνει τον καπνό ώστε να εξασφαλίσει τις κατάλληλες συνθήκες διαφυγής για τους επιβάτες. Ανεμιστήρες τύπου jet fan που είναι τοποθετημένοι εντός της σήραγγας αλλά σε κοντινή απόσταση από την πλατφόρμα, απάγουν τον καπνό από την πλατφόρμα και τον διαχέουν στην σήραγγα (Meng, Hu et al. 2014).



Σχήμα 2-7 Σύστημα μηχανικού αερισμού σε σήραγγα με χρήση ανεμιστήρων jet fans (TVF) (Zitron SA. 2023 1).

2.3 Μελέτη φωτιάς σε σταθμό

2.3.1 Γενικά

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λάβουμε υπόψιν στη μελέτη και στο σχεδιασμό των υπογείων έργων, είναι ο τομέας της ασφάλειας. Τα ατυχήματα που έχουν συμβεί έχουν αποδείξει, πως ο σωστός σχεδιασμός και τα κατάλληλα μέτρα προστασίας που εφαρμόζονται στις σύγχρονες κατασκευές μπορούν να αποδειχθούν σωτήρια. Ο μεγαλύτερος κίνδυνος σε αυτά τα περιστατικά είναι το πυκνό νέφος καπνού και τα τοξικά αέρια, που δυσκολεύουν την όραση και προκαλούν ασφυξία στους επιβάτες κατά την διάρκεια της εκκένωσης των σταθμών (Chen, Long et al. 2022). Λόγω της φύσης των υπόγειων έργων οι άνθρωποι που βρίσκονται σε αυτά θα πρέπει να νιώθουν ασφάλεια κατά την παραμονή τους, ειδικά σε υπόγειους σταθμούς τρένων και μετρό όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση αυτών και η πρόκληση ενός ατυχήματος θα είχε οδυνηρές συνέπειες. Ένα πολύ ανησυχητικό στοιχείο είναι ότι τα συστήματα μετρό που ξεκίνησαν να λειτουργούν πριν τα μέσα του 1980 (Μετρό του Λονδίνου, του Παρισιού αλλά και άλλων Ευρωπαϊκών πόλεων) δεν

έχουν δώσει την απαραίτητη σημασία στα συστήματα πυρασφάλειας. Αυτό έχει οδηγήσει στην αναβάθμιση αυτών ώστε να συμμορφώνονται με τα διεθνή πρότυπα [Teodosiu, Ilie et al. (2015)]. Όλα αυτά τα ατυχήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν δημιουργήσει την ανάγκη μελέτης, ώστε να υπάρξει καλύτερος σχεδιασμός για την αποφυγή παρόμοιων ατυχημάτων μελλοντικά. Πολλές ερευνητικές εργασίες έχουν γίνει πάνω στο θέμα του αερισμού υπόγειων έργων στην περίπτωση ατυχήματος, τόσο για σταθμούς τρένων, όσο και για σήραγγες [Chen, Long et al. (2022), Chen, Guo et al. (2003), Lönnemark, Claesson et al. (2012)]. Οι μελέτες αυτές έχουν γίνει είτε πειραματικά (μεγάλης και μικρής κλίμακας), είτε υπολογιστικά.

2.3.2 Πειραματικές Μελέτες

Οι πειραματικές μελέτες είναι ένας τρόπος για να μελετήσουμε την εξέλιξη της φωτιάς αλλά και την ροή του καπνού μέσα σε ένα τούνελ ή ένα σταθμό μετρό υπό την επίδραση φυσικών συνθηκών. Το μεγάλο μειονέκτημα είναι ότι αυτού του είδους τα πειράματα απαιτούν πολλούς πόρους (προσωπικό, υλικά, εξοπλισμό, μέσα κτλ.). Αυτός είναι και ο λόγος που οι πειραματικές μελέτες είναι περιορισμένες [Lönnemark, Claesson et al. (2012), Long, Liu et al. (2020)]. Τα πειράματα αυτά μπορούν να αποτελέσουν σημείο αναφοράς και σύγκρισης για τις προσομοιώσεις που γίνονται με υπολογιστικές μεθόδους. Αυτού του είδους μελέτες χωρίζονται σε πειραματικές μελέτες μεγάλης κλίμακας και σε μελέτες μικρής κλίμακας.

- Πειραματικές μελέτες μεγάλης κλίμακας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι πειραματικές μελέτες έχουν μεγάλο κόστος, ειδικά όταν πρόκειται για μεγάλης κλίμακας. Είναι όμως αναγκαία η διεξαγωγή τέτοιων πειραμάτων για την συλλογή δεδομένων αλλά και για την μελέτη της εξέλιξης της φωτιάς κάτω από πραγματικές συνθήκες. Ένα πολύ σημαντικό ερευνητικό πρόγραμμα αποτελεί το “METRO project” (<http://www.metroproject.se/>) στο οποίο συμμετείχαν πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα και πυροσβεστικά τμήματα της Σουηδίας. Σε ένα από αυτά τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε μια αμαξοστοιχία (γερμανικών προδιαγραφών) στην οποία έβαλαν μια πυρκαγιά 35 MW. Στη συνέχεια

έγιναν άλλα δυο πειράματα με πυρκαγιές των 13 MW και 43 MW σε διαφορετικού τύπου αμαξοστοιχίες [Lönnermark, Claesson et al. (2012)]. Οι [Qiu, Long et al. (2021)] μελέτησαν την διάδοση του καπνού σε ένα σταθμό μετρό για τρία διαφορετικά σενάρια αερισμού στον οποίο οι πόρτες ασφαλείας ήταν ανοιχτές. Με τον φυσικό αερισμό η διάδοση του καπνού επηρεαζόταν από την ροή του αέρα που επικρατούσε στο κάθε σημείο μέτρησης. Αντίθετα, μόλις ενεργοποιήθηκε ο μηχανικός αερισμός, τα αποτελέσματα ήταν εμφανώς καλύτερα στην κατανομή του καπνού στον σταθμό, με αποτέλεσμα να γίνεται ασφαλέστερη η εκκένωσή του. Επίσης οι [Weng, Yu et al. (2014)] μελέτησαν την κατανομή θερμοκρασίας στην οροφή μιας σήραγγας για τρία διαφορετικά μεγέθη έντασης πυρκαγιάς. Στη συνέχεια με την χρήση του κώδικα FDS διεξήγαγαν διάφορες προσομοιώσεις οι οποίες συμφωνούσαν με τα πειραματικά δεδομένα που είχαν προκύψει. Τέλος οι Long, Liu et al. 2020 εκτέλεσαν μια σειρά από πειράματα σε έναν υπόγειο σταθμό μετρό για τέσσερα διαφορετικά σενάρια φωτιάς, στα οποία μελέτησαν την κατανομή της θερμοκρασίας (τόσο κατακόρυφα, όσο και κατά μήκος του σταθμού), το ύψος του στρώματος καπνού αλλά και την αποτελεσματικότητα του συστήματος αερισμού.

- Πειραματικές μελέτες μικρής κλίμακας

Λόγω των περιορισμών στις πειραματικές μελέτες μεγάλης κλίμακας, πολλοί μελετητές έχουν επιλέξει τις πειραματικές μελέτες μικρής κλίμακας. Αυτές μπορούν να γίνουν ακόμα και σε εργαστήρια με πολύ μικρότερες απαιτήσεις σε πόρους. Μια τέτοια έκαναν οι Li, Liu et al. (2022), όπου χρησιμοποίησαν μια σήραγγα σε κλίμακα για να μελετήσουν την επίδραση που έχει ο διαμήκης αερισμός στα χαρακτηριστικά και στην διάδοση της φωτιάς μέσα σε αυτή. Τη σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών δεδομένων έκαναν οι Hu, Fong et al. (2007), όπου εξέτασαν την διάδοση του καπνού και την μεταφορά του μονοξειδίου του άνθρακα από μια φωτιά 0,75 MW και μια 1,6 MW, σε πρώτο χρόνο με το πρόγραμμα FDS και στη συνέχεια με μια πειραματική διάταξη, με τα αποτελέσματα να εμφανίζουν αρκετά καλή ταύτιση. Επίσης οι Zhang, Tan et al. (2023) σε μια σειρά από πειράματα που έγιναν σε μια σήραγγα διπλής κατεύθυνσης με κλίμακα 1/10, μελέτησαν την επίδραση του φαινομένου του

πιστονιού στη διάδοση του καπνού, τη διακύμανση της θερμοκρασίας και το ρυθμό διάδοσης της φωτιάς σε σχέση με την ταχύτητα μιας αμαξοστοιχίας, η οποία καιγόταν εντός αυτής.

2.3.3 Υπολογιστικές Μελέτες

Η ανάπτυξη της υπολογιστικής ρευστομηχανικής τις τελευταίες δεκαετίες έδωσε την δυνατότητα προσέγγισης με μεγάλη ακρίβεια φυσικών φαινομένων, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για την διεξαγωγή πειραμάτων μικρής ή μεγάλης κλίμακας. Τα κύρια μοντέλα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε δυο κατηγορίες. Οι προσομοιώσεις με την μέθοδο RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes) και οι προσομοιώσεις με την μέθοδο LES (Large- Eddy Simulations).

- Μοντέλο RANS

Στο μοντέλο Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) οι εξισώσεις είναι μια απλοποιημένη μορφή των γενικών εξισώσεων Navier-Stokes. Στις εξισώσεις RANS, η λύση σταθερής κατάστασης αποσυνδέεται από τις χρονικά μεταβαλλόμενες διακυμάνσεις στο σύστημα, οι τελευταίες από τις οποίες θα αντιπροσωπεύουν τις αναταράξεις σε διαφορετικά πεδία ροής. Περαιτέρω χειρισμοί των αποτελεσμάτων RANS και η εφαρμογή εμπειρικών μοντέλων αναταράξεων αποδίδουν πολλά άλλα μοντέλα CFD, μερικά από τα οποία έχουν περάσει σε εφαρμογές ανοιχτού κώδικα και εμπορικές εφαρμογές CFD. Οι Guo and Zhang (2014) σύγκριναν τα δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων, για δυο διαφορετικά μεγέθη σήραγγων και τα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων για τον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας αποκαπνισμού. Πιο συγκεκριμένα, έγινε χρήση των αποτελεσμάτων του εμπορικού κώδικα Fluent και του κώδικα FDS. Τα αποτελέσματα τόσο του υπολογιστικού, όσο και τα πειραματικά συμφωνούν χωρίς μεγάλες αποκλίσεις από την αναλυτική λύση με κάποιες μικρές αποκλίσεις να εμφανίζονται στα αποτελέσματα του FDS για μικρά ύψη σήραγγας. Με την χρήση του OpenFoam οι Amouzandeh, Zeiml et al. (2014) υπολόγισαν το θερμοκρασιακό προφίλ σε δύο διαφορετικές διατομές σήραγγας (ορθογώνιας διατομής και τοξωτής διατομής) για μονής και διπλής σιδηροδρομικής γραμμής κάτω από διαφορετικές ταχύτητες αερισμού. Ο

υπολογισμός του θερμοκρασιακού προφίλ είναι πολύ σημαντικός ώστε να προβλεφθεί η στατική ικανότητα της πλάκας σκυροδέματος κάτω από αυτές τις συνθήκες.

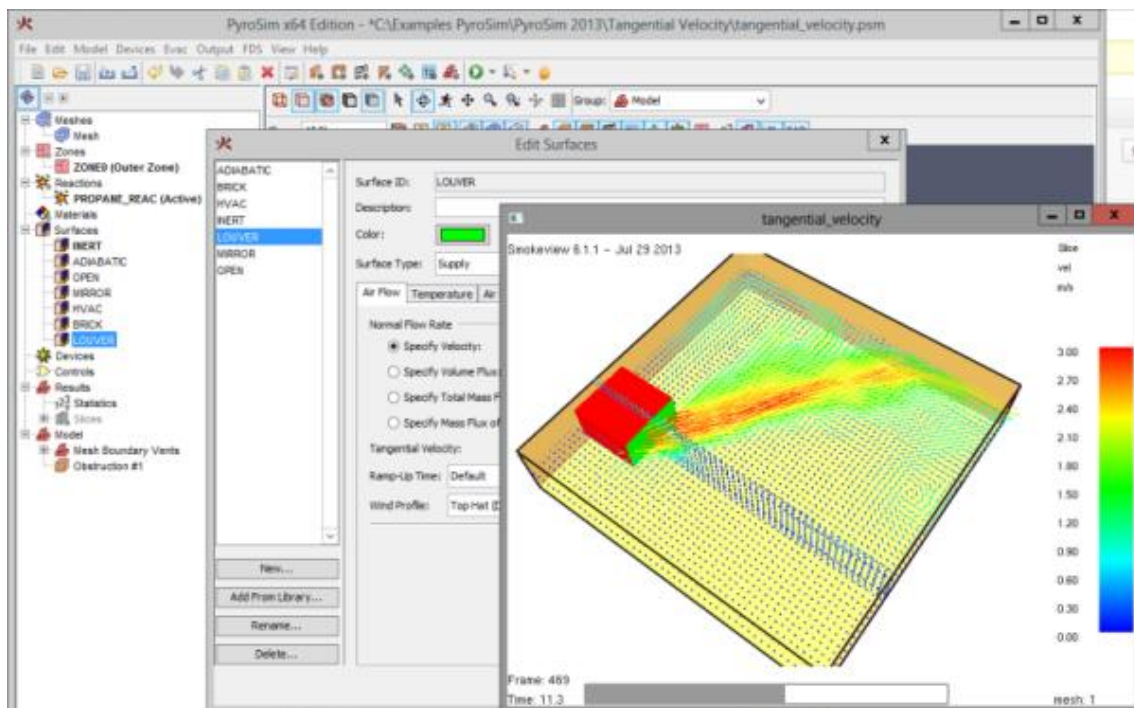
- Μοντέλο LES

Σε μια προσομοίωση CFD, υπάρχουν ορισμένα φαινόμενα που εμφανίζονται μόνο σε κλίμακες μικρού μήκους και μπορεί να μην κυριαρχούν στη συμπεριφορά του συστήματος στο σύνολό του. Το μοντέλο τύρβης μεγάλων δινών LES αγνοεί τα φαινόμενα μικρότερης κλίμακας σε μια προσομοίωση CFD, ενώ εστιάζει σε κλίμακες μεγαλύτερου μήκους. Με αρκετά λεπτό πλέγμα και χρονική ανάλυση, είναι δυνατό να παραχθούν πολύ ακριβή αποτελέσματα σε μια προσομοίωση, που εστιάζει μόνο σε χωρικά μεγαλύτερες δίνες που κυριαρχούν στην τυρβώδη ροή και στο μηχανικό σύστημα συνολικά. Το πρόγραμμα FDS λύνει τα τυρβώδη μεγέθη του πεδίου και βασίζεται στο μοντέλο LES. Οι Zhu, Wei et al. (2017) με την χρήση του προγράμματος FDS και την διεξαγωγή πειράματος, στο τμήμα όπου οι συρμοί του μετρό διασταυρώνονται, έκαναν μια εκτίμηση του μοντέλο εξαερισμού καθώς και της θέσης του πιο δυσμενούς ανοίγματος απομάκρυνσης καπνού για την ασφάλεια των επιβατών σε συνθήκες πυρκαγιάς. Με την χρήση του FDS οι Zhao, Liu et al. (2018) ανέλυσαν την επίδραση της ημι-τοξοτής διατομής μιας σήραγγας στην κίνηση του καπνού σε συνθήκες πυρκαγιάς. Επίσης η διεξαγωγή ενός πειράματος μεγάλης κλίμακας και η αριθμητική προσομοίωση με το πρόγραμμα FDS διεξήχθη από τους [Liu, Liu et al. (2020)] για την περίπτωση πυρκαγιάς σε έναν σταθμό. Η επίδραση του συστήματος αερισμού και η ταχύτητα της ροής του καπνού στη σκάλα διερευνήθηκαν, όταν η πηγή πυρκαγιάς βρισκόταν κοντά σε αυτή με την χρήση του FDS.

3 Υπολογιστική προσομοίωση

3.1 Γενικά

Ο σωστός σχεδιασμός της πυροπροστασίας σε ένα έργο αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι κατά τη μελέτη του. Η αδυναμία εκτέλεσης πραγματικών πειραμάτων μεγάλης ή μικρής κλίμακας λόγω υψηλού κόστους, αλλά και η ανάπτυξη των υπερυπολογιστών, έχει οδηγήσει τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη προγραμμάτων προσομοίωσης πυρκαγιών, αλλά και προγραμμάτων εκκένωσης. Τα προγράμματα αυτά έχουν σαν σκοπό την προσομοίωση της φωτιάς, τη μελέτη αερισμού και την εκκένωση κλειστών αλλά και ανοιχτών χώρων. Πολλές μελέτες έχουν γίνει με τη χρήση τέτοιων προγραμμάτων, τόσο σε εκπαιδευτικό, όσο και σε επαγγελματικό επίπεδο. Παραδείγματα χώρων που έχουν μελετηθεί με τέτοια προγράμματα είναι εμπορικά κέντρα, γήπεδα, συγκροτήματα γραφείων και υπόγεια έργα (σήραγγες, σταθμοί μετρό, κ.α.). Για την παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα προσομοίωσης Pyrosim της Thunderhead Engineering που αποτελεί ένα από τα πιο εμπορικά διαδεδομένα σε αυτό τον τομέα.



Σχήμα 3-1 Γραφικό περιβάλλον Pyrosim και Smokeview

3.2 Εισαγωγή

Το PyroSim είναι ένα γραφικό περιβάλλον για τον χρήστη, το οποίο βασίζεται στον κώδικα FDS (Fire Dynamics Simulator). Τα μοντέλα FDS μπορούν να προβλέψουν την συγκέντρωση του καπνού, της θερμοκρασίας, του μονοξειδίου του άνθρακα και άλλων ουσιών κατά τη διάρκεια πυρκαγιών. Επίσης, μπορούν να υπολογιστούν το προφίλ της ταχύτητας του καπνού, όπως και το προφίλ της θερμοκρασίας για τον προς μελέτη χώρο. Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του FDS χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Smokeview. Η ανάπτυξη του προγράμματος PyroSim έχει πραγματοποιηθεί από την εταιρεία Thunderhead Engineering, ενώ το FDS αναπτύχθηκε από το National Institute of Standards and Technology.

Το FDS προσομοιώνει σενάρια πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας υπολογιστική δυναμική ρευστών (CFD, Computational Fluid Dynamics) βελτιστοποιημένη για χαμηλές ταχύτητες, θερμικά καθοδηγούμενης ροής. Με τον κώδικα FDS γίνεται αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, με έμφαση στις θερμικές ροές χαμηλών ταχυτήτων ($Ma < 0.3$), με έμφαση τη μεταφορά θερμότητας και καπνού. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιείται για την επίλυση των

μερικών παραγώγων των εξισώσεων διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Ο βασικός αλγόριθμος είναι μια μέθοδος επίλυσης τύπου πρόβλεψης-διορθωσης (predictor-corrector), με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών δεύτερης τάξης ακριβής στο χώρο και στο χρόνο. Οι αναταράξεις αντιμετωπίζονται μέσω της Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (LES). Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η εκτέλεση μιας άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης (DNS, Direct Numerical Simulation) εάν το προς μελέτη αριθμητικό πλέγμα είναι αρκετά λεπτό.

Με το κώδικα FDS, μπορούμε να λύσουμε τα τυρβώδη μεγέθη του πεδίου, με το μοντέλο των μεγάλων δινών LES (Large Eddy Simulation) (McGrattan 2005). Το μοντέλο αυτό έχει τη δυνατότητα να επιλύει σ' ένα ροϊκό πεδίο τις δίνες μεγάλης κλίμακας, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη τυρβώδη κινητική ενέργεια και επιδρούν στην ανάπτυξη αυτού. Αντίθετα, οι μικρότερες δίνες είναι υπεύθυνες τόσο για την απορρόφηση όσο και για την καταστροφή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Έτσι μπορούμε εύκολα να μοντελοποιήσουμε και να υπολογίσουμε τις μέσες τιμές των δινών μικρής κλίμακας, με την εφαρμογή χωρικού φίλτρου ανάλογα με το μέγεθός τους. Στο FDS για τη μοντελοποίηση των μεγάλων δινών χρησιμοποιείται το μοντέλο Smagorinsky.

Τα προγράμματα αυτά έχουν βασιστεί στην εφαρμογή που έχει αναπτυχθεί από τον εθνικό οργανισμό πιστοποίησης και τεχνολογίας των Η.Π.Α. (NIST, National Institute of Standards and Technology) και έχουν σαν σκοπό τη δημιουργία ενός καλύτερου γραφικού περιβάλλοντος για τον χρήστη, με στόχο την ευκολότερη ανάπτυξη των εφαρμογών για το πρόγραμμα FDS.

3.3 Μαθηματικό μοντέλο

Θεμελιώδεις εξισώσεις

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών δεύτερης τάξης χρησιμοποιείται στην αριθμητική προσέγγιση των μερικών παραγώγων των εξισώσεων διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις διατήρησης που επιλύονται στον κώδικα FDS:

α) Εξίσωση συνέχειας της μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3-1)$$

β) Εξίσωση της Διατήρησης Ορμής

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_{a,i} + \dot{m}_b''' u_{b,i} \quad (3-2)$$

Οι Rehm και Baum (McGrattan, Baum et al. 1998) σε παρατηρήσεις που έκαναν σε εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας όπως η φωτιά, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χωρική και η χρονική επίλυση της πίεσης p , μπορεί να αποσυντεθεί σε μια πίεση υποβάθρου (background), $\bar{p}(z, t)$, συν μια διαταραχή, $\tilde{p}(x, y, z, t)$ όπου μόνο η πίεση υποβάθρου που διατηρείται στην εξίσωση κατάσταση (ιδανικός νόμος για το αέριο):

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

Σαν 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

Σαν δεύτερη συνέπεια για τις ροές 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 :

$$\frac{\partial(\rho h_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \dot{q}'' \quad (3-4)$$

\dot{q}''' : είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου

Ο όρος \dot{q}'' είναι η ροή θερμότητας από ακτινοβολία και από συναγωγή και ισούται με:

$$\dot{q}'' = -k\nabla T - \sum_a h_{s,a} \rho D_a \nabla Y_a + \dot{q}_r'' \quad (3-5)$$

K: συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

\dot{q}_r'' : η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας σε στερεή επιφάνεια.

Για τον υπολογισμό της απόκλισης της ταχύτητας από την εξίσωση (3.4)

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{\rho h_s} \left[\frac{D}{Dt} (\bar{p} - \rho h_s) + \dot{q}''' + \dot{q}_r''' - \dot{q}_r'' - \nabla \cdot \dot{q}'' \right] \quad (3-6)$$

Η επέκταση των παραγώγων στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης (3-6) παράγει μια αρκετά περίπλοκη έκφραση για την απόκλιση που περιλαμβάνει τους όρους προέλευσης και διάχυσης από τη μάζα, το είδος και την ενέργεια εξισώσεις συντήρησης. Η σημασία του για τον συνολικό αλγόριθμο είναι ότι μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μόνο το θερμοδυναμικές μεταβλητές ρ , Z και ρ . Όπως φαίνεται στη συνέχεια, ο τρόπος προώθησης της ταχύτητας ροής στο χρόνο είναι η πρώτη εκτίμηση των θερμοδυναμικών μεταβλητών. Σε επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της απόκλισης και στη συνέχεια θα λυθεί μια εξίσωση για την πίεση που θα εγγυηθεί ότι η απόκλιση της τρέχουσας ταχύτητας είναι ίδια σε αυτό που υπολογίζεται μόνο από τις θερμοδυναμικές μεταβλητές

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

$$\frac{\partial(\rho Z_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Z_\alpha \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Z_\alpha) + \dot{m}_\alpha''' \quad (3-7)$$

3.4 Μοντέλο Τύρβης στον κώδικα FDS

Το 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.

Στην εξίσωση της Διατήρησης Ορμής

$$\frac{\partial(\overline{\rho u_i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b''' u_{b,i}} \quad (3-8)$$

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

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b''' \tilde{u}_{b,i}} \quad (3-9)$$

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

Ο όρος τ_{ij} αναφέρεται στον τανυστή τάσεων ο οποίος ισούται με:

$$\tau_{ij} = \mu \left(2\bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}) \right) \quad (3-20)$$

όπου δ_{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 μ είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

3.5 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 ρ , Y_α και \bar{p}_m στο επόμενο χρονικό βήμα με χρήση ρητού σχήματος Euler. Για παράδειγμα η πυκνότητα εκτιμάται μέσω της σχέσης:

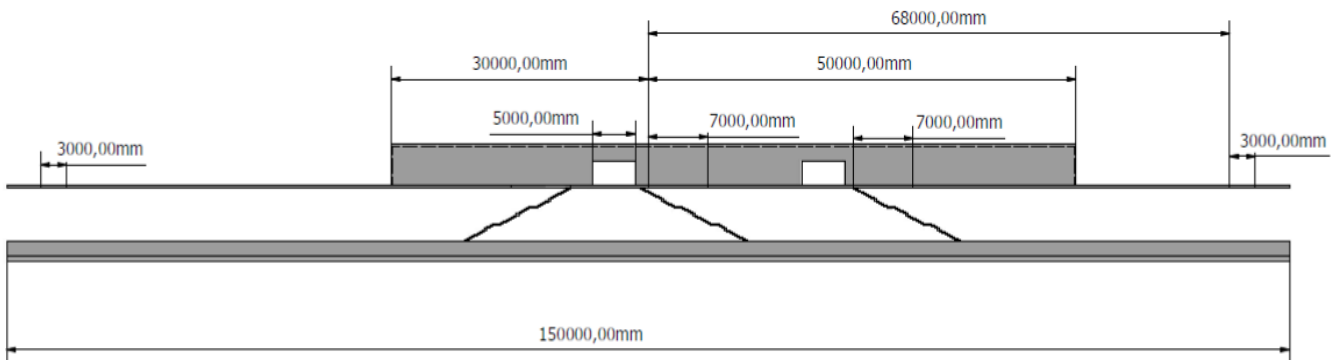
$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\delta t} + \nabla \cdot \rho^n \bar{u}^n = 0 \quad (3-31)$$

3. Ανταλλαγή των τιμών ρ^* και Y_α^* στα όρια των πλεγμάτων.
4. Εφαρμογή οριακών συνθηκών για ρ^* και Y_α^* .
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.

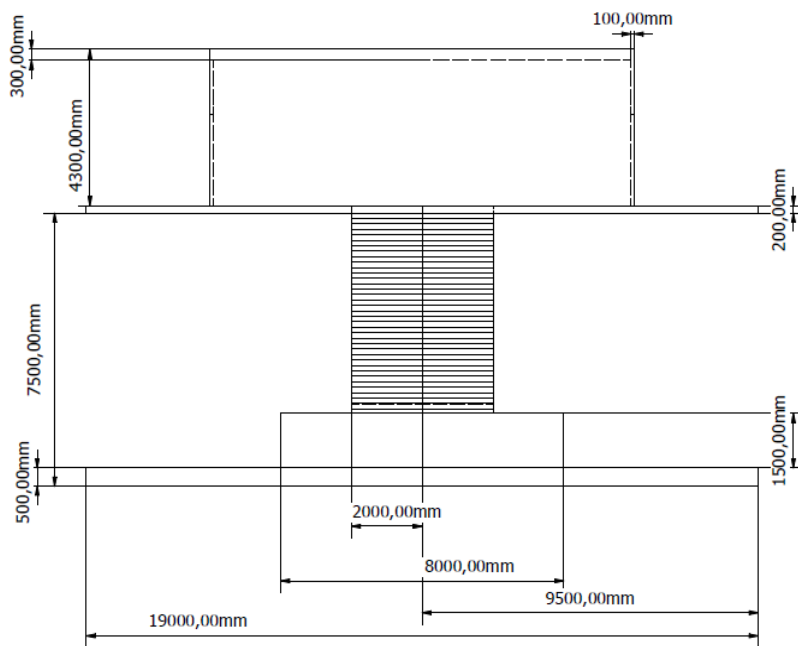
4 Σενάριο Μελέτης

4.1 Περιγραφή γεωμετρικών χαρακτηριστικών σταθμού

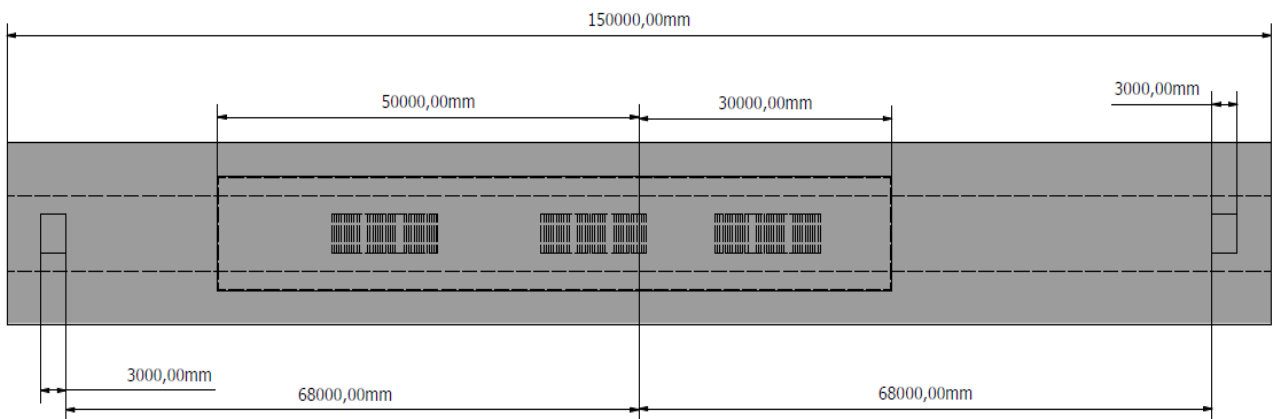
Ο προς μελέτη σταθμός αποτελείται από δύο επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο, που είναι τα εκδοτήρια των εισιτηρίων, το οποίο βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους και έχει τέσσερις εξόδους προς το εξωτερικό περιβάλλον.



Σχήμα 4-1 Πρόσοψη σιδηροδρομικού σταθμού



Σχήμα 4-2 Πλάγια όψη σιδηροδρομικού σταθμού



Σχήμα 4-3 Κάτοψη σιδηροδρομικού σταθμού

Στο σενάριο που θα εξετάσουμε παρακάτω, θεωρούμε ότι όλες οι υπόλοιπες απαραίτητες κτηριακές δομές που χρειάζονται για την λειτουργία του σταθμού (χώρος προσωπικού, τουαλέτες, κυλικείο, χώρος Η/Μ εγκαταστάσεων κτλ.), βρίσκονται εκτός των κυρίων χώρων, όπως είναι η αποβάθρα και τα εκδοτήρια, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζουν το κυρίως μέρος της μελέτης.

Το δεύτερο επίπεδο βρίσκεται κάτω από το έδαφος και συνδέεται με τα εκδοτήρια των εισιτηρίων με τρεις σταθερές σκάλες. Οι σκάλες αυτές είναι συμμετρικές μεταξύ τους και οδηγούν τους επιβάτες προς τις αποβάθρες ή προς τα εκδοτήρια και την έξοδο του σταθμού. Σε αυτό το επίπεδο βρίσκεται η αποβάθρα, η οποία έχει μήκος 150 μέτρα και πλάτος 8 μέτρα. Οι σκάλες έχουν πλάτος 4 μέτρα και τα κρηπιδώματα 2 μέτρα από κάθε μεριά, όπως ορίζεται σαν ελάχιστο πλάτος (Δοκουμετζίδη, Κούσιου et al. 1954).

Αριστερά και δεξιά της αποβάθρας είναι τα διάκενα, στα οποία βρίσκονται οι ράγες του τρένου. Το πλάτος αυτών είναι 5,5 μέτρα και έχει ληφθεί υπόψη η ύπαρξη τμήματος όπου θα γίνεται η διέλευση του προσωπικού συντήρησης ή των σωστικών συνεργείων σε περίπτωση ατυχήματος. Επίσης θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη διαμόρφωση σε αυτό, ώστε να μπορούν να φιλοξενηθούν τα συστήματα τηλεπικοινωνιών και ελέγχου, αλλά και το σύστημα ηλεκτροκίνησης των τρένων.

4.1.1 Υλικά κατασκευής σιδηροδρομικού σταθμού

Η κατασκευή των υπόγειων σταθμών γίνεται στη πλειοψηφία τους με χρήση οπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο επιλέχθηκε και για την παρούσα μελέτη. Άλλα υλικά όπως ο χάλυβας και ο ανοξειδωτος χάλυβας χρησιμοποιήθηκαν για τις μεταλλικές κατασκευές του σταθμού και για την επένδυση διαφόρων επιφανειών, όπως αυτές των κυλιόμενων κλιμακοστάσιων, της τοιχοποιίας και των διαφόρων ηλεκτρομηχανολογικών κατασκευών. Οι ιδιότητες αυτών παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πυκνότητα	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	2100
Αγωγιμότητα	$C_p(\text{kJ}/(\text{kgk}))$	0.88
Ειδική θερμοχωρητικότητα	$W/(\text{m}^*\text{k})$	1
Συντελεστής απορρόφησης	1/m	5.0 E4

Πίνακας 4-1 Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων σκυροδέματος

Πυκνότητα	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	7850
Αγωγιμότητα	$C_p(\text{kJ}/(\text{kgk}))$	0.46
Ειδική θερμοχωρητικότητα	$W/(\text{m}^*\text{k})$	50.2
Συντελεστής απορρόφησης	1/m	5.0 E4

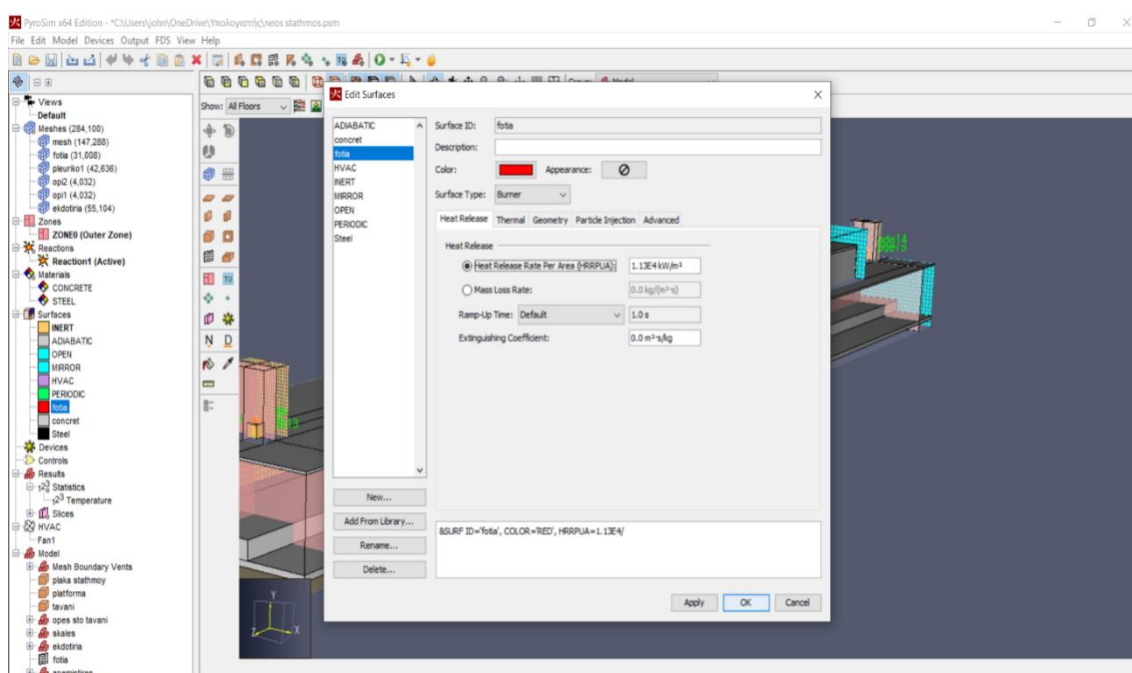
Πίνακας 4-2 Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων χάλυβα

Πυκνότητα	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	8000
Αγωγιμότητα	$C_p(\text{kJ}/(\text{kgk}))$	0.5
Ειδική θερμοχωρητικότητα	$W/(\text{m}^*\text{k})$	16.3
Συντελεστής απορρόφησης	1/m	2.74 E5

Πίνακας 4-3 Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων ανοξείδωτου χάλυβα

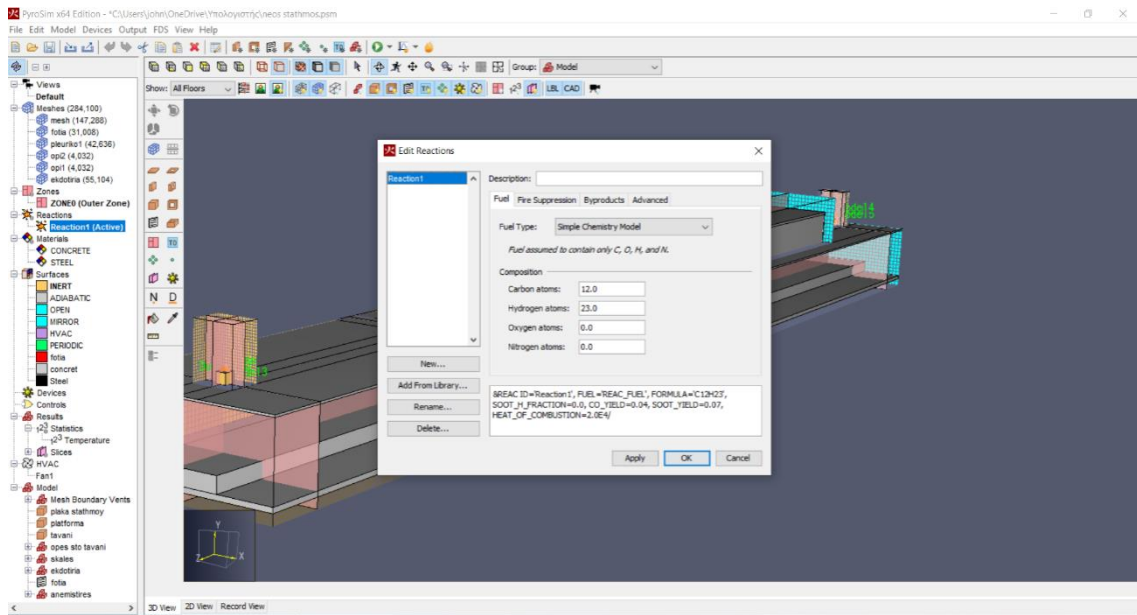
4.2 Χαρακτηριστικά της φωτιάς

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται το σενάριο ύπαρξης φωτιάς εντός του σταθμού. Η φωτιά βρίσκεται 34 μέτρα από το μέσο του σταθμού, πάνω σε τρένο το οποίο θα είναι σταματημένο εντός αυτού. Η εστία που μελετάται θα έχει ισχύ 15 MW και αυτό την κατατάσσει στις φωτιές μικρής κλίμακας (Amouzandeh, Zeiml et al. 2014). Οι διαστάσεις της θα είναι 12 τετραγωνικά μέτρα και η μέγιστη τιμή ρυθμού εκπομπής θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (HRRPUA) είναι $1,15 \cdot 10^4$ (kW/m²).

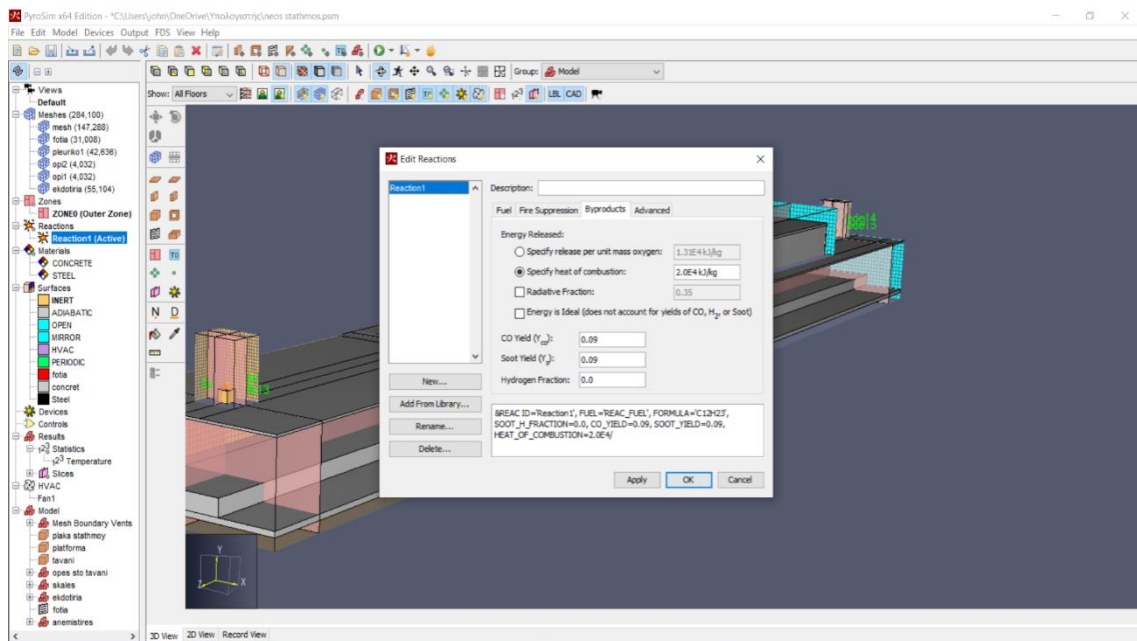


Σχήμα 4-4 Ορισμός των χαρακτηριστικών της φωτιάς στο Pyrosim

Σαν καύσιμη ύλη χρησιμοποιήθηκε το αργό πετρέλαιο με χημική σύσταση καυσίμου, άνθρακας (C:12) και υδρογόνο (H:23). Για τα προϊόντα της καύσης ορίστηκε, για το μονοξείδιο του άνθρακα παραγωγή CO=0,09 και για τον παραγόμενο καπνό (αιθάλη) soot yield=0,09.



Σχήμα 4-5 Ορισμός της τυπικής σύστασης του καυσίμου στο Pyrosim



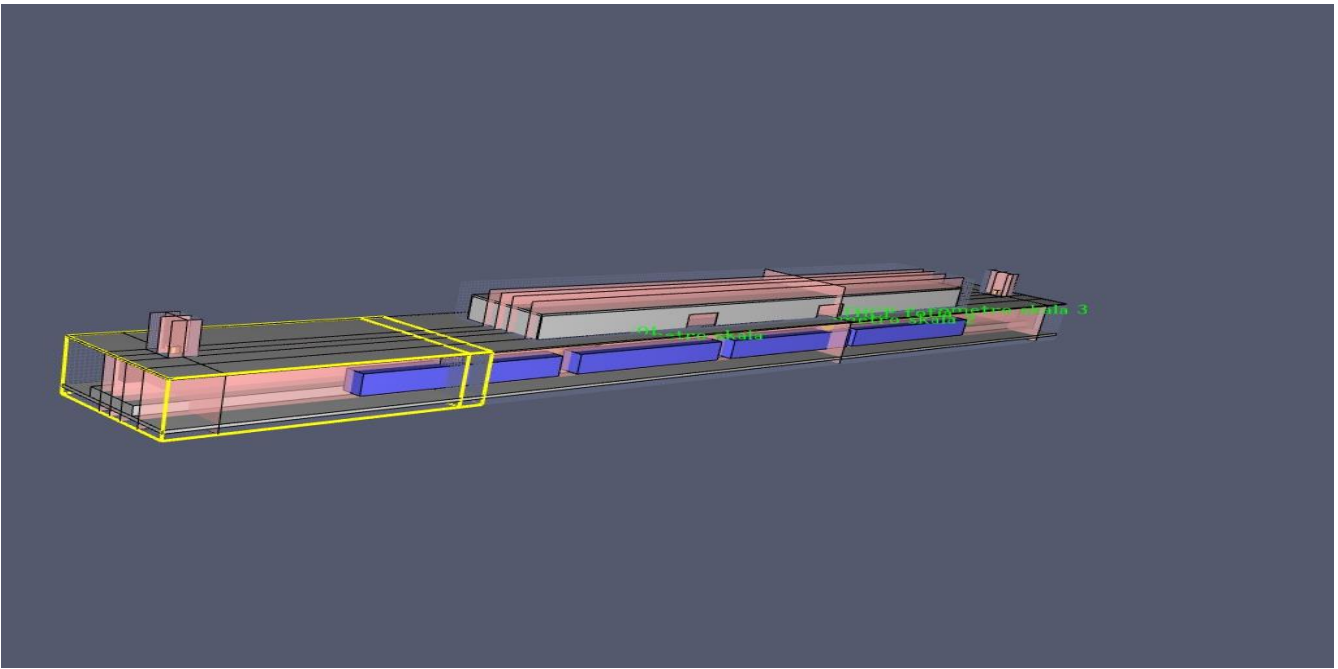
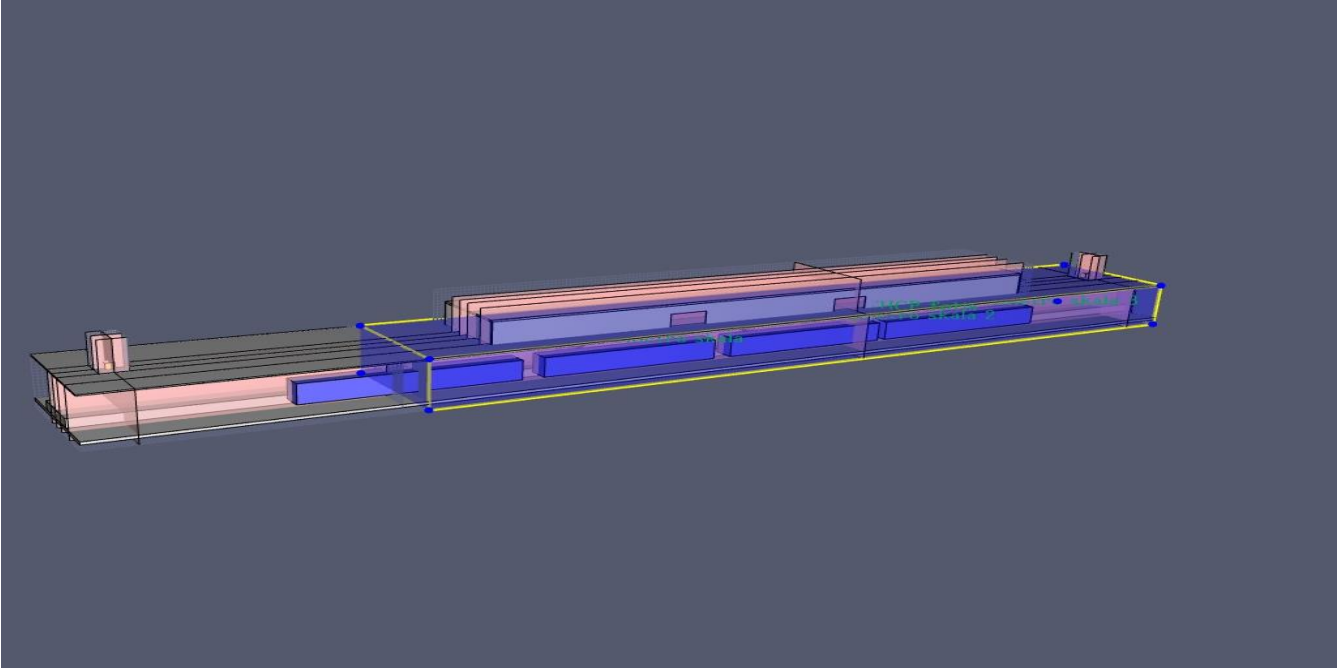
Σχήμα 4-6 Ορισμός των προϊόντων καύσης στο Pyrosim

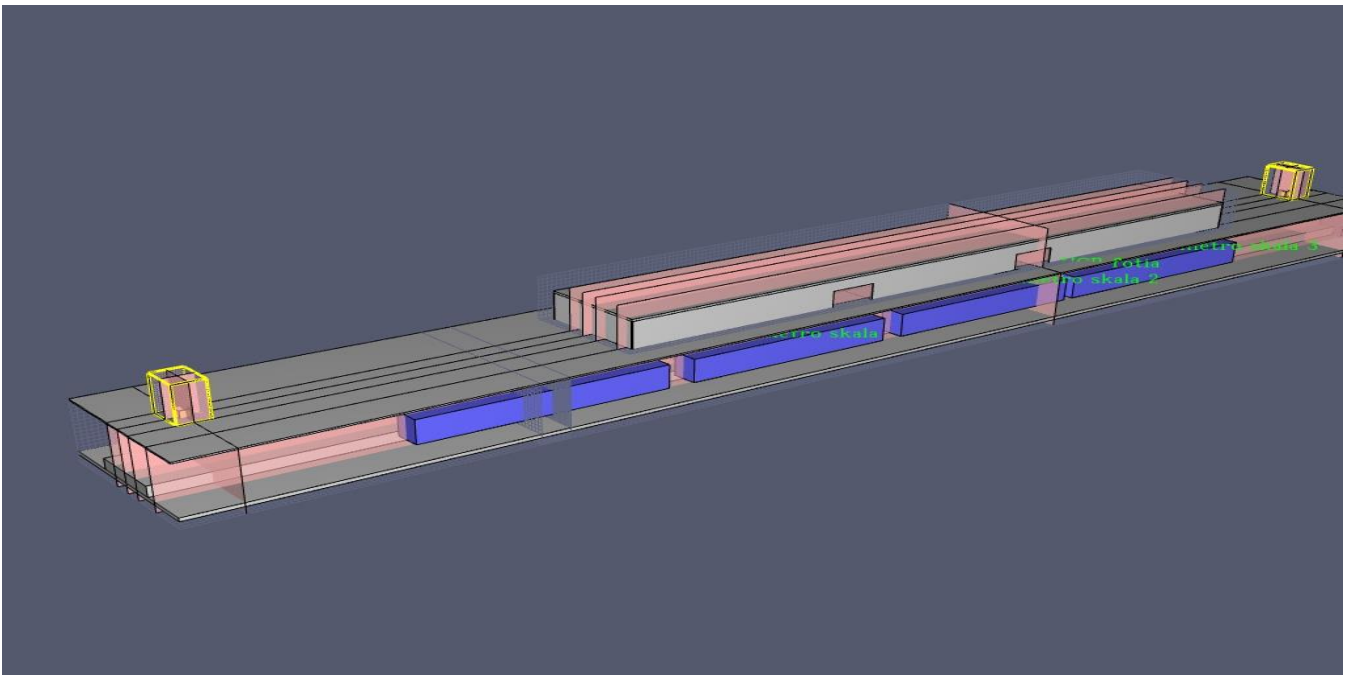
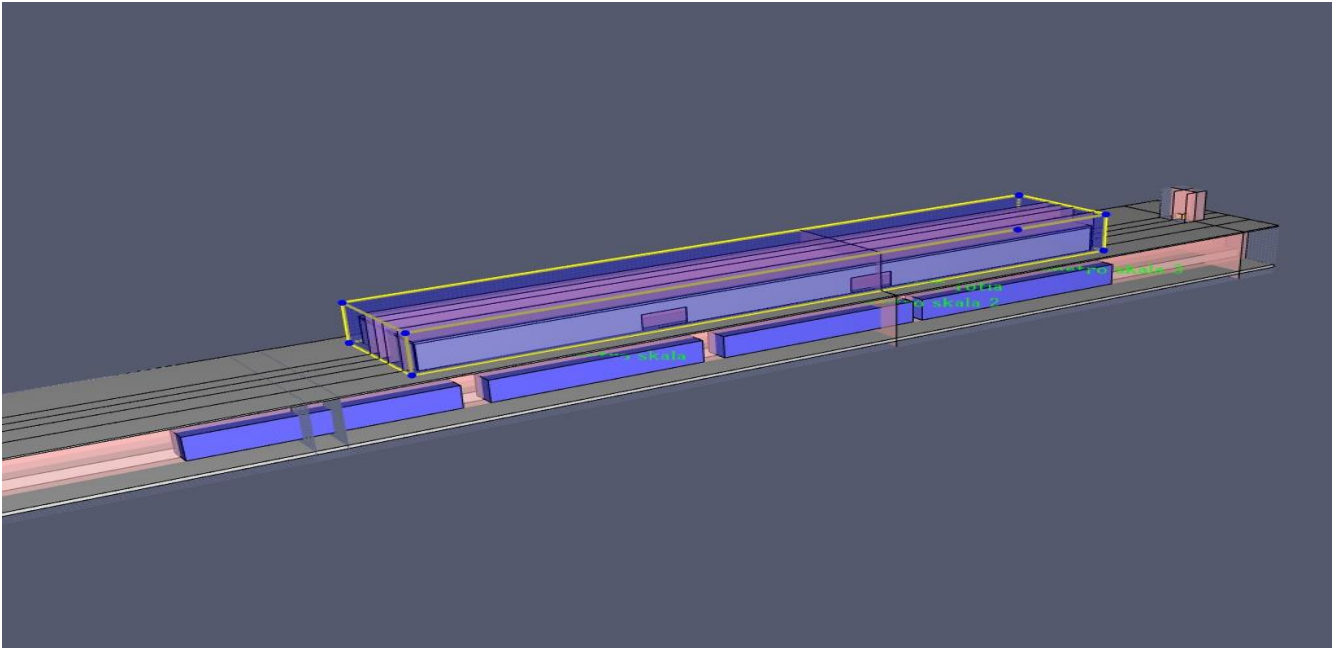
4.3 Υπολογιστικό πλέγμα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια περιγραφή του υπολογιστικού πλέγματος, που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη. Πιο συγκεκριμένα, το υπολογιστικό πλέγμα κατασκευάστηκε σύμφωνα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σταθμού, τα οποία αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4.1. Η οροφή του σταθμού καθώς και το έδαφος αυτού θεωρούνται κλειστά. Στα σημεία όπως τα εκδοτήρια και τα φρεάτια αερισμού το πλέγμα επεκτείνεται και εκτός των γεωμετρικών ορίων του σταθμού. Αυτό έγινε με σκοπό να προσομοιωθούν οι εξωτερικές συνθήκες του περιβάλλοντος. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη είναι τετραγωνικό με χαρακτηριστική διάσταση κελιού 0,25 m x 0.25 m για όλη την επιφάνεια του μοντέλου.

Για να εξασφαλίσουμε μεγαλύτερη ταχύτητα και καλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς, το Pyrosim μας δίνει την δυνατότητα να διαχωρίσουμε το πλέγμα σε άλλα υπό-πλέγματα, τα οποία εφάπτονται μεταξύ τους. Για την ταχύτερη επίλυση του μοντέλου έχουμε την δυνατότητα να κάνουμε καταμερισμό των υπό-πλεγμάτων του υπολογιστικού χωρίου σε περισσότερους επεξεργαστές. Η δυνατότητα αυτή μας δίνεται μέσω του πρωτοκόλλου MPI (Message Passing Interface).

Στο Σχήμα 4-7 έχουμε την απεικόνιση των υπό-πλεγμάτων της μελέτης στο πρόγραμμα του Pyrosim.







Σχήμα 4-7 Απεικόνιση υπό-πλεγμάτων στο Pyrosim

4.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος αερισμού

Στη συγκεκριμένη μελέτη έχουν χρησιμοποιηθεί 2 ανεμιστήρες οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στα φρεάτια αερισμού. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του σταθμού, οι ανεμιστήρες παρέχουν φρέσκο αέρα στο σταθμό και απάγουν τους ρύπους. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης μελέτης επιλέχθηκε ανεμιστήρας της εταιρείας SODECA. Η σειρά που επιλέχθηκε είναι κατασκευασμένη σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα (EN-12101-3-2002/AC:2006) και ειδικά σχεδιασμένη για την απομάκρυνση καπνού σε περίπτωση φωτιάς.

THT

Detail THT/Atax

THT: Cased axial fans 400°C/2h, 300°C/2h and 200°C/2h.

Cased axial fans with for working inside fire danger zones.

Fan:

- Sheet steel long casing.
- Variable angle impellers in cast aluminium.
- Approved to the EN12101-3:2002/AC:2006 standard. With certifications No: 0370-CPR-0305 (F400), 0370-CPR-0973 (F300), 0370-CPR-0514 (F200).
- Airflow direction from motor to impeller

Motor:

- Class H motors, ongoing use S1 and emergency use S2. With ball bearings, IP55 protection, and one-or two-speed depending on the model
- Three-phase 230/400V -50Hz. (up to 4HP) and 400/690V-50Hz. (power over 4HP)
- Max. air temperature to transport: S1 Service -20°C, +40°C, for ongoing use. S2 Service 200°C/2h, 300°C/2h and 400°C/2h

Finish:

- Anti-corrosive finish in polyester resin, polymerised at 190°C after phosphate free pre-treatment

Versions available:

- THT: cased axial fans with short casing
- THT/CL: long-cased axial fans fitted with hinged access door
- THT/ATEX: cased axial fans with short casing, with ATEX Ex II3G certifications for Zone 2 (only 400°C/2h and 300°C/2h). Casing fitted with aluminium strip in accordance with Standard EN-14986:2007.
- THT/CL/ATEX: long-cased axial fans with hinged access door and ATEX Ex II3G certification for Zone 2 (only 400°C/2h and 300°C/2h). Casing fitted with aluminium strip in accordance with Standard EN-14986:2007.

On request:

- Airflow direction from impeller to motor
- 100% reversible impellers.
- Long Casing /CL: increase of 5%

Order code

From size 40 to size 100

THT — 56 — 4T — — 2 — — F-400

<p>THT: Short cased axial fans 400°C/2h, 300°C/2h and 200°C/2h</p> <p>THT/ATEX: Short cased axial fans 400°C/2h, 300°C/2h and 200°C/2h with ATEX certification</p> <p>THT/CL: Long cased axial fans 400°C/2h, 300°C/2h and 200°C/2h with long casing, equipped with an inspection door</p>	<p>Impeller diameter in cm.</p>	<p>Number of motor pole</p> <p>2=2900 r/min, 50 Hz 4=1400 r/min, 50 Hz 6=900 r/min, 50 Hz 8=750 r/min, 50 Hz 12=500 r/min, 50 Hz</p>	<p>T=Three-phase</p>	<p>Motor power (HP)</p>	<p>F-200 Officially approved 200°C/2h</p> <p>F-300 Officially approved, tested for 300°C/2h</p> <p>F-400 Officially approved 400°C/2h</p> <p>CAT3: With ATEX certification, Category 3 Ex II3G.</p>
--	---------------------------------	--	----------------------	-------------------------	---

From size 125 to size 160

THT — 125 — 4T / 9-25 — — 10° — — F-400

<p>THT: Short cased axial fans 400°C/2h, 300°C/2h and 200°C/2h</p> <p>THT/CL: Long cased axial fans 400°C/2h, 300°C/2h and 200°C/2h with long casing, equipped with an inspection door</p>	<p>Impeller diameter in cm.</p>	<p>Number of motor pole</p> <p>2=2900 r/min, 50 Hz 4=1400 r/min, 50 Hz 6=900 r/min, 50 Hz 8=750 r/min, 50 Hz 12=500 r/min, 50 Hz</p>	<p>T=Three-phase</p>	<p>Number of blades</p> <p>3 blades 6 blades 9 blades</p>	<p>Motor power (HP)</p>	<p>Angle of inclination of the blades</p> <p>F-200 Officially approved 200°C/2h</p> <p>F-300 Officially approved, tested for 300°C/2h</p> <p>F-400 Officially approved 400°C/2h</p> <p>CAT3: With ATEX certification, Category 3 Ex II3G.</p>
--	---------------------------------	--	----------------------	---	-------------------------	---

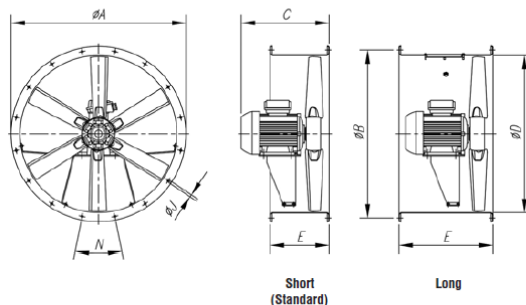
Σχήμα 4-8 Πίνακας γενικών χαρακτηριστικών ανεμιστήρα

Technical characteristics

Model	Speed (r/min)	Maximum admissible current (A)			Power installed (kW)	Tilting angle blades (°)	Airflow maximum (m ³ /h)	Sound pressure level dB(A)	Approx. weight (Kg)	
		230V	400V	690V					Long	Short
THT-100-8T-2	700	9.00	5.20		1.50	22	32900	77	124	105
THT-100-8T-3	705	13.20	7.60		2.20	30	39400	77	142	122
THT-100-8T-4	710	15.60	9.00		3.00	32	40550	78	162	142
THT-125-4T/3-10	1460		17.70	10.22	7.50	8	58550	88	243	210
THT-125-4/8T/3-9	1455 / 725		15.50 / 5.50		6.70 / 1.50	8	58550 / 29275	88 / 68	243	210
THT-125-4T/3-15	1455		23.00	13.28	11.00	14	77750	89	294	266
THT-125-4/8T/3-15	1470 / 725		23.20 / 8.70		11.00 / 2.80	14	77750 / 38875	89 / 69	294	266
THT-125-4T/3-20	1460		29.00	16.74	15.00	18	91450	91	309	281
THT-125-4/8T/3-20	1470 / 725		31.70 / 11.80		15.00 / 3.80	18	91450 / 45725	91 / 71	309	281
THT-125-4T/3-25	1465		37.00	21.36	18.50	20	98350	91	377	334
THT-125-4T/3-30	1470		42.00	24.25	22.00	24	110350	92	391	348
THT-125-4/8T/3-27	1470 / 735		38.00 / 13.00		20.00 / 4.00	22	104400 / 52200	92 / 71	391	348
THT-125-4/8T/3-37	1475 / 735		51.00 / 20.60		27.00 / 6.00	28	120700 / 60350	93 / 72	472	429
THT-125-4T/3-40	1475		58.00	33.49	30.00	30	125000	93	472	429
THT-125-4/8T/3-40	1480 / 735		62.00 / 27.00		30.00 / 10.00	30	125000 / 62500	93 / 72	618	562
THT-125-4T/6-20	1460		29.00	16.74	15.00	10	78600	89	318	290
THT-125-4/8T/6-20	1470 / 725		31.70 / 11.80		15.00 / 3.80	10	78600 / 39300	89 / 68	318	290
THT-125-4/8T/6-22	1470 / 735		31.80 / 12.00		16.50 / 3.30	12	85600 / 42800	89 / 69	303	275
THT-125-4T/6-25	1465		37.00	21.36	18.50	14	92550	90	386	343
THT-125-4/8T/6-27	1470 / 735		38.00 / 13.00		20.00 / 4.00	16	98850 / 49425	90 / 69	400	357
THT-125-4T/6-30	1470		42.00	24.25	22.00	16	98850	90	400	357
THT-125-4/8T/6-37	1475 / 735		51.00 / 20.60		27.00 / 6.00	20	110900 / 55450	90 / 70	481	437
THT-125-4T/6-40	1475		58.00	33.49	30.00	22	117450	92	481	437
THT-125-4/8T/6-40	1480 / 735		62.00 / 27.00		30.00 / 10.00	22	117450 / 58725	92 / 71	627	571
THT-125-4T/6-50	1480		73.00	42.15	37.00	26	131050	93	529	473
THT-125-4T/9-25	1465		37.00	21.36	18.50	10	79650	88	395	352
THT-125-4/8T/9-22	1470 / 735		31.80 / 12.00		16.50 / 3.30	8	71150 / 35575	88 / 69	312	284

Σχήμα 4-9 Πίνακας χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του ανεμιστήρα

Dimensions in mm



C (consult motor size according to power)

Model	ØA	ØB	C (consult motor size according to power)																E			ØJ	N
			80	90S	90L	100	112	132S	132M	132ML	160M	160L	180M	180L	200L	225	250	280	ØD	Short	Long		
THI-40	490	450	348	364	389	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	410	250	400	12	8x45°	
THI-45	540	500	348	364	389	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	460	250	400	12	8x45°	
THI-50	600	560	339	364	389	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	514	250	400	12	12x30°	
THI-50	600	560	-	-	-	419	438	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	514	250	500	12	12x30°	
THI-56	660	620	275	364	389	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	560	250	400	12	12x30°	
THI-56	660	620	-	-	-	416	432	480	518	-	-	-	-	-	-	-	-	560	250	500	12	12x30°	
THI-56	660	620	-	-	-	-	-	-	-	620	-	-	-	-	-	-	-	560	250	660	12	12x30°	
THI-63	730	690	339	369	389	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	640	250	400	12	12x30°	
THI-63	730	690	-	-	-	420	437	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	640	250	500	12	12x30°	
THI-63	730	690	-	-	-	-	-	539	577	-	-	-	-	-	-	-	-	640	250	660	12	12x30°	
THI-63	730	690	-	-	-	-	-	-	-	630	674	-	-	-	-	-	-	640	350	660	12	12x30°	
THI-71	810	770	366	379	404	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	710	300	430	12	16x22°30'	
THI-71	810	770	-	-	-	438	433	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	710	300	500	12	16x22°30'	
THI-80	900	860	-	-	-	422	456	472	-	-	-	-	-	-	-	-	-	800	300	500	12	16x22°30'	
THI-80	900	860	-	-	-	-	-	515	-	-	-	-	-	-	-	-	-	800	300	600	12	16x22°30'	
THI-90	1015	970	-	-	-	466	482	525	565	590	-	-	-	-	-	-	-	900	350	600	15	16x22°30'	
THI-100	1115	1070	-	-	-	482	525	565	590	-	-	-	-	-	-	-	-	1000	450	600	15	16x22°30'	
THI-100	1115	1070	-	-	-	-	-	-	-	696	696	-	-	-	-	-	-	1000	450	700	15	16x22°30'	
THI-125	1365	1320	-	-	-	-	-	561	601	-	-	-	-	-	-	-	-	1250	500	700	15	20x18°	
THI-125	1365	1320	-	-	-	-	-	-	-	620	650	680	-	-	-	-	-	1250	500	700	15	20x18°	
THI-125	1365	1320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	740	740	860	-	-	-	1250	500	900	15	20x18°	
THI-125	1365	1320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	907	-	-	1250	500	1000	15	20x18°	
THI-125	1365	1320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	967	-	1250	600	1000	15	20x18°	
THI-125	1365	1320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1077	-	1250	600	1200	15	20x18°	
THI-140	1515	1470	-	-	-	-	-	532	570	-	-	-	-	-	-	-	-	1400	400	650	15	20x18°	
THI-140	1515	1470	-	-	-	-	-	-	-	-	650	700	-	-	-	-	-	1400	450	700	15	20x18°	

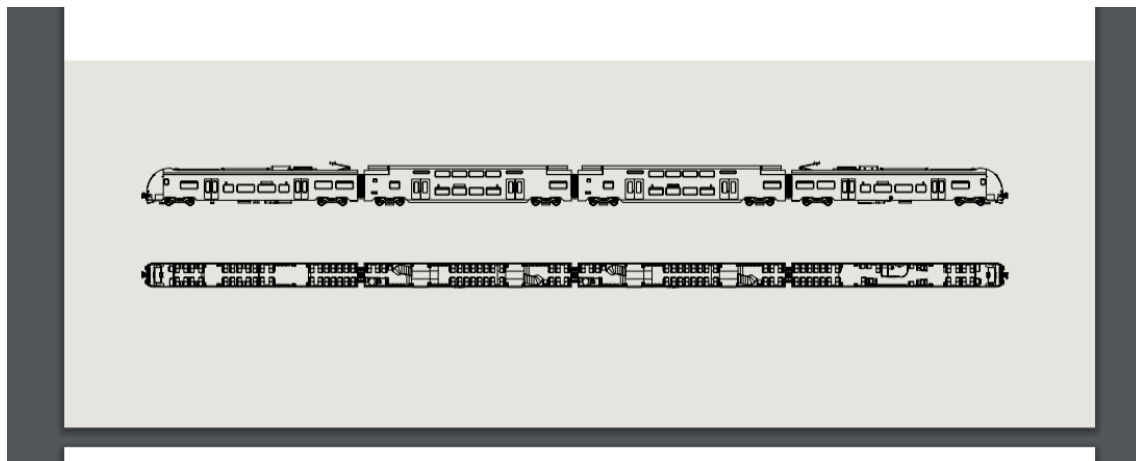
Σχήμα 4-10 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανεμιστήρα

4.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά Τρένου

Ένα από τα κύρια μοντέλα αμαξοστοιχιών που χρησιμοποιήθηκαν στον Ελληνικό σιδηρόδρομο (Προαστιακός, σιδηροδρομική γραμμή Αθήνας-Χαλκίδας), αλλά και σε άλλα σιδηροδρομικά δίκτυα της Ευρώπης, είναι το μοντέλο Desiro της Γερμανικής εταιρείας Siemens. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης μελέτης χρησιμοποιήθηκε η παραλλαγή Desiro HR που παρουσιάστηκε το 2014 και έχει υιοθετηθεί από χώρες όπως το Ισραήλ, η Γερμανία και η Αίγυπτος. Η αμαξοστοιχία αποτελείται από τα δύο κινητήρια βαγόνια και δύο ρυμουλκούμενα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-12 και τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτού παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-11.

Technical data	
Wheel arrangement	Bo'Bo'+2'2'+2'2'+Bo'Bo'
Track gauge	1,435 mm
Maximum speed	160 km/h
Traction power	4,000 kW
Starting acceleration	Up to 1.1 m/s ²
Power supply	15 kV AC / 16.7 Hz
Seats	400
Length of train	105,252 mm
Access height	800 mm (end car) and 730 mm (middle cars)
Width	2,820 mm
Car length	26,226 mm (end car) and 25,200 mm (middle cars)
Weight	200 t
Crashworthiness	TSI and EN 15227-compliant
Operating temperature	-25°C to +45°C (class T3 as per EN 50125-1)

Σχήμα 4-11 Τεχνικά χαρακτηριστικά συρμού Desiro HR



Σχήμα 4-12 Σχηματική απεικόνιση συρμού Desiro HR

4.6 Υπολογισμός κρίσιμης ταχύτητας U_{crit}

Σε μια πρώτη προσπάθεια να υπολογιστεί η κρίσιμη ταχύτητα ο [Thomas, Baldwin et al. (1968)] μέσω πειραμάτων και θεωρητικών προσεγγίσεων, παρατήρησε ότι για την αποφυγή εμφάνισης του φαινομένου αναστροφής του καπνού (smoke backflow) απαιτείται η ύπαρξη ορισμένου ελάχιστου αερισμού. Σε αυτά τα πειράματα, ο Thomas παρατήρησε, ότι η κρίσιμη ταχύτητα αερισμού αυξάνεται αναλόγως της κυβικής ρίζας του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας. Σε μια πρώτη προσέγγιση ο Thomas πρότεινε για τον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας τον εξής τύπο:

$$u_{crit} = k \left(\frac{g\dot{Q}H}{\rho_0 c_p T A} \right)^{1/3} \quad (3-12)$$

Όπου ρ_0 είναι η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες [kg/m³], c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα [kJ/kg°C], A η διατομή της σήραγγας [m²], \dot{Q} η μεταφερόμενη ισχύς μέσω συναγωγής [KW], H το ύψος της σήραγγας [m], g η επιτάχυνση της βαρύτητας [m/s²], T η θερμοκρασία καυσαερίων [°C]. Σε αυτή τη σχέση ο Thomas δεν έδωσε κάποια τιμή για τη σταθερά k .

Η πιο δημοφιλής σχέση για τον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας είναι ο εμπειρικός τύπος των Danziger and Kennedy [Khattari, Log et al. (2021), Chen, Yuen et al. (2022)] και αποτελεί συνέχεια του τύπου που πρότεινε ο Thomas (3-12), με την διαφορά ότι εμπεριέχει τις σταθερές k_1 και k_g όπου:

- $k_1 = (Frc)^{-1/3}$ [Σταθερά εξισώσεων Kennedy]
- $Frc = 4.5$ [αριθμός Froude]
- $k_g = 1 + 0.0374(-s)^{0.8}$ [Σταθερά εξισώσεων Kennedy]

$$u_{crit} = k_g k_1 \left(\frac{g\dot{Q}H}{\rho_0 c_p T A} \right)^{1/3} \quad (3-23)$$

Μια πρώτη προσέγγιση στον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας γίνεται παρακάτω με το υπολογιστικό φύλλο Excel το οποίο υπάρχει στο διαδίκτυο και το οποίο βασίζεται στην εξίσωση (3-23).

Values in Yellow to be Entered

Convective fire heat release rate (Q_c)	15,000,000	W
Tunnel Area (A_T)	56	m ²
Ambient Temperature (T_a)	21	°C
Ambient Pressure (P_a)	101000	Pa
Gas Constant (R_a)	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}	200,612,315	W
-------------------	-------------	---

(Formula is valid for this application)

Ambient Temperature (T_a)	294.15	K
Density (ρ)	1.196	kg / m ³
Froude Number (Fr_m)	4.500	
a	0.759	
c	-11.580	
R_h	5.725	
Q_h	-0.064	
S_h	2.254	
T_h	0.028	
Critical Velocity (V_c)	2.029	m/s

Πίνακας 4-4 Υπολογισμός κρίσιμης ταχύτητας (U_{crit})

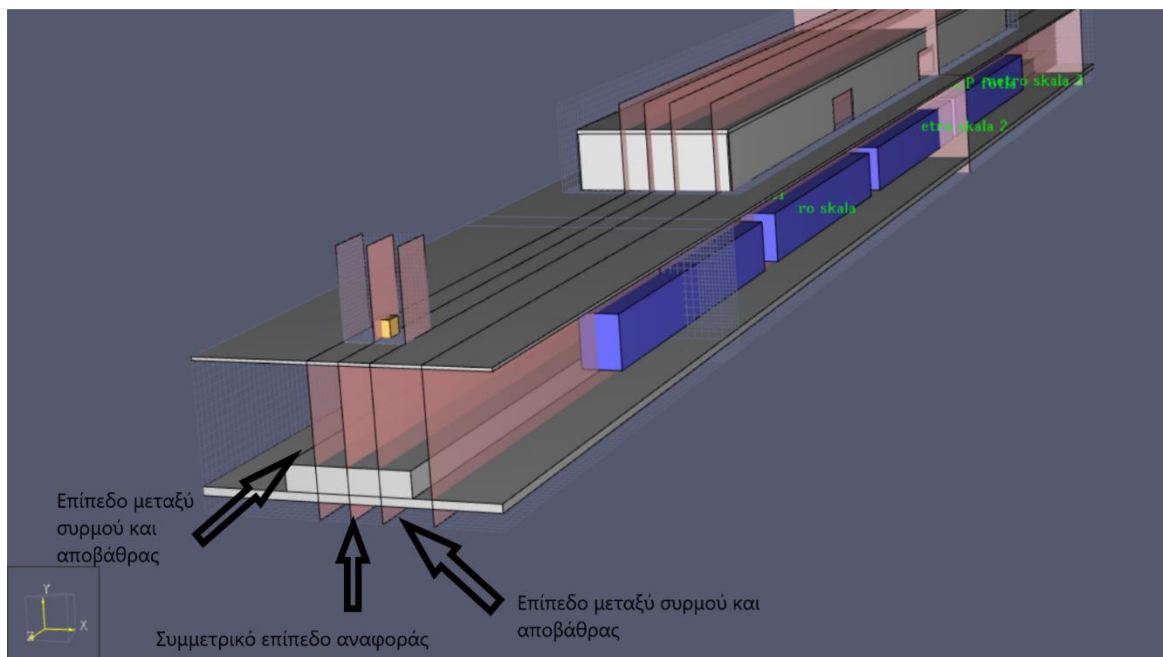
Σύμφωνα με τον Πίνακα 4- η κρίσιμη ταχύτητα για τα δεδομένα της μελέτης μας υπολογίστηκε σε 2,029 m/s. Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 2-4 η κρίσιμη ταχύτητα για το μέγεθος της φωτιάς που μελετάμε είναι 2,5 m/s. Για να εξετάσουμε το δυσμενέστερο σενάριο θα επιλέξουμε την μεγαλύτερη ταχύτητα όπως εμφανίζεται και στη βιβλιογραφία. Έτσι θα επιλέξουμε σαν κρίσιμη ταχύτητα (U_{crit}) τα 2,5m/s.

5 Αποτελέσματα

Στόχος του παρακάτω κεφαλαίου είναι να γίνει η απεικόνιση της εξέλιξης της φωτιάς εντός του σταθμού. Με την χρήση του λογισμικού smokeview και για διακριτά χρονικά διαστήματα θα παρουσιαστούν ισοϋψής κατανομές της θερμοκρασίας (T), της οριζόντιας ταχύτητας (W-Velocity) και της κατακόρυφης ταχύτητας (Y-Velocity) στο εσωτερικό του σταθμού. Για τις ανάγκες αυτής της μελέτης, κατά την διάρκεια κατασκευής του μοντέλου τοποθετήθηκαν κάποιες ισοϋψείς καμπύλες (slices), στα οποία απεικονίζεται η εξέλιξη και η μεταβολή των μεταβλητών που αναφέρθηκαν παραπάνω.

5.1 Σενάριο 1: Φωτιά χωρίς την ύπαρξη μηχανικού αερισμού

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου αυτής της διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα σε αυτό το σενάριο εξετάζουμε την επίδραση που έχει η απουσία μηχανικού αερισμού στον αποκαπνισμό του σταθμού, κατά την διάρκεια φωτιάς εντός αυτού, ισχύος 15 Mw, η οποία θα βρίσκεται πάνω σε σταματημένο συρμό τρένου εντός του σταθμού. Σκοπός αυτού του σεναρίου είναι να απεικονίσουμε και να σχολιάσουμε το πεδίο ροής για την οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας (στο μοντέλο που μελετάμε η οριζόντια συνιστώσα είναι ο άξονας των Z), για την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας καθώς και την κατανομή της θερμοκρασίας στα επίπεδα ενδιαφέροντος. Αυτά τα επίπεδα είναι το συμμετρικό επίπεδο του σταθμού όπου βρίσκονται οι σκάλες εισόδου και εξόδου. Τα επίπεδα μεταξύ αποβάθρας και συρμού, το πρώτο είναι σε απόσταση 2m από το επίπεδο συμμετρίας και το δεύτερο σε απόσταση -2m από το επίπεδο συμμετρίας, πάνω στον άξονα των x
Σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1 Γραφική αναπαράσταση επιπέδων ενδιαφέροντος στο Pyrosim

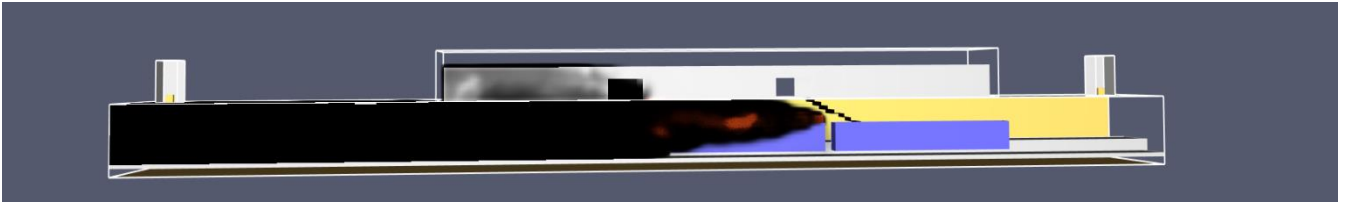
5.1.1 Οριζόντια ταχύτητα

Στο Σχήμα 5-3 απεικονίζεται το προφίλ της οριζόντιας ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς του σταθμού όπου συμπίπτει με το επίπεδο των αξόνων των ανεμιστήρων.

Παρατηρούμε ότι, η οριζόντια ταχύτητα στις σκάλες, όπου αποτελεί και σημείο ενδιαφέροντος στη μελέτη μας, παρουσιάζει μικρές τιμές της τάξεως του 1-1,5 m/s αρχικά Σχήμα 5-3 a). Όσο εξελίσσεται η φωτιά οι τιμές της οριζόντιας ταχύτητας αυξάνονται στο σημείο της αποβάθρας μετά τα 150s Σχήμα 5-3 b) καθώς υπάρχει κίνηση του αέρα από τη σήραγγα προς τη φωτιά ώστε να τροφοδοτείται αυτή. Επίσης, παρατηρούμε ότι η οριζόντια ταχύτητα στο αριστερό κομμάτι του σταθμού παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές και ειδικότερα μετά τα 300s οι τιμές αυτές κυμαίνονται πάνω από 4 m/s, σε αντίθεση με το δεξί μέρος του σταθμού όπου η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται είναι τα 5,5 m/s.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.2.1 υπάρχει μια κρίσιμη ταχύτητα πάνω από την οποία δεν έχουμε εμφάνιση του φαινομένου αναστροφής του καπνού, σύμφωνα με το Σχήμα 2-4 για το μέγεθος της φωτιάς που εξετάζουμε η κρίσιμη ταχύτητα είναι πάνω από τα 2,5 m/s κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται αφού δεν παρατηρούμε αναστροφή του καπνού εντός του σταθμού, αυτό μας το επιβεβαιώνει και το Σχήμα 5-6.

Παράλληλα στο Σχήμα 5-4 και στο Σχήμα 5-5 παρατηρούμε ότι οι τιμές της οριζόντιας ταχύτητας στο δεξί κομμάτι του σταθμού ταυτίζονται με αυτές που προέκυψαν στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς και είναι αρκετά υψηλότερες από τα 2,5 m/s (σημείο όπου δεν παρατηρείται αναστροφή του καπνού). Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι στο Σχήμα 5-5 οι τιμές της οριζόντιας ταχύτητας εμφανίζουν μικρότερες μέγιστες ταχύτητες, σε αντίθεση με το Σχήμα 5-4 όπου οι τιμές της μέγιστης οριζόντιας ταχύτητας φτάνουν και τα 19 m/s σε κάποιες χρονικές στιγμές. Τέλος μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι εμφανίζονται σποραδικά περιοχές με αρνητικές τιμές ταχύτητας κυρίως στα ανοίγματα του σταθμού, στις πόρτες που οδηγούν στα εκδοτήρια του σταθμού και στα ανοίγματα πάνω από τις σκάλες. Αν και οι τιμές της οριζόντιας ταχύτητας είναι μικρότερες του 0,5 m/s, αυτή η μικρή παροχή αέρα είναι πολύ σημαντική κατά την εκκένωση του σταθμού, καθώς οι επιβάτες που ανεβαίνουν τις σκάλες θα έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες διαφυγής.



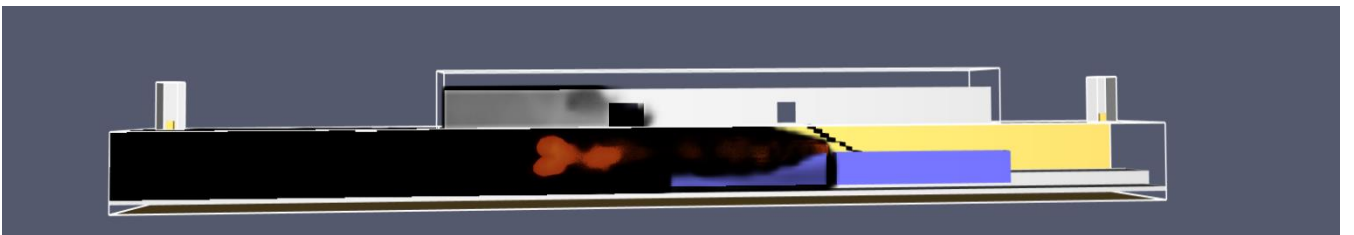
a)



b)

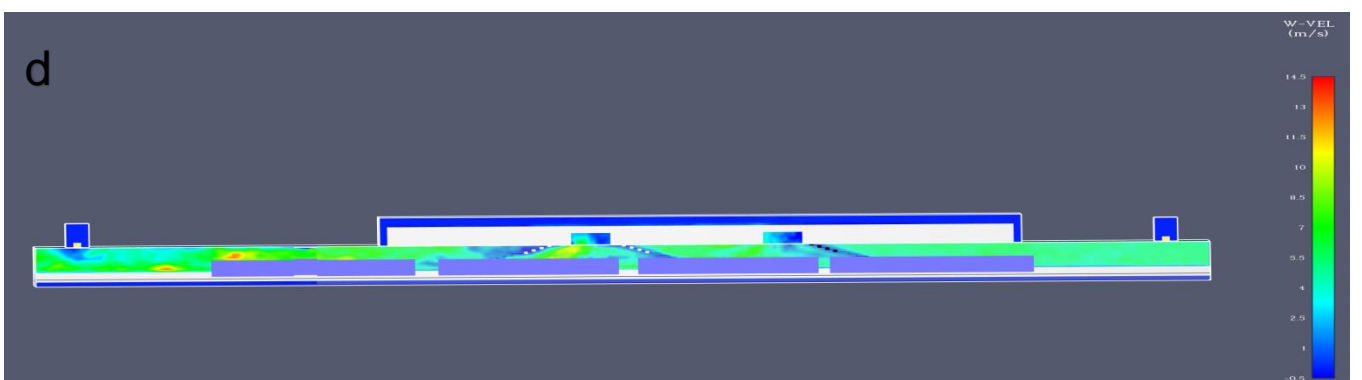
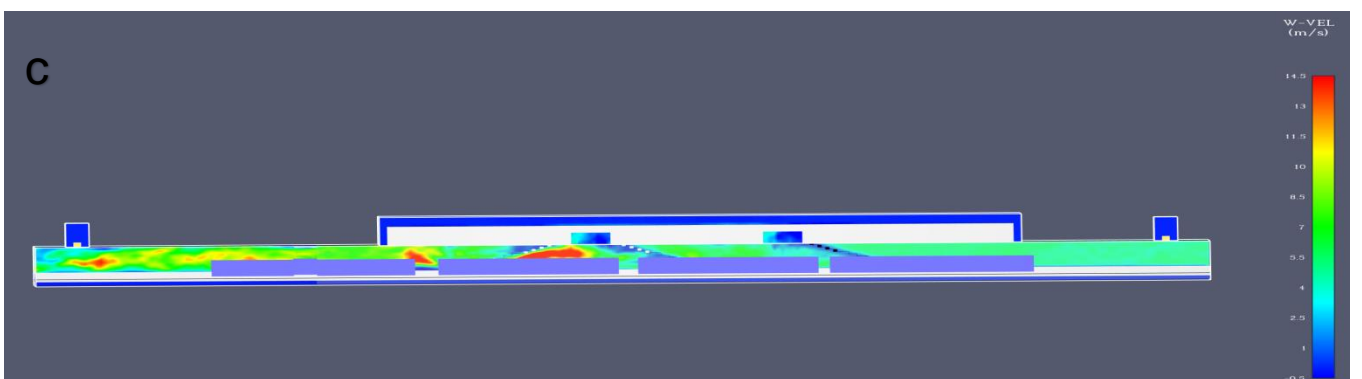
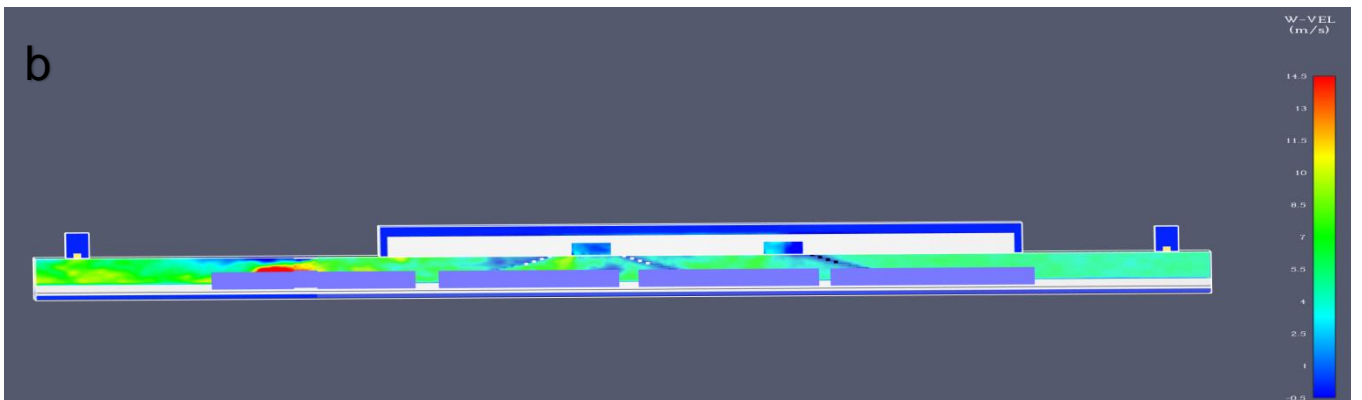
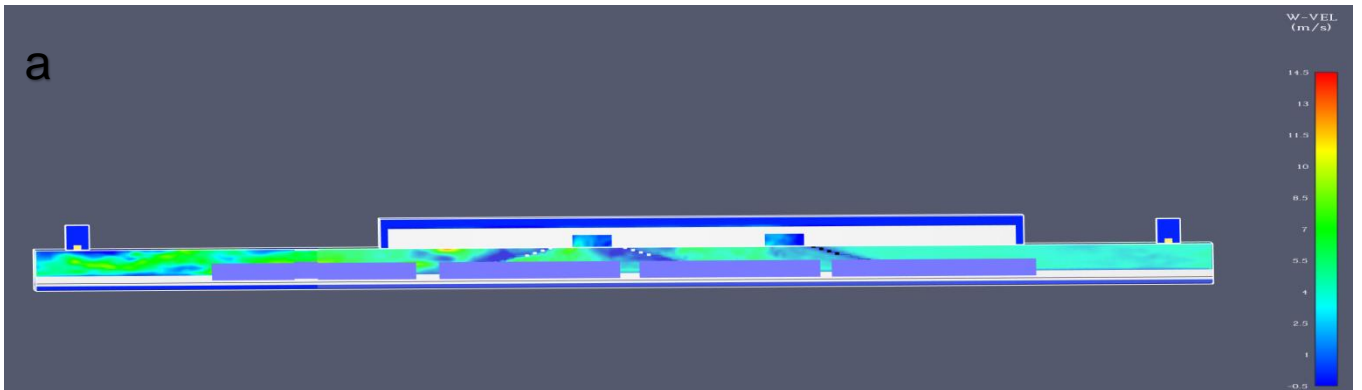


c)

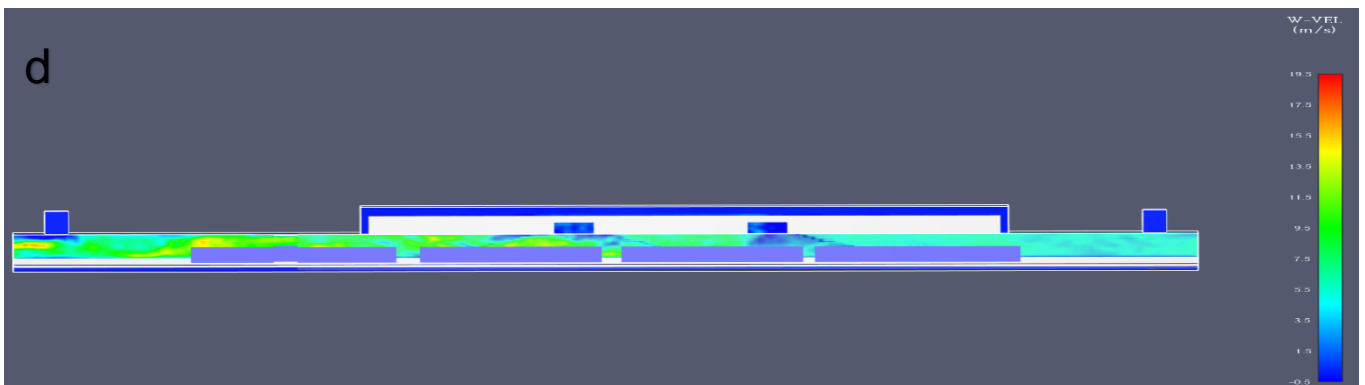
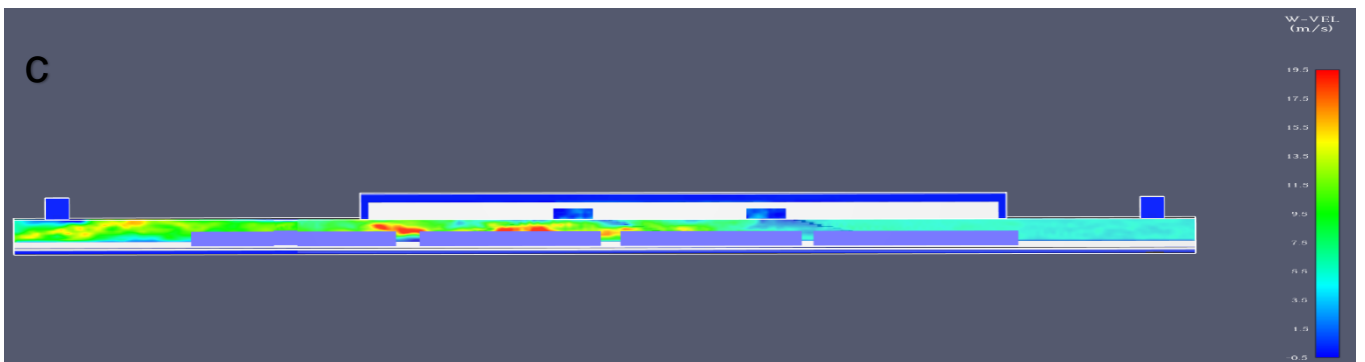
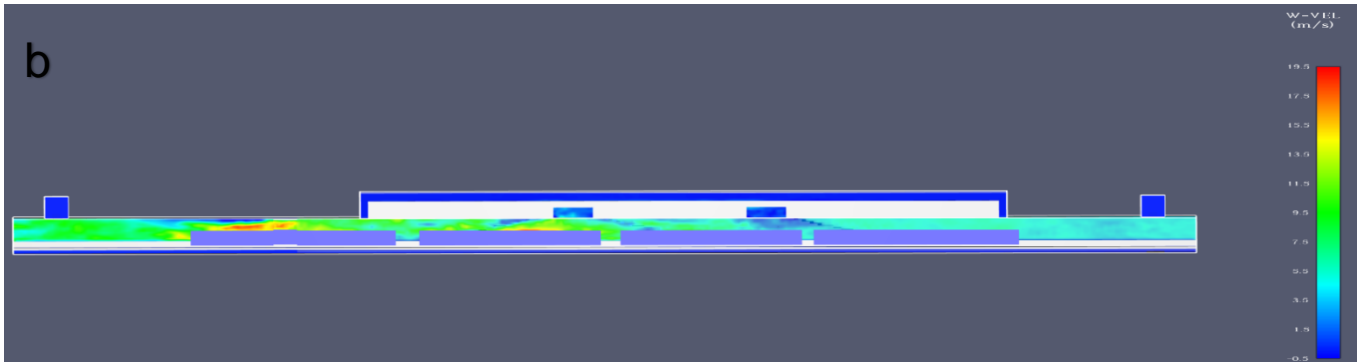
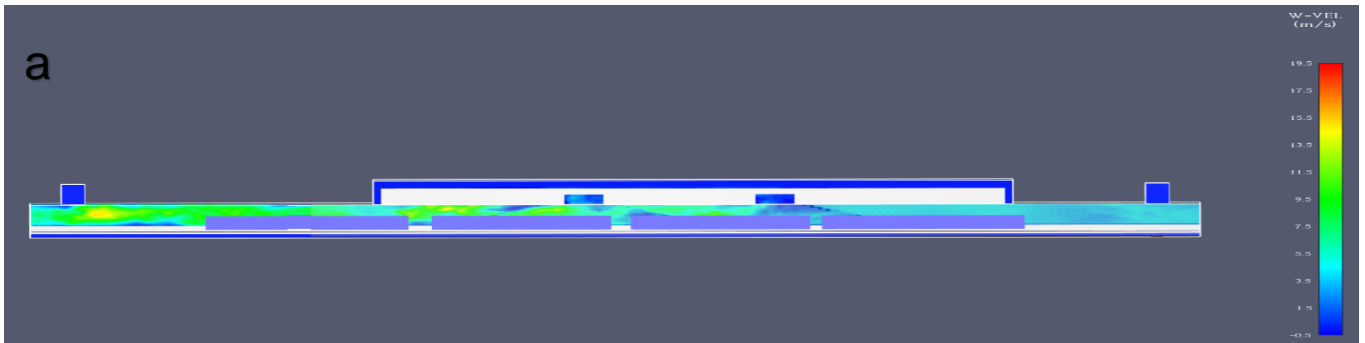


d)

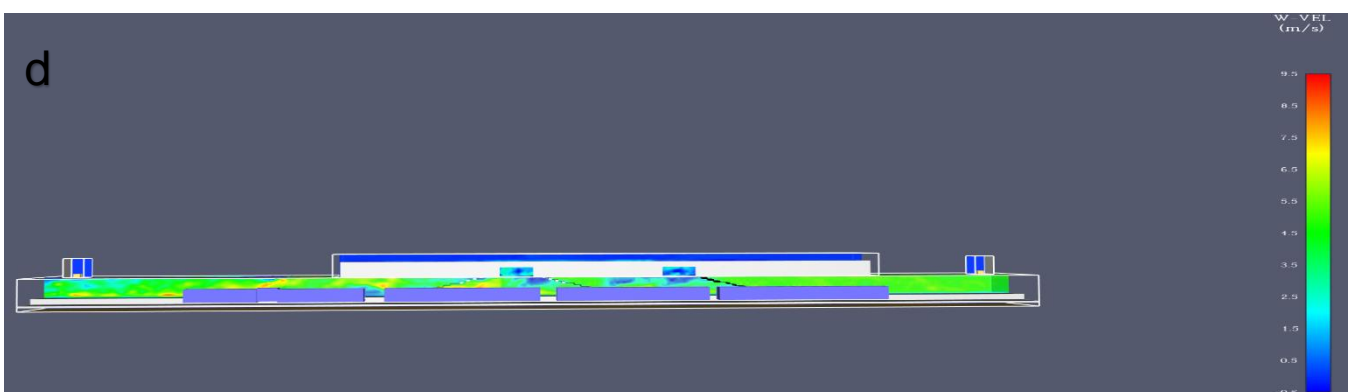
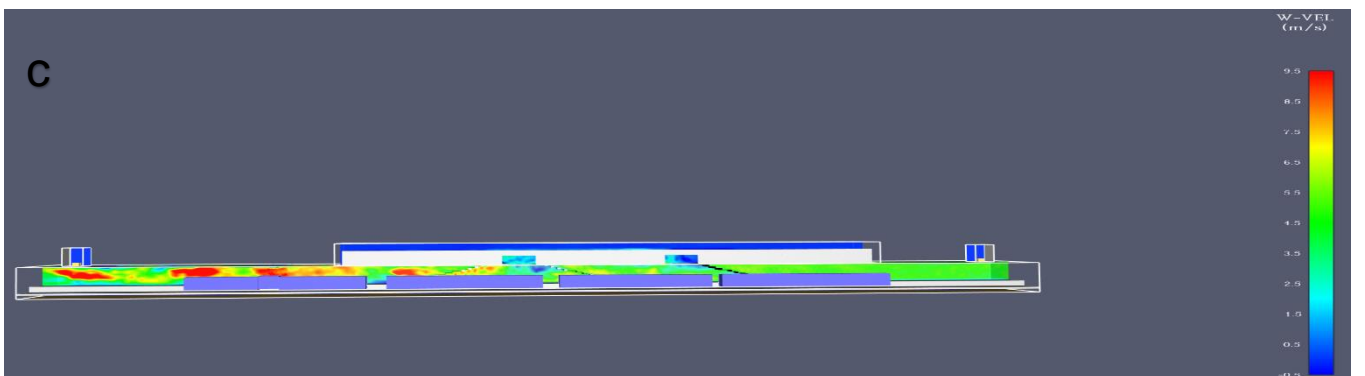
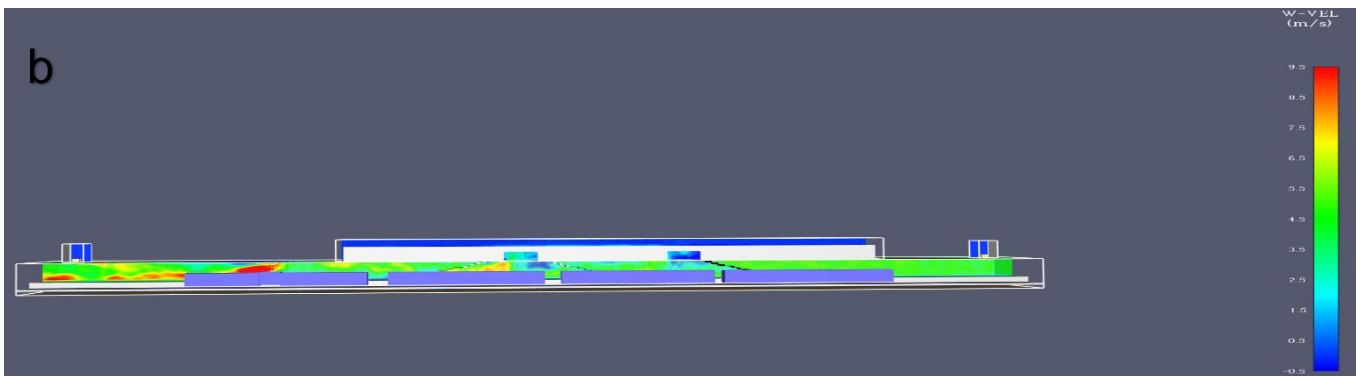
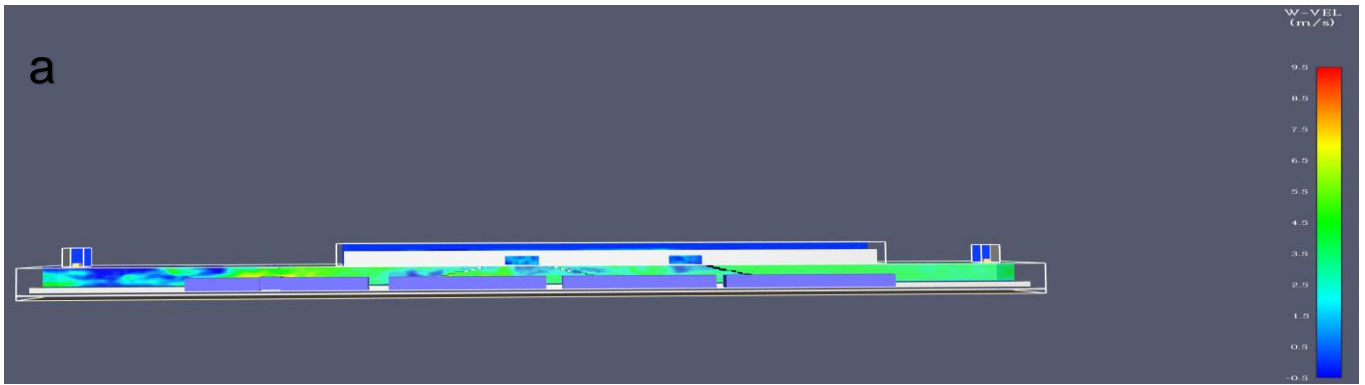
Σχήμα 5-2 Χρονική εξέλιξη της εξάπλωσης καπνού για μετά από: a) 50s ,b) 150s, c)300s) , d) 450s



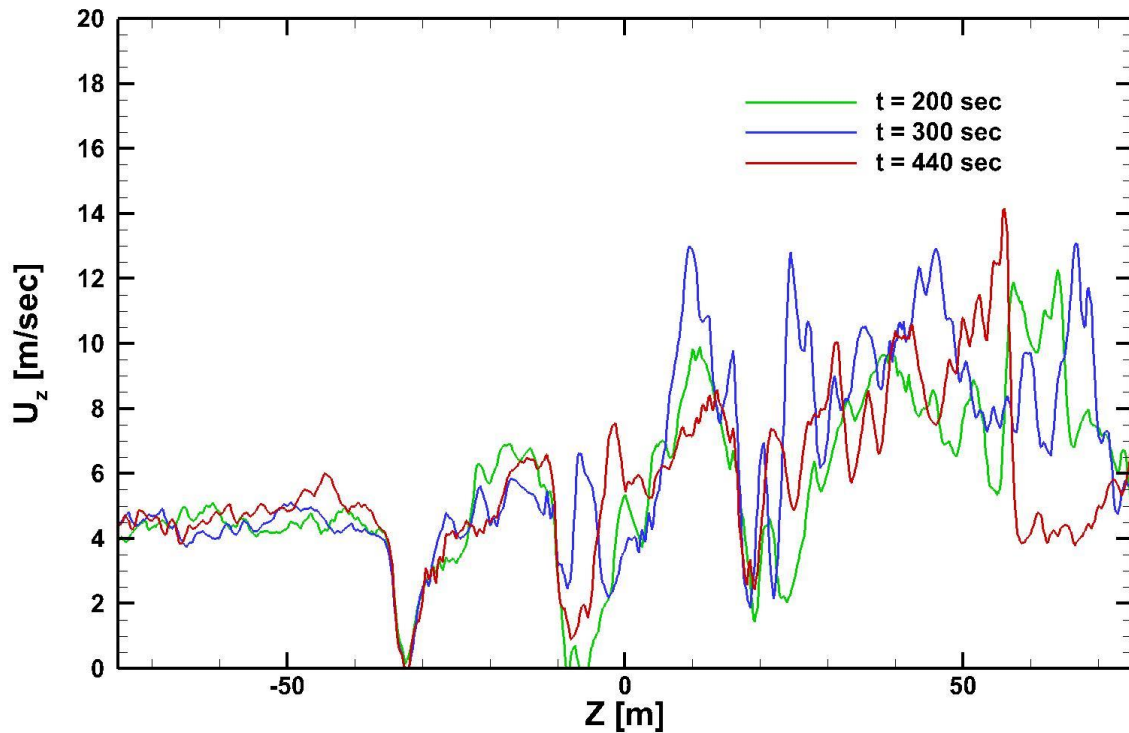
Σχήμα 5-3 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-4 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w -Velocity) σε απόσταση 2m στον άξονα των x από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-5 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w -Velocity) σε απόσταση -2m στον άξονα των x από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



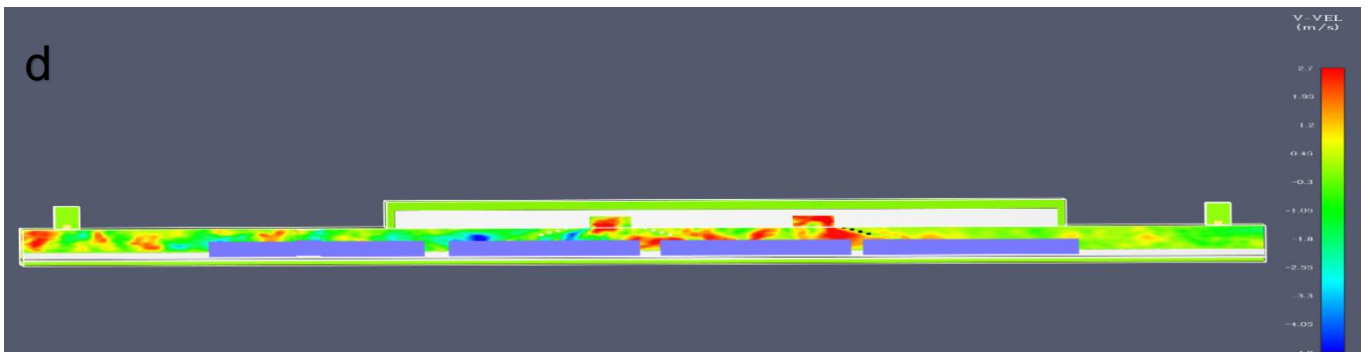
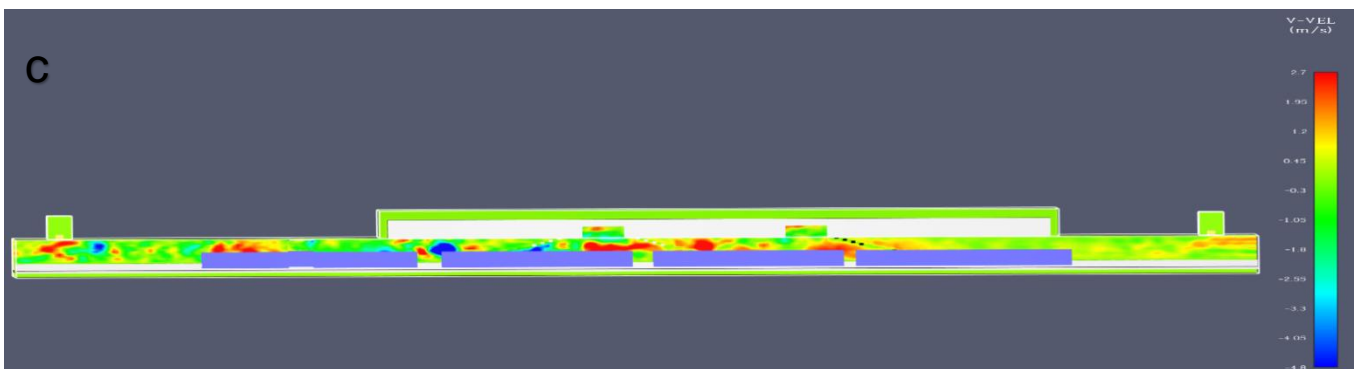
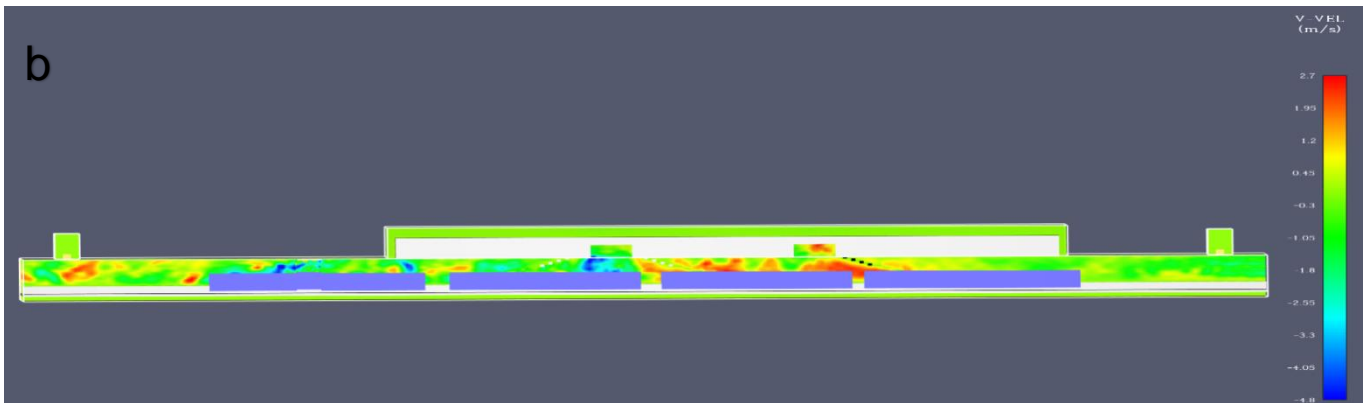
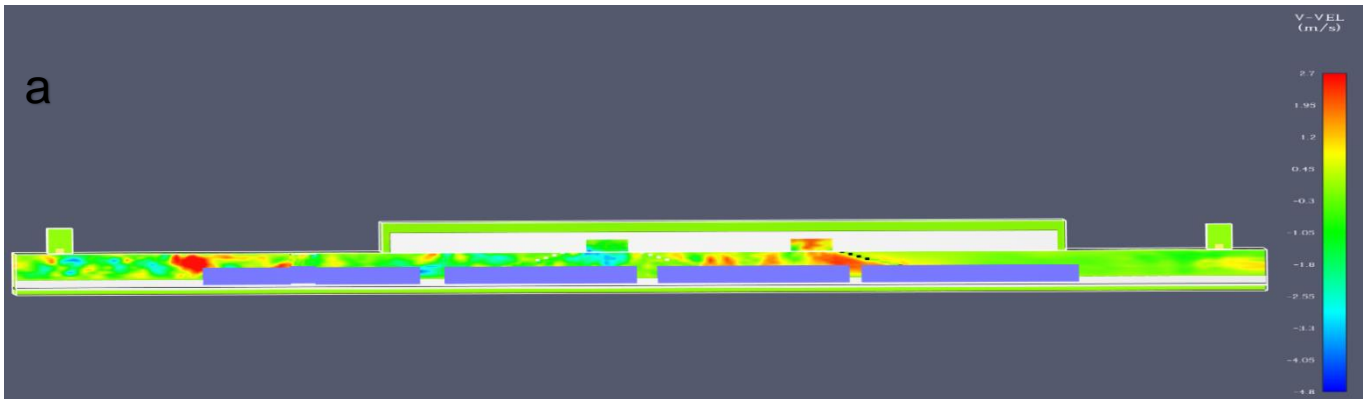
Σχήμα 5-6 Κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο για διαφορετικές χρονικές στιγμές στο ύψος διέλευσης των επιβατών.

Παρατηρούμε από το Σχήμα 5-6 ότι έχουμε επίτευξη της κρίσιμης ταχύτητας στο μεγαλύτερο μέρος του συμμετρικού επιπέδου του σταθμού. Πολύ σημαντικό είναι ότι στα σημεία όπου βρίσκονται οι σκάλες η ταχύτητα εμφανίζει μηδενικές τιμές, αφού η ροή του αέρα αποκόπτεται λόγω του εμποδίου που παρουσιάζεται. Επίσης στα σημεία αριστερά της φωτιάς (θετικός άξονας) η ταχύτητα εμφανίζει απότομη αύξηση της τιμής της, λόγω της επιτάχυνσης του αέρα από τη διαφορά θερμοκρασίας. Οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις στο διάγραμμά μας εμφανίζονται τη χρονική στιγμή 300 sec όπου η φωτιά έχει εξελιχθεί πλήρως.

5.1.2 Κατακόρυφη ταχύτητα

Ένας σημαντικός παράγοντας που μελετάμε είναι η κατακόρυφη ταχύτητα, η παροχή του αέρα που εισέρχεται εντός του σταθμού από τα φρεάτια αερισμού αλλά και από τα ανοίγματα, είναι αυτή που θα εξασφαλίσει τις κατάλληλες συνθήκες εκκένωσης. Το επίπεδο συμμετρίας του σταθμού αποτελεί και το επίπεδο ενδιαφέροντος σε αυτό το κεφάλαιο καθώς εκεί βρίσκονται όλα τα ανοίγματά μας, παράλληλα αυτό είναι και το επίπεδο διέλευσης των επιβατών. Στο

Σχήμα 5-7 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή των τιμών της κατακόρυφης ταχύτητας. Στη διάρκεια των πρώτων 50 sec οι τιμές της κατακόρυφης ταχύτητας στο μεγαλύτερο μέρος του σταθμού παρουσιάζονται σταθερές. Η κατακόρυφη ταχύτητα εμφανίζεται να έχει αρνητικό πρόσημο και κυρίως στα φρεάτια αερισμού τα οποία παρουσιάζουν μια σταθερή παροχή αέρα εντός του σταθμού καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Μετά τα 150 sec και μέχρι το πέρας της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι στο σημείο του σταθμού όπου υπάρχει η φωτιά, στο τρίτο βαγόνι του συρμού, η κατακόρυφη ταχύτητα παρουσιάζει θετικό πρόσημο. Αυτό οφείλεται στις δυνάμεις άνωσης που εμφανίζονται λόγω της μεγάλης διαφοράς θερμοκρασιών. Τέλος, στο σημείο του σταθμού όπου βρίσκεται η αριστερή σκάλα παρουσιάζονται δυσμενέστερες συνθήκες καθώς η κατακόρυφη ταχύτητα εμφανίζει αρνητικό πρόσημο, δηλαδή υπάρχει αναστροφή του καπνού και άρα δυσκολότερες συνθήκες για την όραση των επιβατών κατά την εκκένωση.



Σχήμα 5-7 Ισοϋψής κατανομή της κατακόρυφης ταχύτητας (v-Velocity) στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s

5.1.3 Θερμοκρασία

Παρακάτω θα μελετήσουμε το θερμοκρασιακό προφίλ εντός του σταθμού για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τα επίπεδα ενδιαφέροντος είναι τρία, αρχικά το συμμετρικό επίπεδο του σταθμού αλλά και τα 2 επίπεδα μεταξύ του συρμού και της αποβάθρας τόσο για τη μία μεριά του σταθμού, όσο και για την άλλη. Σκοπός είναι να γίνει μία πρώτη εκτίμηση για την επίδραση της θερμοκρασίας στο επίπεδο διέλευσης των επιβατών κατά την διάρκεια απουσίας του μηχανικού αερισμού και κατά πόσο αυτή θα αποτελέσει σημαντικό κίνδυνο για την εκκένωση του σταθμού. Στη συνέχεια οι τιμές αυτές θα αποτελέσουν βάση ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που θα προκύψουν όταν θα υπάρχει η επίδραση του μηχανικού αερισμού.

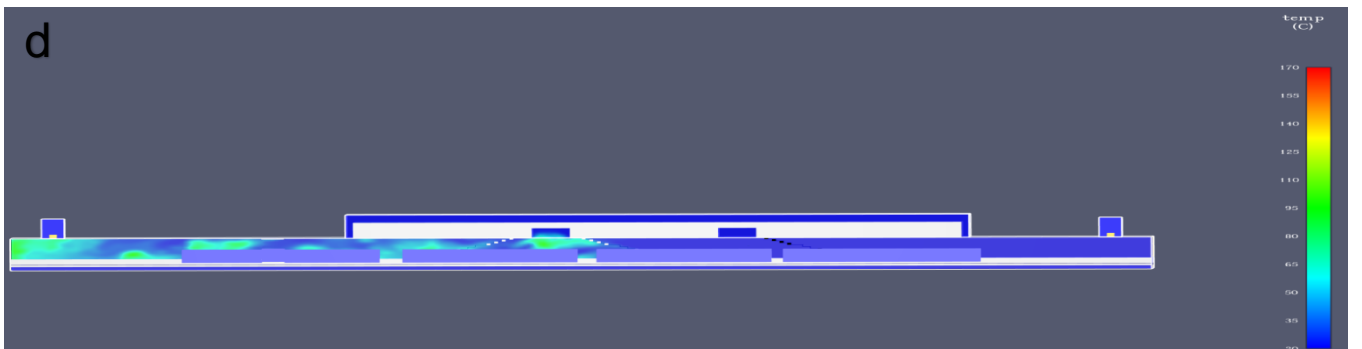
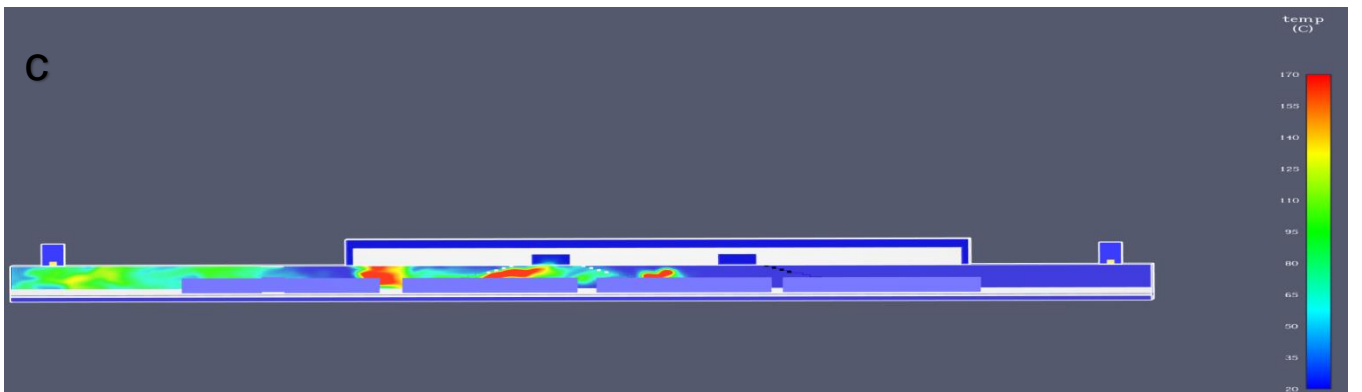
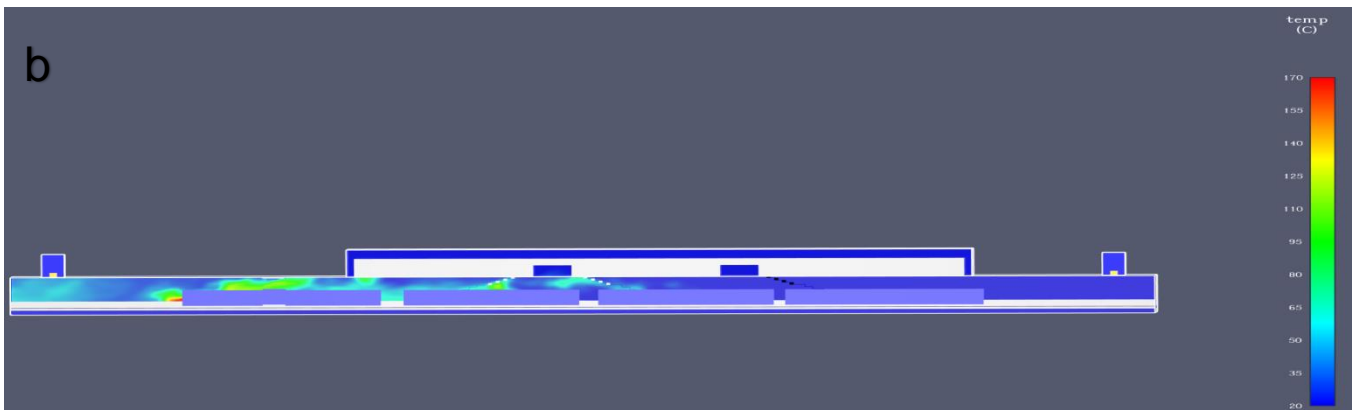
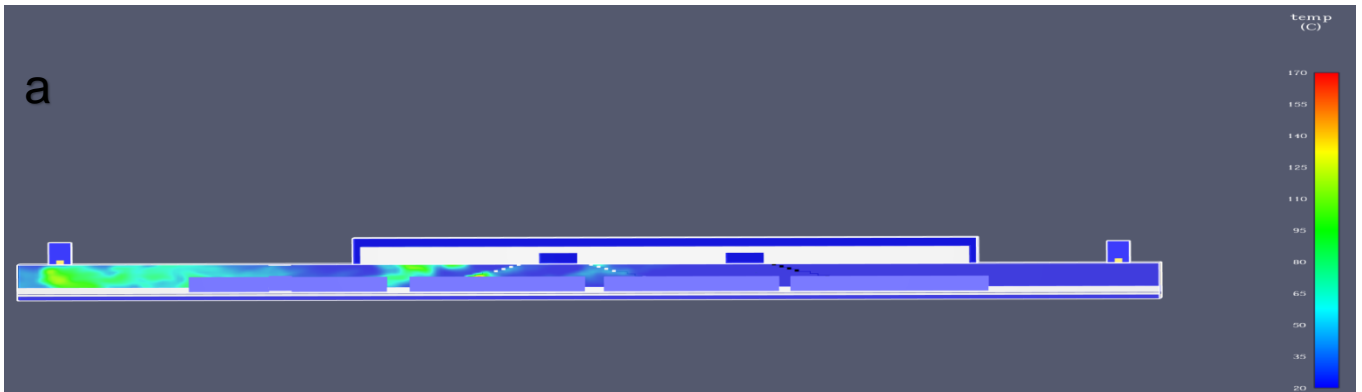
Στο Σχήμα 5-8 βλέπουμε ότι η φωτιά φτάνει το σημείο μέγιστης ισχύος της, την χρονική στιγμή 300 sec μετά την έναρξή της. Η θερμοκρασία της οροφής σχεδόν σε ολόκληρο το αριστερό κομμάτι του σταθμού παρουσιάζεται αυξημένη και όσο προχωράμε προς το δεξί μέρος του σταθμού παρατηρούμε μικρότερες θερμοκρασίες. Επίσης παρατηρούμε ότι μετά από τα 150 sec η θερμοκρασία στις σκάλες εμφανίζει αρκετά υψηλές τιμές και κυρίως την χρονική στιγμή 300 sec όπου και παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές. Μετά την χρονική στιγμή 300 sec η ισχύς της φωτιάς παρουσιάζει μια πτωτική τάση, όπως αναφέραμε στο σημείο αυτό η φωτιά έχει φτάσει στη μέγιστη ισχύ, για το λόγο αυτό ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας παρουσιάζει μια συνεχή πτώση. Τέλος μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι μετά την έναρξη της φωτιάς και μέχρι το τέλος της προσομοίωσης η θερμοκρασία στο επίπεδο διέλευσης των επιβατών στην αποβάθρα εμφανίζει αυξημένες τιμές από το μέσον του σταθμού και αριστερά, αυτό αποτελεί κίνδυνο για τους επιβάτες που βρίσκονται στα δύο πρώτα βαγόνια.

Στο Σχήμα 5-10 παρατηρούμε ότι το επίπεδο αυτό εμφανίζει υψηλές θερμοκρασίες από την έναρξη της φωτιάς, καθώς είναι και το πλησιέστερο στον συρμό. Μετά τα 150 sec οι θερμοκρασίες ξεπερνούν τους 100 °C από το μέσον του σταθμού και αριστερά αυτού, εκεί όπου βρίσκονται τα τρία πρώτα βαγόνια. Κατά την χρονική στιγμή 300 sec παρατηρούμε θερμοκρασίες που ξεπερνούν

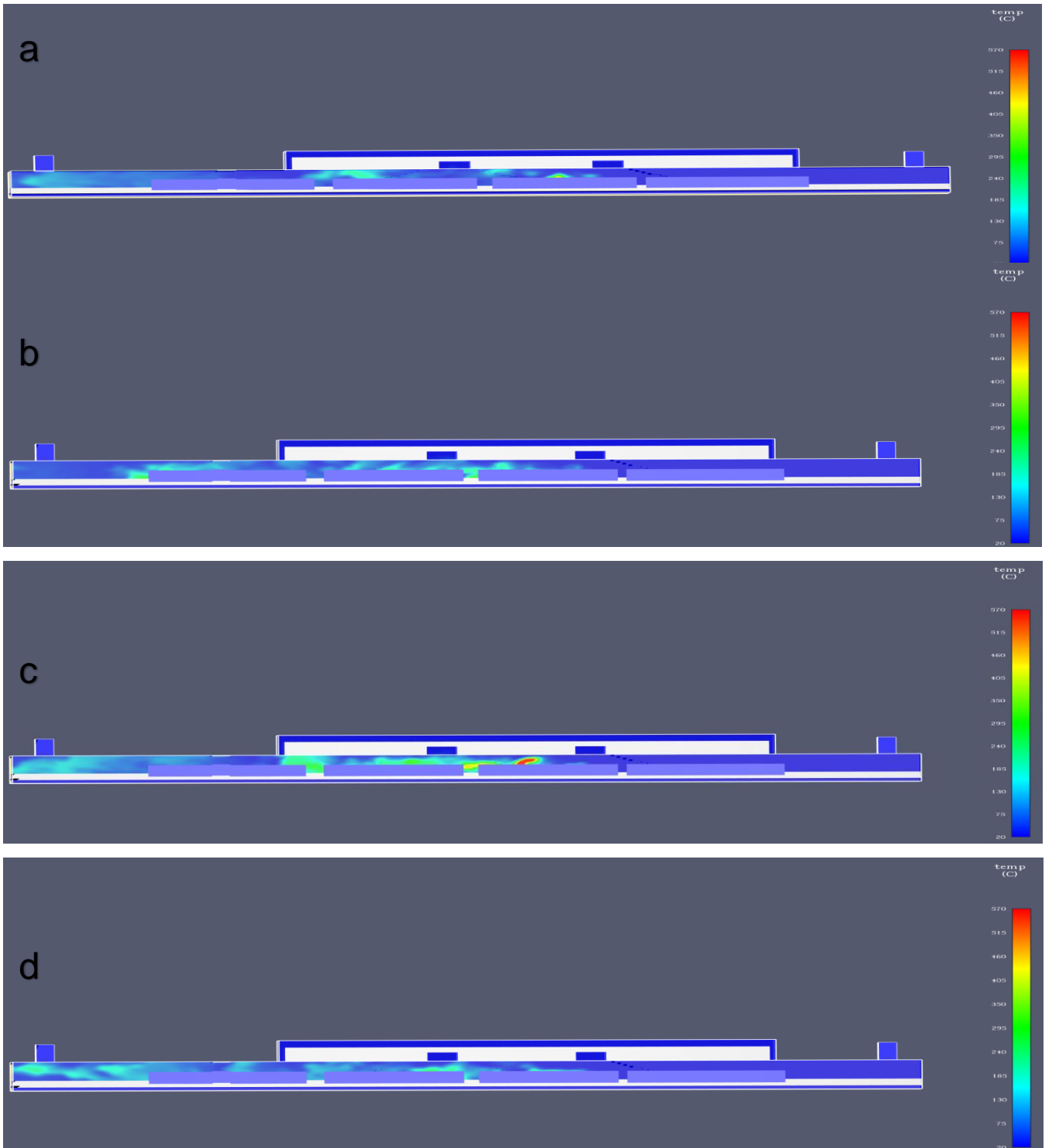
τους 400 °C, ακόμα και μετά τα 450 sec η θερμοκρασία στο κομμάτι αυτό του σταθμού δεν έχει εμφανίσει θερμοκρασίες χαμηλότερες των 100 °C. Σημαντικό είναι να παρατηρήσουμε ότι οι θερμοκρασίες αυτές εμφανίζονται στο ύψος διέλευσης των επιβατών, αυτό αποτελεί έναν επιπλέον κίνδυνο για τους επιβάτες κατά την διάρκεια εκκένωσης του σταθμού.

Τέλος στο Σχήμα 5-11 παρατηρούμε ότι οι θερμοκρασίες είναι εμφανώς χαμηλότερες σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, αφού το επίπεδο αυτό είναι σε μεγαλύτερη απόσταση από το σημείο της φωτιάς. Αξίζει να σημειωθεί ότι, τόσο σε αυτό το επίπεδο όσο και στα άλλα που μελετήσαμε, η θερμοκρασία της οροφής του σταθμού εμφανίζει υψηλές τιμές θερμοκρασίας.

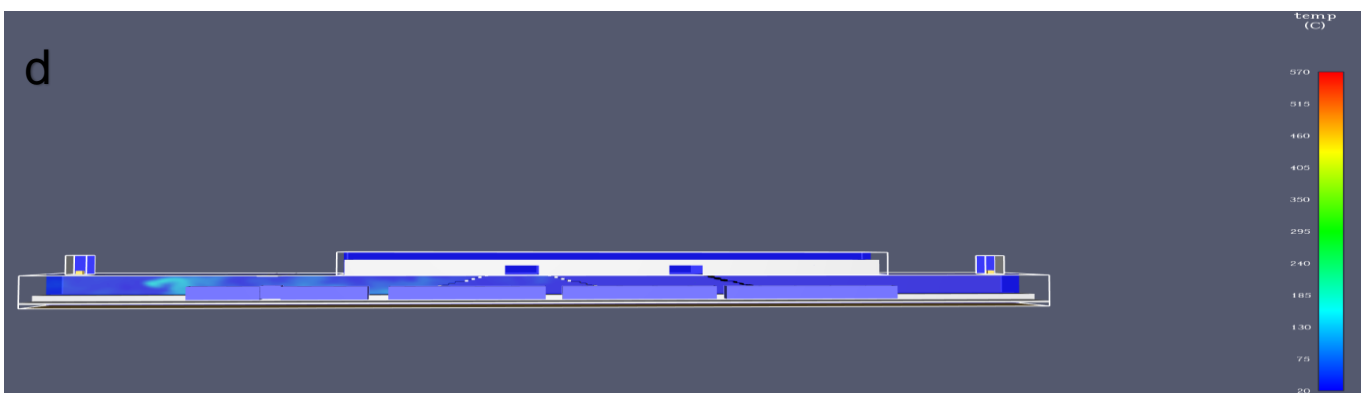
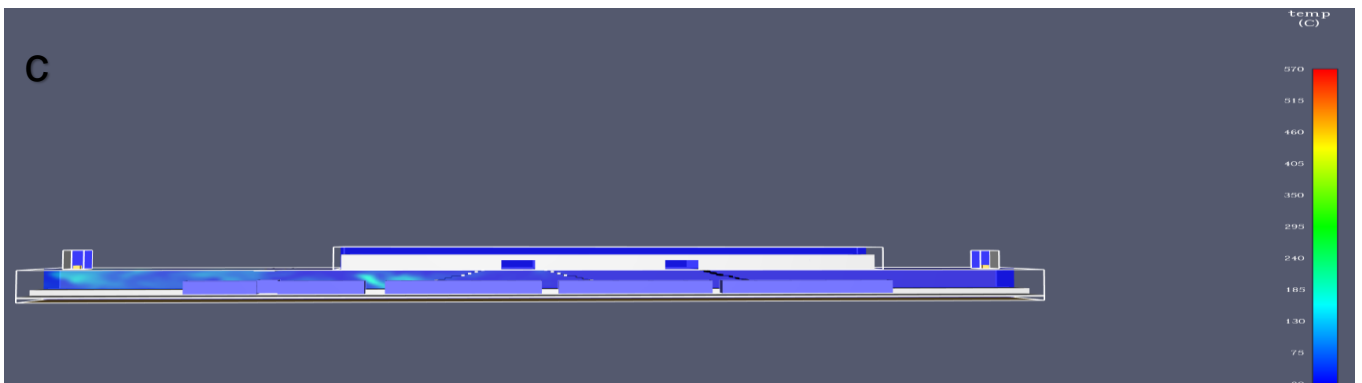
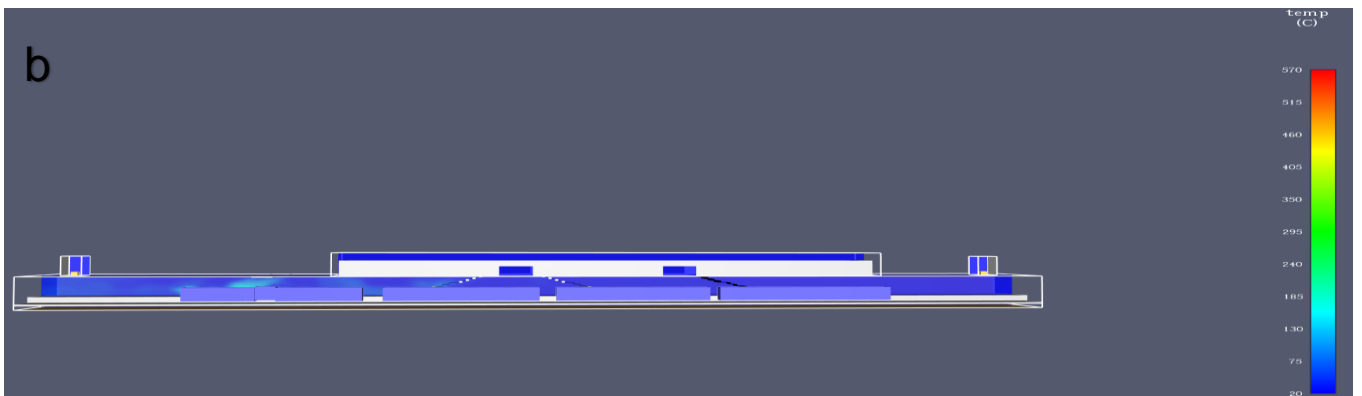
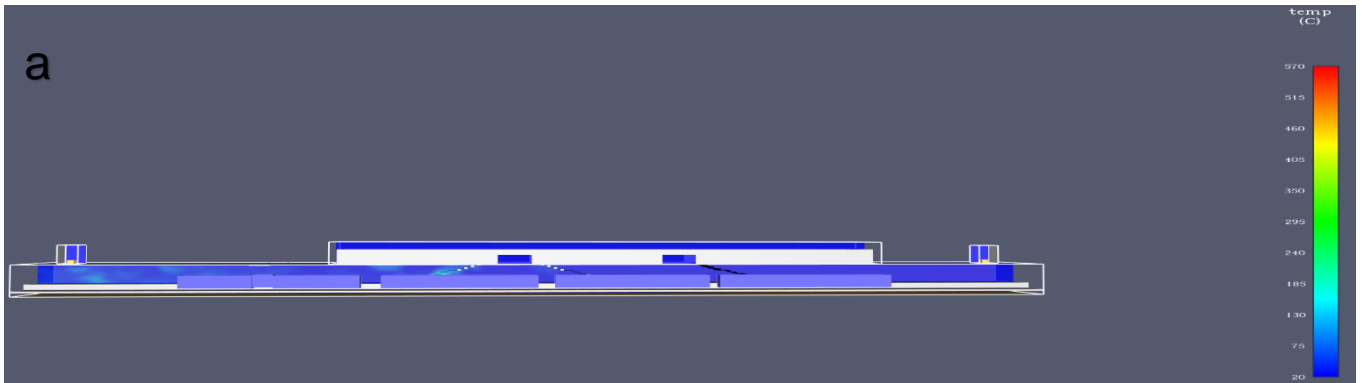
Στην γεωμετρία του χώρου έχουν τοποθετηθεί εικονικά θερμοστοιχεία (thermocouples), για την καταγραφή της θερμοκρασίας καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το πρώτο θερμοστοιχείο (thermocouple) τοποθετήθηκε στην αρχή της πρώτης σκάλας σε ύψος 1,5 m από το επίπεδο της αποβάθρας και σε απόσταση 21 m από το γεωμετρικό κέντρο του σταθμού. Τα άλλα δύο θερμοστοιχεία (thermocouples) τοποθετήθηκαν στην αρχή της δεύτερης και της τρίτης σκάλας στο ίδιο ύψος με το πρώτο και σε απόσταση -12,5 m και -36,5 m αντίστοιχα, από το γεωμετρικό κέντρο του σταθμού. Στο Σχήμα 5-11 παρατηρούμε ότι τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες καταγράφουμε στις σκάλες που βρίσκονται αριστερά από το μέσον του σταθμού. Αντίθετα η σκάλα που βρίσκεται δεξιά από το μέσον του σταθμού παρουσιάζει ικανοποιητικές θερμοκρασίες, ιδανικές για την εκκένωση του σταθμού από αυτό το σημείο. Τα δεδομένα του διαγράμματος επιβεβαιώνουν και τις παρατηρήσεις που κάναμε από το Σχήμα 5-8.



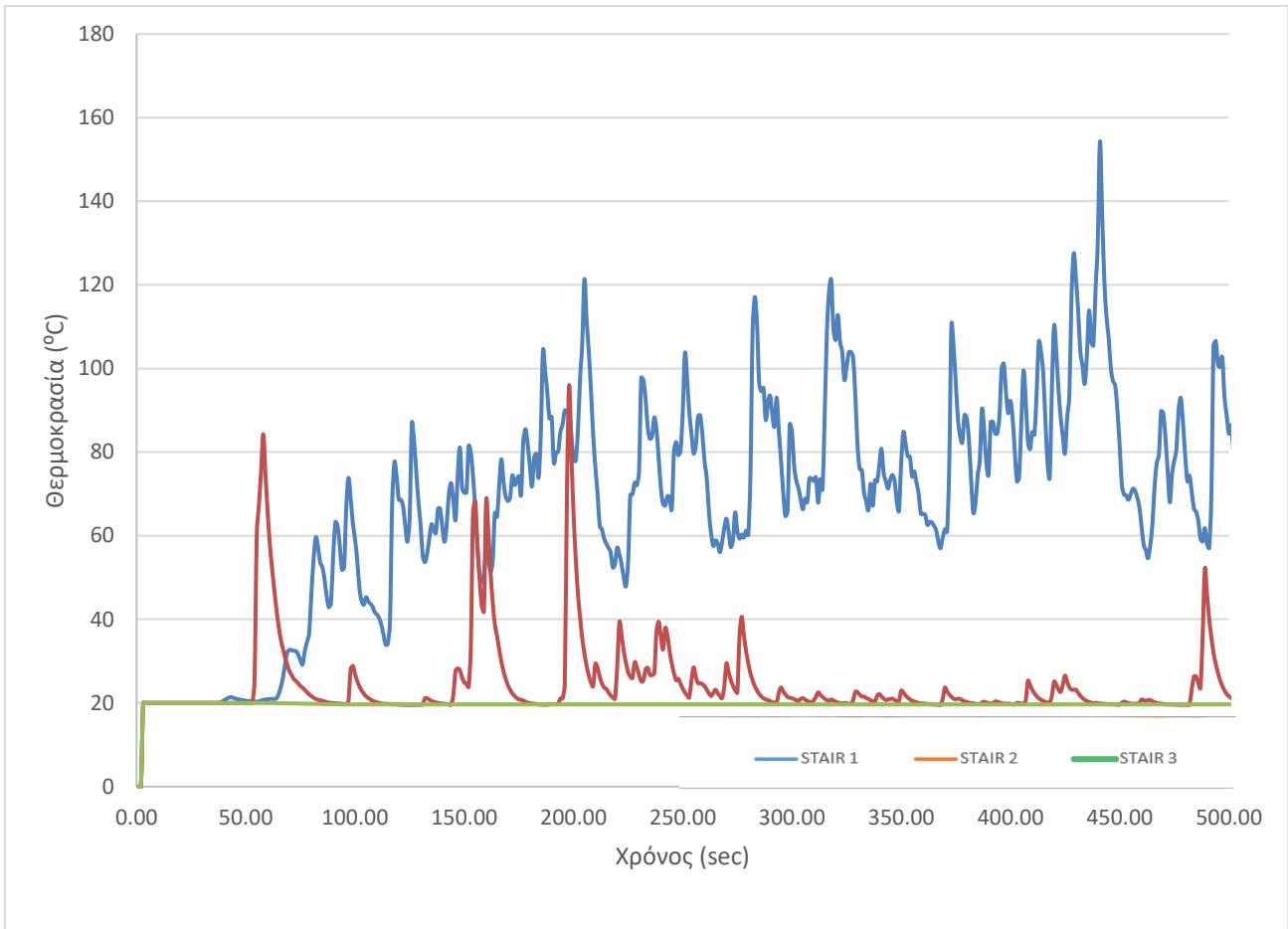
Σχήμα 5-8 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-9 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση 2 m στον άξονα των x από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-10 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση -2 m στον άξονα των x από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-11 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς πάνω από τις σκάλες στο ύψος διέλευσης των επιβατών.

5.2 Σενάριο 2: Φωτιά υπό την παρουσία μηχανικού αερισμού (Με αναρρόφηση και κατάθλιψη εντός του σταθμού)

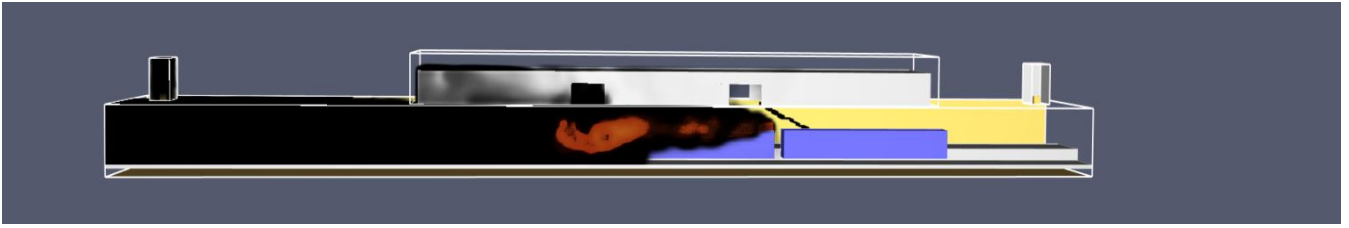
Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε το δεύτερο σενάριο αυτής της διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα σε αυτό το σενάριο εξετάζουμε την επίδραση που έχει η παρουσία μηχανικού αερισμού στον αποκαπνισμό του σταθμού. Για το σενάριο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο ανεμιστήρες, τα χαρακτηριστικά των οποίων αναλύθηκαν στο 4.4, όπου η λειτουργία τους θα είναι ο πρώτος να κάνει αναρρόφηση και ο δεύτερος να καταθλίβει. Η ισχύς της φωτιάς θα είναι ίδια με το πρώτο σενάριο που εξετάσαμε, δηλαδή 15 Mw το ίδιο και η θέση της πάνω στο τρένο. Οι ανεμιστήρες είναι σε λειτουργία από την αρχή της φωτιάς καθώς αποτελούν μέρος του συστήματος εξαερισμού του σταθμού. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τα μεγέθη που εξετάστηκαν και στο πρώτο σενάριο, δηλαδή η οριζόντια ταχύτητα, η κατακόρυφη ταχύτητα και η θερμοκρασία. Τα επίπεδα ενδιαφέροντος είναι το επίπεδο συμμετρίας του σταθμού όπου ταυτίζεται με το επίπεδο των ανεμιστήρων, τα επίπεδα μεταξύ συρμού και αποβάθρας σε απόσταση $x=2m$ και $x=-2m$ από το επίπεδο συμμετρίας.

5.2.1 Οριζόντια ταχύτητα

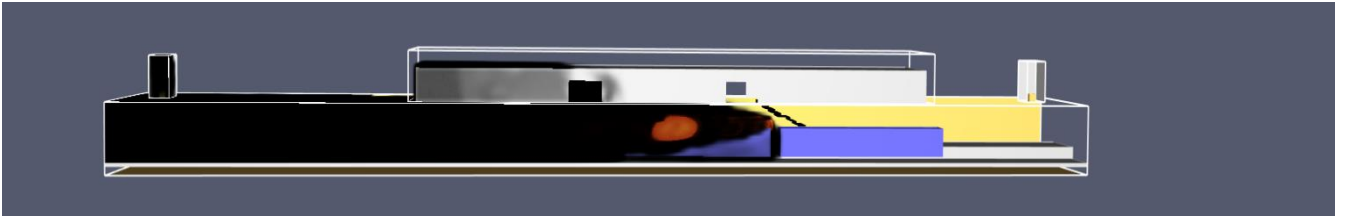
Στο Σχήμα 5-13 a) παρατηρούμε ότι η επίδραση του μηχανικού αερισμού είναι εμφανής από την αρχή της προσομοίωσης οι ταχύτητες που παρατηρούνται από τα 50 sec είναι πάνω από τα 2,5 m/s (ταχύτητα πάνω από την οποία δεν έχουμε εμφάνιση του φαινομένου αναστροφής του καπνού) στο μεγαλύτερο μέρος της αποβάθρας. Μετά τα 150 sec Σχήμα 5-13 b) έχουμε και εμφάνιση ταχυτήτων πάνω από τα 10 m/s, συνεπώς υπάρχει κίνηση του αέρα εντός του σταθμού σε όλο το μήκος της αποβάθρας. Επίσης έχουμε εμφάνιση ταχυτήτων με αρνητικό πρόσημο στις σκάλες του σταθμού σε διάφορες χρονικές στιγμές. Αυτό είναι πολύ σημαντικό κατά την διάρκεια της εκκένωσης του σταθμού αφού ο αέρας που φυσάει εξασφαλίζει καλύτερο οπτικό πεδίο στους επιβάτες.

Παρατηρούμε από το Σχήμα 5-14 ότι οι ταχύτητες στο σημείο +2m από το επίπεδο συμμετρίας του σταθμού εμφανίζουν ταχύτητες πάνω από τα 2,5 m/s, άρα υπάρχουν ικανοποιητικότερες συνθήκες για τους επιβάτες που θα βρίσκονται πάνω στην αποβάθρα αλλά και για αυτούς που βρίσκονται εντός του συρμού.

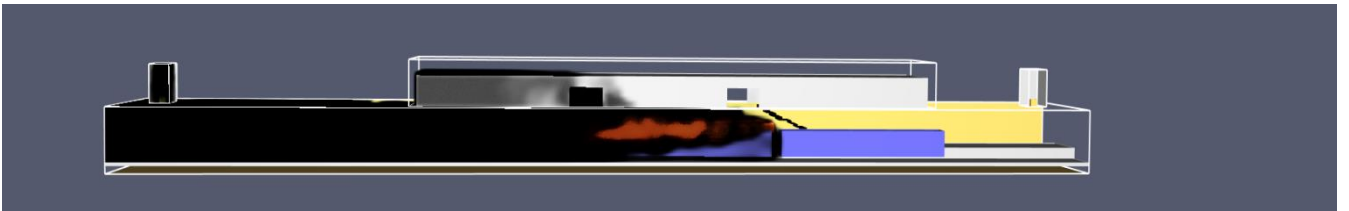
Όπως παρατηρήσαμε και στο πρώτο σενάριο η φωτιά παρουσιάζει ένα σημείο μέγιστης ισχύος. Σε αυτό το σενάριο παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές της οριζόντιας ταχύτητας εμφανίζονται μετά τα 150 sec και στα τρία επίπεδα ενδιαφέροντος. Άρα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι σε εκείνη τη χρονική στιγμή έχουμε τη μέγιστη ισχύ της φωτιάς, αφού υπάρχει η μέγιστη επιτάχυνση του αέρα λόγω της φωτιάς. Από το Σχήμα 5-16 παρατηρούμε ότι και σε αυτό το επίπεδο εμφανίζονται ικανοποιητικές τιμές οριζόντιας ταχύτητας (w velocity), όμως οι τιμές αυτές είναι μικρότερες από αυτές που εμφανίζονται κοντά στη φωτιά. Επίσης στο Σχήμα 5-16 a) παρατηρούμε ότι στα πρώτα 50 sec υπάρχει μια περιοχή όπου η ταχύτητα παρουσιάζει αρνητικό πρόσημο και αυτό είναι εμφανές πριν την έναρξη της φωτιάς, μέχρι τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά την έναρξή της. Μόλις η φωτιά αρχίζει και αυξάνει την ισχύ της, υπάρχει μία αύξηση στις τιμές της οριζόντιας ταχύτητας και αυτές με τη σειρά τους αποκτούν θετικό πρόσημο.



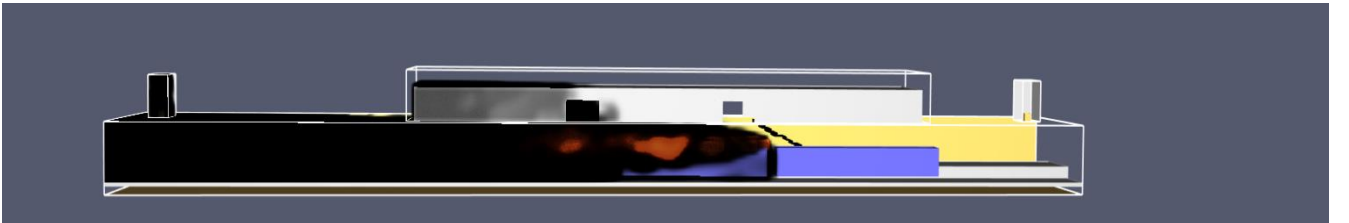
a)



b)

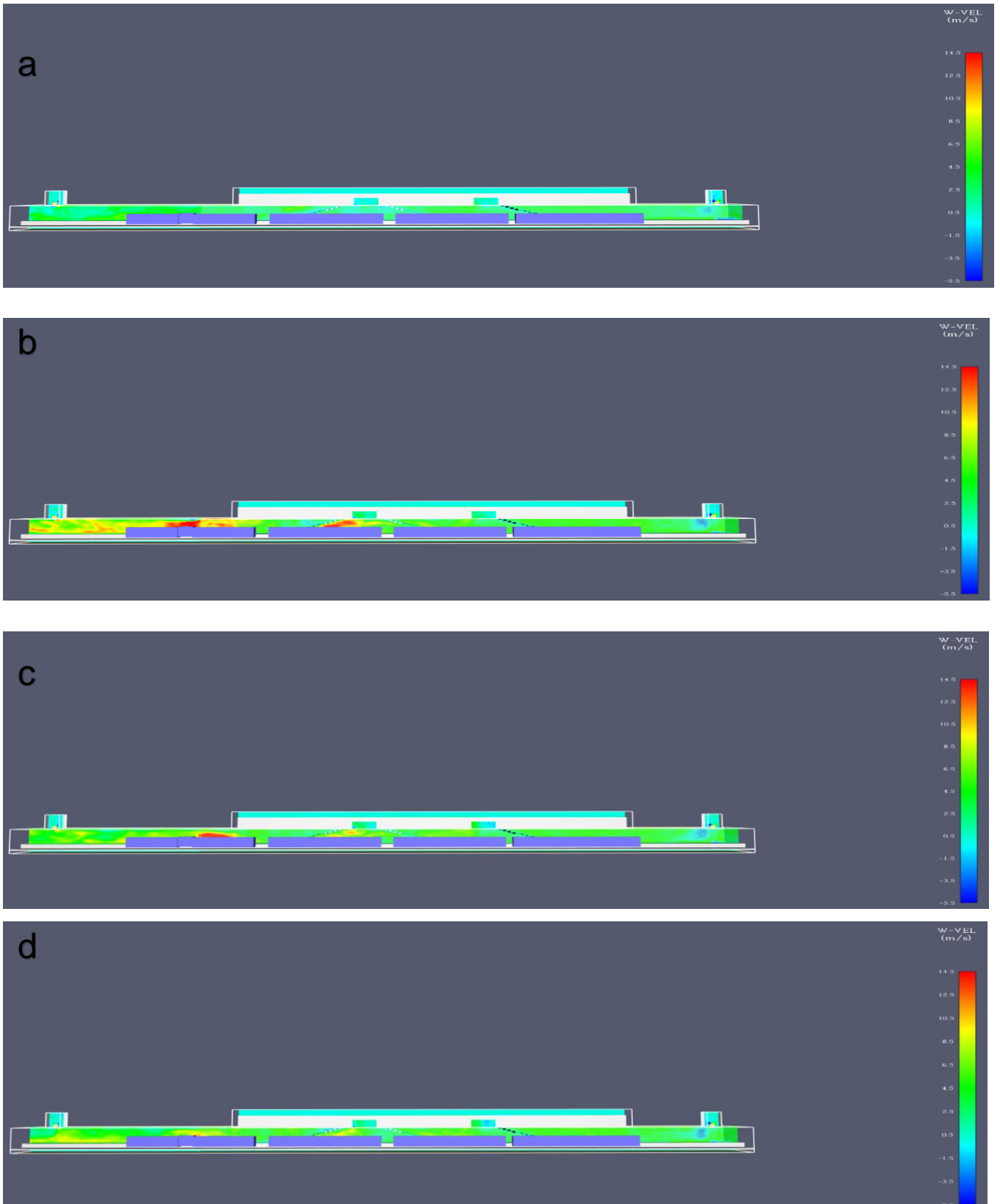


c)

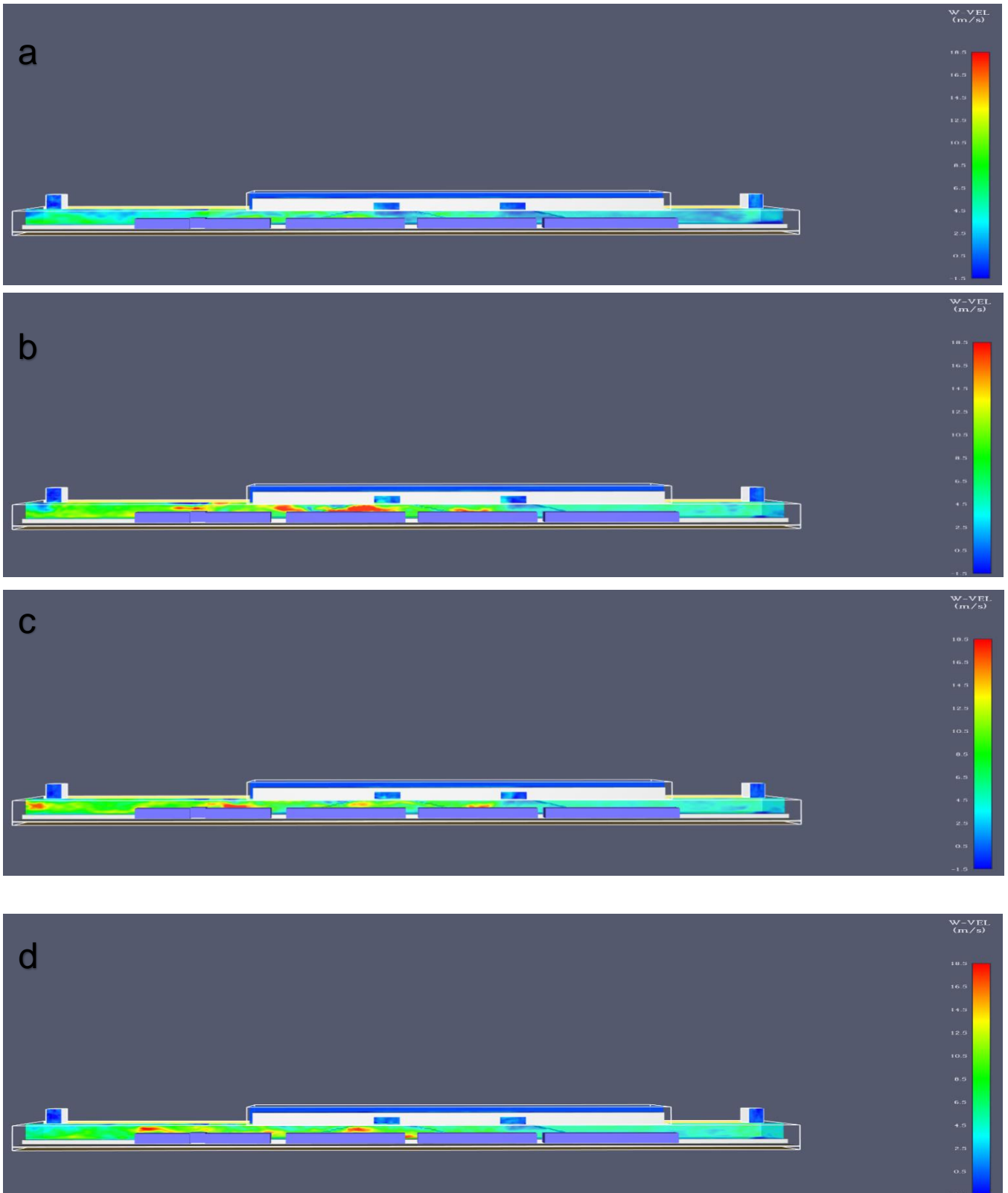


d)

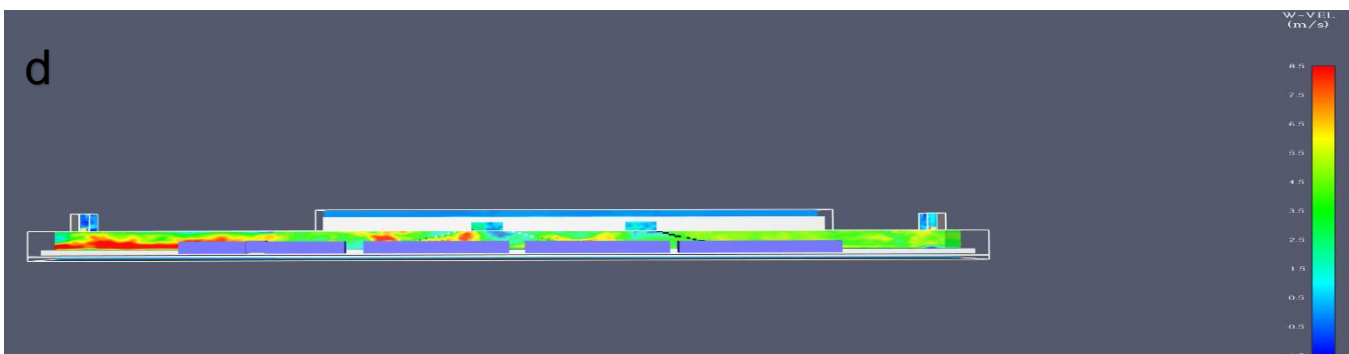
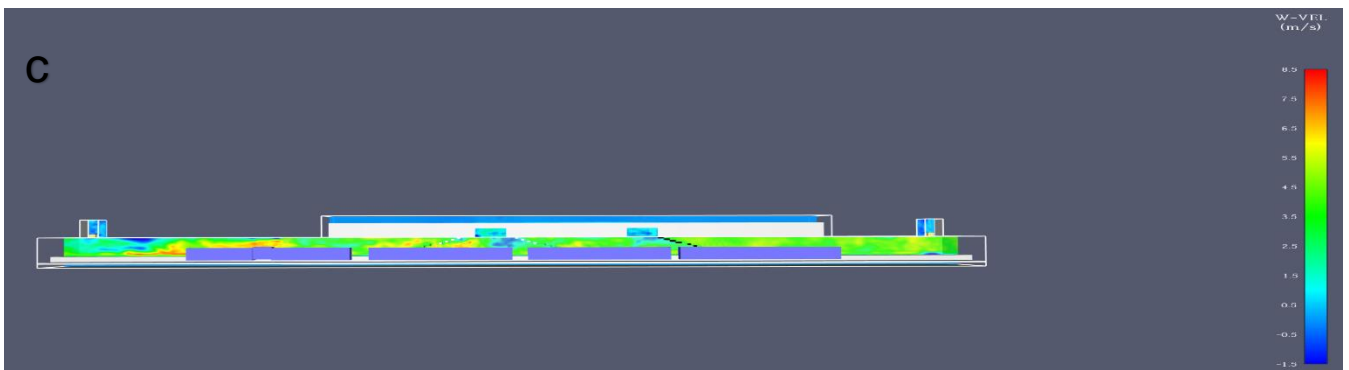
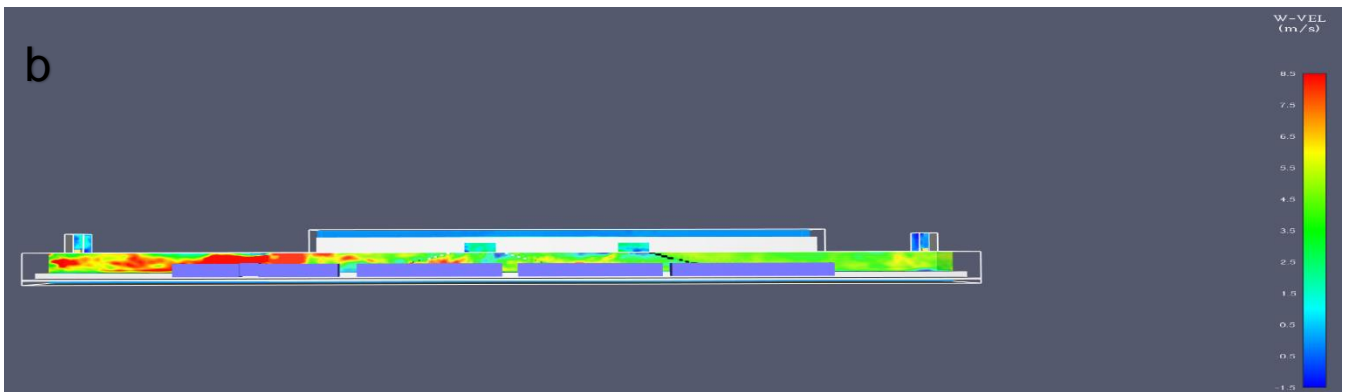
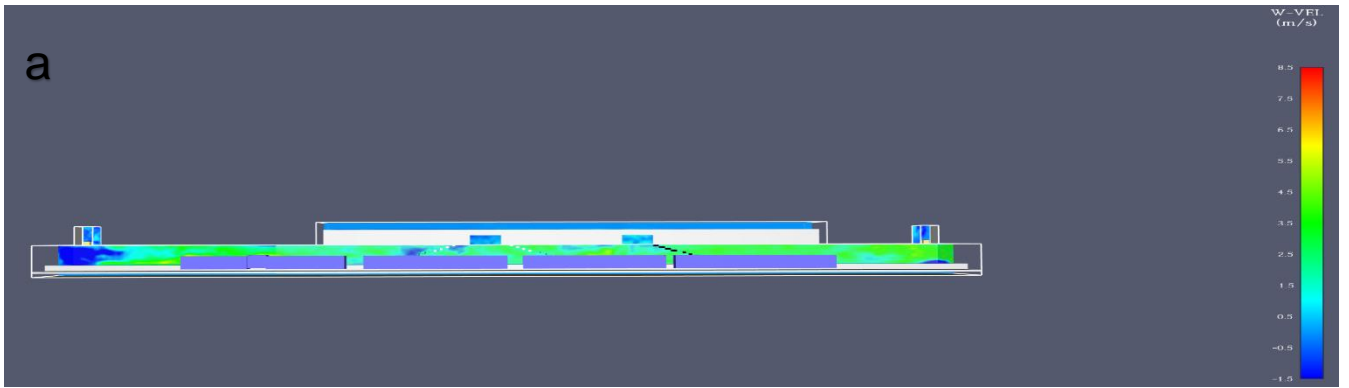
Σχήμα 5-12 Χρονική εξέλιξη της εξάπλωσης καπνού για μετά από: a) 50s ,b) 150s, c)300s) , d) 450s



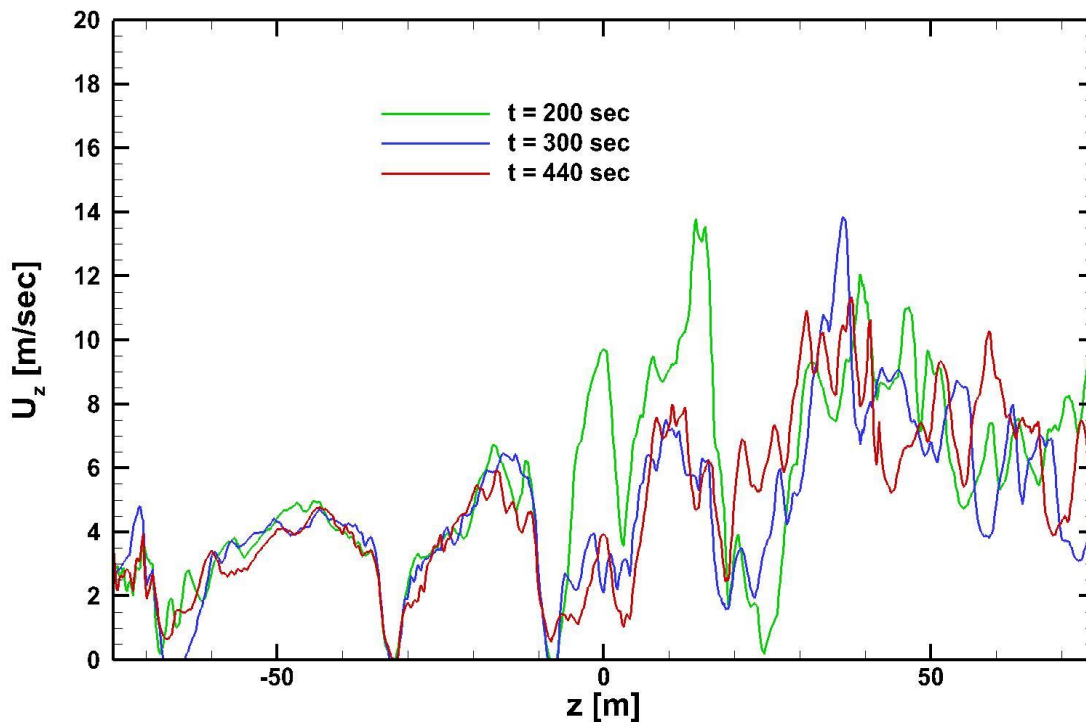
Σχήμα 5-13 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-14 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w -Velocity) σε απόσταση 2m στον άξονα των x από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-15 Ισοψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w -Velocity) σε απόσταση -2m στον άξονα των x από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



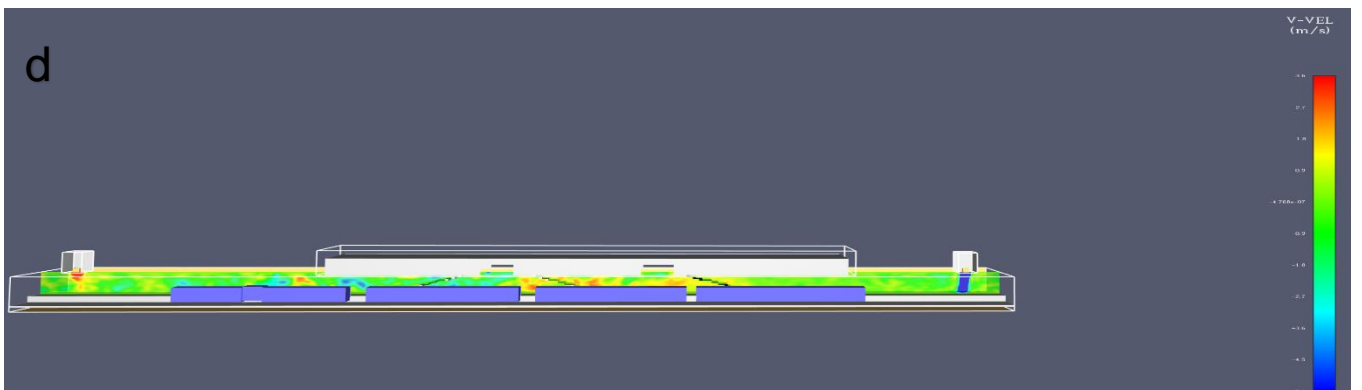
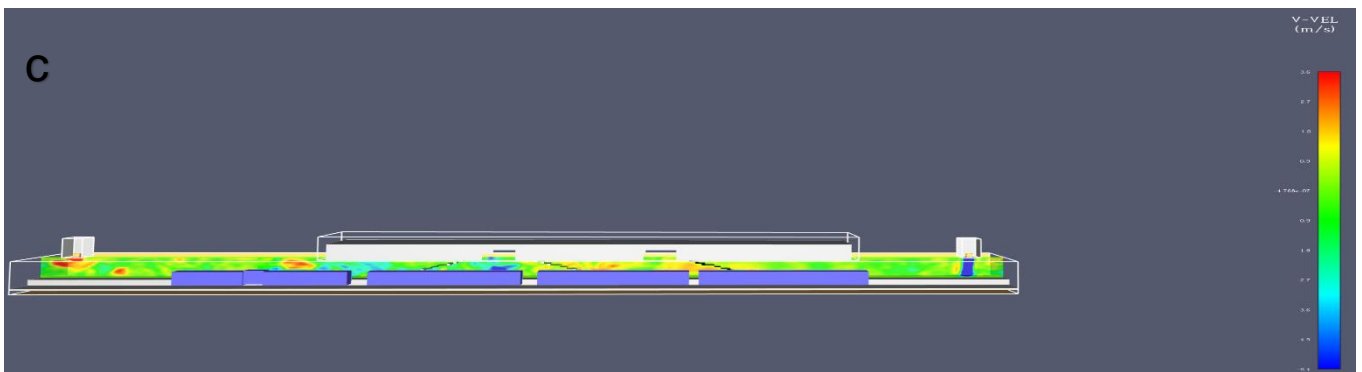
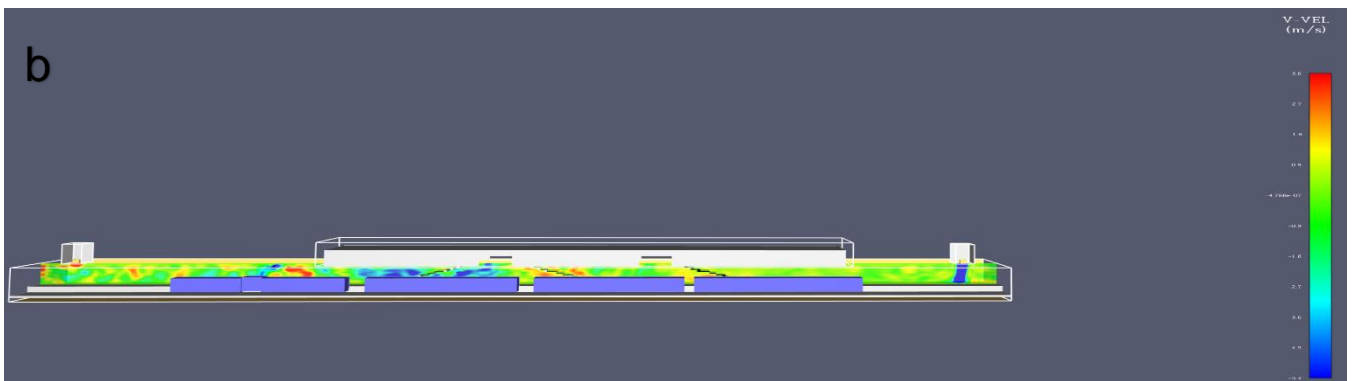
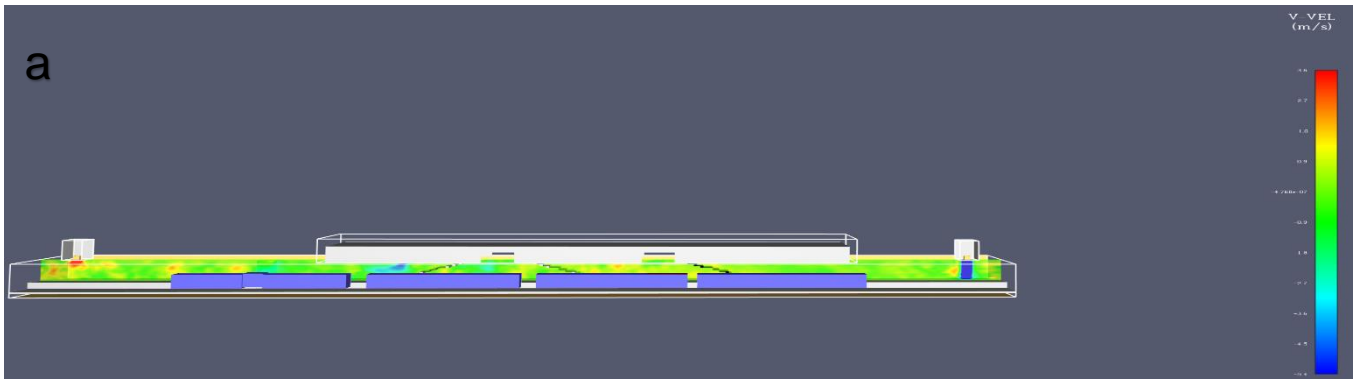
Σχήμα 5-16 Κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο για διαφορετικές χρονικές στιγμές στο ύψος διέλευσης των επιβατών.

Στο Σχήμα 5-16, για αυτό το σενάριο όπως και στο πρώτο που μελετήσαμε οι τιμές της οριζόντιας ταχύτητας που καταγράφουμε είναι πάνω από την κρίσιμη που έχουμε υπολογίσει. Ακόμα παρατηρούμε ότι στα σημεία όπου βρίσκονται οι σκάλες έχουμε μείωση της ταχύτητας, όπως είδαμε και στο πρώτο σενάριο. Στο σημείο όπου βρίσκεται το φρεάτιο προσαγωγής του αέρα παρατηρείται μια πτώση στην τιμή της οριζόντιας ταχύτητας και πιθανόν οφείλεται στην απότομη αύξηση της κατακόρυφης ταχύτητας κατά την προσαγωγή του αέρα από τον ανεμιστήρα.

5.2.1 Κατακόρυφη ταχύτητα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το προφίλ της κατακόρυφης ταχύτητας (*v* velocity) στο εσωτερικό του σταθμού. Στο Σχήμα 5-7 υπάρχει εμφάνιση της κατακόρυφης ταχύτητας κυρίως πάνω και γύρω από τη φωτιά όπου εμφανίζονται δυνάμεις άνωσης, κύριος παράγοντας είναι η διαφορά θερμοκρασίας. Αντίθετα

στο Σχήμα 5-18 παρατηρούμε ότι στα φρεάτια αερισμού εμφανίζεται στο πρώτο εισροή από το εξωτερικό περιβάλλον προς το σταθμό, οι τιμές αυτές εμφανίζονται με αρνητικό πρόσημο. Επίσης στο δεύτερο φρεάτιο παρατηρούμε ότι υπάρχει απαγωγή του αέρα από το εσωτερικό του σταθμού και σε αυτή την περίπτωση οι τιμές ταχύτητας εμφανίζουν θετικό πρόσημο. Όπως είδαμε και στο πρώτο σενάριο οι τιμές της κατακόρυφης ταχύτητας γύρω από την φωτιά εμφανίζονται υψηλές με θετικό πρόσημο, σε αντίθεση με το σενάριο που μελετάμε τώρα όπου η κατακόρυφη ταχύτητα σε αυτή την περιοχή έχει μικρότερες τιμές. Παρατηρούμε ότι στην αριστερή σκάλα υπάρχει εισροή αέρα από έξω προς τον σταθμό, σε αντίθεση με τις σκάλες που βρίσκονται δεξιά και στη μέση, όπου ο αέρας εμφανίζεται να κινείται από το εσωτερικό του σταθμού προς τα έξω.



Σχήμα 5-17 Ισοϋψής κατανομή της κατακόρυφης ταχύτητας (v-Velocity) στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s

5.2.2 Θερμοκρασία

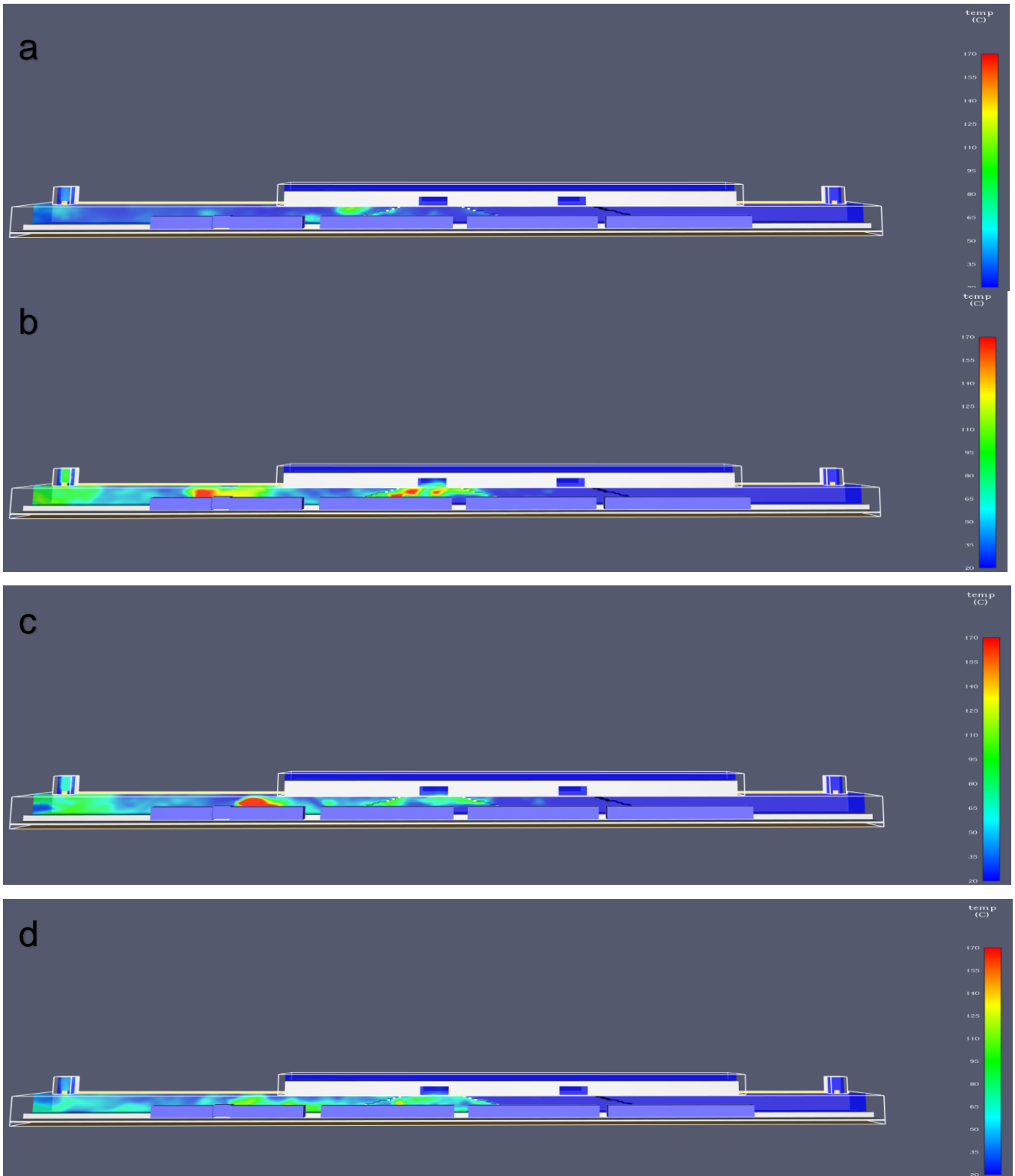
Εδώ παρουσιάζεται το προφίλ της θερμοκρασίας για τα τρία επίπεδα ενδιαφέροντος της μελέτης, όπου στο σενάριο αυτό θα υπάρχουν δύο ανεμιστήρες που ο ένας θα καταθλίβει και ο άλλος θα αναρροφά.

Στο Σχήμα 5-18 παρατηρούμε αρχικά ότι στα πρώτα 50 sec της προσομοίωσης η θερμοκρασία παραμένει σε χαμηλές τιμές στο μεγαλύτερο μέρος του σταθμού. Στο Σχήμα 5-18 b) μετά τα 150 sec όπου η φωτιά παρουσιάζει μεγαλύτερη ένταση η θερμοκρασία στην δεξιά και στη μεσαία σκάλα παρουσιάζουν αυξημένες τιμές. Όμως παρατηρούμε ότι ο ανεμιστήρας που βρίσκεται στο αριστερό μέρος του σταθμού, αναρροφά τον θερμό αέρα από το εσωτερικό του σταθμού προς τα έξω. Αυτό είναι εμφανές και στις επόμενες χρονικές στιγμές όπου η θερμοκρασία στο εσωτερικό του σταθμού παρουσιάζει μια εξομάλυνση.

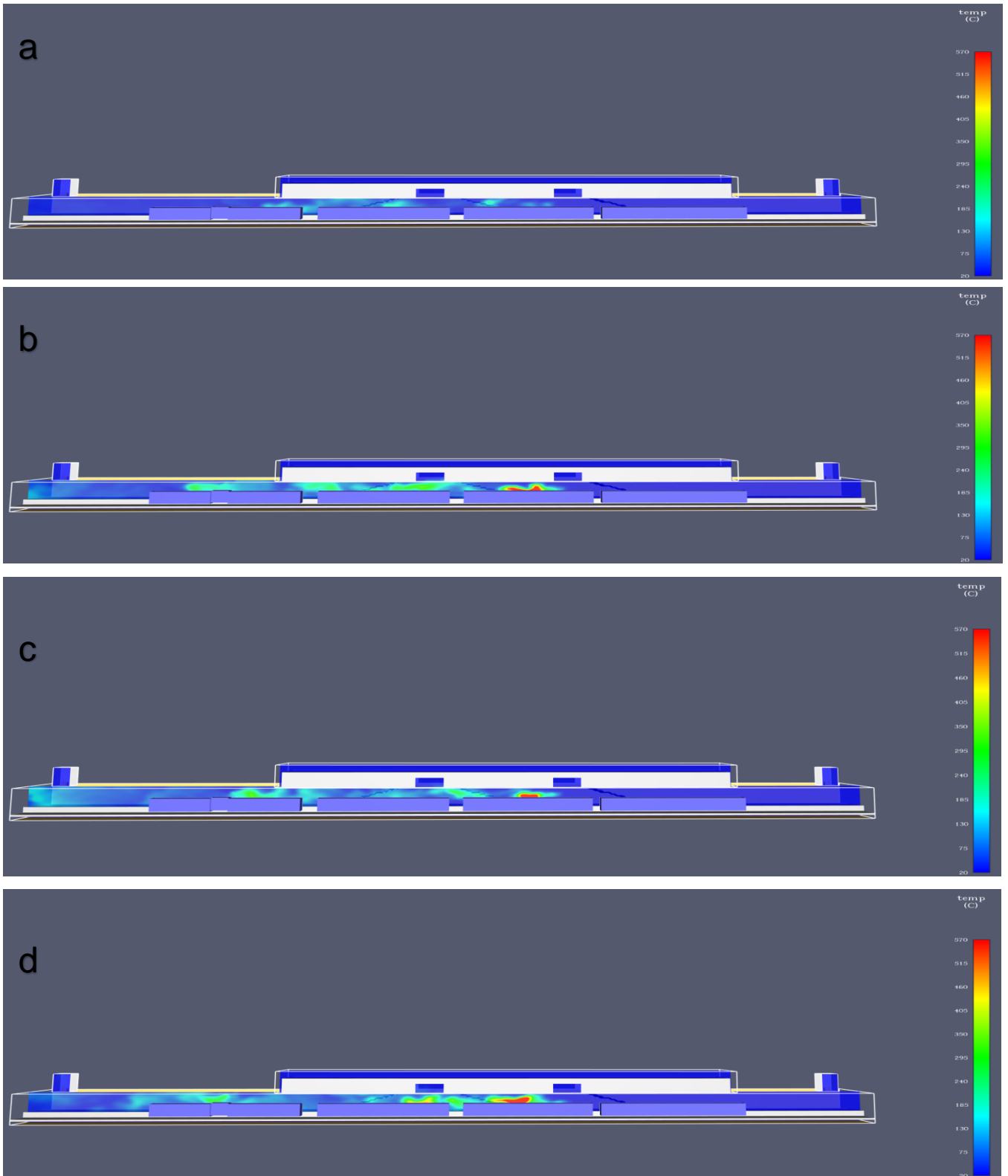
Από το Σχήμα 5-18 παρατηρούμε ότι οι τιμές της θερμοκρασίας είναι χαμηλές στο μεγαλύτερο μέρος της αποβάθρας με εξαίρεση τα σημεία κοντά στη φωτιά όπου εμφανίζονται και τιμές πάνω των 400°C τοπικά. Αυτό αποτελεί μεγάλο κίνδυνο για τους επιβάτες κυρίως του τρίτου βαγονιού.

Στο Σχήμα 5-20 οι τιμές της θερμοκρασίας είναι εμφανώς χαμηλότερες σε όλο το μήκος της αποβάθρας. Αυτό θα εξασφαλίσει και καλύτερες συνθήκες διαφυγής για τους επιβάτες.

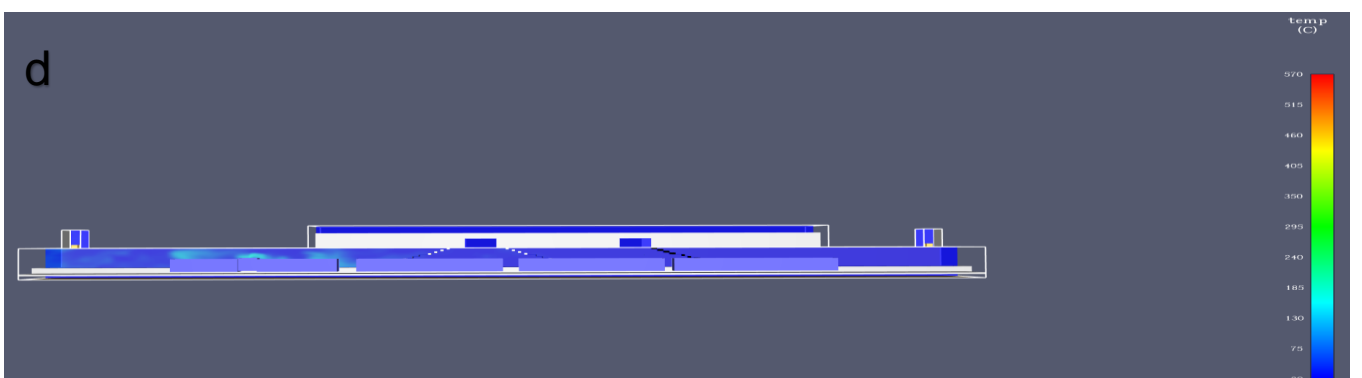
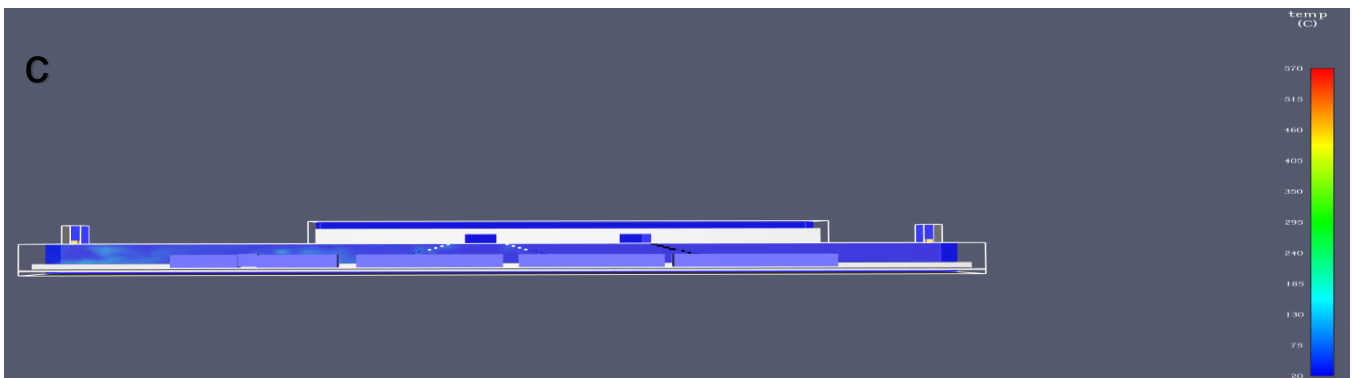
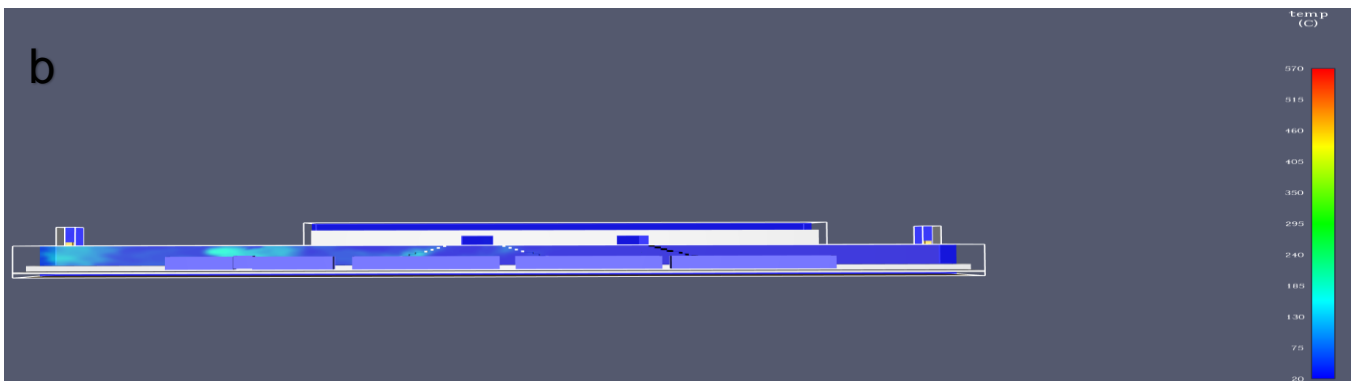
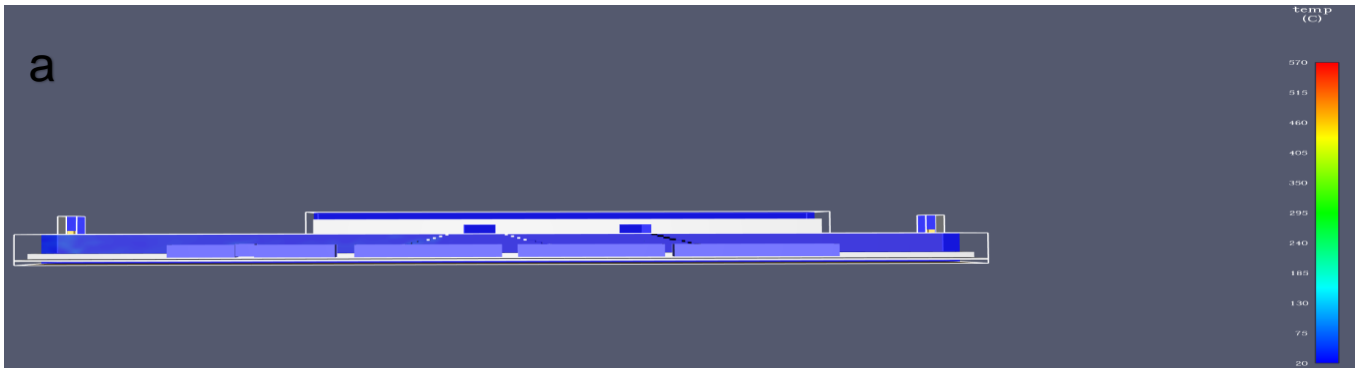
Τέλος στο Σχήμα 5-21 παρατηρούμε ότι οι θερμοκρασίες στις σκάλες ένα και δύο, που βρίσκονται αριστερά και στη μέση του σταθμού εμφανίζονται αυξημένες σε σχέση με τιμές θερμοκρασίας της δεξιάς σκάλας. Αυτό έρχεται να επιβεβαιώσει αυτό που παρατηρήσαμε και στο slice για το επίπεδο συμμετρίας παραπάνω. Η σκάλα ένα εμφανίζει υψηλότερη θερμοκρασία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ενώ η σκάλα δύο εμφανίζει έντονες μεταβολές της θερμοκρασίας που όμως πέφτουν με την πάροδο του χρόνου σε πιο χαμηλές τιμές.



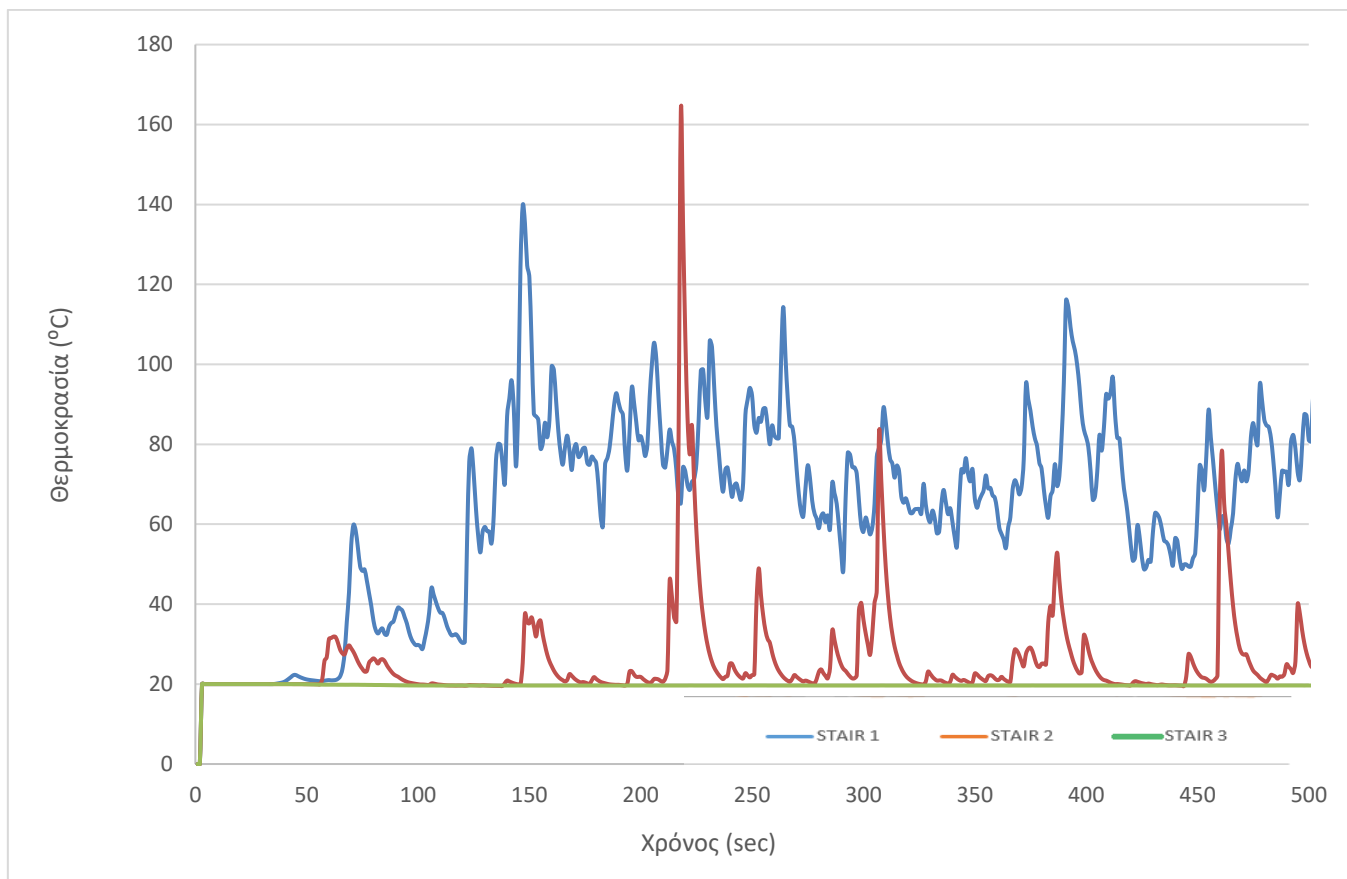
Σχήμα 5-18 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-19 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση 2 m στον άξονα των x από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-20 Ισοψής κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση -2 m στον άξονα των x από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-21 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς πάνω από τις σκάλες στο ύψος διέλευσης των επιβατών.

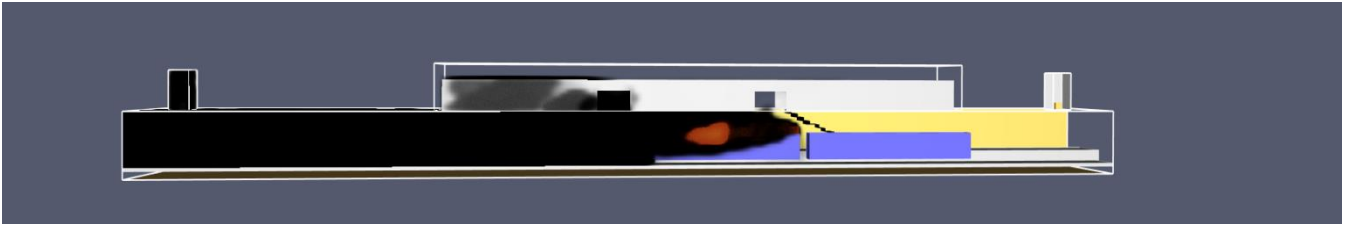
5.3 Σενάριο 3: Φωτιά υπό την παρουσία μηχανικού αερισμού (Με λειτουργία σύγχρονης αναρρόφησης)

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε την επίδραση του μηχανικού αερισμού στον αποκαπνισμό του σταθμού, όταν και οι δύο ανεμιστήρες είναι στην λειτουργία αναρρόφησης. Τα χαρακτηριστικά των ανεμιστήρων θα είναι ίδια με αυτά που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο σενάριο και θα βρίσκονται σε λειτουργία από την αρχή της προσομοίωσης. Επίσης η ισχύ της φωτιάς θα είναι ίδια με τα προηγούμενα σενάρια που εξετάστηκαν. Ο σκοπός αυτού του σεναρίου θα είναι να δούμε την επίδραση που θα έχει στην οριζόντια ταχύτητα, στην κατακόρυφη ταχύτητα και στην θερμοκρασία όταν θα υπάρχουν δύο καταθλίψεις. Τα επίπεδα που θα εξετάσουμε είναι τα ίδια με τα προηγούμενα και το ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται στο επίπεδο συμμετρίας του σταθμού, και τα δύο επίπεδα μεταξύ του συρμού και της αποβάθρας.

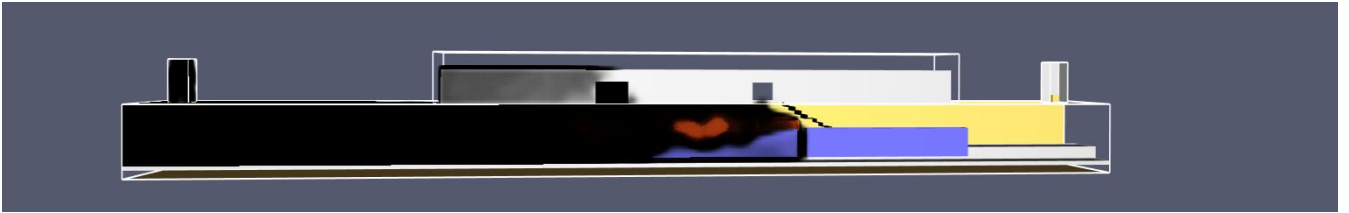
5.3.1 Οριζόντια ταχύτητα

Από το Σχήμα 5-23 παρατηρούμε ότι οι τιμές της οριζόντιας ταχύτητας αρχικά παρουσιάζουν αρνητικές τιμές μέχρι τα πρώτα 20 sec της προσομοίωσης. Στη συνέχεια και μέχρι τα 150 sec οι τιμές παρουσιάζονται οριακά πάνω από τα 2,5 m/s όπου είναι η κρίσιμη ταχύτητα ώστε να μην εμφανίζεται το φαινόμενο αναστροφής του καπνού. Μετά τα 150 sec οι τιμές της οριζόντιας ταχύτητας παρουσιάζουν αύξηση. Σημαντικό είναι ότι σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης υπάρχει ροή αέρα από το εξωτερικό του σταθμού προς το εσωτερικό του στις σκάλες του σταθμού με ταχύτητες μεγαλύτερες από το αυτές που προέκυψαν στο σενάριο δύο και κυρίως στην πρώτη σκάλα όπου όπως είδαμε στα προηγούμενα σενάρια αποτελεί σημείο προσοχής.

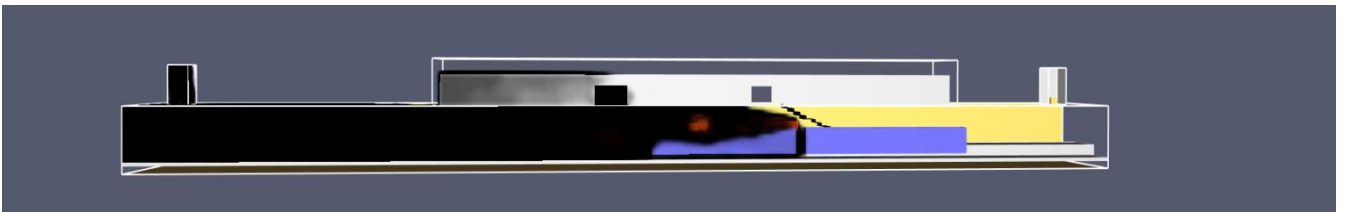
Στο επίπεδο μεταξύ της αποβάθρας και του τρένου όπως παρατηρούμε και στο Σχήμα 5-24 η οριζόντια ταχύτητα εμφανίζει τιμές πάνω από το επιθυμητό όριο των 2,5 m/s από την αρχή της προσομοίωσης, με τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου όμως να είναι πιο πάνω από τον στόχο που θέσαμε. Για το σημείο που βρίσκεται σε απόσταση -2m από το κέντρο συμμετρίας του σταθμού, από το Σχήμα 5-25 παρατηρούμε επίσης ότι οι τιμές της οριζόντιας ταχύτητας είναι μικρότερες από αυτές που προέκυψαν από στο δεύτερο σενάριο.



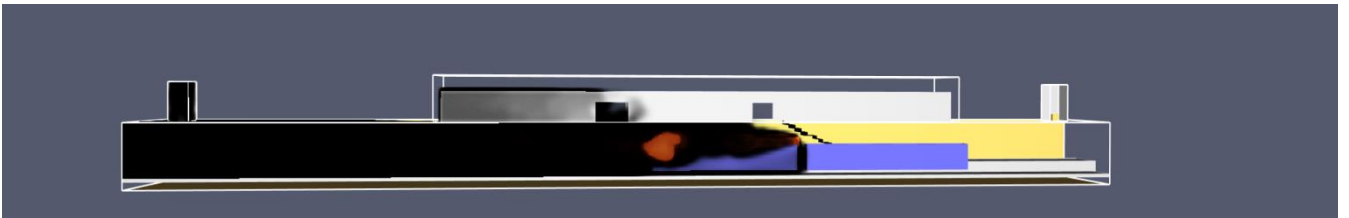
a)



b)

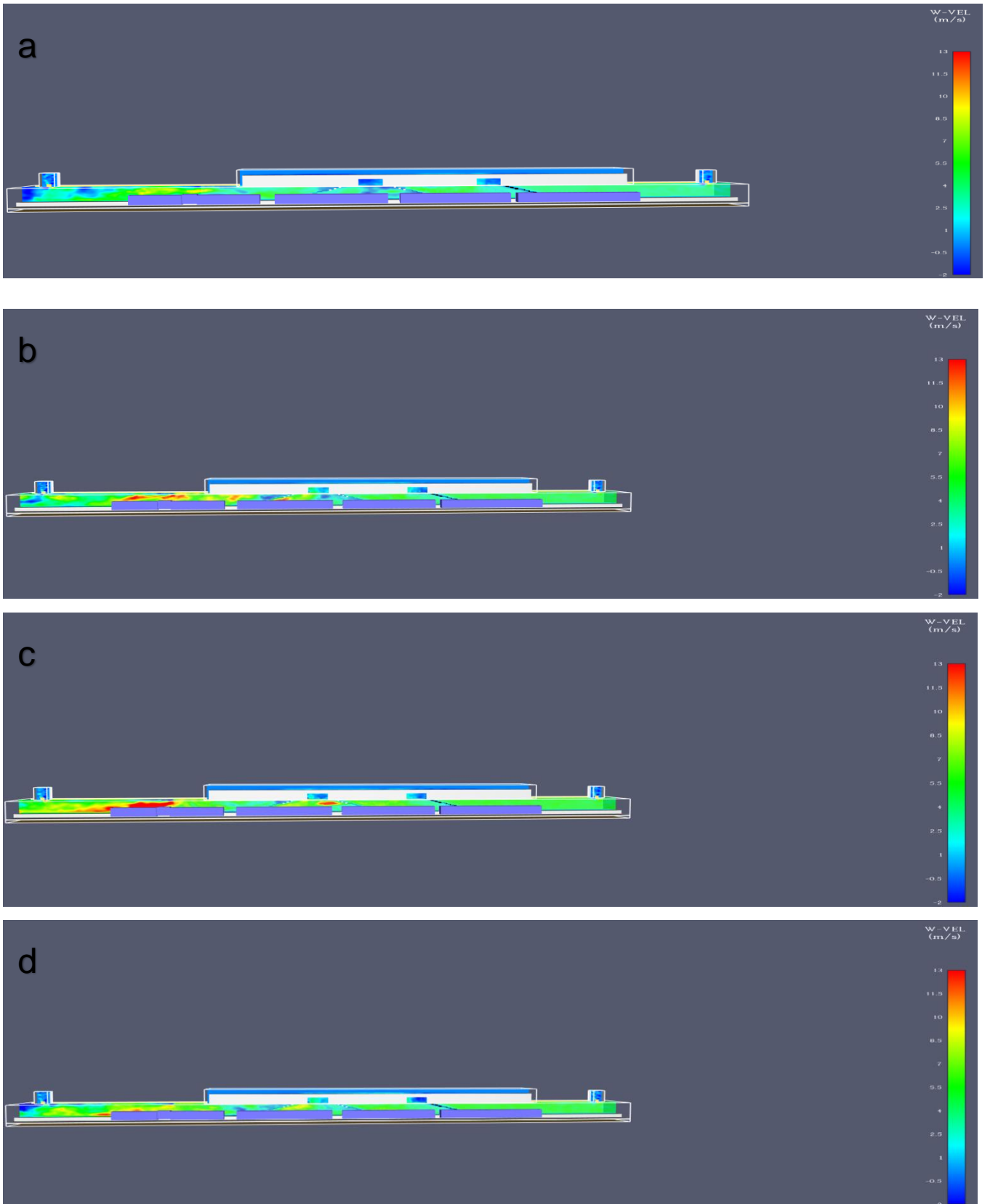


c)

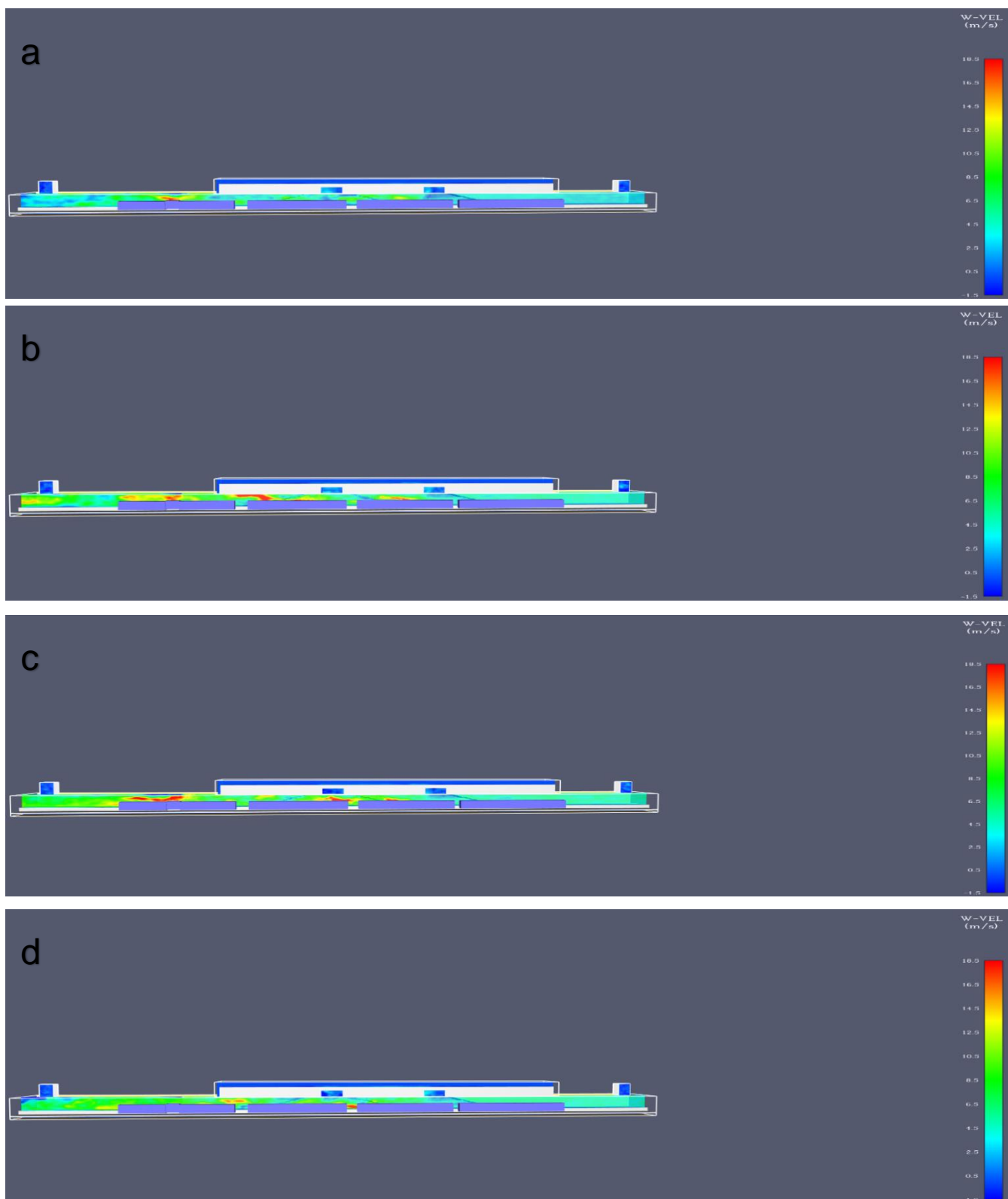


d)

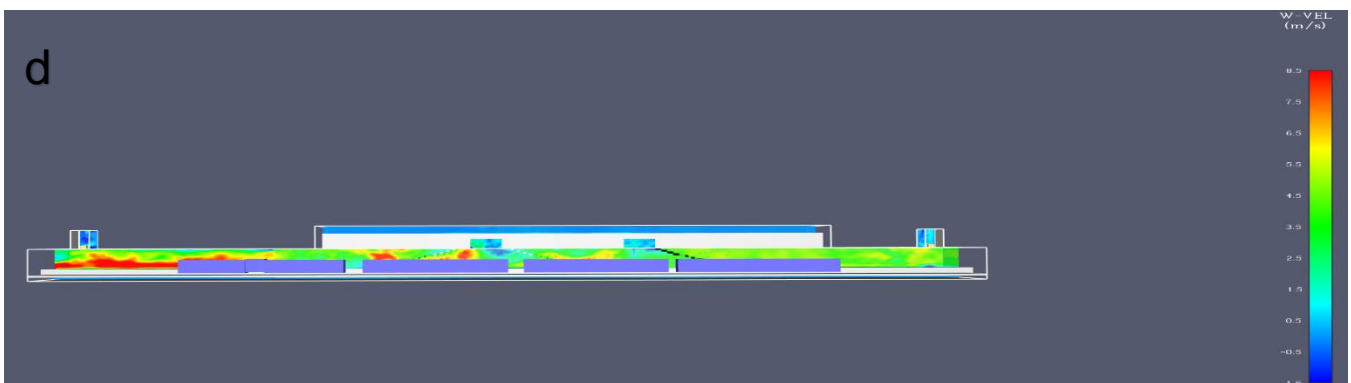
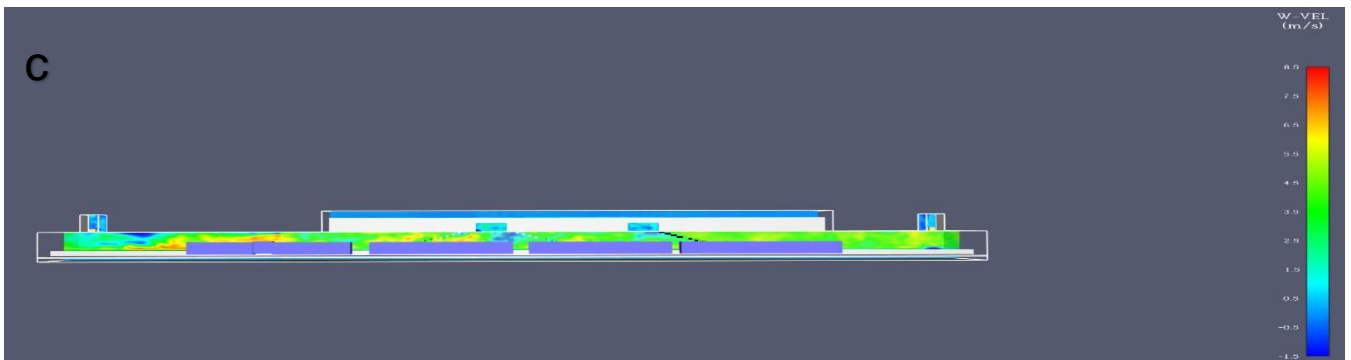
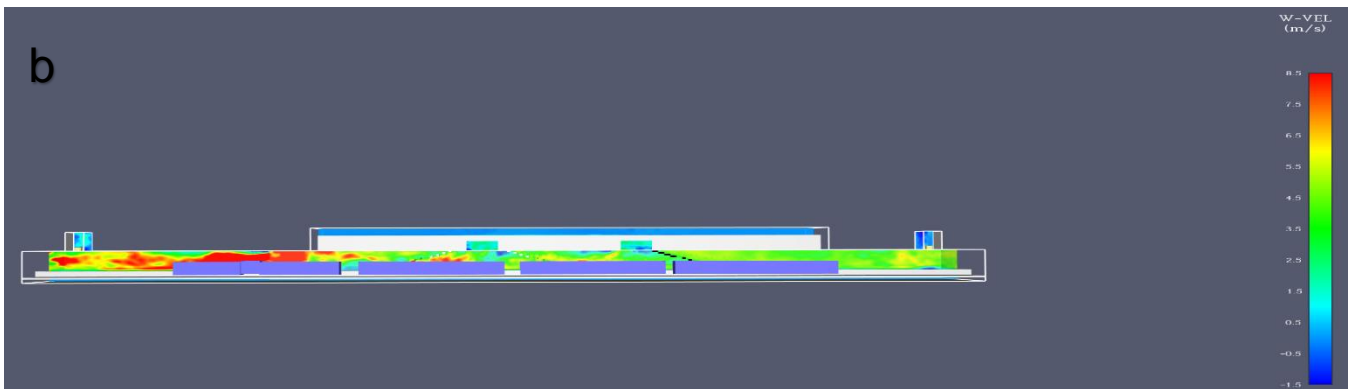
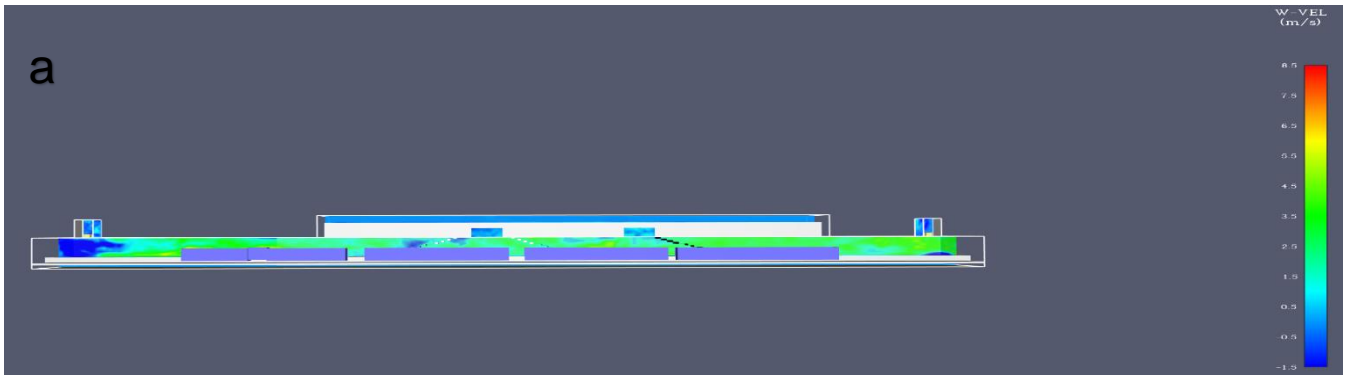
Σχήμα 5-22 Χρονική εξέλιξη της εξάπλωσης καπνού για μετά από: a) 50s ,b) 150s, c)300s) , d) 450s



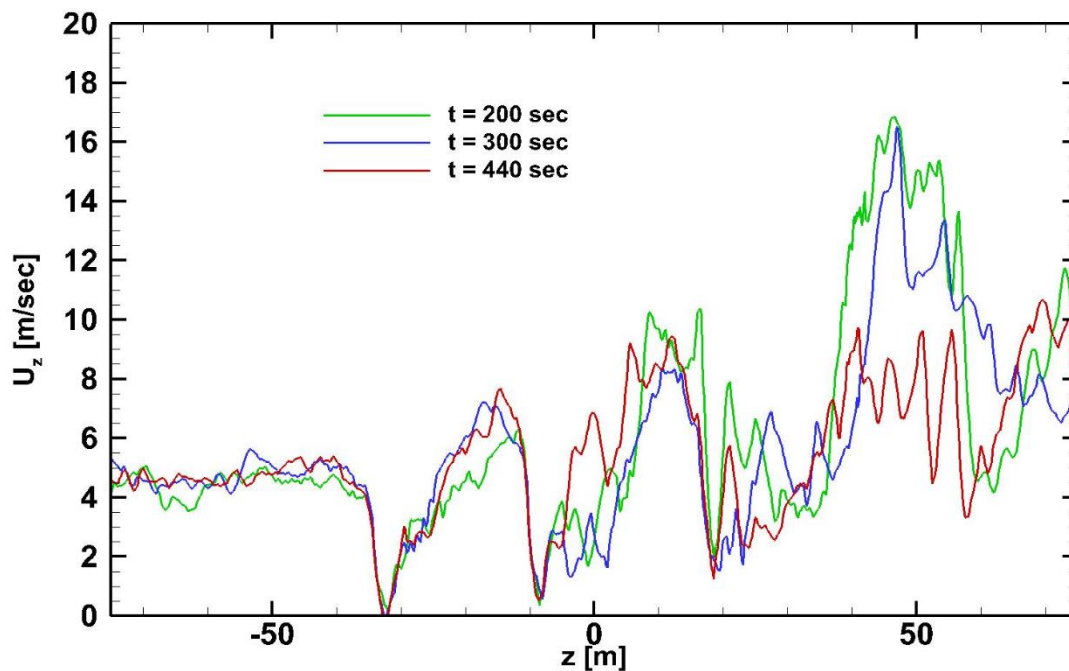
Σχήμα 5-23 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-24 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w-Velocity) σε απόσταση 2m στον άξονα των x από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-25 Ισοϋψής κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας (w -Velocity) σε απόσταση -2m στον άξονα των x από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s

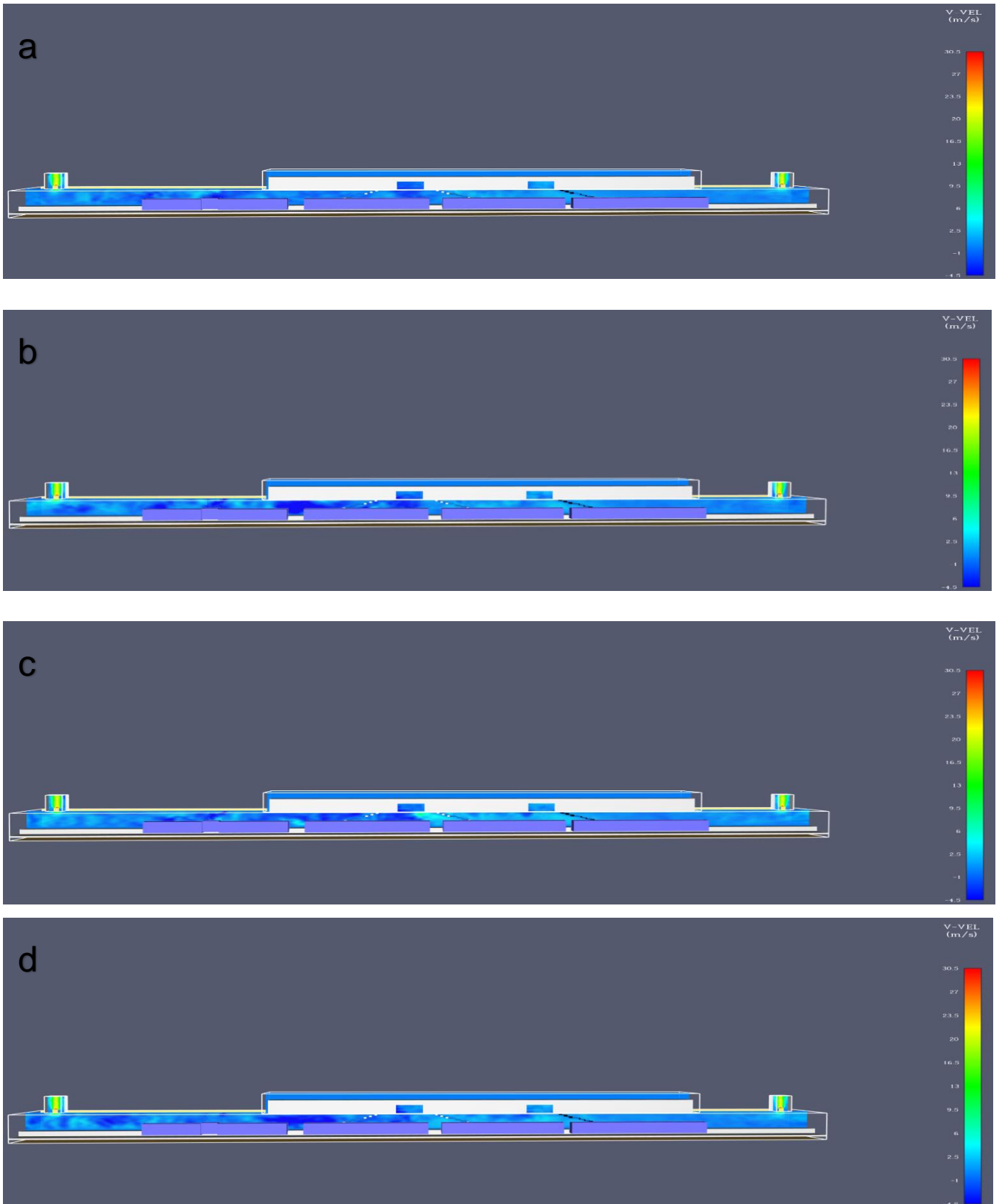


Σχήμα 5-26 Κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας στο συμμετρικό επίπεδο για διαφορετικές χρονικές στιγμές στο ύψος διέλευσης των επιβατών.

Όπως είδαμε και στα προηγούμενα σενάρια, υπάρχει επίτευξη της κρίσιμης ταχύτητας για το μεγαλύτερο μέρος του σταθμού. Τα σημεία όπου βρίσκονται οι σκάλες εμφανίζουν την ίδια πτώση στην ταχύτητα. Σε αυτό το σενάριο παρατηρούμε ότι και για τις τρεις χρονικές στιγμές υπάρχει μεγαλύτερη ταύτιση των καμπυλών. Επίσης έχουμε εμφάνιση μεγαλύτερων μεγίστων τιμών οριζόντιας ταχύτητας, σε σύγκριση με το δεύτερο σενάριο. Σε αντίθεση με το δεύτερο σενάριο όπου κατά την προσαγωγή αέρα από το φρεάτιο αερισμού υπήρχε πτώση της οριζόντιας ταχύτητας σε εκείνο το σημείο, εδώ η ταχύτητα παραμένει σταθερή για εκείνη την περιοχή του σταθμού.

5.3.1 Κατακόρυφη ταχύτητα

Της Στο Σχήμα 5-27 παρατηρούμε ότι η κατακόρυφη ταχύτητα στα φρεάτια αερισμού παρουσιάζει υψηλές τιμές όπως θα περιμέναμε. Στα ανοίγματα κοντά στη φωτιά και λόγω της επιτάχυνσης του αέρα από τη διαφορά θερμοκρασίας, η ταχύτητα παρουσιάζει θετικό πρόσημο δηλαδή έχει φορά από το εσωτερικό του σταθμού προς τα εκδοτήρια και το εξωτερικό περιβάλλον. Αντίθετα στη σκάλα που βρίσκεται αριστερά η ταχύτητα εμφανίζεται με αρνητικό πρόσημο δηλαδή έχει φορά προς το εσωτερικό του σταθμού. Σε αυτό το σενάριο η κατακόρυφη ταχύτητα εμφανίζει πολύ μικρότερες τιμές σε σύγκριση με αυτές που προέκυψαν από το σενάριο δύο για τα ανοίγματα του σταθμού.

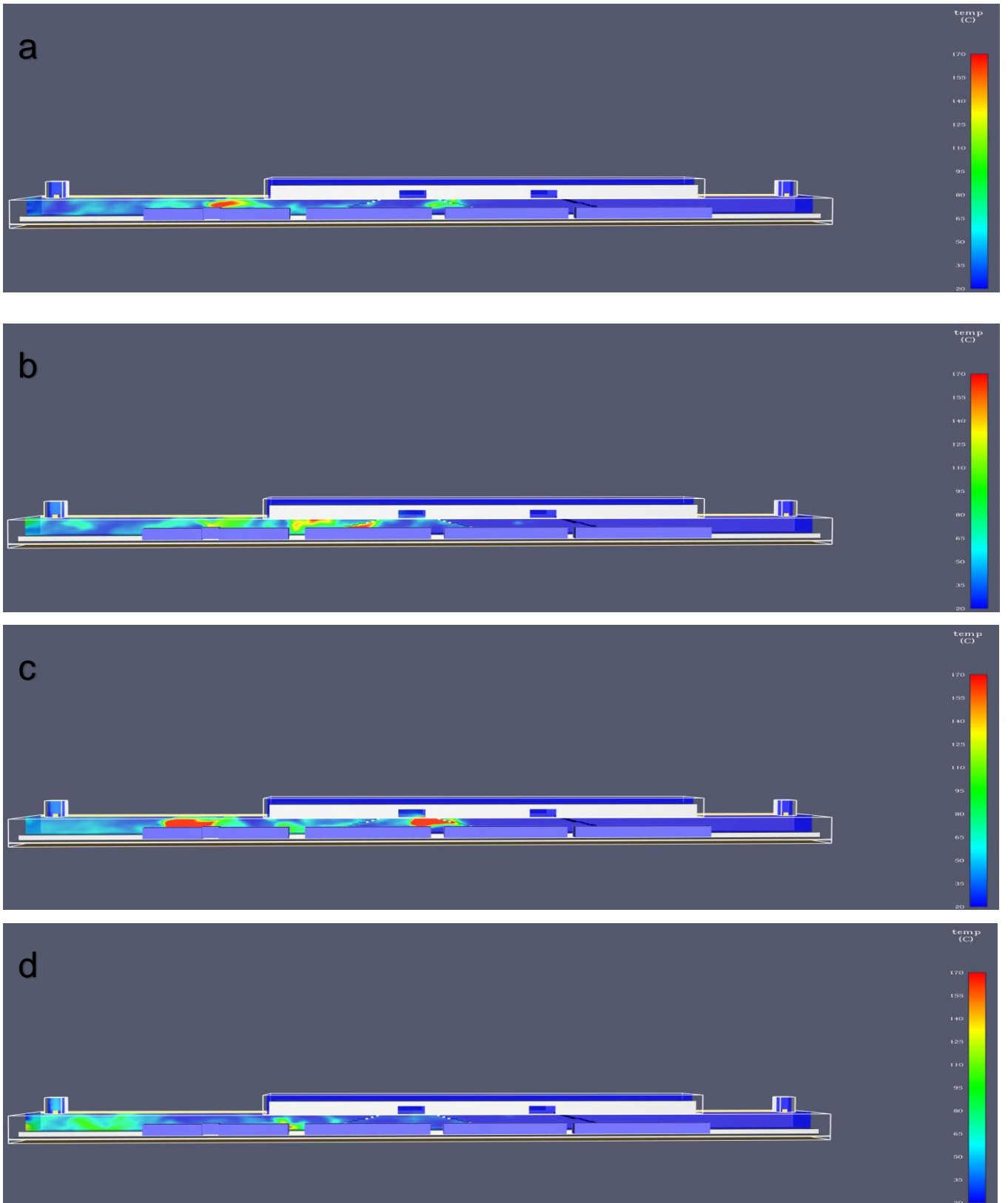


Σχήμα 5-27 Ισοϋψής κατανομή της κατακόρυφης ταχύτητας (v -Velocity) στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s

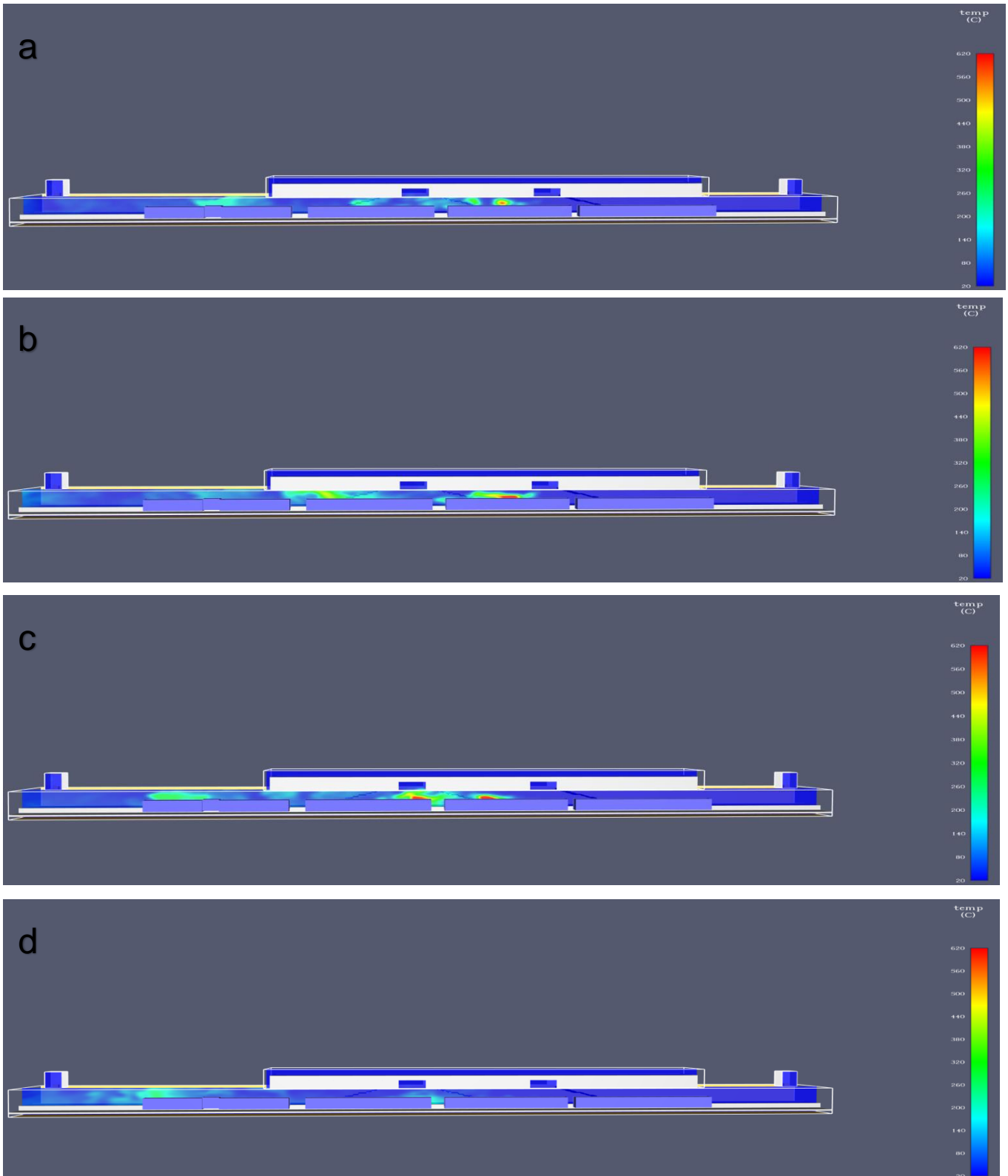
5.3.1 Θερμοκρασία

Στο σενάριο αυτό η λειτουργία των ανεμιστήρων θα είναι να αναρροφούν και οι δύο από τον σταθμό προς το εξωτερικό περιβάλλον. Για τα τρία επίπεδα ενδιαφέροντος της μελέτης θα γίνει ανάλυση του προφίλ της θερμοκρασίας.

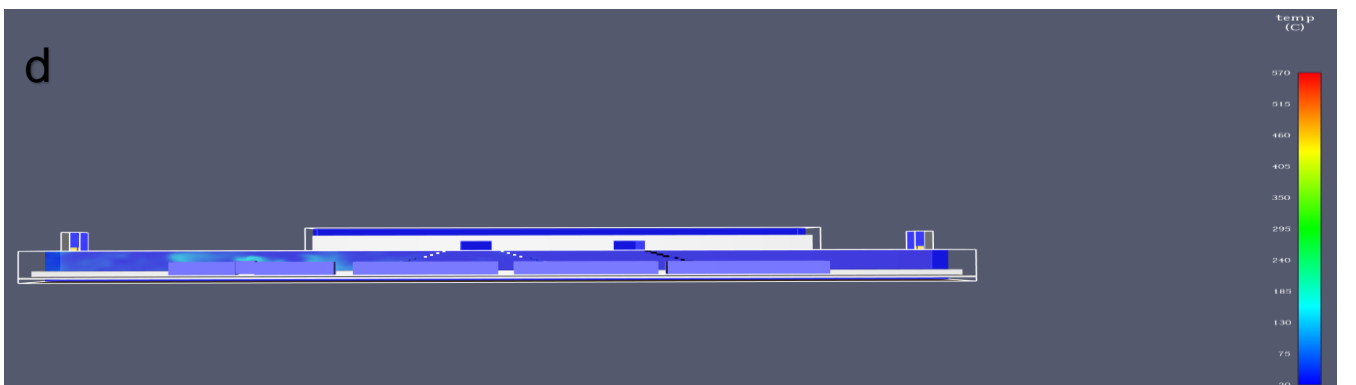
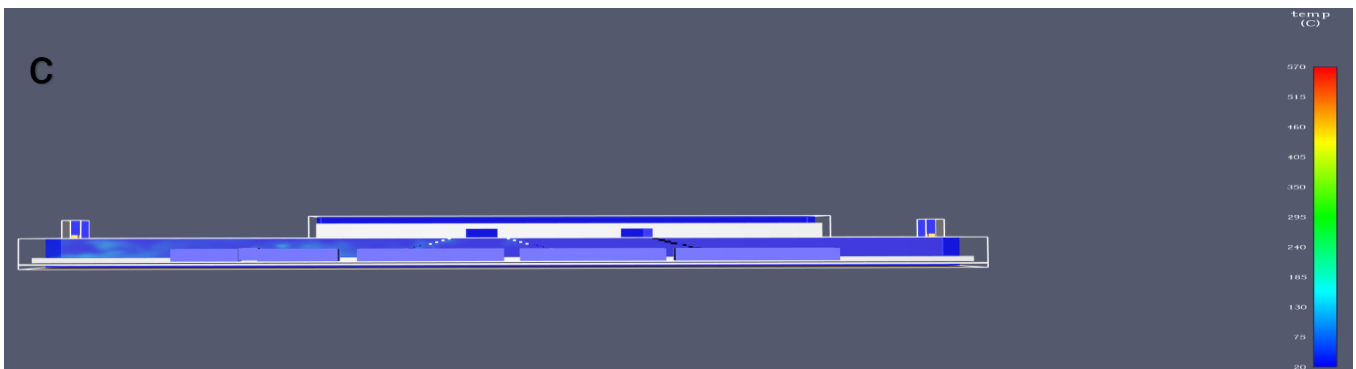
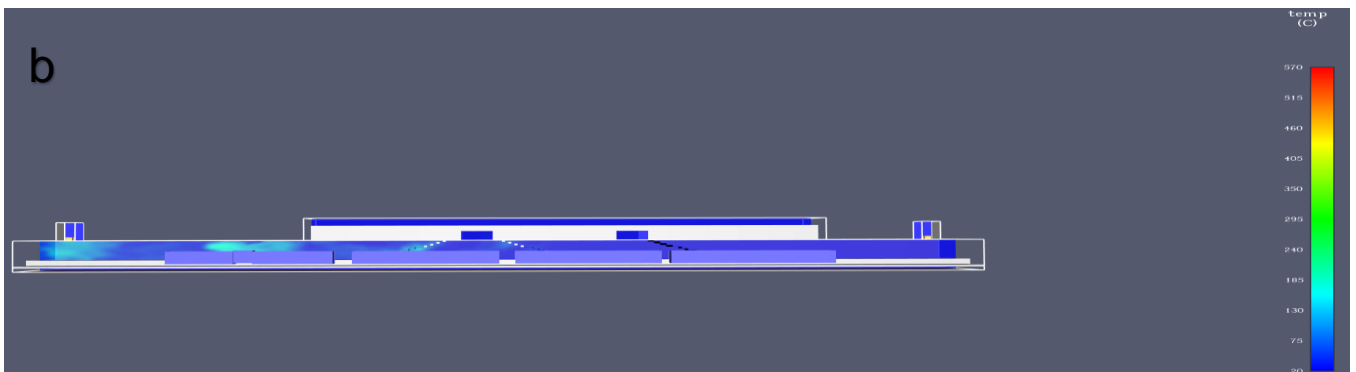
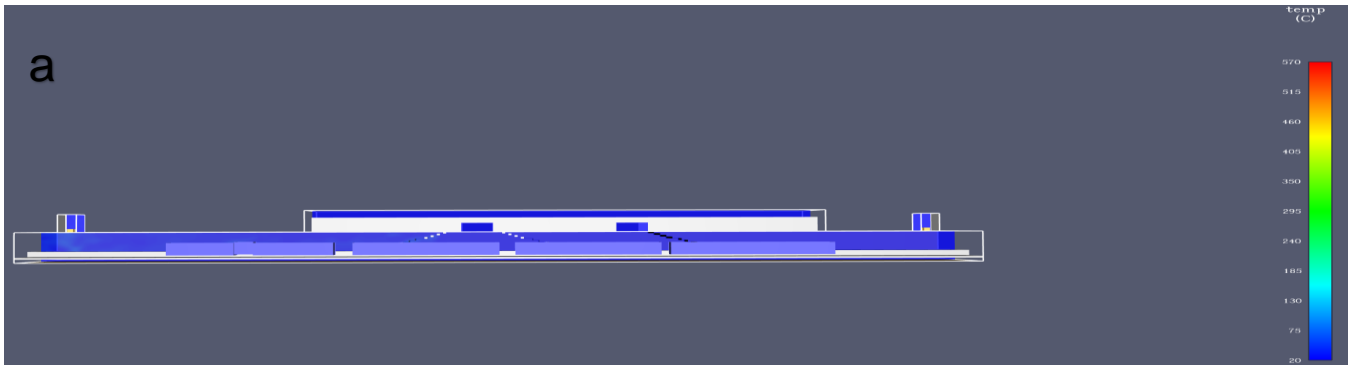
Στο Σχήμα **5-28** παρατηρούμε ότι η περιοχή από την κεντρική σκάλα και αριστερά παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας, κυρίως στην αριστερή σκάλα έχουμε εμφάνιση και των μεγαλύτερων τιμών θερμοκρασίας. Επίσης οι επιβάτες που βρίσκονται πάνω στην πλατφόρμα μπροστά από τα τρία πρώτα βαγόνια, αλλά και αυτοί που βρίσκονται μέσα σε αυτά έχουν να αντιμετωπίσουν τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες εντός του σταθμού όπως παρατηρούμε και από το Σχήμα **5-29**. Σε σύγκριση με τις θερμοκρασίες που παρατηρούμε από το Σχήμα 5-19 έχουμε εμφάνιση μικρότερων τιμών θερμοκρασίας σε αυτό το σενάριο για το ίδιο επίπεδο αναφοράς. Το επίπεδο που βρίσκεται σε απόσταση -2m από το κέντρο συμμετρίας εμφανίζει μικρότερες τιμές θερμοκρασίας όπως παρατηρούμε από το σχήμα Σχήμα **5-30**. Τέλος από το Σχήμα **5-31** επιβεβαιώνουμε αυτό που παρατηρήσαμε και στο Σχήμα **5-28**, δηλαδή την εμφάνιση μεγαλύτερων θερμοκρασιών στη σκάλα ένα και δύο, άρα και δυσμενέστερων συνθηκών εκκένωσης.



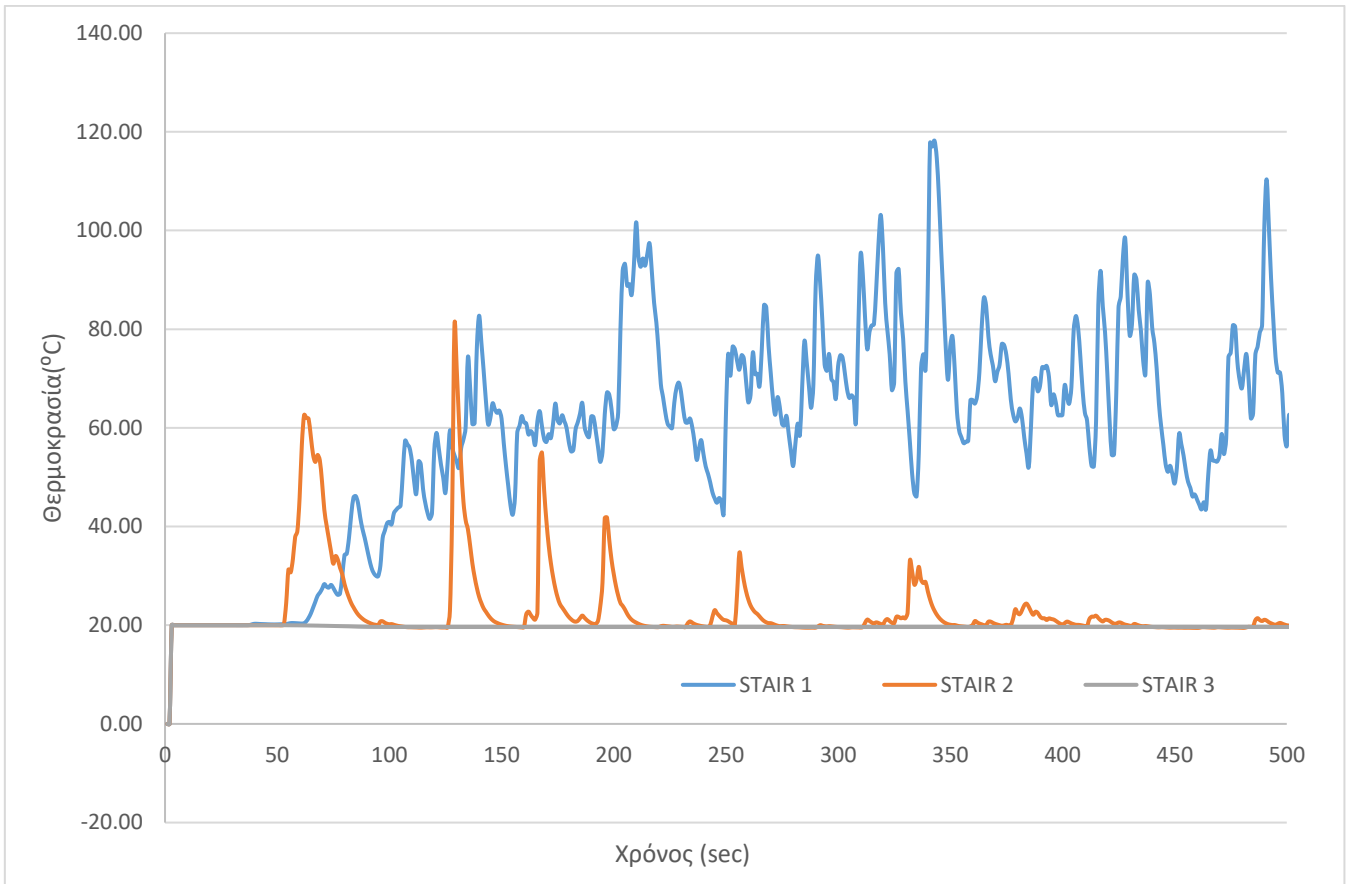
Σχήμα 5-28 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-29 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση 2 m στον άξονα των x από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a) 50s, b) 150s, c) 300s, d) 450s



Σχήμα 5-30 Ισοϋψής κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση -2 m στον άξονα των x από το συμμετρικό επίπεδο αναφοράς μετά από : a)50s, b)150s, c)300s, d)450s



Σχήμα 5-31 Χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στο συμμετρικό επίπεδο αναφοράς πάνω από τις σκάλες στο ύψος διέλευσης των επιβατών.

6 Συμπεράσματα

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν να ελεγχθεί κατά πόσο το σύστημα μηχανικού αερισμού που κατασκευάσαμε για τον συγκεκριμένο σιδηροδρομικό σταθμό που μελετάμε, που αποτελείται από δύο κατακόρυφους αξονικούς ανεμιστήρες, μπορεί να κάνει αποτελεσματική απομάκρυνση του καπνού που θα προέλθει από μια φωτιά με ισχύ 15 Mw για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας αυτού.

Με το κατακόρυφο σύστημα αερισμού δεν υπάρχει εξάπλωση του καπνού σε όλο το σύνολο του σταθμού και ενώ διασφαλίζουμε την τιμή της οριζόντιας ταχύτητας ώστε να μην υπάρχει αναστροφή του καπνού, η απομάκρυνση του καπνού από το εσωτερικό του σταθμού δεν είναι ικανοποιητική σε κανένα από τα σενάρια που μελετήσαμε.

Όπως είδαμε στο Σχήμα 5-16 και Σχήμα 5-26, το σύστημα μηχανικού αερισμού που επιλέξαμε έχει την ικανότητα επίτευξης της κρίσιμης ταχύτητας όπως υπολογίστηκε, αλλά και όπως αυτή δίνεται βάση της οδηγίας του NFPA 2020, και για τα δύο σενάρια λειτουργίας του μηχανικού αερισμού που μελετήσαμε. Συγκρίνοντας το Σχήμα 5-26, το Σχήμα 5-16 και το Σχήμα 5-6 παρατηρούμε ότι, στο δεύτερο και στο τρίτο σενάριο οι τιμές της οριζόντιας ταχύτητας, για όλες τις χρονικές στιγμές, ακολουθούν παρόμοια κατανομή. Αντιθέτως, στο πρώτο σενάριο οι τιμές της οριζόντιας ταχύτητας εμφανίζουν διαφορετική κατανομή, για κάθε χρονική στιγμή. Αυτό παρατηρείται κυρίως στο δεξί μέρος του σταθμού (άξονας θετικών τιμών του Z), όπου οι εξωτερικές συνθήκες επηρεάζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Από το Σχήμα 5-4, Σχήμα 5-14 και Σχήμα 5-24 στα σενάρια όπου υπάρχει επίδραση μηχανικού αερισμού παρατηρούνται περιοχές με υψηλότερες τιμές οριζόντιας ταχύτητας. Η εξασφάλιση υψηλότερων τιμών οριζόντιας ταχύτητας στο επίπεδο μεταξύ του συρμού και της αποβάθρας είναι πολύ σημαντικό, καθώς εκεί βρίσκεται το μεγαλύτερο μέρος των επιβατών και μαζί με το συμμετρικό επίπεδο του σταθμού αποτελούν τις δύο κρίσιμότερες περιοχές ενδιαφέροντος.

Ένας από τους στόχους που τέθηκε είναι η επίτευξη κατάλληλων θερμοκρασιών στο εσωτερικό του σταθμού ώστε να υπάρχει ασφαλέστερη εκκένωσή του. Η επίδραση του μηχανικού αερισμού είναι εμφανής αφού και στα δύο σενάρια, όπου το σύστημα αερισμού είναι σε λειτουργία, οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες και κυρίως για τη σκάλα 1 όπου εμφανίζει μεγαλύτερες θερμοκρασίες και στα τρία σενάρια. Κατά τα πρώτα 100 sec και για τα δύο σενάρια, όπου υπάρχει η επίδραση του μηχανικού αερισμού, η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη και στη σκάλα 1 και στη σκάλα 2. Αυτό είναι σημαντικό αφού, μέσα σε αυτό το χρονικό περιθώριο αρχίζει να γίνεται αντιληπτή η φωτιά από τους επιβάτες.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι οι στόχοι που τέθηκαν για την επίτευξη της κρίσιμης ταχύτητας αλλά και για των κατάλληλων θερμοκρασιών εντός του σταθμού επιτεύχθηκαν. Αντίθετα η διάταξη μηχανικού αερισμού που επιλέξαμε δεν μπόρεσε να εξασφαλίσει τον πλήρη αποκαπνισμό του σταθμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του οπτικού πεδίου των επιβατών, καθιστώντας δυσκολότερη την εκκένωση του σταθμού.

6.1 Μελλοντική εργασία

Σε επόμενη φάση προτείνεται η μελέτη σιδηροδρομικού σταθμού όπου θα μελετά την εφαρμογή ενός μικτού συστήματος αερισμού για μεγαλύτερο μέγεθος σταθμού με πιο περίπλοκη γεωμετρία. Επίσης σημαντικό θα ήταν να γίνει μελέτη για διαφορετικά σενάρια πυρκαγιάς μεγαλύτερης ισχύος, όπου θα συνδυάζεται και με την διέλευση κινούμενων συρμών εντός του σταθμού. Ακόμα ένα θέμα για μελλοντική έρευνα που αποτελεί συνέχεια αυτής της μελέτης, είναι η προσομοίωση εκκένωσης του σταθμού, με ειδικό λογισμικό, όπου θα μελετάται η πορεία και ο χρόνος εξόδου των επιβατών με βάση την επιρροή των σεναρίων φωτιάς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Amouzandeh, A., et al. (2014). "Real-scale CFD simulations of fire in single- and double-track railway tunnels of arched and rectangular shape under different ventilation conditions." Engineering Structures **77**: 193-206.

Association, N. F. P. (2011). NFPA 502, Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways, NFPA.

Chen, F., et al. (2003). "Smoke Control of Fires in Subway Stations." Theoretical and Computational Fluid Dynamics **16**(5): 349-368.

Chen, J., et al. (2022). "Investigation of the performance of lateral ventilation in subway station fires." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **228**: 105133.

Chen, T. B. Y., et al. (2022). "In-Depth Assessment of Cross-Passage Critical Velocity for Smoke Control in Large-Scale Railway Tunnel Fires." Fire **5**(5): 140.

Guo, X. and Q. Zhang (2014). "Analytical solution, experimental data and CFD simulation for longitudinal tunnel fire ventilation." Tunnelling and Underground Space Technology **42**: 307-313.

Hu, L. H., et al. (2007). "Modeling fire-induced smoke spread and carbon monoxide transportation in a long channel: Fire Dynamics Simulator comparisons with measured data." Journal of Hazardous Materials **140**(1): 293-298.

Izadi, T., et al. (2022). "The effect of ventilation system with and without under-platform exhaust on the concentration of braking micro-particles inside the subway system." Tunnelling and Underground Space Technology **128**: 104638.

Khatti, S. K., et al. (2021). "A novel representation of the critical ventilation velocity for mitigating tunnel fires." Tunnelling and Underground Space Technology **112**: 103853.

Li, J., et al. (2022). "Scale modelling experiments on the effect of longitudinal ventilation on fire spread and fire properties in tunnel." Tunnelling and Underground Space Technology **130**: 104725.

Liu, F., et al. (2020). "Experimental and numerical study on the smoke movement and smoke control strategy in a hub station fire." Tunnelling and Underground Space Technology **96**: 103177.

Long, Z., et al. (2020). "Full-scale experimental study on fire-induced smoke movement and control in an underground double-island subway station." Tunnelling and Underground Space Technology **103**: 103508.

Lönnermark, A., et al. (2012). Full-scale fire tests with a commuter train in a tunnel. SP Rapport.

McGrattan, K. (2005). "Fire Dynamics Simulator (Version 4)—Technical Reference Guide."

McGrattan, K. B., et al. (1998). "Large eddy simulations of smoke movement." Fire Safety Journal **30**(2): 161-178.

Meng, N., et al. (2014). "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 **40**: 151-159.

Qiu, P., et al. (2021). "Full-scale experiment on smoke propagation in metro station tunnel fire under opening the platform screen doors." Tunnelling and Underground Space Technology **107**: 103662.

Teodosiu, C., et al. (2015). "Assessment of ventilation efficiency for emergency situations in subway systems by CFD modeling." Building Simulation **9**.

Thomas, P. H., et al. (1968). "Some model-scale experiments with multiple fires." Fire Saf Sci **700**: 1.

Wan, H., et al. (2019). "A numerical study on smoke back-layering length and inlet air velocity of fires in an inclined tunnel under natural ventilation with a vertical shaft." International Journal of Thermal Sciences **138**: 293-303.

Weng, M. C., et al. (2014). "Full-scale experiment and CFD simulation on smoke movement and smoke control in a metro tunnel with one opening portal." Tunnelling and Underground Space Technology **42**: 96-104.

Zhang, Z., et al. (2023). "Experimental investigation of tunnel temperature field and smoke spread under the influence of a slow moving train with a fire in the carriage." Tunnelling and Underground Space Technology **131**: 104844.

Zhao, Q., et al. (2021). "Measurement-based evaluation of the effect of an over-track-exhaust ventilation system on the particulate matter concentration and size distribution in a subway." Tunnelling and Underground Space Technology **109**: 103772.

Zhao, S., et al. (2018). "A numerical study on smoke movement in a metro tunnel with a non-axisymmetric cross-section." Tunnelling and Underground Space Technology **73**: 187-202.

Zhu, P., et al. (2017). "Numerical Simulation & Scene Experiment of Metro Tunnel with Crossover Interval under Fire Conditions." Procedia Engineering **205**: 87-94.

Zitron SA. 2023. 1. Retrieved 21/3/2023, 2023, from <https://zitron.com/ventilation/underground-infrastructures/>

Station exaples 1. Retrieved 21/3/2023, 2023, from

<https://ypodomes.com/thriasio-ii-ena-schima-katethese-prosfora-prochora-o-diagonismos/>

<https://www.athenstransport.com/2020/09/erga-stathmos-larisis/>

<https://www.athensvoice.gr/epikairotita/ellada/746318/metro-epekteinetai-orario-eos-0130/>

Δοκουμετζίδη, Γ. Γ., Δ. Δ. Κ. Κούσιου and Α. Δ. Μαλασπίνα (1954).
"ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΕΡΓΑ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΟΙ-ΑΕΡΟΛΙΜΕΝΕΣ."