

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Μελέτη εκκένωσης έκτακτης ανάγκης σιδηροδρομικού σταθμού
μετά την εκδήλωση πυρκαγιάς

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ακαδημαϊκό Έτος: 2022- 2023

Επιβλέπων: ΔΡ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΙΩΑΝΝΗΣ
Επιβλέπων: ΔΡ. ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ακαδημαϊκό Έτος: 2022-2023

ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Μελέτη εκκένωσης έκτακτης ανάγκης σιδηροδρομικού σταθμού μετά την
εκδήλωση πυρκαγιάς

Επιβλέπων: ΔΡ. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων: ΔΡ. ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΙΟΥΛΙΟΣ 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

Μελέτη εκκένωσης έκτακτης ανάγκης σιδηροδρομικού σταθμού μετά την εκδήλωση πυρκαγιάς

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

α/α	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Δρ. Ιωάννης Σαρρής	Καθηγητής	
2	Δρ. Κωνσταντίνος Ιωάννης Βασιλόπουλος	Διδάκτορας ΕΣΠΑ	
3	Δρ. Καρβέλας Ευάγγελος	Διδάκτορας ΕΣΠΑ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ του ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ, με αριθμό μητρώου 46702 φοιτητής του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω 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».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Παναγιώτης Αργυρόπουλος



Περίληψη

Οι σιδηροδρομικοί σταθμοί είναι κρίσιμοι κόμβοι μεταφορών που συνδέουν περιοχές και χώρες. Είναι σημαντικοί όχι μόνο για τις μεταφορές, αλλά και ως πόλοι κοινωνικών, οικονομικών και πολιτιστικών δραστηριοτήτων. Ωστόσο, μπορούν να είναι επικίνδυνοι σε περίπτωση πυρκαγιάς. Επομένως, ο σχεδιασμός έκτακτης εκκένωσης είναι απαραίτητος για την ασφάλεια των επιβατών και του προσωπικού. Η προσομοίωση με λογισμικά, όπως το Pathfinder και το Pyrosim, βοηθά στην ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών εκκένωσης και στη βελτίωση της ασφάλειας στους σιδηροδρομικούς σταθμούς. Αυτή η διατριβή επικεντρώνεται στη μελέτη της εκκένωσης σε σιδηροδρομικό σταθμό μετά από πυρκαγιά, χρησιμοποιώντας αυτά τα λογισμικά για την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών εκκένωσης. Η έρευνα επιδιώκει να εντοπίσει παράγοντες που επηρεάζουν την εκκένωση και να προσφέρει προτάσεις για βελτιώσεις στον σχεδιασμό εκκένωσης σιδηροδρομικών σταθμών.

Abstract

Railway stations are critical transportation hubs connecting areas and countries. They are important not only for transportation but also as centers for social, economic, and cultural activities. However, they can be hazardous in the event of a fire. Therefore, emergency evacuation planning is essential for the safety of passengers and personnel. Simulation using software such as Pathfinder and Pyrosim helps in developing effective evacuation strategies and improving safety at railway stations. This dissertation focuses on the study of post-fire evacuation at a railway station, using these software tools to assess and optimize evacuation strategies. The research aims to identify factors affecting evacuation and provide recommendations for enhancing the evacuation planning of railway stations.

Keywords:

FDS, Subway train fire, Smoke spread, evacuation, fire dynamic simulation, Pathfinder.

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Κωνσταντίνο Βασιλόπουλο για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της ο Δρ. Βασιλόπουλος μου έδωσε πολύ σημαντική καθοδήγηση και ήταν παρών σε κάθε μου δυσκολία. Η βοήθειά του στην ολοκλήρωση της διπλωματικής ήταν ανεκτίμητη και η προθυμία του να απαντήσει και να λύσει οποιαδήποτε απορία είχα ήταν πολύ σημαντική. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Σαρρή Ιωάννη για την ανάληψη της ευθύνης της διπλωματικής, την επίβλεψή της και την παροχή υπολογιστικών πόρων. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που πάντα πιστεύει σε εμένα και με ένα μόνο τους λόγο μου δίνουν δύναμη να συνεχίζω παρά τις δυσκολίες. Επίσης, τους φίλους και συνεργάτες μου εντός και εκτός πανεπιστημίου. Η υποστήριξη και η κατανόησή τους με βοήθησαν να ξεπεράσω τα εμπόδια που αντιμετώπισα κατά τη διάρκεια της έρευνάς μου. Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ σε εκείνον τον άνθρωπο που με ενέπνευσε να ακολουθήσω τα βήματά του και η απώλεια του ήταν και είναι κινητήριο δύναμη για μένα να συνεχίζω να πετυχαίνω τους στόχους μου, πατέρα, σου είμαι ειλικρινά ευγνώμων.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	1
Κατάλογος Εικόνων	4
Κατάλογος Πινάκων	7
Κατάλογος Εξισώσεων.....	8
1 Εισαγωγή	9
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	11
2.1 Ιστορικές πυρκαγιές σε σιδηροδρομικούς σταθμούς και ο αντίκτυπός τους στο σχεδιασμό εκκένωσης έκτακτης ανάγκης	11
2.2 Συμπεριφορές των ανθρώπων κατά την εκκένωση.....	12
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την εκκένωση έκτακτης ανάγκης του σιδηροδρομικού σταθμού.....	13
2.4 Ορισμός εκκένωσης	16
2.4.3 Παράγοντες που βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης.....	17
2.5 Η φωτιά και τα χαρακτηριστικά της.....	18
2.5.1 Στατιστικά Στοιχεία σχετικά με τη φωτιά	19
2.5.2 Επίδραση της θερμότητας.....	20
2.5.3 Επιπτώσεις επικίνδυνων ρύπων.....	21
3 Προγραμματισμός και πραγματοποίηση της έρευνας	22
3.1 Εισαγωγή.....	22
3.2 Pyrosim	23
3.2.1 Παραμετροποίηση Pyrosim	23
3.2.2 Μεθοδολογία του Κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής FDS	23
3.3 Pathfinder	38
3.3.1 Προσομοίωση εκκένωσης με Χρήση του Προγράμματος PathFinder	39
4 Σιδηροδρομικός σταθμός	49
4.1 Στοιχεία του σιδηροδρομικού σταθμού.....	49
5 Ανάλυση της εκκένωσης υπό πυρκαγιά	52
5.1 Σενάριο.....	53
5.2 Προσομοίωση του σταθμού και της φωτιάς στο Pyrosim.....	54
5.3 Προσομοίωση του σταθμού και της εκκένωσης στο Pathfinder.....	57
5.4 Αποτελέσματα και έλεγχος διαδικασίας της εκκένωσης	59
6 Αποτελέσματα	60
6.1 Αποτελέσματα του λογισμικού Pyrosim	61
6.1.1 Πρώτο Σενάριο.....	61
6.1.2 Δεύτερο Σενάριο	65
6.2 Αποτελέσματα του λογισμικού Pathfinder	70
6.2.1 Ανάλυση εκκένωσης για το 1 ^ο σενάριο	70
6.2.2 Ανάλυση εκκένωσης για το 2 ^ο σενάριο	76
6.3 Επιπτώσεις της φωτιάς στα άτομα του σιδηροδρομικού σταθμού	83

7 Συμπεράσματα.....	85
8 Βιβλιογραφία.....	86

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3-1: Παράθυρο «Εισαγωγή Επιφανειών».....	29
Εικόνα 3-2: Ανάλυση παραμετροποίησης της επιφάνειας τύπου Burner(PyroSim Manual 2023)	30
Εικόνα 3-3 Παράμετροι Burner	31
Εικόνα 3-4: Καρτέλα επιλογής στοιχείων για την αντίδραση	32
Εικόνα 3-5: Καρτέλα επιλογής για την ενεργοποίηση του Fire Suppression	33
Εικόνα 3-6: Καρτέλα επιλογής για τις ιδιότητες προϊόντων καύσης.....	34
Εικόνα 3-7: Καρτέλα επιλογής συσκευής	35
Εικόνα 3-8 Καρτέλα επιλογής συσκευής	36
Εικόνα 3-9: Καρτέλα slices για την επιλογή παραμέτρων.....	37
Εικόνα 3-10: Καρτέλα επιλογών Plot3D Data	38
Εικόνα 3-11: Περιβάλλον Pathfinder.....	39
Εικόνα 3-12: Τρόποι αποτύπωσης χρηστών	40
Εικόνα 3-13:Κίνηση των χρηστών προς στενή έξοδο (αριστερά), αντίθετη κίνηση των επιβατών σε έναν διάδρομο πιο γεμάτο (στο δεξί) (Pathfinder Technical Reference, 2013)	44
Εικόνα 3-14: Ταχύτητα κίνησης βάση ορατότητας σε ερεθιστικό καπνό	47
Εικόνα 4-1: Απεικόνιση Σταθμού σε πρόοψη.....	49
Εικόνα 4-2: Απεικόνιση Σταθμού σε 3D διαστάσεις	50
Εικόνα 4-3: Διάσταση σκάλας.....	51
Εικόνα 4-4: Έξοδος.....	52
Εικόνα 5-1:Εστία φωτιάς στο συρμό κοντά στο κέντρο της αποβάθρας	53
Εικόνα 5-2: 3D μοντέλο του σταθμού	54
Εικόνα 5-3: Devices σε κρίσιμα σημεία.....	55
Εικόνα 5-4: Slices για την ορατότητα, θερμοκρασία και πυκνότητα	56
Εικόνα 5-5: Σταθμός στο Pathfinder.....	57
Εικόνα 5-6: Ταχύτητα κίνησης ανάλογα την ορατότητα.....	58
Εικόνα 5-7: εντολή τροποποίηση ταχύτητας (Speed Modifier).....	59

Εικόνα 5-8: Τιμές οριακές για τους δείκτες FED (AFC 2010).....	60
Εικόνα 6-1: Το HRR της εστίας για το πρώτο σενάριο.....	61
Εικόνα 6-2 Μεταβολή στην ορατότητα σε όλους τους χώρους του σταθμού κατά την διάρκεια της εκκένωσης (σενάριο 1)	62
Εικόνα 6-3 Μεταβολή στην Θερμοκρασία σε όλους στους χώρους του σταθμού κατά την διάρκεια της εκκένωσης (σενάριο 1)	63
Εικόνα 6-4:Τα DEVICES που αφορούν την δυνατότητα όρασης για τα 420sec (σενάριο 1)	64
Εικόνα 6-5: Τα DEVICES που αφορούν την θερμοκρασία για χρόνο 420sec (σενάριο 1)	65
Εικόνα 6-6: Τεχνικά χαρακτηριστικά του Jet Fan	66
Εικόνα 6-7:Διαστάσεις Jet Fan	66
Εικόνα 6-8: Το HRR της εστίας για το δεύτερο σενάριο.....	67
Εικόνα 6-9: Μεταβολή στην ορατότητα σε όλους τους χώρους του σταθμού κατά την διάρκεια της εκκένωσης (σενάριο 2)	68
Εικόνα 6-10: Μεταβολή στην Θερμοκρασία σε όλους στους χώρους του σταθμού κατά την διάρκεια της εκκένωσης (σενάριο 2).....	68
Εικόνα 6-11: Τα DEVICES που αφορούν την ορατότητα για χρόνο 420sec (σενάριο 2)	69
Εικόνα 6-12: Τα DEVICES που αφορούν την θερμοκρασία για χρόνο 420sec (σενάριο 2)	70
Εικόνα 6-13: Αριθμός ατόμων που εκκενώνουν το σταθμό με βάση το χρόνο για 100 άτομα σενάριο 1.....	71
Εικόνα 6-14: Αριθμός ατόμων που χρησιμοποιούν σκάλες για την εκκένωση από την αποβάθρα (συναρτήσσει του χρόνου- σενάριο 1 που αφορά 100 άτομα)	72
Εικόνα 6-15: Αριθμός ατόμων που εκκενώνουν το σταθμό με βάση το χρόνο για 200 άτομα σενάριο 1.....	73
Εικόνα 6-16: Αριθμός ατόμων που απομακρύνθηκαν από το σταθμό ως συνάρτηση του χρόνου με 200 άτομα στο σενάριο 1.....	74
Εικόνα 6-17: Αριθμός χρηστών που εκκενώνουν τον σταθμό στο σενάριο 1 συναρτήσσει του χρόνου για 300 άτομα	75
Εικόνα 6-18: Αριθμός ατόμων (ως συνάρτηση του χρόνου) που χρησιμοποιούν τις σκάλες για την εκκένωση από την αποβάθρα 300 άτομα στο σενάριο 1.	76

Εικόνα 6-19: Αριθμός χρηστών που εκκένωσαν το σταθμό ως συναρτήσει του χρόνου για τα 100 άτομα στο σενάριο 2.....	77
Εικόνα 6-20: Αριθμός ατόμων που χρησιμοποιούν τις σκάλες για την εκκένωση από την αποβάθρα (σε συνάρτηση με το χρόνο) για το σενάριο 2 για 300 ατόμων.....	78
Εικόνα 6-21: Αριθμός χρηστών που εκκενώνουν το σταθμό σε συνάρτηση με το χρόνο για 200 άτομα σενάριο 2	79
Εικόνα 6-22: Αριθμός ατόμων που χρησιμοποιούν τις σκάλες για την εκκένωση από την αποβάθρα (σε συνάρτηση με το χρόνο) για το σενάριο 2 των 200 ατόμων.....	80
Εικόνα 6-23: Αριθμός ατόμων που εκκενώνουν το σταθμό σε συνάρτηση με το χρόνο στο σενάριο 2 των 300 ατόμων.....	81
Εικόνα 6-24: Αριθμός ατόμων που βρίσκονταν στις σκάλες κατά την εκκένωση της αποβάθρας σε συνάρτηση με το χρόνο για το σενάριο 2 και τα 300 άτομα.	82

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Αιτία της πυρκαγιάς (Fernandez, 2004)	19
Πίνακας 2-2: Συμπτώματα των επιδράσεων του μονοξειδίου του άνθρακα στον ανθρώπινο οργανισμό ανάλογα με τη συγκέντρωσή του στον εισπνεόμενο αέρα. 22	
Πίνακας 6-1: Στοιχεία για τον δυσμενέστερο χρήστη του σεναρίου 1	84
Πίνακας 6-2: Στοιχεία για τον δυσμενέστερο χρήστη του σεναρίου 2	84

Κατάλογος Εξισώσεων

Εξίσωση 3-1: Συνέχειας της μάζας	25
Εξίσωση 3-2: Εξίσωση για την διατήρηση ορμής	25
Εξίσωση 3-3: Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας	25
Εξίσωση 3-4: Εξίσωση ροής θερμότητας από ακτινοβολία και από συναγωγή	26
Εξίσωση 3-5: Εξίσωση απόκλισης της ταχύτητας.....	26
Εξίσωση 3-6: Εξίσωση των αέριων συστατικών που μεταφέρονται στον αέρα	26
Εξίσωση 3-7: Εξίσωση της Διατήρησης Ορμής.....	27
Εξίσωση 3-8: Εξίσωση υπολογισμού πυκνότητας.....	28
Εξίσωση 3-9: Αντίδραση	31

1 Εισαγωγή

Οι σιδηροδρομικοί σταθμοί είναι βασικοί κόμβοι μεταφορών που συνδέουν διάφορα μέρη πόλεων, περιοχών και χωρών. Είναι επίσης ζωτικής σημασίας δημόσιοι χώροι που χρησιμεύουν ως πύλες για πολιτιστικές, οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες για εκατομμύρια ανθρώπους καθημερινά. Ωστόσο, οι σιδηροδρομικοί σταθμοί μπορεί επίσης να είναι επικίνδυνα μέρη, ειδικά σε περίπτωση εστίας πυρκαγιάς, η οποία μπορεί να εξαπλωθεί γρήγορα και να προκαλέσει τραυματισμούς, θανάτους και σημαντικές υλικές ζημιές. Επομένως, ο σχεδιασμός έκτακτης εκκένωσης είναι σημαντικός για τη διατήρηση της ασφάλειας και της ευημερίας των επιβατών και του προσωπικού στους σιδηροδρομικούς σταθμούς. Ο σχεδιασμός εκκένωσης έκτακτης ανάγκης περιλαμβάνει την πρόβλεψη πιθανών καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, τον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών εκκένωσης και τη δοκιμή τους χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις και ασκήσεις.

Τα εργαλεία προσομοίωσης είναι ιδιαίτερα πολύτιμα στον σχεδιασμό εκκένωσης έκτακτης ανάγκης, καθώς επιτρέπουν σε ερευνητές και επαγγελματίες να μοντελοποιούν διαφορετικά σενάρια, να δοκιμάζουν διαφορετικές υποθέσεις και μεταβλητές και να εντοπίζουν δυνατά και αδύνατα σημεία διαφορετικών στρατηγικών εκκένωσης χωρίς να διακινδυνεύουν την ασφάλεια των ανθρώπων. Τα τελευταία χρόνια, έχουν σημειωθεί αρκετές πρόοδοι στο λογισμικό προσομοίωσης που επιτρέπουν πιο εξελιγμένη και ρεαλιστική μοντελοποίηση των εκκενώσεων έκτακτης ανάγκης σε δημόσιους χώρους, συμπεριλαμβανομένων των σιδηροδρομικών σταθμών. Ένα τέτοιο λογισμικό είναι το Pathfinder, ένα εργαλείο προσομοίωσης πλήθους που μπορεί να προσομοιώσει την κίνηση μεγάλου αριθμού ανθρώπων σε πολύπλοκους χώρους. Ένα άλλο λογισμικό είναι το Pyrosim, ένα εργαλείο προσομοίωσης δυναμικής πυρκαγιάς που μπορεί να προσομοιώσει την εξάπλωση και τη συμπεριφορά των πυρκαγιών.

Συνδυάζοντας αυτά τα δύο προγράμματα λογισμικού, οι ερευνητές και οι επαγγελματίες μπορούν να μοντελοποιήσουν τη συμπεριφορά εκκένωσης των επιβατών ως απόκριση σε ξέσπασμα πυρκαγιάς και να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα διαφορετικών στρατηγικών εκκένωσης. Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επείγουσας εκκένωσης σιδηροδρομικού σταθμού μετά το ξέσπασμα πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας τα προγράμματα λογισμικού Pathfinder και Pyrosim.

Η μελέτη θα επικεντρωθεί σε έναν επιλεγμένο σιδηροδρομικό σταθμό, ο οποίος θα μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας τα προγράμματα λογισμικού και θα προσομοιωθούν διαφορετικά σενάρια εκκένωσης για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα διαφορετικών στρατηγικών εκκένωσης. Αυτή η διατριβή θα συμβάλει στην ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών εκκένωσης έκτακτης ανάγκης που μπορούν να βελτιώσουν την ασφάλεια των επιβατών στους σιδηροδρομικούς σταθμούς. Με την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, η μελέτη θα εντοπίσει κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία εκκένωσης, όπως η διάταξη του σιδηροδρομικού σταθμού, η τοποθεσία της εστίας της πυρκαγιάς, η συμπεριφορά των επιβατών και η διαθεσιμότητα των διαδρομών εκκένωσης. Η παρούσα έρευνα θα εξετάσει επίσης τους περιορισμούς και τα δυνατά σημεία των εργαλείων προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται και θα παρέχει συστάσεις για μελλοντική έρευνα σε αυτόν τον τομέα.

Οι ακόλουθες ενότητες αυτής της διατριβής θα ανασκοπήσουν τη σχετική βιβλιογραφία, θα περιγράψουν τη μεθοδολογία και τις τεχνικές προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν, θα παρουσιάσουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν και θα συζητήσουν τις επιπτώσεις τους στον σχεδιασμό εκκένωσης έκτακτης ανάγκης σε σιδηροδρομικούς σταθμούς.

2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η προστασία των εργαζομένων και του κοινού σε οποιοδήποτε χώρο είναι βασική προτεραιότητα για αυτό είναι αναγκαίο να υπάρχει ένα σχέδιο με τις αναγκαίες δράσεις για την αντιμετώπιση μιας πυρκαγιάς και την εκκένωση των χώρων εργασίας, εφόσον απαιτηθεί. Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να υπάρχει για την προστασία Α.Μ.Ε.Α και ευαίσθητων ομάδων πληθυσμού (π.χ. ηλικιωμένων, ατόμων που αντιμετωπίζουν προβλήματα υγείας κ.λπ.) και για άτομα που δεν ανήκουν στο προσωπικό (π.χ. κοινό, προσωπικό εργολάβων κ.λπ.) και μπορεί να βρίσκονται στον χώρο.

2.1 Ιστορικές πυρκαγιές σε σιδηροδρομικούς σταθμούς και ο αντίκτυπός τους στο σχεδιασμό εκκένωσης έκτακτης ανάγκης

- Πυρκαγιά στο σταθμό King's Cross του Λονδίνου το 1987: Αυτή η πυρκαγιά είχε ως αποτέλεσμα τον θάνατο 31 ατόμων και τον τραυματισμό πολλών ακόμη. Αποτέλεσε το αφορμή για τη βελτίωση της πυροπροστασίας στους σιδηροδρομικούς σταθμούς και την ανάπτυξη νέων κανονιστικών απαιτήσεων για την εκκένωση έκτακτης ανάγκης.
- Πυρκαγιά στο σταθμό Baku του Αζερμπαϊτζάν το 1995: Αυτή η πυρκαγιά είχε ως αποτέλεσμα τον θάνατο 288 ατόμων και τον τραυματισμό πολλών ακόμη. Η πυρκαγιά αυτή οδήγησε σε αλλαγές στην πολιτική ασφαλείας των σιδηροδρόμων και στη βελτίωση της πυροπροστασίας σε σιδηροδρομικούς σταθμούς.
- Πυρκαγιά στο σταθμό Daegu της Νότιας Κορέας το 2003: Αυτή η πυρκαγιά είχε ως αποτέλεσμα τον θάνατο 192 ατόμων και τον τραυματισμό πολλών ακόμη (υπολογίζεται ότι οι τραυματίες ήταν 151 άτομα). Αυτή η πυρκαγιά οδήγησε σε αλλαγές στο σχεδιασμό εκκένωσης στους σιδηροδρομικούς σταθμούς και την ενίσχυση της εκπαίδευσης του προσωπικού σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.
- Πυρκαγιά στο σταθμό Paddington του Λονδίνου το 2015: Αυτή η πυρκαγιά είχε ως αποτέλεσμα να εκκενωθεί ο σταθμός και την επίβλεψη των επιβατών για αρκετές ώρες. Η πυρκαγιά αυτή οδήγησε σε αλλαγές στους κανονισμούς ασφαλείας των σιδηροδρόμων και στον σχεδιασμό εκκένωσης στους σταθμούς.

Αξίζει να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι τα παραπάνω ατυχήματα αντιμετωπίστηκαν με βάση την εμπειρία που κατείχαν οι εργαζόμενοι του μετρό. Όμως μετά το ατύχημα στο Λονδίνο άρχισαν να αλλάζουν οι κανονισμοί ασφαλείας και να μελετάτε ο τρόπος εκκένωσης των σταθμών.

2.2 Συμπεριφορές των ανθρώπων κατά την εκκένωση

Συνολικά, αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι οι άνθρωποι έχουν την τάση να ακολουθούν άλλους ανθρώπους σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στον υπερπληθισμό σε συγκεκριμένα σημεία του σταθμού ή στο μπλοκάρισμα των εξόδων, ενώ η επιθυμία να βγουν γρήγορα μπορεί να οδηγήσει σε αγχωτική συμπεριφορά, πιέσεις και ακόμη και σε πανικό. Η ατομική συμπεριφορά όπως ούτε και η ομαδική συμπεριφορά παρουσιάζουν αρκετά καλά αποτελέσματα στις περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, αλλά το βέλτιστο αποτέλεσμα προέρχεται από μια συγκεκριμένη συνδυασμένη συμπεριφορά.

Οι ερευνητές δεν έχουν σαφή απάντηση σχετικά με το εάν οι άνθρωποι σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης θα εκδηλώσουν συνεργατική συμπεριφορά ή θα εκδηλώσουν συμπεριφορά πιέσεων και αναγκαστικού εκτοπισμού. Παρόλο που σε ορισμένες καταστροφές συνωστισμού και εκκενώσεων, έχουν παρατηρηθεί περιπτώσεις συμπεριφοράς πιέσεων, σε άλλες περιπτώσεις οι άνθρωποι έχουν επιδείξει συνεργατική συμπεριφορά. Επίσης, στις συνθήκες συνωστισμού, η ανυπομονησία μπορεί να οδηγήσει σε πιέσεις και αναγκαστικό εκτοπισμό. Ωστόσο, άλλες έρευνες έχουν δείξει ότι οι άνθρωποι διατηρούν τους κοινωνικούς δεσμούς τους και καθυστερούν τη δική τους απομάκρυνση για να διασφαλίσουν την ασφαλή εκκένωση της ομάδας ως σύνολο.

Το μοντέλο συμπεριφοράς ρόλου-κανόνα, που έχει αναπτυχθεί με βάση τη μάθηση από διάφορες τεκμηριωμένες μελέτες εκκένωσης (Fridolf, Nilsson, & Frantzich, 2013), δηλώνει ότι η αντίδραση ενός συγκεκριμένου ατόμου σε μια απειλή (π.χ. φωτιά) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ρόλο του ατόμου (π.χ. αν είναι μέλος του προσωπικού ή επιβάτης). Για παράδειγμα, η ενημέρωση του προσωπικού στο σιδηροδρομικό σταθμό σχετικά με τη διαδικασία εκκένωσης μπορεί να συνδέεται με τους κανόνες που σχετίζονται με τους ρόλους των μελών του προσωπικού του σταθμού. Αντίθετα, οι επιβάτες μπορεί να μην είναι ενήμεροι για τα εργαλεία και τις διαδικασίες έκτακτης ανάγκης καθώς συνήθως βασίζονται στις οδηγίες του προσωπικού ή της αρμόδιας αρχής πριν ζητήσουν επιπλέον πληροφορίες κατά τη διάρκεια της εκκένωσης. Αυτή η αντιδραστική συμπεριφορά μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες κατά τη διάρκεια της εκκένωσης.

Σε διάφορες περιπτώσεις εκκένωσης, οι άνθρωποι ήταν προ-ενεργητικοί και κινήθηκαν γρήγορα προς τις εξόδους, χρησιμοποιώντας επίσης τα κουμπιά κλήσης έκτακτης ανάγκης μόλις γνώριζαν για την έκτακτη κατάσταση. Αυτή η προ-ενεργητική προσέγγιση των επιβατών έχει παρατηρηθεί όχι μόνο στα υπόγεια μέσα μαζικής μεταφοράς αλλά και στις εκκενώσεις αεροσκαφών, όπως στο ατύχημα της China Airlines CI-120.

Πολλές μελέτες δείχνουν ότι χαρακτηριστικά όπως φύλο και ηλικία επηρεάζουν τη συμπεριφορά των επιβατών κατά τη διάρκεια έκτακτων καταστάσεων. Μελέτη στην Καλιφόρνια δείχνει ότι οι γυναίκες είναι πιο προσκολλημένες στην αναζήτηση πληροφοριών κατά τη διάρκεια καταστροφών, ενώ οι άνδρες αγνοούν συχνότερα τις εντολές εκκένωσης και επιδεικνύουν πιο ριψοκίνδυνη συμπεριφορά. Επιπλέον, οι γυναίκες έχουν την τάση να ακολουθούν τις ενέργειες άλλων επιβατών πιο πιστά από τους άνδρες. Τέλος οι ηλικιωμένοι επιβάτες είναι περισσότερο αντιδραστικοί και περιμένουν για οδηγίες κατά τη διάρκεια εκτάκτων καταστάσεων σε σύγκριση με τους νέους (Shiwakoti, Tay, & Stasinopoulos, 2020).

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την εκκένωση έκτακτης ανάγκης του σιδηροδρομικού σταθμού

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκκένωση έχουν άμεση σχέση με τα χαρακτηριστικά των εκκενωθέντων, τις εγκαταστάσεις εκκένωσης και την οργάνωση και διαχείριση εκκένωσης.

2.3.1 Χαρακτηριστικά των εκκενωθέντων

1. Σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, η κίνηση πεζών μέσα στους σταθμούς μετρά αυξάνεται αιφνιδιαστικά σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ένας μεγάλος αριθμός επιβατών που περνούν απλώς από τον σταθμό πρέπει να κατέβουν από το τρένο και να μετακινηθούν σε ασφαλές μέρος. Λόγω του ενστίκτου επιβίωσης, η αναμενόμενη ταχύτητα των εκκενωθέντων κατά τη διάρκεια της εκκένωσης είναι πολύ μεγαλύτερη από την κανονική ταχύτητα περπατήματος. Ωστόσο, η πραγματική ταχύτητα θα επιβραδυνθεί λόγω του συμφόρησης. Στην πραγματικότητα, η μέση ταχύτητα εκκένωσης είναι πάντα χαμηλότερη από την κανονική ταχύτητα περπατήματος λόγω των περιορισμών στις εξόδους, στις σκάλες, στους διαδρόμους και στους ελέγχους εισόδου-εξόδου. Προφανώς, σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, η πυκνότητα της κίνησης πεζών είναι πολύ μεγαλύτερη από την κανονική κατάσταση άρα η υψηλή πυκνότητα είναι ένας άλλος λόγος που οδηγεί σε χαμηλή ταχύτητα εκκένωσης και σοβαρή συμφόρηση κατά τη διάρκεια της εκκένωσης.

2. Η ηλικία, το φύλο και η δραστηριότητα του ατόμου επηρεάζουν το χρόνο ανταπόκρισης και την ταχύτητα εκκένωσης κατά τη διάρκεια εκκένωσης σε έκτακτη κατάσταση. Αυτές οι διαφορές μεταξύ των ατόμων θα επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας της ομάδας εκκένωσης. Δεδομένα έρευνας δείχνουν ότι η ταχύτητα εκκένωσης των παιδιών και των ηλικιωμένων είναι πολύ χαμηλότερη από τους νέους και τους μεσήλικες. Αυτοί οι παράγοντες θα μειώσουν την μέση ταχύτητα εκκένωσης της ομάδας.
3. Η παρουσία μεγάλου αριθμού μεταναστών και τον αντίκτυπό τους στην ασφάλεια των σταθμών του μετρό. Επειδή αυτοί οι άνθρωποι δεν είναι εξοικειωμένοι με το σύστημα μετρό, μπορεί να προκαλέσουν μη λογικές ενέργειες κατά τη διάρκεια μιας εκκένωσης λόγω του φόβου και του πανικού που μπορεί να προκληθεί. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στη διαδρομή εκκένωσης και στη συνωστισμό, επιπλέον, αυτό θα μειώσει την ταχύτητα εκκένωσης και θα υποβαθμίσει την ικανότητα εκκένωσης του σταθμού του μετρό,

2.3.2 Χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων κατά την εκκένωση

Οι κρίσιμες εγκαταστάσεις εκκένωσης αναφέρονται κυρίως σε διάδρομο, σκάλα, κυλιόμενη κλίμακα, περιστροφική θύρα με μετρητή και η έξοδος, που πρέπει να χρησιμοποιηθούν από τους ανθρώπους για να φτάσουν στο ασφαλές μέρος. Αυτές οι εγκαταστάσεις, αν δεν σχεδιαστούν καλά, είναι πολύ πιθανό να γίνουν σημείο συμφόρησης για την εκκένωση. Οι επιπτώσεις στην έκτακτη εκκένωση του σταθμού του μετρό που προκαλούνται από τις κρίσιμες εγκαταστάσεις εκκένωσης αναλύονται ως εξής:

1. Οι διαδρομές εκκένωσης περιλαμβάνουν διαδρόμους, σκάλες και κυλιόμενες κλίμακες. Κατά τη διάρκεια μιας έκτακτης κατάστασης, ένας μεγάλος αριθμός επιβατών συγκεντρώνεται στη διαδρομή εκκένωσης, προκαλώντας συμφόρηση και ουρές. Ως αποτέλεσμα, η χειριστική ικανότητα της διαδρομής θα είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την εκκένωση του σταθμού μετρό συνολικά. Το πλάτος και ο αριθμός της διαδρομής εκκένωσης πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις της έκτακτης εκκένωσης. Αφετέρου, η εκκενρότητα της διαδρομής εκκένωσης επηρεάζεται από τα φυσικά της χαρακτηριστικά, όπως το πλάτος, το μήκος και η κλίση. Αφετέρου, επηρεάζεται από το

βαθμό πανικού, τη μέση ταχύτητα εκκένωσης και την πυκνότητα εκκένωσης των ανθρώπων που εκκενώνουν. Κατά τη διάρκεια της έκτακτης εκκένωσης, η κυλιόμενη κλίμακα δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για λόγους ασφαλείας.

2. Η περιστροφική θύρα, στην κανονική λειτουργία, η αυτόματη περιστροφική θύρα ελέγχου των εισιτηρίων μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα του σταθμού του μετρό να διαχειριστεί τη ροή των επιβατών. Ωστόσο, λόγω του περιορισμού του αριθμού και του πλάτους του στροφείου, ο ρυθμός διέλευσης των επιβατών στο στροφείο κατά τη διάρκεια της έκτακτης εκκένωσης είναι πολύ χαμηλός. Είναι εύκολο λοιπόν να δημιουργηθεί συμφόρηση και ουρές.
3. Η έξοδος. Η EEC (Emergency Evacuation Capacity) (Εκτιμώμενη Χωρητικότητα Εκκένωσης) του σταθμού του μετρό καθορίζεται από το πλάτος και τον αριθμό των εξόδων. Οι εξοδοί πρέπει να τοποθετούνται ομοίμορφα με σαφή σημάδια σε όλες τις κατευθύνσεις του σταθμού του μετρό, έτσι ώστε να αποφεύγεται η συμφόρηση. Επιπλέον, η EEK του σταθμού του μετρό επηρεάζεται επίσης από άλλους παράγοντες, όπως η χωρική διάταξη των εγκαταστάσεων, ο βαθμός αντιστοιχίας των κρίσιμων εγκαταστάσεων εκκένωσης καθώς και η διαδρομή εκκένωσης (Guo & Zhang, 2022).

2.3.3 Οργάνωση και Διαχείριση Εκκένωσης

Κατά την έκτακτη κατάσταση εκκένωσης, η παροχή χρήσιμων κατευθυντήριων πληροφοριών για τους εκκενωθέντες είναι ωφέλιμη για τη βελτίωση της χωρητικότητας εκκένωσης του σταθμού και τη βοήθεια των εκκενωθέντων να φτάσουν σε ασφαλές μέρος όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Η οργάνωση και διαχείριση της έκτακτης εκκένωσης του σταθμού έχει δύο πτυχές: την κατεύθυνση και τα κατευθυντήρια σήματα εκκένωσης (Shi et al., 2012).

1. Τα κατευθυντήρια σήματα εκκένωσης περιλαμβάνουν κυρίως τα σήματα ενδείξεων εξόδου, τα σήματα κατεύθυνσης, τα προειδοποιητικά σήματα και οι πληροφορίες μετάδοσης μέσω ηχητικής ανακοίνωσης και άλλων εγκαταστάσεων κατευθυντήριας εκκένωσης. Ο σκοπός του θέσπισης κατευθυντήριων σημάτων εκκένωσης είναι να βοηθήσουν τους ανθρώπους να βρουν γρήγορα κατάλληλη διαδρομή εκκένωσης, ώστε

να μειωθούν η συμφόρηση και το χάος κατά τη διάρκεια της εκκένωσης και να διασφαλιστεί η ασφάλεια των επιβατών.

2. Κατά τη διάρκεια μιας έκτακτης εκκένωσης, είναι πολύ συνηθισμένο οι άνθρωποι να λαμβάνουν ανόητες αποφάσεις λόγω του φόβου και του πανικού. Μια αποτελεσματική κατεύθυνση μπορεί να ανακουφίσει το ψυχολογικό φόβο των ανθρώπων και να βοηθήσει στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της εκκένωσης. Επομένως, είναι απαραίτητο να αναθέσουμε αστυνομικούς και εργαζόμενους για την κατεύθυνση και καθοδήγηση των ατόμων στο σημείο της εκτάκτου εκκένωσης.

2.4 Ορισμός εκκένωσης

Η εκκένωση έκτακτης ανάγκης είναι μια κρίσιμη πτυχή της δημόσιας ασφάλειας σε δημόσιους χώρους, ειδικά σε σιδηροδρομικούς σταθμούς όπου μεγάλος αριθμός επιβατών μετακινείται καθημερινά. Με τα χρόνια, ερευνητές και επαγγελματίες έχουν αναπτύξει διάφορα μοντέλα και τεχνικές για την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση της εκκένωσης έκτακτης ανάγκης σε σιδηροδρομικούς σταθμούς.

2.4.1 Τύποι εκκένωσης

Υπάρχουν δύο τύποι εκκένωσης που μπορούν να εφαρμοστούν σε περιπτώσεις καταστροφής ή έκτακτης ανάγκης:

- 1) την μερική εκκένωση
- 2) την πλήρη εκκένωση

Αυτό καθορίζεται από τη φύση του συμβάντος και την αμεσότητα της απειλής για την ασφάλεια των επιζώντων καθορίζουν τον τύπο της εκκένωσης που πρέπει να διεξαχθεί. Η μερική εκκένωση περιλαμβάνει τη μετακίνηση των παρευρισκόμενων από την ζώνη του κινδύνου σε μια ασφαλή περιοχή, ενώ στην πλήρη εκκένωση απαιτείται η εκκένωση όλων των παρευρισκόμενων, εκτός από εξαιρέσεις, όπως οι μέλη της ομάδας αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης ή καταστροφής (Li, Wang, Wang, & Huang, 2017).

2.4.2 Βασικοί λόγοι εκκένωσης

Υπάρχουν δύο κύριοι λόγοι εκκένωσης:

- 1) η φύση του συμβάντος εάν είναι έκτακτης ανάγκης ή κάποια καταστροφή.

2) ενδεχόμενη απειλή για την ασφάλεια των επιβατών, ανάλογα με την σπουδαιότητα του περιστατικού, δηλαδή το πόσο σοβαρό είναι.

Άλλοι κρίσιμοι παράγοντες που έχουν σχέση με την εκκένωση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και μάλιστα να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη στρατηγικών εκκένωσης. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά, όπως:

- ✓ Τα εσωτερικό επίπεδο ευθύνης και εξουσίας είναι υπεύθυνο για να δοθεί η έναρξη της εκκένωσης και την παρακολούθηση της όλης διαδικασίας, η οποία σχετίζεται με το χαρακτήρα αλλά και τη σοβαρότητα του γεγονότος .Οι εντολές εκκένωσης μπορεί να εκδίδονται από την αρχή της εγκατάστασης, την τοπική πυροσβεστική υπηρεσία ,άλλες αρμόδιες αρχές ή και από τις δύο.
- ✓ Η χρονική στιγμή που θα δοθεί η εντολή. Ανάλογα με τον πιθανό κίνδυνο για την ασφάλεια των ατόμων, η τελική επιλογή της απόφασης να διαταχθεί η εκκένωση μπορεί να πρέπει να ληφθεί άμεσα.
- ✓ Διάφοροι τύποι παροχής βοήθειας θα οφείλουν να είναι διαθέσιμοι από την Α.Μ.Ε.Α, συμπεριλαμβανομένου ειδικά εκπαιδευμένου προσωπικού που εργάζεται στις εγκαταστάσεις, προσωπικού πυρόσβεσης και διάσωσης.

Είναι επίσης σημαντικό να έχουμε κατά νου την πιθανή χρήση βομβών και εκρηκτικών κατά τη διάρκεια βίαιων γεγονότων. Αυτό δεν πρέπει να αγνοηθεί για λόγους ασφαλείας (Li et al., 2017).

2.4.3 Παράγοντες που βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης

- 1) Λήψη αποφάσεων. Είναι γνωστό ότι είναι αρκετά δύσκολο για έναν άνθρωπο να πάρει το ρίσκο για να λάβει μία επείγουσα απόφαση. Όταν όμως καταλάβει ότι στην ουσία πρόκειται για μία κατάσταση έκτακτης ανάγκης τότε συνήθως λαμβάνει δράση, και επομένως παίρνει διάφορες αποφάσεις. Η σωστή εκπαίδευση που θα συνδυαστεί με σωστή οργάνωση και πληροφόρηση μπορεί να βοηθήσει στην λήψη αποφάσεων σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα (Shiwakoti, Tay, Stasinopoulos, & Woolley, 2017).
- 2) Χρονικό διάστημα αποσαφήνισης της πραγματικής κατάστασης. Κατά το χρονικό αυτό διάστημα τα άτομα προσπαθούν να κατανοήσουν και να αναζητήσουν τις πληροφορίες οι οποίες θα τους βοηθήσουν στην λήψη αποφάσεων. Σε πολλές περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί καθυστέρηση στην εκκένωση, μιας και αισθάνονται αβεβαιότητα για την αναγκαιότητα της εκκένωσης.

- 3) Εκκένωση του χώρου από τη σωστή διαδρομή εξόδου. Συνήθως υπάρχουν πινακίδες σήμανσης εξόδου που οδηγούν στην κατάλληλη έξοδο.
- 4) Αυτοσυγκράτηση. Σε καταστάσεις υψηλής πυκνότητας, όπως σε γεμάτα γραφεία ή αμφιθέατρα, οι άνθρωποι πρέπει να είναι σε επαγρύπνηση και να αποφεύγουν την εκκένωση μέχρι να υποχωρήσει το πλήθος. Όταν οι άνθρωποι φτάνουν σε βασικά σημεία εξόδου, όπως σε πολυσύχναστους κεντρικούς δρόμους (συχνά σε κλιμακοστάσια), οι ενέργειές τους δεν θα έχουν κανένα αποτέλεσμα αν τροφοδοτούνται συνεχώς από μικρές ουρές ανθρώπων που περιμένουν (Sun et al., 2012). Ωστόσο, όταν μια καθυστέρηση προκαλείται από ένα μεμονωμένο άτομο, η παροχή στα κρίσιμα σημεία μειώνεται, με αποτέλεσμα τη μείωση της αποτελεσματικότητας εκκένωσης.
- 5) Οι υπολογισμοί του χρόνου εκκένωσης έκτακτης ανάγκης συζητούνται με βάση την υπόθεση ότι η ροή των ανθρώπων και η ροή του νερού μπορούν να αντιστοιχηθούν. Θεωρείται ότι η συγχώνευση των διαφορετικών ροών στο σημείο συγκέντρωσης αυτορυθμίζεται ανάλογα με τη χωρητικότητα των κλιμακοστασίων και την ποσότητα της ροής. Ωστόσο, στις πραγματικές εκροές, η κατανομή της πρόσβασης στο σημείο συγκέντρωσης μπορεί να προκαλέσει διάσπαση των ροών εξόδου και μείωση της χωρητικότητας της διατομής εξόδου από 30% έως 50%.
- 6) Εάν μια μονάδα παραγωγής χρησιμοποιείται περισσότερο από μια άλλη, η αποδοτικότητα του συστήματος παραγωγής θα μειωθεί. Ορισμένες εκροές θα υπολειτουργούν, ενώ άλλες θα υπερλειτουργούν. Η ανισότητα στην χρησιμοποίηση των παραγωγικών εγκαταστάσεων αποτελεί μια συνάρτηση

2.5 Η φωτιά και τα χαρακτηριστικά της

Η φωτιά προέρχεται από τη διαδικασία της καύσης. Πρόκειται για μια διαδικασία που συνδέεται με γρήγορη οξείδωση σε υψηλή θερμοκρασία με το σχηματισμό αερίων καύσης και την παραγωγή ορατής και μη ακτινοβολίας. Η καύση με φλόγα επιτυγχάνεται με δύο τρόπους. (Babrauskas, 2008):

1. Προαναμεμιγμένες φλόγες, όπου το οξυγόνο αναμειγνύεται με το καύσιμο πριν πραγματοποιηθεί η ανάφλεξη (π.χ. μια σόμπα αερίου ή ένας πυρσός προπανίου).
2. Οι φλόγες διάχυσης εμφανίζονται όταν το καύσιμο και το οξυγόνο είναι αρχικά διαχωρισμένα, αλλά καίγονται στο σημείο όπου ανακατεύονται - για παράδειγμα, όταν καίγεται μια λίμνη εύφλεκτου υγρού ή όταν καίγεται ξύλο.

2.5.1 Στατιστικά Στοιχεία σχετικά με τη φωτιά

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανάδειξε τρεις κύριες αιτίες πυρκαγιάς:

- 1) Ατυχήματα που προκαλούνται από εκτροχιασμούς ή συγκρούσεις με βραχυκυκλώματα σε ηλεκτρικά κυκλώματα
- 2) Βλάβη των ηλεκτρικών συστημάτων εντός και εκτός της αμαξοστοιχίας
- 3) Εμπρησμός (συνήθως μέσα στον συρμό)

Οι πυρκαγιές που προκαλούνται από βραχυκύκλωμα των ηλεκτρικών κυκλωμάτων λόγω εκτροχιασμών ή συγκρούσεων είναι σπάνιες (μόνο μία σημειώθηκε στις 12 Δεκεμβρίου 1971 στο Μόντρεαλ του Καναδά) και έχουν συμβεί σε πολύ παλιά τρένα. Τα στατιστικά του Tipping (2004) έδειξαν ότι η πυρκαγιά που προκλήθηκε από ηλεκτρικές βλάβες και ο εμπρησμός ήταν οι κύριες αιτίες των περιστατικών. Η αιτία της πυρκαγιάς συνοψίζεται στον Πίνακα 2-1 σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία.

Αίτιο της Φωτιάς	Συχνότητα	%
Εμπρησμός (μέσα στο συρμό)	145	68
Ηλεκτρική Βλάβη (μέσα στο συρμό)	8	4
Μικρές εστίες φωτιάς από αμέλεια (μέσα στο συρμό)	2	1
Ηλεκτρική Βλάβη (στο κάτω μέρος του συρμού)	57	27
Σύνολο	212	100

Πίνακας 2-1: Αιτία της πυρκαγιάς (Fernandez, 2004)

Φωτιά και οι επιπτώσεις της στον άνθρωπο

Όλες οι πυρκαγιές δίνουν μεγάλες ποσότητες καπνού και αρκετά υψηλή θερμοότητα, καθιστώντας δύσκολη την μετακίνηση και την ορατότητα, εμποδίζοντας τους τρόπους διαφυγής και εμποδίζοντας την ταχεία αντίδραση έκτακτης ανάγκης. Το πιο σημαντικό πράγμα σε τέτοιες περιπτώσεις είναι ο διαθέσιμος χρόνος για την εκκένωση: Σύμφωνα με τους G. Hartzell και H. Emmons (1988), ένα σημαντικό κριτήριο για τη διάσωση ζώων από πυρκαγιά είναι ο διαθέσιμος χρόνος για την εκκένωση να είναι μικρότερος από τον απαιτούμενο χρόνο εκκένωσης. Ο χρόνος ετοιμότητας εκκένωσης ορίζεται ως ο χρόνος από τη στιγμή της ανάφλεξης έως ότου οι συνθήκες στην περιοχή γίνουν τέτοιες ώστε να είναι δυνατή η διαφυγή.

Επομένως, τα δεν έχουν την δυνατότητα να δραστηριοποιηθούν ώστε να διαφύγουν (SFPE 2002). Η κατάσταση αυτή προκύπτει για τους ακόλουθους λόγους:

1. Εισπνοής ασφυξιογόνων αερίων που μπορεί να προκαλέσει απώλεια των αισθήσεων και δηλητηρίαση.
2. Έκθεση σε θερμότητα με συναγωγή ή ακτινοβολία
3. Παρεμπόδιση της ορατότητας λόγω πυκνού καπνού

2.5.2 Επίδραση της θερμότητας

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την επίδραση της θερμότητας στο ανθρώπινο σώμα μέσω της θερμικής ακτινοβολίας και της θερμικής συναγωγής είναι η ένταση της θερμότητας και η διάρκεια της έκθεσης στη θερμότητα. Μια εξέχουσα επίδραση είναι η πιθανότητα πρόκλησης εγκαυμάτων λόγω της αγωγής θερμότητας στο δέρμα. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες εγκαυμάτων (Assael, 2007)

Πρώτου βαθμού: βλάβη στην εξωτερική στιβάδα του δέρματος (επιδερμίδα) με τη μορφή ερυθρότητας, πρηξίματος, φουσκάλες και πόνου

Δεύτερου βαθμού: ερυθρότητα, οίδημα, ερεθισμός του δέρματος, πρήξιμο, πόνος, ευαισθησία, πόνος, τραυματισμός και φλεγμονή: η βλάβη επεκτείνεται στον ενδιάμεσο ιστό του δέρματος (χόριο), προκαλώντας περαιτέρω οίδημα, οξύ πόνο και σχηματισμό φουσκάλων. Τα ανώτερα στρώματα της επιδερμίδας υφίστανται βλάβη σε βάθος 0,07-0,12 mm.

Τρίτου βαθμού: Η ιστική βλάβη επεκτείνεται περαιτέρω, προκαλώντας εκτεταμένη καταστροφή των ιστών και των νευρικών απολήξεων. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται μούδιασμα του δέρματος.

Κυρίως τα εγκαύματα δευτέρου και τρίτου βαθμού μπορεί να οδηγήσουν στο θάνατο ανάλογα με το βαθμό. Αντίστοιχα, τα παιδιά ηλικίας 0-9 ετών έχουν 80% πιθανότητα επιβίωσης σε εγκαύματα που υπερβαίνουν το 50% της επιφάνειας του δέρματος, οι ενήλικες ηλικίας 30-35 ετών έχουν 50% πιθανότητα επιβίωσης και τα άτομα ηλικίας 60 ετών και άνω δεν έχουν καμία πιθανότητα επιβίωσης.

Οι αυξημένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος δυσκολεύουν τους ανθρώπους να κινηθούν ή να εργαστούν. Η κρίσιμη θερμοκρασία στην οποία το ανθρώπινο σώμα γίνεται αδύναμο σε κλειστούς χώρους όπως οι σήραγγες είναι 60°C.

2.5.3 Επιπτώσεις επικίνδυνων ρύπων

Επικίνδυνοι τοξικοί ρύποι όπως μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του αζώτου (NOx) και οξείδια του θείου (SOx) μπορούν να εξαπλωθούν κατά την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς σε μια σήραγγα, καθιστώντας δύσκολη την εκκένωση ή τη διάσωση των χρηστών. Οι επιπτώσεις των επικίνδυνων ρύπων που αναγνωρίζονται ως χημικές ουσίες εξαρτώνται από την ένταση και τη διάρκεια της έκθεσης του ανθρώπου σε αυτές. Ως εκ τούτου, ο ορισμός των οριακών τιμών, εκφρασμένων σε [mg/m³] ή [ppm] υπό κανονικές συνθήκες και με βάση τις κατευθυντήριες γραμμές της Αμερικανικής Διάσκεψης Κυβερνητικών Βιομηχανικών Υγιεινολόγων (ACGIH), δίνεται παρακάτω:

Κατώτατο όριο - Η χρονικά σταθμισμένη μέση τιμή (TLV-TWA) είναι ο χρονικά σταθμισμένος μέσος όρος της συγκέντρωσης της ουσίας για μια τυπική ατομική έκθεση στη χημική ουσία, που μετράται στη ζώνη αναπνοής κατά τη διάρκεια μιας τυπικής 8ωρης ημέρας, 40ωρης εβδομάδας.

Όριο - Το όριο βραχυχρόνιας έκθεσης (TLV-STEL) είναι η συγκέντρωση (TLV-STEL) στην οποία ένα άτομο μπορεί να εκτεθεί σε μια χημική ουσία για σύντομο, συνεχές χρονικό διάστημα χωρίς βαθμό καταστολής, μειωμένη ικανότητα αυτοπροστασίας ή μειωμένη συνολική απόδοση που αυξάνει την πιθανότητα ερεθισμού, χρόνιας ή μη αναστρέψιμης ιστικής βλάβης ή ατυχήματος (αλλά δεν υπερβαίνει την ημερήσια TLV-TWA).

Παράλληλα με το TLV, η Μέγιστη Οριακή Τιμή Έκθεσης είναι η χρονικά σταθμισμένη μέση έκθεση σε μια χημική ουσία που μετράται στην αναπνευστική ζώνη ενός ατόμου κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε περιόδου 15 λεπτών του τυπικού ημερήσιου χρόνου έκθεσης ενός ατόμου, ακόμη και αν τηρούνται τα όρια έκθεσης. Ο κύριος επικίνδυνος ρύπος που μετράται στον περισσότερο εργαστηριακό εξοπλισμό είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Οι συγκεντρώσεις αναφοράς στον άνθρωπο εξαρτώνται από τις συνήθειές του. Για παράδειγμα, έχει βρεθεί ότι οι καπνιστές και οι άνθρωποι που ζουν σε μεγάλες πόλεις (λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης) έχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις στο αίμα. Το σχήμα 2-2 δίνει μια επισκόπηση των συμπτωμάτων που παρατηρούνται ανάλογα με την εισπνεόμενη συγκέντρωση CO και τη συγκέντρωση COHb στο αίμα.

Συγκέντρωση CO στον εισπνεόμενο αέρα	Επίπεδα COHb	Συμπτώματα
35 ppm	<10%	Πονοκέφαλος και ζαλάδες μετά από 6-8 ώρες συνεχόμενης έκθεσης
100 ppm	>10%	Ελαφρύς πονοκέφαλος μέσα σε 2-3 h
200 ppm	20%	Ελαφρύς πονοκέφαλος μέσα σε 2-3 h και απώλεια συνείδησης
400 ppm	25%	Μετωπιαία κεφαλαλγία σε 60 – 120 min
800 ppm	30%	Ζαλάδες -ναυτία στα πρώτα 45min. Αναισθησία σε 120 min
1600 ppm	40%	Πονοκέφαλος και ζαλάδες-ναυτία στα πρώτα 20min. Θάνατος μέσα σε 120 min
3200 ppm	50%	Πονοκέφαλος και ζαλάδες -ναυτία στα πρώτα 5-10min. Θάνατος μέσα σε 30 min
6400 ppm	60%	Πονοκέφαλος και ζαλάδες στα πρώτα 1-2min. Σπασμοί, διακοπή αναπνοής και θάνατος σε λιγότερο από 20 min
12800 ppm	>70%	Θάνατος εντός 3 min

Πίνακας 2-2: Συμπτώματα των επιδράσεων του μονοξειδίου του άνθρακα στον ανθρώπινο οργανισμό ανάλογα με τη συγκέντρωσή του στον εισπνεόμενο αέρα.

3 Προγραμματισμός και πραγματοποίηση της έρευνας

3.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται και απαριθμούνται τα στοιχεία του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Αρχικά, γίνεται αναφορά στο Pyrosim, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μιας πυρκαγιάς που εξαπλώνεται στο εσωτερικό ενός σταθμού και των προϊόντων του. Στη συνέχεια, περιγράφονται και αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του προγράμματος Pathfinder για την προσομοίωση της διαδικασίας εκκένωσης.

Περιγράφεται επίσης η μοντελοποίηση της διαδικασίας εκκένωσης. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μελέτη περίπτωσης εκκένωσης από πυρκαγιά.

3.2 Pyrosim

Το PyroSim είναι μια γραφική διεπαφή χρήστη που εκτελεί τον προσομοιωτή Fire Dynamics Simulator (FDS). Επιτρέπει στους χρήστες να προβλέπουν τις συγκεντρώσεις καπνού, μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και άλλων ουσιών και τα προφίλ της θερμοκρασίας του χώρου κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς. Το πρόγραμμα PyroSim αναπτύχθηκε από την Thunderhead Engineering, ενώ το FDS αναπτύχθηκε από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (PyroSim Manual, 2023). Το πρόγραμμα αναφοράς (FDS) είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης της θερμικά καθοδηγούμενης ρευστοδυναμικής (CFD, Computational Fluid Dynamics). Πιο συγκεκριμένα, το FDS επιλύει μια μορφή των εξισώσεων Navier-Stokes κατάλληλη για θερμικά καθοδηγούμενες ροές σε χαμηλές ταχύτητες, με έμφαση στον καπνό και τη μεταφορά θερμότητας από πυρκαγιές. Το πρόγραμμα Smokeview είναι ένα άλλο πρόγραμμα οπτικοποίησης που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του FDS. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα προσομοίωσης πυρκαγιάς βασίζεται σε μια εφαρμογή που αναπτύχθηκε από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST), η οποία έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός καλύτερου οπτικού περιβάλλοντος για τον χρήστη, προκειμένου να διευκολυνθεί η ανάπτυξη εφαρμογών για το πρόγραμμα FDS (PyroSim manual, 2023).

3.2.1 Παραμετροποίηση Pyrosim

Στο τμήμα αυτό αναλύονται όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την ομαλή και ορθολογική εκτέλεση του pyrosim.

3.2.2 Μεθοδολογία του Κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής FDS

Ο κώδικας FDS (Fire Dynamics Simulator) εφαρμόζει αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, με έμφαση στη μοντελοποίηση θερμικών ροών χαμηλών ταχυτήτων, καθώς και στη μελέτη της παραγωγής καπνού και της μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Για την επίλυση αυτών των φυσικών φαινομένων, ο κώδικας χρησιμοποιεί μια απλουστευμένη εξίσωση καύσης, που είναι κατάλληλη για μικρές τιμές Mach, δηλαδή χαμηλές ταχύτητες. Για την προσομοίωση αυτών των φυσικών φαινομένων χρησιμοποιούνται μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση των μερικών παραγώγων των εξισώσεων διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας.

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια μέθοδο πεπερασμένων διαφορών δεύτερης τάξης με μια μέθοδο επίλυσης τύπου διόρθωσης πρόβλεψης για την επίλυση του πεδίου ροής. Ειδικότερα, η μέθοδος επίλυσης τύπου πρόβλεψης-διόρθωσης υπολογίζει το επόμενο σημείο επίλυσης με βάση το προηγούμενο σημείο επίλυσης και διορθώνει τις προβλέψεις χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες σχεσιακές εξισώσεις. Αρχικά, γίνονται υποθέσεις σχετικά με τις ποσότητες κλίσης (π.χ. θερμοκρασία, πυκνότητα, πίεση) του πεδίου ροής. Στη συνέχεια, οι εξισώσεις Navier-Stokes, που εκφράζονται ως πεπερασμένες διαφορές, προχωράμε στην επίλυση του πεδίου ταχυτήτων με βάση το πεδίο πιέσεων. Αυτή η διαδικασία οδηγεί στον υπολογισμό νέων τιμών για το πεδίο ταχυτήτων. Στη συνέχεια, με χρήση των εξισώσεων διατήρησης, γίνεται υπολογισμός των διορθωμένων τιμών της πίεσης, καθώς και ενημερώνονται οι τιμές της πίεσης και της ταχύτητας. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται με επαναλαμβανόμενα βήματα μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση των τιμών της ταχύτητας.

Το FDS (Fire Dynamics Simulator) λύνει τα τυρβώδη χαρακτηριστικά του ροϊκού πεδίου χρησιμοποιώντας το μοντέλο τύρβης των μεγάλων κλίμακων (Large Eddy Simulation) όπως περιγράφηκε στο έργο του McGrattan το 2005. Αυτό το μοντέλο επικεντρώνεται στην επίλυση των δινών μεγάλης κλίμακας σε ένα ροϊκό πεδίο, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την τυρβώδη κινητική ενέργεια και επηρεάζουν την ανάπτυξη του ροητικού πεδίου.

Ενώ οι μικρότερες δίνες διαδραματίζουν ρόλο στην απορρόφηση και την αποσβεστική διάσπαση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, οι μεγαλύτερες δίνες αντιπροσωπεύουν σημαντική συμβολή στη διακίνησή της. Η μοντελοποίηση και ο υπολογισμός των μέσων τιμών των μικρότερων δινών επιτυγχάνεται με τη χρήση χωρικών φίλτρων που προσαρμόζονται στις διαστάσεις τους. Αντίθετα, οι μεγαλύτερες δίνες λαμβάνονται υπόψη κατά τη λύση. Στο πρόγραμμα FDS, για τη μοντελοποίηση των μεγάλων δινών, χρησιμοποιείται το μοντέλο Smagorinsky.

Βασικές εξισώσεις

Χρησιμοποιούνται μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών δεύτερης τάξης για την αριθμητική προσέγγιση των παραγώγων των εξισώσεων διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις διατήρησης που υπόκεινται σε αριθμητική επίλυση στον κώδικα FDS.

Οι βασικές εξισώσεις του κώδικα FDS είναι:

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

Εξίσωση 3-1: Συνέχειας της μάζας

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

Εξίσωση 3-2: Εξίσωση για την διατήρηση ορμής

Οι ερευνητές Rehm και Baum (McGrattan et al., 1998) διαπίστωσαν ότι η χωρική και χρονική ανάλυση της πίεσης (p) σε εφαρμογές χαμηλής ροής, όπως η πυρκαγιά, μπορεί να διακριθεί ως εξής: η πίεση μπορεί να αναλυθεί σε μια βασική πίεση (πίεση υποβάθρου), που συμβολίζεται με $\bar{p}(z,t)$, και σε μια διαταραχή, που συμβολίζεται με $\tilde{p}(x,y,z,t)$, και μόνο η πίεση υποβάθρου διατηρείται στην καταστατική εξίσωση (νόμος ιδανικών αερίων):

$$\bar{p} = \rho T R \sum_a \frac{Z_a}{W_a} = \frac{\rho RT}{\bar{W}}$$

Η συντεταγμένη z ορίζεται ως η χωρική διάσταση που αντιστοιχεί στη διεύθυνση της βαρύτητας. Αυτό σημαίνει ότι η ατμοσφαιρική διαμόρφωση περιλαμβάνεται στην πίεση υποβάθρου. ρ Οι διαταραχές πίεσης, που συμβολίζονται ως \tilde{p} , επηρεάζουν τη ροή του ρευστού.

Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

Ένα δεύτερο αποτέλεσμα της ροής με μικρή τιμή Mach εκδηλώνεται μέσω του γεγονότος ότι η εσωτερική ενέργεια e , και η ενθαλπία h συνδέονται με τις θερμοδυναμικές συνθήκες της βασικής πίεσης: $h = e + \bar{p}/\rho$. Η διατήρηση της ενέργειας να εκφράζεται με τη χρήση της ενθαλπίας, h_s :

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

Εξίσωση 3-3: Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

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

Ο όρος \vec{q}'' είναι η ροή θερμότητας από ακτινοβολία και από συναγωγή και είναι ίση με

$$\vec{q}'' = -k\nabla T - \sum_a h_{s,a}\rho D_a \nabla Y_a + \dot{q}_r''$$

Εξίσωση 3-4: Εξίσωση ροής θερμότητας από ακτινοβολία και από συναγωγή

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

Η απόκλιση της ταχύτητας υπολογίζεται ως εξής:

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

Εξίσωση 3-5: Εξίσωση απόκλισης της ταχύτητας

Επεκτάσεις του διαφορικού υλικού στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης 3-5 προκαλεί τη δημιουργία μιας αρκετά πολύπλοκης έκφρασης για τη διαφορά που περιλαμβάνει τους όρους που σχετίζονται με τη μάζα, το είδος και την ενέργεια στις εξισώσεις συντήρησης. Η σημασία αυτού στον συνολικό αλγόριθμο είναι ότι μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μόνο τις θερμοδυναμικές μεταβλητές όπως η πίεση (p), η κατεύθυνση (Z_α), και η πυκνότητα (ρ). Όπως φαίνεται πιο κάτω, ο τρόπος με τον οποίο προωθείται η ταχύτητα της ροής με το πέρασμα του χρόνου είναι μια πρώτη εκτίμηση των μεταβλητών θερμοδυναμικής στο επόμενο βήμα, η απόκλιση, και ακολούθως η επίλυση μιας εξίσωσης για την πίεση, προκειμένου να διασφαλίσει ότι οι διαθέσιμες αποκλίσεις ταχύτητας είναι οι ίδιες με εκείνες που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μόνο θερμοδυναμικές μεταβλητές.

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

Εξίσωση 3-6: Εξίσωση των αέριων συστατικών που μεταφέρονται στον αέρα

Μοντέλο Τύρβης στον κώδικα FDS

Το Fire Dynamics Simulator (FDS) λύνει τις εξισώσεις της ρευστομηχανικής Navier-Stokes μέσω της Large Eddy Simulation (LES), μιας προσέγγισης στην οποία οι μεγάλες κλίμακες δίνες

υπολογίζονται απευθείας, ενώ οι μικρότερες κλίμακες μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας υποπλεγματικά μοντέλα. Για να προσομοιώσουμε τα αναταραχώδη φαινόμενα, χρησιμοποιούμε τη μέθοδο Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (LES) με τη χρήση του μοντέλου Smagorinsky. Μπορούμε να υπολογίσουμε άμεσα τις διαδικασίες καύσης και μεταφοράς σε πειράματα καύσης μικρής κλίμακας, τουλάχιστον για την παρούσα στιγμή.

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

Εξίσωση 3-7: Εξίσωση της Διατήρησης Ορμής

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

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

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:

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

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

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

Διαδικασία Επίλυσης

Ο κώδικας FDS χρησιμοποιεί μια ημι-σχήματος προσέγγιση για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων για κάθε αριθμητικό πλέγμα που μπορεί να αποτελεί την περιοχή επίλυσης για κάθε ειδικό πρόβλημα. Οι χαρακτηριστικές ποσότητες της ροής ενημερώνονται καθώς προχωρούμε στο χρόνο, χρησιμοποιώντας ένα σχήμα Runge-Kutta που είναι δεύτερης τάξης. Για τον υπολογισμό της πίεσης, χρησιμοποιείται ένα πλέγμα που είναι βασισμένο σε διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης.

Ο αλγόριθμος επίλυσης χρησιμοποιείται με βάση τα ακόλουθα στάδια:

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 υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\delta t} + \nabla \cdot \rho^n \bar{u}^n = 0$$

Εξίσωση 3-8: Εξίσωση υπολογισμού πυκνότητας

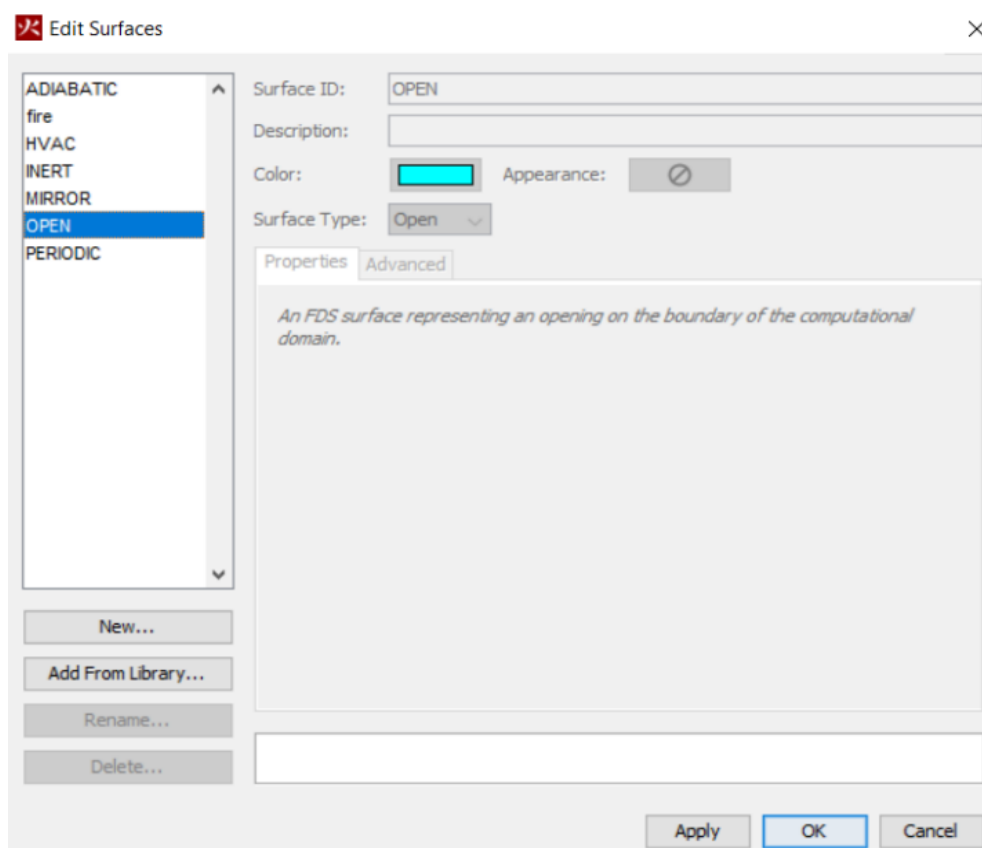
3. Ανταλλαγή των τιμών ρ^* και Y_α^* στα όρια των πλεγμάτων.
4. Εφαρμογή οριακών συνθηκών για ρ^* και Y_α^* .
5. Υπολογισμός της απόκλισης, $\nabla \cdot \bar{u}^*$, με χρήση της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας. Σε αυτό το στάδιο το πεδίο ταχύτητας δεν έχει εκτιμηθεί για το επόμενο χρονικό βήμα, μόνο η απόκλιση της.

Meshes (Πλέγμα)

Οι διάφοροι υπολογισμοί του FDS πραγματοποιούνται μέσα σε υπολογιστικά πλέγματα (computational meshes). Με οποιαδήποτε αναπαράσταση ενός αντικείμενου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι απαραίτητο βήμα η προσαρμογή στο πλέγμα. Όταν η θέση ενός αντικείμενου δεν έχει προσαρμοστεί ακριβώς στο πλέγμα, τότε γίνεται επανατοποθέτησή του αντικείμενου με αυτόματο τρόπο όσο πραγματοποιείται η προσομοίωση. Οποιοδήποτε αντικείμενο όπου ξεπερνά τα όρια από το εξωτερικό πλέγμα κόβεται όσο διαρκεί η προσομοίωση. Πρέπει να λάβετε υπ' όψιν σας ότι η πυκνότητα του Mesh επηρεάζει αναλόγως το επίπεδο πολυπλοκότητας και τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Surfaces (Επιφάνειες)

Οι επιφάνειες χρησιμοποιούνται κατά τον ορισμό για τις ιδιότητες των στερεών αντικειμένων (solid objects) και των αεραγωγών (vents) σε ένα πρότυπο μοντέλου FDS. Υπάρχουν διάφοροι τύποι επιφανειών όπου έχουν τη δυνατότητα να γίνει χρήση τους όπως ADIABATIC, INERT, MIRROR, OPEN, HVAC, PERIODIC και BUR-NER. Συγκεκριμένα χρειάστηκαν οι επιφάνειες του τύπου Open και Burner όπου θα επεξηγηθούν παρακάτω. Για την δημιουργία και της τροποποίηση μιας επιφάνειας, διαλέγεται η επιλογή Εισαγωγή Επιφανειών (Edit Surfaces) βλέπε εικόνα 3-1, το παράθυρο Εισαγωγή Επιφανειών είναι στο μενού Model.



Εικόνα 3-1: Παράθυρο «Εισαγωγή Επιφανειών»

Open

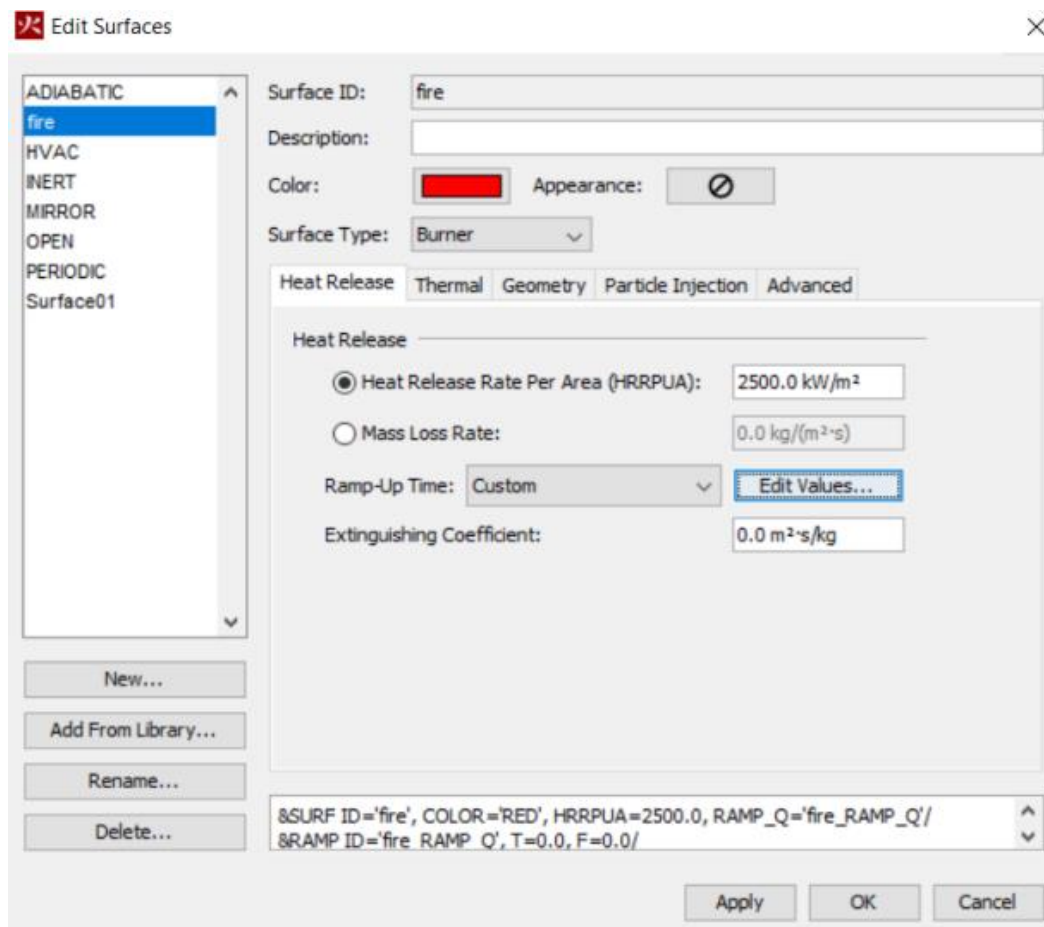
Η ανοιχτή επιφάνεια είναι χρήσιμη μόνο στους αεραγωγούς και πάντοτε στο εξωτερικό όριο του πλέγματος. Η open υποδεικνύει ένα παθητικό άνοιγμα προς τα έξω και συνήθως χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μιας ανοιχτής πόρτας ή ενός ανοιχτού παραθύρου.

Burner

Ο συγκεκριμένος τύπος επιφάνειας αντικατοπτρίζει την πηγή πυρκαγιάς επιλέγοντας τον ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας ή τον ρυθμό απώλειας μάζας του καυσίμου. Οι παράμετροι αυτοί για τον ορισμό του καυστήρα περιγράφονται λεπτομερώς στον πίνακα και εισάγονται στην καρτέλα εμφάνισης.

Ανάλυση παραμέτρων της επιφάνειας τύπου Burner (PyroSim Manual 2023)	
Παράμετροι	Ανάλυση
Heat Release Rate Per Unit Area	Ο ρυθμός έκλυσης της θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας του Burner
Mass Loss Rate	Το ποσοστό απώλειας μάζας ανά μονάδα επιφάνειας του Burner
Ramp-Up Time	Στην αρχή της προσομοίωσης, αυτή η επιφάνεια δεν είναι αναγκαίο να καεί αμέσως. Αυτό το πεδίο επιτρέπει να δηλωθεί πώς η έκλυση θερμότητας μεταβάλλεται στο χρόνο και ποτέ φτάνει τη μέγιστη τιμή της
Extinguishing Coefficient	Αυτή η παράμετρος ρυθμίζει την καταστολή της φωτιάς από το νερό.

Εικόνα 3-2: Ανάλυση παραμετροποίησης της επιφάνειας τύπου Burner(PyroSim Manual 2023)



Εικόνα 3-3 Παράμετροι Burner

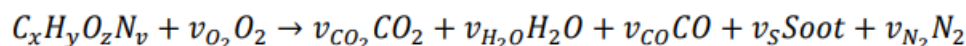
Vents (Αεραγωγοί)

Οι αεραγωγοί χρησιμοποιούνται συνήθως στα προγράμματα FDS για την αναπαράσταση δισδιάστατων ορθογώνιων τομών σε μια επιφάνεια. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται δύο τύποι αεραγωγών: επιφανειακοί (επιφανειακοί) καυστήρες για την προσομοίωση πηγών φωτιάς και επιφανειακά (επιφανειακά) ανοίγματα για την προσομοίωση δομικών ανοιγμάτων.

Reactions (Αντιδράσεις)

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται ο τρόπος εισαγωγής αντιδράσεων στο Pyrosim και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Δύο τύποι καύσης μπορούν να εισαχθούν στο Pyrosim: Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η καύση σε αέρια φάση, η οποία αναφέρεται στην αντίδραση μεταξύ ατμών καυσίμου και οξυγόνου. Μόνο ένα καύσιμο (αέριο) μπορεί να προστεθεί στην προσομοίωση, και το καύσιμο αυτό λειτουργεί ως υποκατάστατο για τη στερεοποίηση άλλων καυσίμων, εάν υπάρχει. Οι αντιδράσεις ορίζονται από το μενού Pyrosim και η προσομοίωση πυρκαγιάς με τη χρήση του FDS προσφέρει δύο τρόπους ορισμού μιας πυρκαγιάς: α) με τον ορισμό του ρυθμού έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας στην επιφάνεια (HRRPUA) και β) με τον ορισμό της θερμότητας της αντίδρασης (HRRPUA). Μόλις εισαχθεί ο απαιτούμενος τύπος χημικής αντίδρασης, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την εξίσωση 3-9 (απλό χημικό μοντέλο) για τον υπολογισμό των προϊόντων καύσης. Με τη συμπερίληψη της αντίδρασης στην προσομοίωση, τα σωματίδια του αέρα, τα προϊόντα της καύσης και τα καύσιμα που έγινε χρήση τους για την αντίδραση μετατρέπονται στα χημικά είδη που ακολουθούνται. Ως αποτέλεσμα, οι συγκεντρώσεις των συστατικών όπως το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα, το μονοξείδιο του άνθρακα και η αιθάλη μπορούν να ληφθούν ως τα δεδομένα εξόδου.

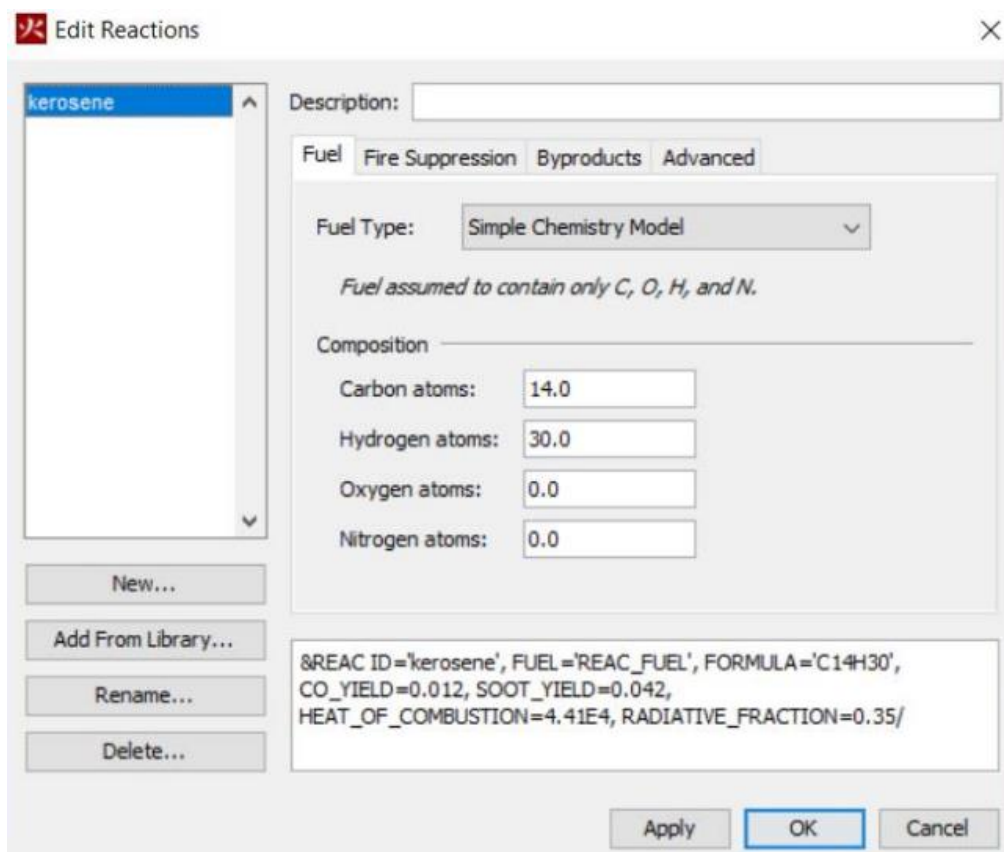
Εξίσωση 3-9: Αντίδραση



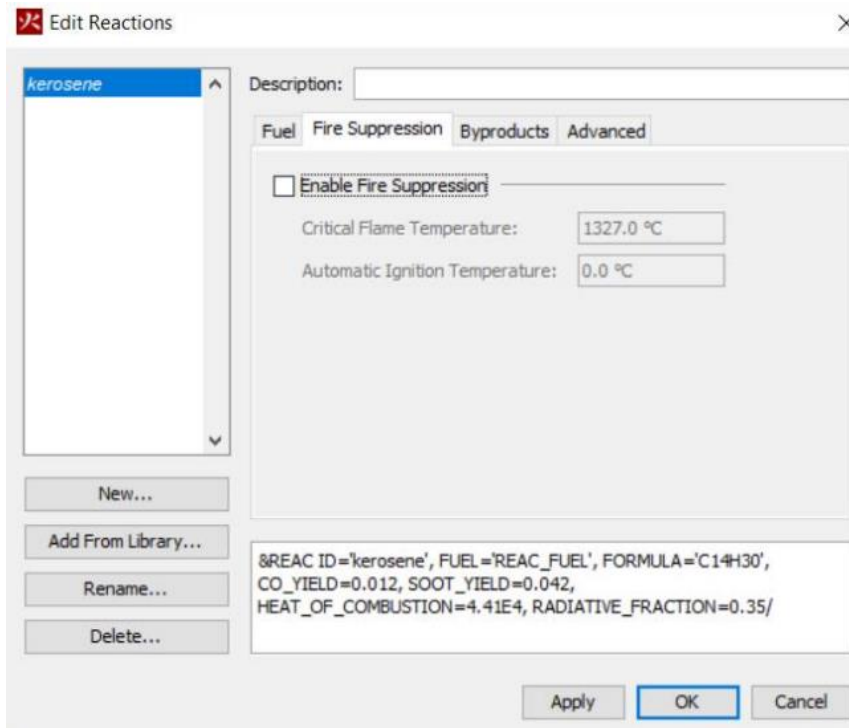
Η εισαγωγή μιας αντίδρασης στο πρόγραμμα πραγματοποιούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Στο menu Model, επιλέγουμε το Edit Reactions.

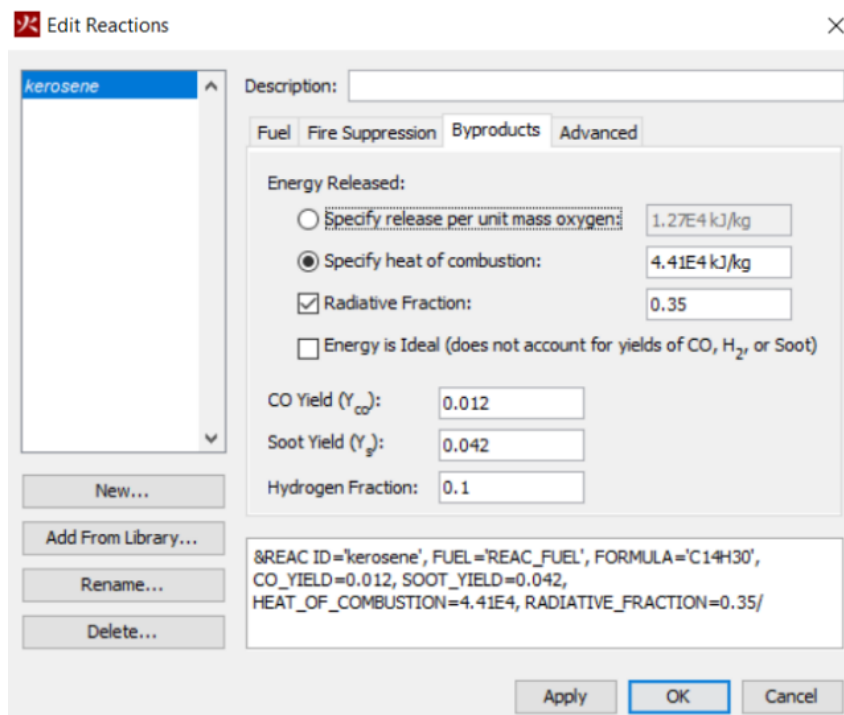
2. Εισάγετε τον ατομικό αριθμό του αντιδρώντος στοιχείου στην καρτέλα Fuel εικόνα 3-4.
3. Η καρτέλα "Καταστολή πυρκαγιάς" στο διάγραμμα επιτρέπει την ενεργοποίηση της επιλογής "Καταστολή πυρκαγιάς" και την εισαγωγή των τιμών της κρίσιμης θερμοκρασίας φλόγας και της θερμοκρασίας αυτόματης ανάφλεξης. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο παρόν έγγραφο, η επιλογή "Fire suppression" είναι απενεργοποιημένη.
4. Το διάγραμμα στην καρτέλα Παραπροϊόντα επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει τη μέθοδο απελευθέρωσης ενέργειας, καθορίζοντας την ποσότητα που απελευθερώνεται ανά μονάδα μάζας οξυγόνου (EPUMO2) ή τη θερμότητα καύσης. Στις δοκιμές όπου πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, η απελευθέρωση της ενέργειας έχει ως βάση τη μέθοδο προσδιορισμού της θερμότητας καύσης. Αναφέρονται επίσης το παραγόμενο μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και η απόδοση της αιθάλης.



Εικόνα 3-4: Καρτέλα επιλογής στοιχείων για την αντίδραση



Εικόνα 3-5: Καρτέλα επιλογής για την ενεργοποίηση του Fire Suppression

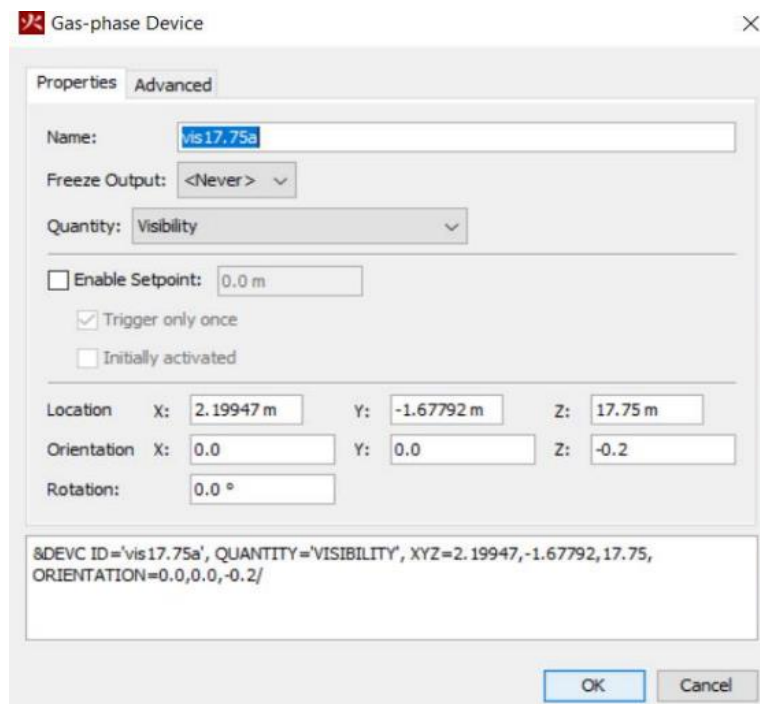


Εικόνα 3-6: Καρτέλα επιλογής για τις ιδιότητες προϊόντων καύσης

Devices (Συσκευές)

Ένα device μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή ποσοτήτων διαφόρων παραμέτρων ανάλυσης σε οποιοδήποτε σημείο του μοντέλου ή για τις πιο περίπλοκες συσκευές, όπως είναι οι ανιχνευτές του καπνού ή καταιονιστήρες. Μπορεί να εμφανίζει γραφήματα της χρονικής μεταβολής ορισμένων παραμέτρων, και μεταξύ των πολλών επιλογών οργάνων που προσφέρει η PyroSim, η παρούσα μελέτη χρησιμοποίησε, σε βασικά σημεία του μοντέλου, ένα όργανο αέριας φάσης για τη μέτρηση της ορατότητας, ένα όργανο αέριας φάσης για τη μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα (mol/mol), ένα όργανο αερίου για τη μέτρηση της ροής θερμότητας ακτινοβολίας (kW/m^2), ένα όργανο αερίου kW/m^2 (ακτινοβολία) για τη μέτρηση της ροής θερμότητας ακτινοβολίας (kW/m^2). Για να επιλέξουμε ένα device στο PyroSim πραγματοποιούνται τα βήματα:

1. Στο μενού Devices, επιλέγουμε «Gas-phase Device»
2. Επιλογή του ονόματος της συσκευής, εικόνα 3-7
3. Επιλογή της ποσότητας που θα μετρηθεί
4. Εισαγωγή συντεταγμένων τοποθεσίας.



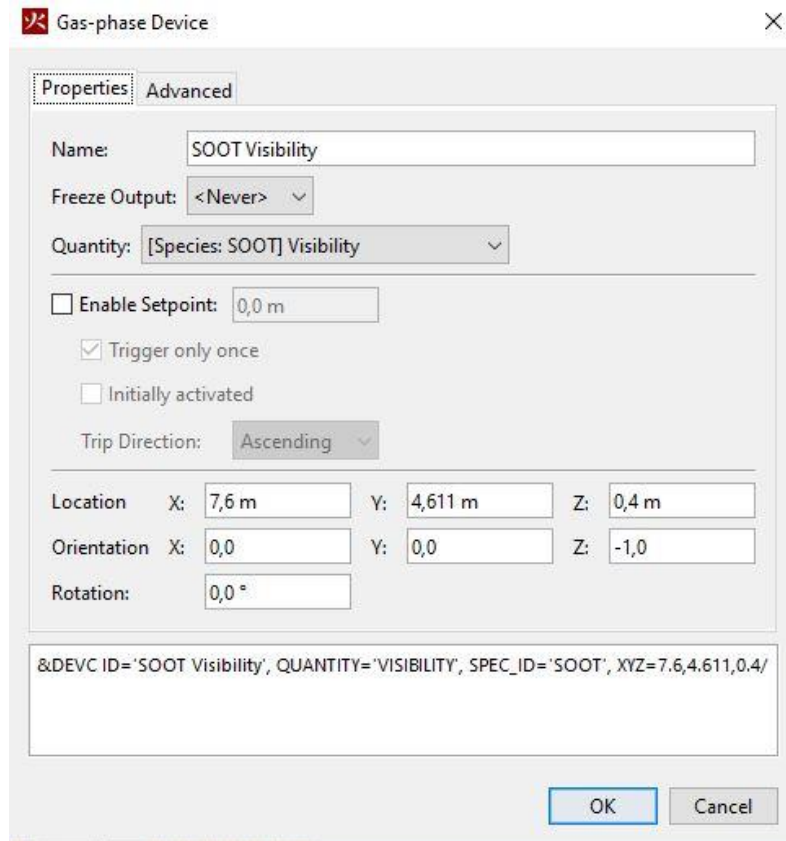
Εικόνα 3-7: Καρτέλα επιλογής συσκευής

Devices (Συσκευές)

Στις πιο περίπλοκες συσκευές (ανιχνευτές καπνού και ψεκαστήρες) καθώς και για τα υπόλοιπα devices τοποθετούνται σε όποια θέση της γεωμετρίας επιθυμούμε για να πραγματοποιείται καταγραφή ποσότητας διάφορων παραμέτρων. Επίσης, η χρονική εξέλιξη κάποιων παραμέτρων μας δίνεται από τις συσκευές σε μορφή γραφημάτων. Στην παρούσα εργασία, παρόλο που το Pyrosim μας δίνει αρκετές συσκευές, χρησιμοποιείται η Gas Phase Device για να μετρηθεί την ορατότητα (Visibility), για την μέτρηση του μονοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιείται η Gas Phase Device (mol/mol) και τέλος, για την μέτρηση της ακτινοβολία Kw/m^2 (radiation) χρησιμοποιείται η Radiative Heat Flux Gas Device, σε κρίσιμα σημεία του μοντέλου.

Για να γίνει εισαγωγή μίας συσκευής στο PyroSim εκτελούνται τα παρακάτω:

1. Στο menu Devices, επιλέγουμε «Gas-Phase Device»
2. Γίνεται επιλογή του ονόματος της συσκευής εικόνα 3-8
3. Γίνεται επιλογή της ποσότητας που θα μετρηθεί
4. Εισαγωγή των συντεταγμένων τοποθεσίας



Εικόνα 3-8 Καρτέλα επιλογής συσκευής

Output Controls (Έλεγχος αποτελεσμάτων)

Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στο χρήστη αρκετές επιλογές διευκολύνοντας έτσι την επιλογή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Στην συγκεκριμένη μελέτη έγινε χρήση των slices και η δυνατότητα για Plot3D Data των παραμέτρων όπου είναι απαραίτητες στην προσομοίωσης της απομάκρυνσης από το σιδηροδρομικό σταθμό.

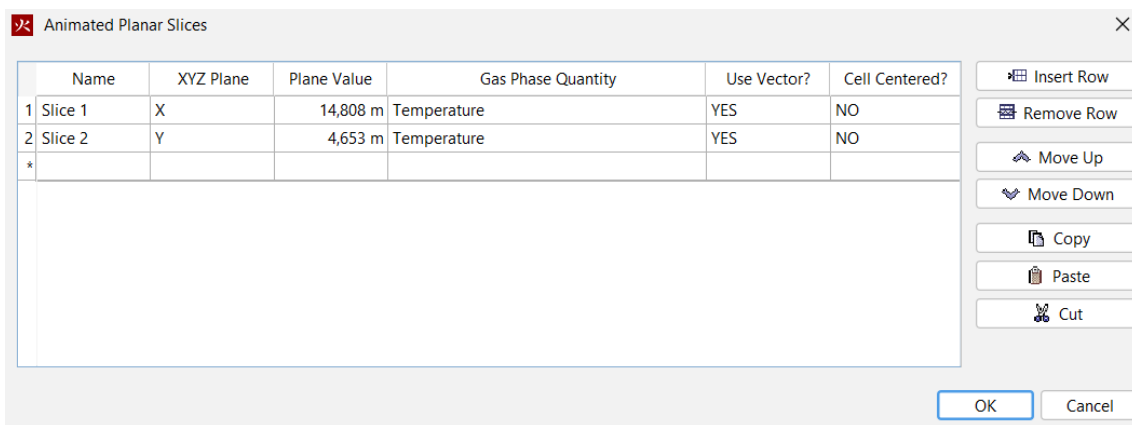
Slices (Φέτες – Κομμάτια)

Μπορούν και μετρούν δεδομένα της αέρας φάσης (ταχύτητα, πίεση, συγκέντρωση σωματιδίων, θερμοκρασία, κ.λπ.) σε ευθυγραμμισμένους άξονες παράλληλους με τον άξονα x, y ή z. Τα στοιχεία αυτά έχουν τη δυνατότητα επίσης να συλλεχθούν για να γίνει μια παρουσίαση αυτών από ένα αρχείο Smokeview.

Στη εργασία συγκεκριμένα τα slices που επιλέχθηκαν αφορούν την ορατότητας, την πυκνότητα των σωματιδίων του μονοξειδίου του άνθρακα και τη θερμοκρασία στα περισσότερα κρίσιμα σημεία του μοντέλου.

Για να γίνει εισαγωγή ενός Slice στο πρόγραμμα εκτελούνται τα παρακάτω στάδια:

1. Στο μενού επιλογή output, επιλέγουμε slices 3-9
2. Κατά την δυνατότητα επιλογής XYZ Plane επιλέγεται ο άξονας εκείνος που είναι παράλληλος με το slice που εξετάζουμε
3. Επιλέγεται η θέση στο plane value
4. Επιλέγεται παράμετρος στο Gas-phase Quantity που θα καταγραφούν οι μετρήσεις



Εικόνα 3-9: Καρτέλα slices για την επιλογή παραμέτρων

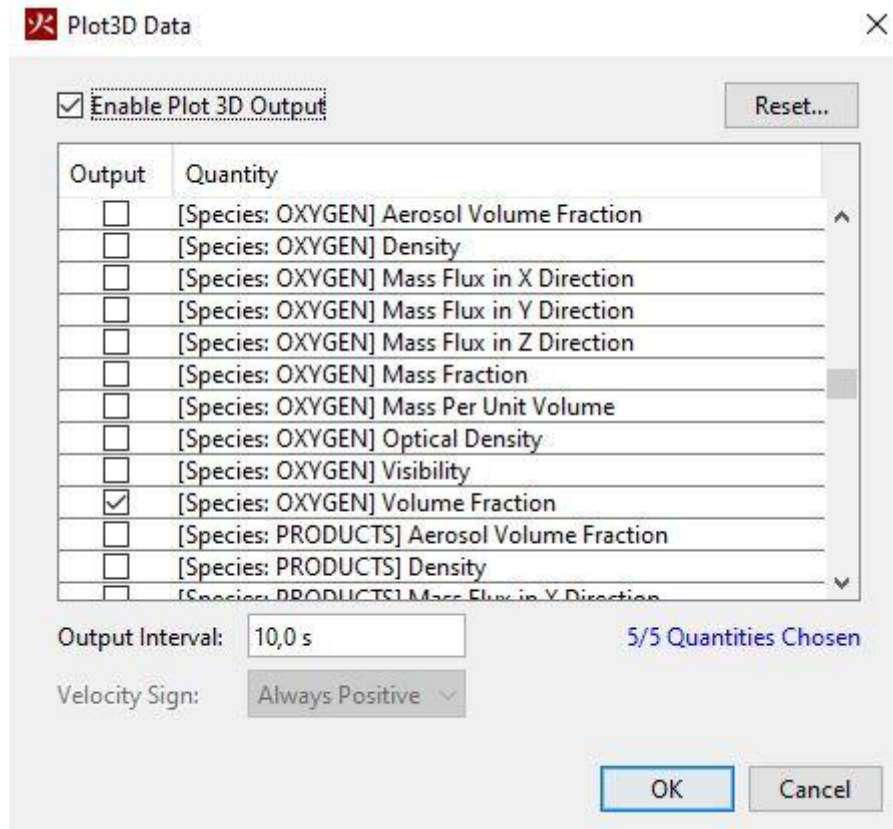
Plot 3D Data

Τα αποτελέσματα του Plot 3D συντελούνται από δύο αρχεία δεδομένων: το Q που περιέχει τα αποτελέσματα για κάθε καθορισμένη τιμή και το XYZ που έχει πληροφορίες σχετικά με τη δομή των meshes. Κάθε αρχείο Q αποτελείται από έως και πέντε μεγέθη, για την εργασία αυτή χρησιμοποιούνται οι ποσότητες Pathfinder που περιλαμβάνει τέσσερα μεγέθη και η θερμοκρασία. τα Plot3D δεδομένα χρησιμοποιούνται από το λογισμικό της προσομοίωσης εκκένωσης Pathfinder για να ενταχθούν με τα αποτελέσματα που προήλθαν από το FDS.

Τα βήματα που ακολουθούνται για Plot 3D Data από το Pyrosim είναι τα παρακάτω

1. Στο menu output, επιλέγεται του Plot3D Data ώστε να γίνει enabled εικόνα 3-10

2. Ενεργοποιούμε το Plot3D Data Output
3. Γίνεται επιλογή των ποσοτήτων που χρειάζονται
4. Τέλος γίνεται επιλογή του βήματος που θα εξαχθεί σύμφωνα με τις μετρήσεις



Εικόνα 3-10: Καρτέλα επιλογών Plot3D Data

3.3 Pathfinder

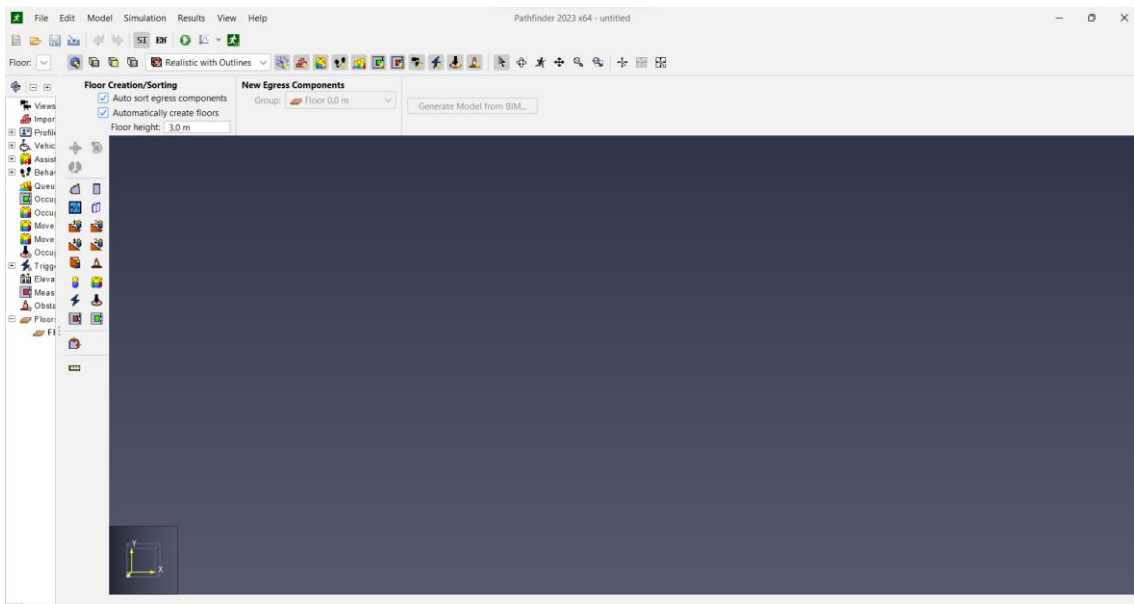
Το πρόγραμμα Pathfinder αποτελεί ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε για την εξερεύνηση και τον εντοπισμό βέλτιστων διαδρομών σε ένα μαθηματικό αντικείμενο που αποτελείται από ένα σύνολο από κόμβους (vertices) και ακμές (edges) που τους συνδέουν.. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εφαρμόζει την τεχνική της ευρείας πρώτης αναζήτησης (breadth-first search) σε συνδυασμό με τη χρήση ευρετικών για την αναζήτηση της βέλτιστης διαδρομής.

Στην πράξη, το πρόγραμμα Pathfinder μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλά διαφορετικά πεδία, όπως η πλοήγηση σε οδικούς χάρτες, η σχεδίαση κτιρίων, η δημιουργία βάσεων δεδομένων για την καταγραφή διαδρομών, η δημιουργία βιντεοπαιχνιδιών και πολλά άλλα. Κατά τη χρήση του

προγράμματος, ο χρήστης μπορεί να εισάγει την αρχική και την τελική τοποθεσία στον γράφο και να επιλέξει τον τρόπο κίνησης (π.χ. πεζοπορία, οδήγηση, πτήση κλπ.) για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής. Η εκτίμηση αυτή της βέλτιστης διαδρομής βασίζεται στην απόσταση ανάμεσα στα δύο σημεία που εξετάζονται και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση εκτίμησης (heuristic function) όπως η απόσταση Manhattan ή η Ευκλείδεια απόσταση.

3.3.1 Προσομοίωση εκκένωσης με Χρήση του Προγράμματος PathFinder

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση εκκένωσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά, την ευελιξία και τα εργαλεία σχεδιασμού του.. Υπάρχει ένας αριθμός υπολογιστικών προγραμμάτων που προσομοιώνουν τις συγκεκριμένες συνθήκες του χώρου εργασίας και παρέχουν τα τελικά αποτελέσματα τόσο σε μορφή αρχείου όσο και σε μορφή τρισδιάστατης εικόνας. Το Pathfinder, ένα πολύ εύκολο στη χρήση πρόγραμμα, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των χρόνων εκκένωσης στο σταθμό του μετρό. Η εικόνα 3-11 παρουσιάζει το εν λόγω πρόγραμμα.

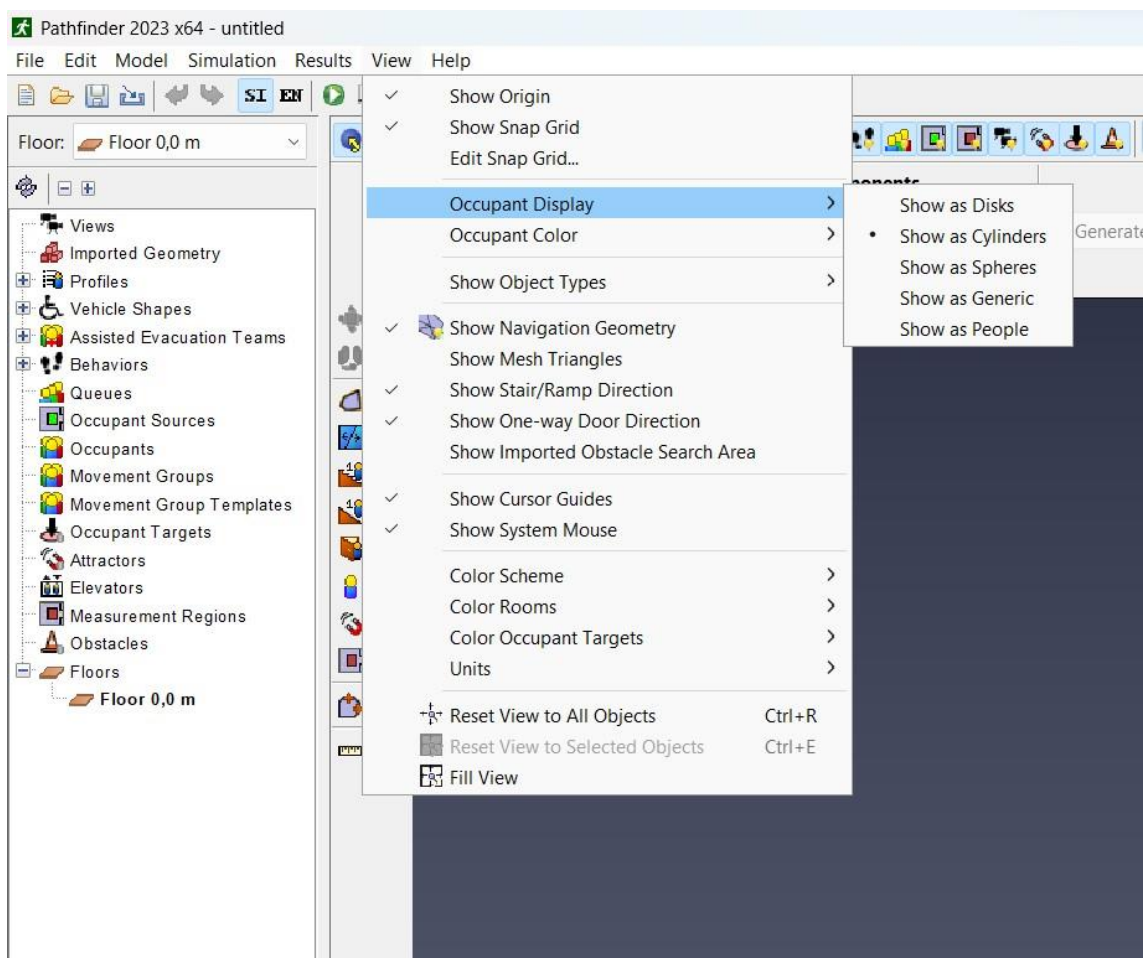


Εικόνα 3-11: Περιβάλλον Pathfinder

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-11, το πρόγραμμα επιτρέπει στους χρήστες να εισάγουν τις σχετικές κατόψεις και, μέσω ειδικών εντολών, να καθορίζουν τους χώρους όπου μπορούν να μετακινηθούν οι άνθρωποι, τις εξόδους και τον μεγαλύτερο αριθμό ανθρώπων όπου μπορούν να

κινηθούν στους συγκεκριμένους χώρους. Οι επιλεγμένοι άνθρωποι έχουν τη δυνατότητα να απεικονιστούν με διάφορους τρόπους, σύμφωνα και με την Εικόνα 3-12. Επιπρόσθετα, υπολογίζεται η διαδρομή όπου ακολουθεί κάθε άτομο και ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει σε μια ασφαλής περιοχή.

Το Pathfinder μπορεί να εκτελέσει πολυπαραμετρικές αναλύσεις μεταβάλλοντας διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος του αριθμού των χρηστών, ο αριθμός από τις εξόδους, οι ταχύτητες κυκλοφορίας και άλλες παραμέτρους συμπεριφοράς ανάλογα με την κατάσταση. Επίσης, μία λειτουργία του συγκεκριμένου λογισμικού είναι η αναπαράσταση των κινήσεων των χρηστών σε ανθρώπινη μορφή.



Εικόνα 3-12: Τρόποι αποτύπωσης χρηστών

3.3.2. Περιγραφή Λειτουργίας του Προγράμματος

Όταν η προσομοίωση ξεκινάει για πρώτη φορά, κάθε άτομο δημιουργεί μια διαδρομή που ονομάζεται "path". Το μονοπάτι αυτό ακολουθείται μέχρι την έξοδο. Για τη δημιουργία της

διαδρομής, το λογισμικό χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο αναζήτησης A και έναν κάρναβο τριγωνισμένο για την πλοήγηση. Το μονοπάτι που εμφανίζεται αναπαρίσταται ως μια σειρά σημείων σε κάθε άκρο της τριγωνικής μπάλας. Τα σημεία αυτά σχηματίζουν μια διαδρομή με τις απαραίτητες αλλαγές κατεύθυνσης αντί για μια ευθεία γραμμή μέχρι ο χρήστης να φτάσει στον τελικό προορισμό.

Όταν γίνει ο προσδιορισμός του μονοπατιού αυτού, το πρόγραμμα Pathfinder χρησιμοποιεί μία παραλλαγή της τεχνικής που ονομάζεται «κίνηση νημάτων». Η μέθοδος αυτή έχει ως σκοπό να επανευθυγραμμίσει τα σημεία για να παραμένουν σε ένα μήκος ασφαλές που είναι ίσο με το πλάτος του ατόμου και σε απόσταση μακρινή από το όποιο εμπόδιο.

Μόλις σχηματιστεί το μονοπάτι ο χρήστης ακολουθεί τα βήματα που αναφέρονται στην συνέχεια:

- Καταγράφονται δύο σημεία που δημιουργούν κατεύθυνση: Το παρόν και το επόμενο
- Κάθε άτομο προσπαθεί να επιτύχει επαναπροσδιορισμό από το σημείο παρόν στο σημείο επόμενο
- Κάθε άτομο ελέγχει εάν είναι απαραίτητο να γίνει αλλαγή στην κατεύθυνση του path του. Αυτό συμβαίνει όταν η ευθεία γραμμή προς το τρέχον σημείο πορείας δεν είναι ορατή ή αποκλίνει από την προκαθορισμένη διαδρομή κατά περισσότερο από ένα μέτρο.
- Δημιουργεί το άτομο μια «καμπύλη αναζήτησης» για να προσδιορίσει το πως θα κινηθεί τελικά.

3.3.3. Μέθοδος Κίνησης των Χρηστών με Steering Mode

Το λογισμικό Pathfinder λειτουργεί με βάση ένα συνδυασμό σχεδιασμού διαδρομής, τρόπων καθοδήγησης και μηχανισμών διαχείρισης συγκρούσεων για τον έλεγχο της κίνησης του χρήστη. Κάθε άτομο του Pathfinder κρατάει ένα μονοπάτι μεταξύ ενός συγκεκριμένου σημείου (ή δωματίου) από την τρέχουσα θέση του έως τον τελικό προορισμό του. Αυτός ο μηχανισμός ελέγχει τις διαδρομές όπου έχει επιλέξει ο κάθε χρήστης όταν πραγματοποιείται η προσομοίωση. Διαφορετικοί λόγοι, για παράδειγμα τα χτυπήματα (σύγκρουση) με άλλα άτομα, πιθανότατα να

κάνουν τους ταξιδιώτες να αποκλίνουν από την προκαθορισμένη διαδρομή τους, αλλά στο τέλος η πορεία τους θα είναι παρόμοια με την αρχική τους επιλογή.

Μέγιστες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης

Καθώς ο χρήστης κινείται μέσα στο Mesh, γίνεται υπολογισμός της μέγιστης ταχύτητας. Η τιμή αυτή βασίζεται στην τρέχουσα κατάσταση της διάσωσης και στην καθορισμένη μέγιστη ταχύτητα (V_{max}). Στην συνέχεια, η V_{max} χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς που ζητά το steering mode. Υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο η μέγιστη ταχύτητα και με την επιλογή SFPE με την μόνη αλλαγή ότι η πυκνότητα των επιβατών ορίζεται ως 0.

Ο υπολογισμός της μέγιστης επιτάχυνσης όπως και μέγιστης επιβράδυνσης είναι μία σταθερή λειτουργία της V_{max} και υπολογίζεται:

$$a_{max} = \frac{V_{max}}{t_{accel}}$$

Η σχέση αυτή οριοθετεί ότι τα επιλεγμένα άτομα έχουν την δυνατότητα να μετακινηθούν από τη μέγιστη ταχύτητα τους μέχρι και να μένουν ακινητοποιημένοι. Παρόμοια, έχουν τη δυνατότητα να ακινητοποιηθούν από τις μέγιστες τιμές της ταχύτητας τους σε χρόνο 0.5s. Το steering mode οδηγεί τα άτομα κατά μήκος μιας προκαθορισμένης διαδρομής καθώς δίνει τη δυνατότητα να προσαρμόζονται σε ένα δυναμικό περιβάλλον. Σε κάθε βηματισμό, ο άνθρωπος αλλάζει φορά προς την πιο κοντινή έξοδο. Το πρόγραμμα κάνει χρήση πέντε ενδεχόμενων διευθύνσεων κίνησης των ατόμων για τον υπολογισμό της πιο κοντινής εξόδου.

Το Pathfinder στην ουσία έχει τρεις βασικές συμπεριφορές όσον αφορά την δημιουργία της σωστής διεύθυνσης

- Αναζήτηση
- αποφυγή τοίχων
- αποφυγή άλλων χρηστών

Για κάθε προβλεπόμενο σημείο, η κάθε συμπεριφορά αποκτά μια τιμή μεταξύ 0 και 1. Το αποτέλεσμα για μια τοποθεσία σημείου προκύπτει από το σύνολο του αθροίσματος των τριών τιμών, το οποίο είναι σταθμισμένο.

Λειτουργία της Αναζήτησης

Η λειτουργία της αναζήτησης πραγματοποιεί περιστροφή του ατόμου, επιτρέποντάς του να μετακινηθεί κατά μια καθορισμένη διαδρομή.

Λειτουργία Αποφυγής των τοίχων

Η λειτουργία Wall Avoidance ανιχνεύει τοίχους και δίνει οδηγίες στο άτομο να αποφύγει την όποια σύγκρουση. Αυτή η λειτουργία βοηθάει στην πρόβλεψη συμπεριφοράς δηλαδή στην πρόβλεψη μιας σφαίρας μπροστά από τον άνθρωπο που κινείται προς την διεύθυνση του προβλεπόμενου σημείου. Το αποτέλεσμα της κίνησης στηρίζεται στην απόσταση που γίνεται να μετακινηθεί ο χρήστης προς την κατεύθυνση του προβαλλόμενου σημείου, διατηρώντας παράλληλα μια ασφαλή απόσταση από τον τοίχο για την ευκολία της κίνησης.

Λειτουργία αποφυγής χρηστών

Η λειτουργία ώστε να αποφύγει ένας χρήστης άλλους χρήστες λειτουργεί με την έννοια της διατήρησης μιας "ζώνης άνεσης" μεταξύ των χρηστών. Αρχικά, δημιουργείται μια λίστα με τους χρήστες που ελέγχεται η ταχύτητα του καθενός. Αυτή η συμπεριφορά αποτυπώνει μια κινητή μπάλα στο μπροστά μέρος από το άτομο προς την διεύθυνση του προοριζόμενου χρήστη.. Εάν οι σφαιροειδείς μπάλες δεν συγκρούονται, το αποτέλεσμα είναι μηδέν. Αντίθετα, εάν υπάρχει σύγκρουση, το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται στο πόσο ο χρήστης μπορεί να κινηθεί πριν την κρούση. Με βάση το πόσο πλησιέστερα είναι στο σημείο κρούσης, τόσο υψηλότερη τιμή παίρνει το steering στο τέλος.

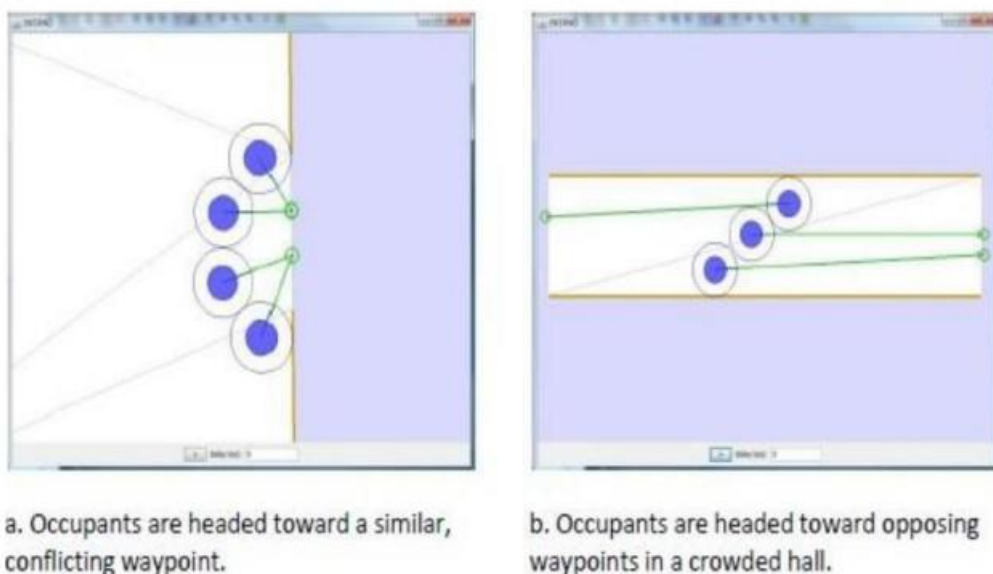
Αποφυγή της Σύγκρουσης/ Αντίδραση

Τα προγράμματα συχνά αποτυγχάνουν να αποφύγουν τοίχους και άλλους χρήστες. Το φαινόμενο που προαναφέρθηκε ισχύει ιδιαίτερα σε πολυσύχναστους χώρους, όπου οι άνθρωποι αποτυγχάνουν να ξεφύγουν από το πυκνό πλήθος και την πίεση, με αποτέλεσμα να οδηγούνται σε συγκρούσεις με τοίχους και άλλους χρήστες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, θα πρέπει να προστεθεί καθοδήγηση σχετικά με τον τρόπο διαχείρισης των συγκρούσεων, ώστε να αποφευχθεί η προσομοίωση άκυρων καταστάσεων. Υφίστανται δύο σενάρια διαχείρισης των συγκρούσεων: το πρώτο σενάριο όπου δύο ή περισσότεροι χρήστες συγκρούονται μεταξύ τους και ένας χρήστης προσκρούει σε εμπόδιο, για παράδειγμα σε έναν τοίχο. Εάν είναι ενεργοποιημένη η διαχείριση

συγκρούσεων, ο χρήστης σταματά ένα βήμα πριν συγκρουστεί με τοίχο ή άλλο χρήστη. Εάν η διαχείριση συγκρούσεων δεν είναι ενεργοποιημένος, ο χρήστης δεν συνεχίζει μόνο την πρώτη φορά που συγκρούεται με τοίχο ή άλλο φράγμα.

Επίλυση πιθανών συγκρούσεων

Σε ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες, δεν έχουν παρθεί τα κατάλληλα μέτρα προφύλαξης, υπάρχει υψηλή πιθανότητα πρόκλησης συμπλοκής, ή αλλιώς σύγκρουσης. Αυτές οι περιπτώσεις πιθανότατα μπορούν να εμφανιστούν, για παράδειγμα, όταν οι επιβαίνοντες βρίσκονται σε αδιέξοδο (όταν κανείς δεν μπορεί να μετακινηθεί). Αξιοσημείωτο παράδειγμα όταν όλοι οι χρήστες μετακινούνται με όμοια διεύθυνση, αλλά εξαιτίας των περιορισμών του σχήματος του χώρου πλοήγησης (π.χ. στενές πόρτες, στενοί διάδρομοι), οι επιβάτες διαλέγουν να μην κινηθούν για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις μεταξύ τους. Ένα άλλο σενάριο είναι όταν οι επιβάτες κινούνται αντίθετα προς την κατεύθυνση σε έναν υπερπλήρη διάδρομο. Οι παραπάνω περιπτώσεις φαίνονται στο σχήμα της εικόνας 3-13.



Εικόνα 3-13:Κίνηση των χρηστών προς στενή έξοδο (αριστερά), αντίθετη κίνηση των επιβατών σε έναν διάδρομο πιο γεμάτο (στο δεξί) (Pathfinder Technical Reference, 2013)

3.3.4. Κίνηση με την επιλογή SFPE

Το πρόγραμμα Pathfinder μπορεί να χρησιμοποιήσει τις ρυθμίσεις SFPE για τον υπολογισμό των κινήσεων. Η δυνατότητα αυτή υλοποιεί τη λογική ροής εξόδου βασισμένη σε τεχνικές προσομοίωσης. Για να υπολογιστεί το SFPE λειτουργεί ως μοντέλο ροής στο οποίο καθορίζονται οι ρυθμοί βημάτων και οι ροές μέσω ανοιγμάτων και δίοδων. Η γεωμετρία

πλοήγησης στο Pathfinder διαχωρίζεται σε τρεις ομάδες αντικειμένων: τις σκάλες, τα δωμάτια και τις πόρτες. Αρχικά, τα δωμάτια είναι ανοικτοί χώροι, όπου οι άνθρωποι μπορούν να κινηθούν ελεύθερα. Στη συνέχεια, τα σκαλιά θεωρούνται ένα ειδικό είδος δωματίου, όπου το ύψος και το πλάτος του σκαλοπατιού εμποδίζει τον ρυθμό κίνησης των ανθρώπων. Η λειτουργία της τρίτης κατηγορίας αντικειμένου, δηλαδή οι πόρτες, περιορίζουν τη ροή καθώς ενώνουν δωμάτια και σκάλες. Αντίθετα με τον Οδηγό SFPE, δεν υπάρχει συγκεκριμένη κατηγορία για διαδρόμους. Αντίθετα, υπάρχει ένας διάδρομος που μετατρέπεται σε δωμάτιο με πόρτες και στις δύο άκρες. Συνεπώς, ο διάδρομος θεωρείται δωμάτιο του οποίου η ροή ελέγχεται από μια πόρτα. Η διάταξη SFPE επιτρέπει σε αρκετούς ανθρώπους να κατέχουν τον ίδιο χώρο.

Αποφυγή Συγκρούσεων / Αντίδραση

Με την ρύθμιση SFPE, οι χρήστες αποφεύγουν τις συγκρούσεις μεταξύ τους και με άλλους χρήστες, αλλά μπορεί να υπάρξει σύγκρουση με άλλα εμπόδια, όπως οι τοίχοι. Η αντιμετώπιση των συγκρούσεων ακολουθεί δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται πριν από την έναρξη της κίνησης και το δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται κατά τη κίνηση των χρηστών. Στο πρώτο βήμα πριν από την κίνηση, η ταχύτητα της κινήσεως μεταβάλλεται για να αποφεύγονται τα εμπόδια. Στην περίπτωση που βρεθεί για εμπόδιο ένας τοίχος, ορίζεται νέα ταχύτητα ώστε ο άνθρωπος να μπορεί να περάσει μέσα από τα εμπόδια. Μετά τη ρύθμιση της ταχύτητας για την επίτευξη της αποφυγής των εμποδίων, το άτομο προσπαθεί να μετακινείται με αυτόν τον καινούργιο ρυθμό. Κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, εξακολουθούν να υπάρχουν πιθανές συγκρούσεις με τους τοίχους. Συνεπώς, το άτομο θα σταματήσει στην πρώτη σύγκρουση που θα συμβεί, αποφεύγοντας έτσι περαιτέρω συγκρούσεις.

3.3.5. Διαδικασία Επίλυσης

Το Pathfinder εκτελεί μια σειρά προσομοιώσεων για τον υπολογισμό της κίνησης σε διακριτά χρονικά βήματα. Σε όλα τα χρονικά βήματα ακολουθούνται οι παρακάτω ενέργειες, όπως περιγράφονται στο Pathfinder Technical Reference του 2023:

1. Επαναπροσδιορισμός του προορισμού για κάθε άτομο. Η συγκεκριμένη ενέργεια είναι η πιο χρονοβόρα, επειδή όλα τα άτομα πρέπει να βρουν μια διαδρομή προς τον προορισμό του.
2. Μέτρηση της ταχύτητας ελιγμού για όλα τα άτομα. Η ταχύτητα ελιγμού υπολογίζεται διαφορετικά ανάλογα με τη ρύθμιση που είναι ενεργοποιημένη, είτε είναι Steering είτε SFPE.

3. Αύξηση του χρονικού βήματος κατά μία μονάδα.
4. Κίνηση των ατόμων, η οποία συμπεριλαμβάνει τα εξής βήματα:
 - I. Υπολογισμός της ταχύτητας για τον τρέχοντα χρόνο. Εάν η ρύθμιση είναι Steering, υπολογίζεται μια επιθυμητή δύναμη ελιγμού με βάση την επιθυμητή ταχύτητα, και στη συνέχεια υπολογίζεται η πραγματική ταχύτητα με την ολοκλήρωση. Εάν η ρύθμιση είναι SFPE, η ταχύτητα ρυθμίζεται αυτόματα στον επιθυμητό αριθμό.
 - II. Στην περίπτωση που είναι ενεργοποιημένη η αποφυγή συγκρούσεων, εντοπίζονται πιθανές συγκρούσεις και τροποποιείται η επιθυμητή ταχύτητα για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις.
 - III. Ολοκλήρωση της τελικής ταχύτητας για να γίνει υπολογισμός της μέγιστης απόστασης που μπορεί να διανύσει το άτομο και μετακίνηση μέσω του χώρου έως αυτήν την απόσταση ή έως το πρώτο εμπόδιο που συναντά.
 - IV. Ενημέρωση των αρχείων εξόδου.

Με αυτά τα βήματα, το Pathfinder υπολογίζει και προσομοιώνει την κίνηση των ατόμων σε διαδρομές με διακριτά χρονικά βήματα.

3.3.6. Θεωρητικός Πληθυσμός

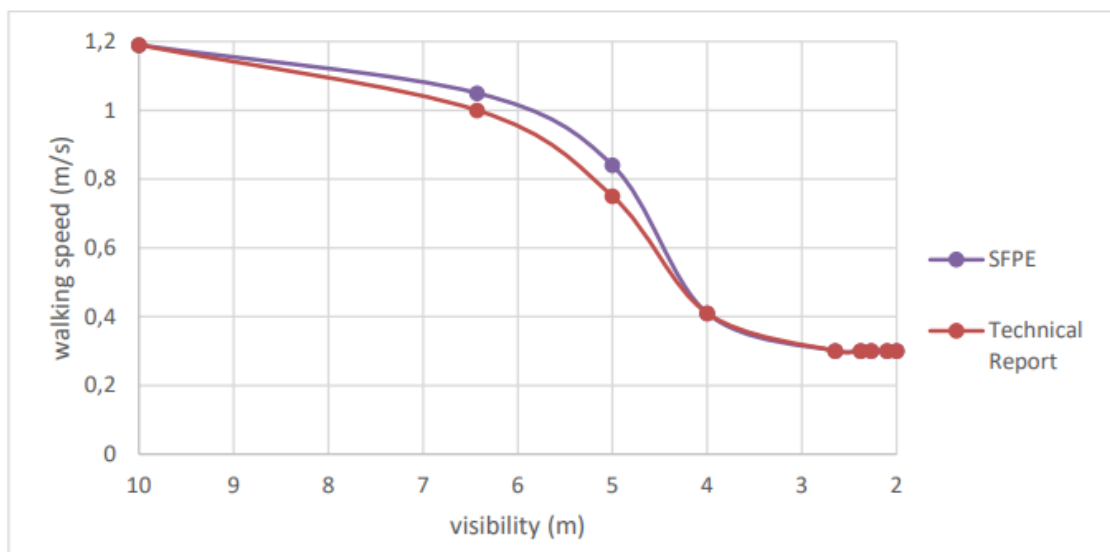
Σύμφωνα με τους νόμους, τόσο το Ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο (Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτιρίων Π.Δ. 71/88) όσο και το ξένο (NFPA 101 - Life Safety Code Handbook), ο υποθετικός αριθμός ατόμων ενός χώρου επηρεάζεται από τον σκοπό και τη χρήση του. Όταν αναφερόμαστε στον υποθετικό αριθμό ατόμων, αναφερόμαστε στο μέγιστο πιθανό αριθμό ανθρώπων που μπορεί να βρίσκεται σε έναν χώρο και θα πρέπει να εκκενωθεί σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα σε κινηματογράφους, θέατρα, στάδια κ.λπ., ο αριθμός αυτός μπορεί να είναι προκαθορισμένος. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις είναι αόριστος. Για αυτόν το λόγο, οι κανονισμοί παρέχουν συντελεστές πυκνότητας για αρκετές διαφορετικές κατηγορίες κτιρίων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του αναμενόμενου αριθμού ατόμων σε έναν χώρο, με βάση το συνολικό εμβαδόν του. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη εργασία, ο πληθυσμός της πλατφόρμας θα υπολογιστεί βάσει 15λεπτων χρονικών διαστημάτων κατά τη διάρκεια της ώρας αιχμής στον σταθμό. Τα στοιχεία για τον πληθυσμό της ώρας αιχμής προέρχονται από τις προβλέψεις της εταιρείας που έχει κατασκευάσει τον σταθμό.

Δυνατότητα Όρασης (Ορατότητα)

Η ύπαρξη πυκνού καπνού έχει αρνητική επιρροή στην ταχύτητα κίνησης των χρηστών και την ικανότητά τους να βρίσκουν και να επιλέγουν τις κατάλληλες διόδους και οδούς διαφυγής. Το ποσοστό επίδρασης του καπνού καθορίζεται από τη συγκέντρωσή του (οπτική πυκνότητα) και τον ερεθισμό των ματιών και των αναπνευστικών οδών. Ο καπνός επηρεάζει την ορατότητα των χρηστών και γίνεται να μετρηθεί με δύο τρόπους: α) με τη χρήση του δείκτη FEC (κλασματική αποτελεσματική συγκέντρωση) για κάθε δωμάτιο και β) με την προσαρμογή της ταχύτητας κίνησης του χρήστη με βάση την ορατότητα κατά την εκκένωση.

Ταχύτητα κυκλοφορίας των χρηστών εξαρτώμενη από την ορατότητα.

Προκειμένου να συσχετιστούν οι ταχύτητες κίνησης των χρηστών με βάση την ορατότητα, ήταν πρώτα απαραίτητο να βρεθεί μια σχέση μεταξύ της ορατότητας και του συντελεστή εξαφάνισης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, με βάση τη βιβλιογραφική αναζήτηση, μπορούν να βρεθούν μόνο γραφήματα που συσχετίζουν τις ταχύτητες κίνησης των χρηστών με βάση τον συντελεστή εξαίλισης. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε το διάγραμμα εικόνας 3-14 όπου φαίνεται η μείωση της ταχύτητας κίνησης λόγω της ορατότητας του χρήστη σε ένα δωμάτιο γεμάτο με ενοχλητικό καπνό.



Εικόνα 3-14: Ταχύτητα κίνησης βάση ορατότητας σε ερεθιστικό καπνό

Ταχύτητα Κίνησης

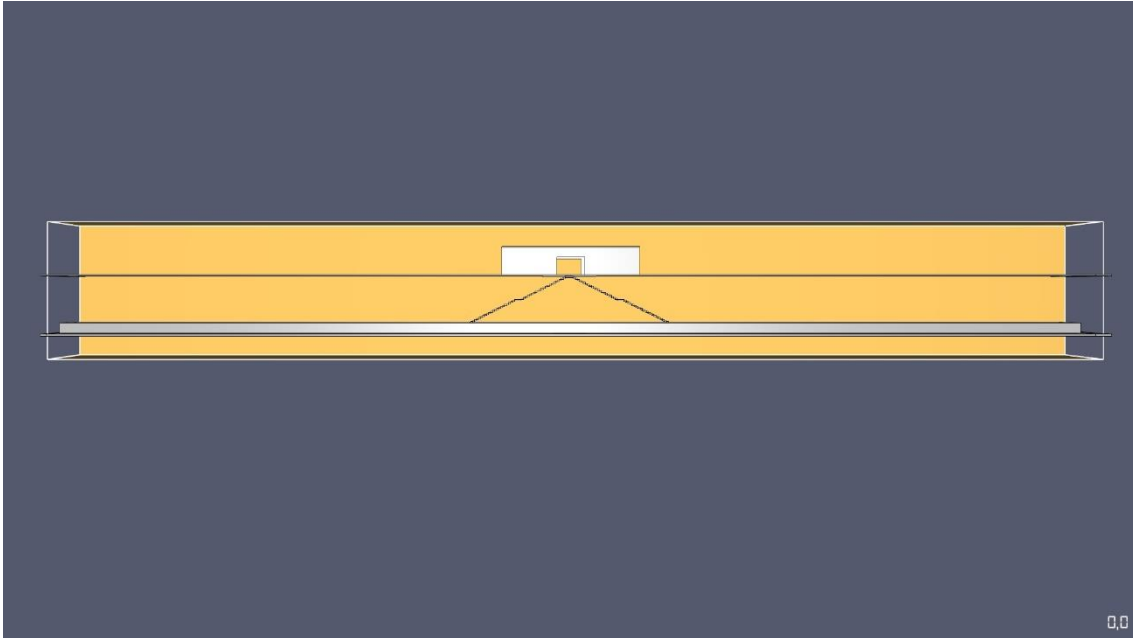
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα που δημοσιεύτηκε από την SFPE το 2002, όταν η πυκνότητα των χρηστών ενός χώρου γίνεται λιγότερη από 0,5 άνθρωποι ανά τετραγωνικό μέτρο,

μια κατάλληλη μέση ταχύτητα για την ελεύθερη κίνηση των ατόμων είναι 1,25 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Ωστόσο, σε περιστάσεις υψηλότερης πυκνότητας, υπάρχει μείωση της ταχύτητας διότι οι άνθρωποι δυσκολεύονται να μετακινηθούν με άνεση. Ενδεικτικά, για πυκνότητες χρηστών μεταξύ 3 και 4 ατόμων ανά τετραγωνικό μέτρο, η ταχύτητα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, προκαλώντας μια κατάσταση στάσιμης κίνησης. Όταν ο χρήστης πρέπει να κινηθεί μέσα από καπνό, παρατηρείται ότι η ταχύτητα κίνησής του κυμαίνεται από 0,2 έως 0,4 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη η περίπτωση όπου ο χρήστης δεν μπορεί να κινηθεί γρήγορα λόγω κινητικών προβλημάτων.

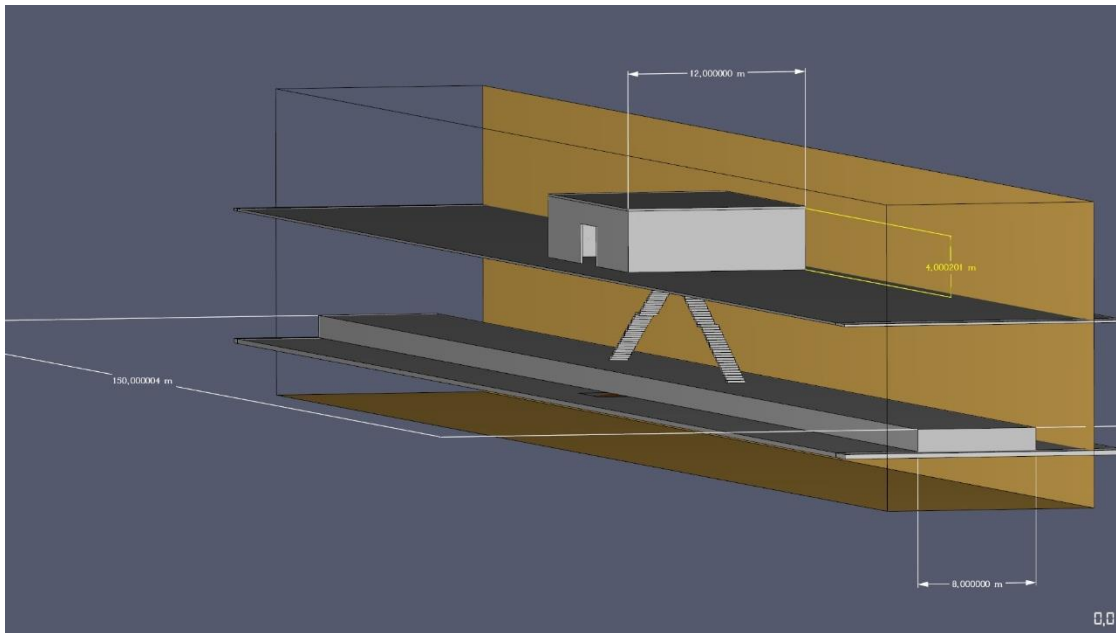
Στην συγκεκριμένη εργασία, έγινε η επιλογή της ανεμπόδιστης ταχύτητας κίνησης των χρηστών να είναι στα 1,19m/sec και στην υπόθεση όπου οι άνθρωποι βρίσκονται και μετακινούνται σε χώρο που υπάρχει καπνός να μειώνεται ανάλογα με το διάγραμμα της εικόνας 3-14. Το πρόγραμμα επιτρέπει πολυπαραμετρικές αναλύσεις, μεταβάλλοντας διάφορους παράγοντες σε κάθε περίπτωση, όπως ο αριθμός των ανθρώπων, ο αριθμός των εξόδων, οι ταχύτητες κυκλοφορίας και άλλες συνθήκες συμπεριφοράς κατά περίπτωση. Η λειτουργικότητα του λογισμικού προσομοίωσης περιλαμβάνει επίσης τη δυνατότητα αναπαράστασης των κανονικών κινήσεων των χρηστών σε ανθρώπινη μορφή.

4 Σιδηροδρομικός σταθμός

4.1 Στοιχεία του σιδηροδρομικού σταθμού



Εικόνα 4-1: Απεικόνιση Σταθμού σε πρόοψη

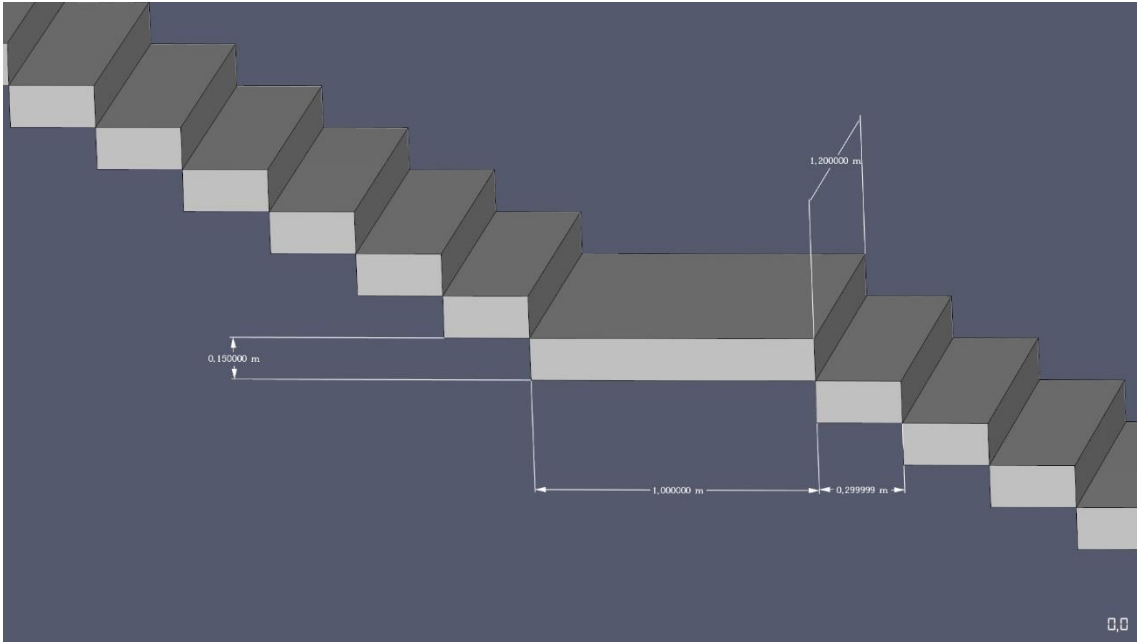


Εικόνα 4-2: Απεικόνιση Σταθμού σε 3D διαστάσεις

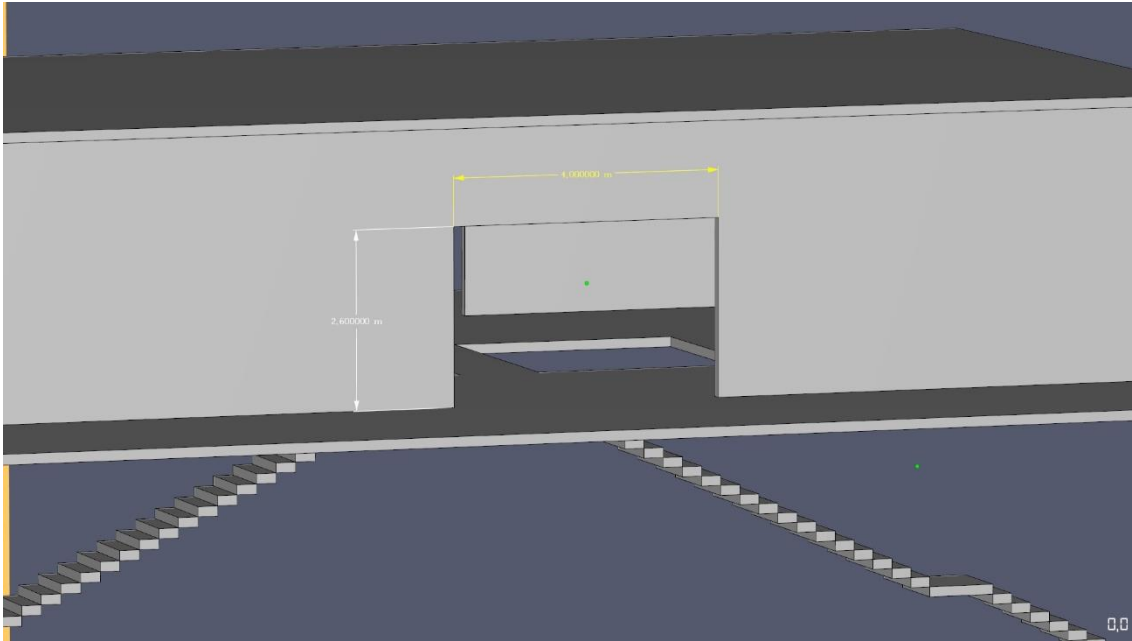
Ο υπό μελέτη σταθμός χωρίζεται σε δύο επίπεδα, το πρώτο επίπεδο όπου βρίσκεται στην επιφάνεια του δρόμου (επίπεδο 0) και το επίπεδο που υπάρχει μία κεντρική αποβάθρα μήκους

150 m (επίπεδο -1). Το πλάτος χρήσης της αποβάθρας είναι 8m. Τα δύο επίπεδα συνδέονται με δύο σκάλες.

Η κάθε σκάλα αποτελείται από σκαλοπάτια μήκους 1,2m, πλάτους 0,3m και ύψους 0,15m, καθώς και από δύο πλατύσκαλα μήκους 1m, πλάτους 1,2m και ύψους 0,15m.



Εικόνα 4-3: Διάσταση σκάλας



Εικόνα 4-4: Έξοδος

Από το σχήμα φαίνεται η ύπαρξη δύο εξόδων όπου καταλήγουν στην επιφάνεια και η διάταξη τους είναι συμμετρική. Κάθε έξοδος έχει πλάτος 4m και ύψος 2,6m.

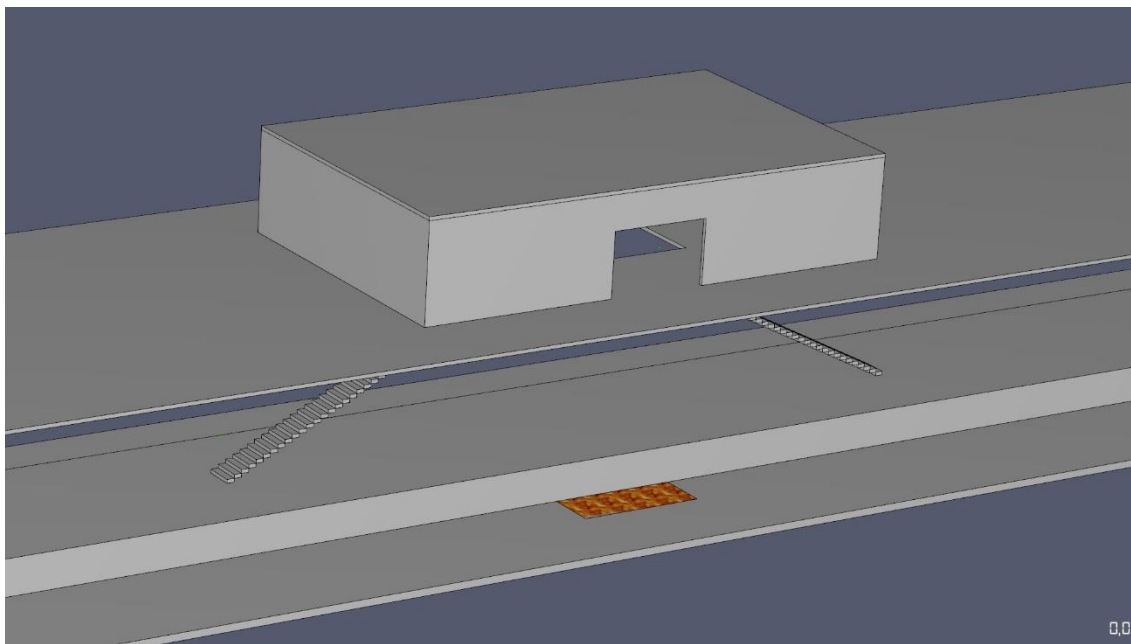
5 Ανάλυση της εκκένωσης υπό πυρκαγιά

Ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η διερεύνηση της εκκένωσης ενός σιδηροδρομικού σταθμού σε περίπτωση πυρκαγιάς. Ο συγκεκριμένος σταθμός διαλέχθηκε έναντι των υπολοίπων σταθμών εξαιτίας της δομής του και του δεδομένου ότι από τους βαθύτερους σταθμούς με ύψος αποβάθρας 7,9 m κάτω από το επίπεδο του δρόμου. Ο σταθμός διαθέτει επίσης τρεις σκάλες κατά τις οποίες οι χρήστες μπορούν να κινηθούν προς τις τέσσερις διαθέσιμες εξόδους διαφυγής. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών του σταθμού, η μελέτη εκκένωσης θα δώσει σημαντικά και ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Το ερευνητικό σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε είναι αρχικά ένα πρόγραμμα για την προσομοίωση του σταθμού, της πυρκαγιάς και της εξάπλωσης της πυρκαγιάς γύρω από το σταθμό. Το τελευταίο πρόγραμμα χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την προσομοίωση της εκκένωσης των χρηστών του σταθμού με βάση τα αποτελέσματα της

προσομοίωσης πυρκαγιάς. Σύμφωνα με τον συγκεκριμένο σχεδιασμό, έγινε επιλογή του προγράμματος Pyrosim για την προσομοίωση της πυρκαγιάς και του προγράμματος Pathfinder για την προσομοίωση της εκκένωσης των χρηστών. Ένας σημαντικός λόγος για την επιλογή αυτών των προγραμμάτων είναι ότι ορισμένα από τα αποτελέσματα της ανάλυσης του Pyrosim μπορούν να μεταφερθούν άμεσα στο Pathfinder και να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης του σταθμού.

5.1 Σενάριο

Σε αυτό το σενάριο διαλέχθηκε η εστία της φωτιάς να βρίσκεται στο κέντρο του σιδηρόδρομου κάτω από την αποβάθρα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 5-1. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο σημείο για εστία της φωτιάς γιατί δίνεται η δυνατότητα παρουσίασης αποτελεσμάτων και κατά την διαφυγή του κόσμου από τις σκάλες.



Εικόνα 5-1:Εστία φωτιάς στο συρμό κοντά στο κέντρο της αποβάθρας

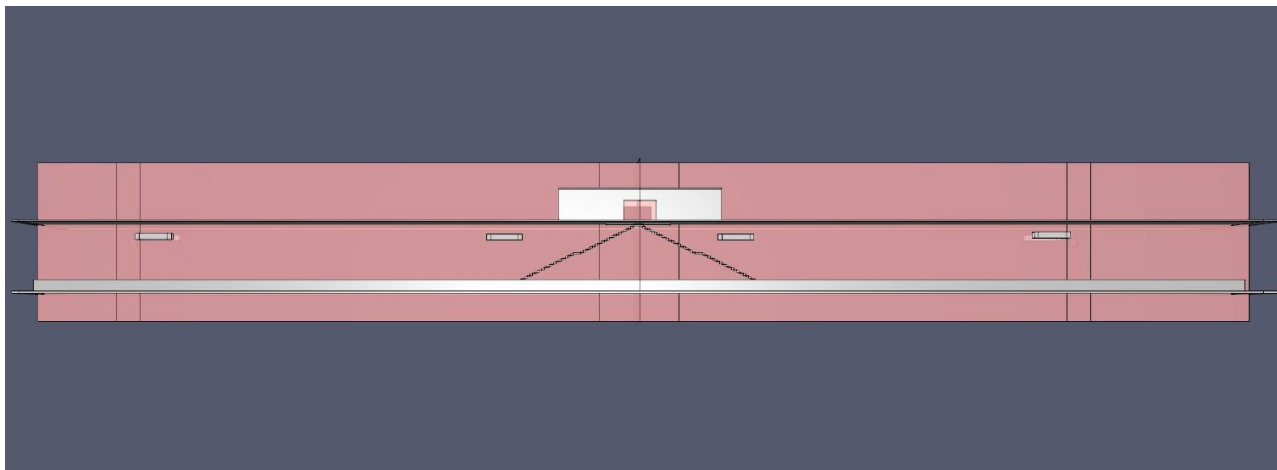
Η πυρκαγιά αυτή προκλήθηκε από εμπρησμό ενός ανθρώπου σε αποσκευή που μετέφερε κηροζίνη (Kerosene). Χαρακτηριστικές τιμές των ιδιοτήτων του φαινομένου της φωτιάς είναι:

Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 2000 kW/m²

Geometry: 5m • 2m = 10m²

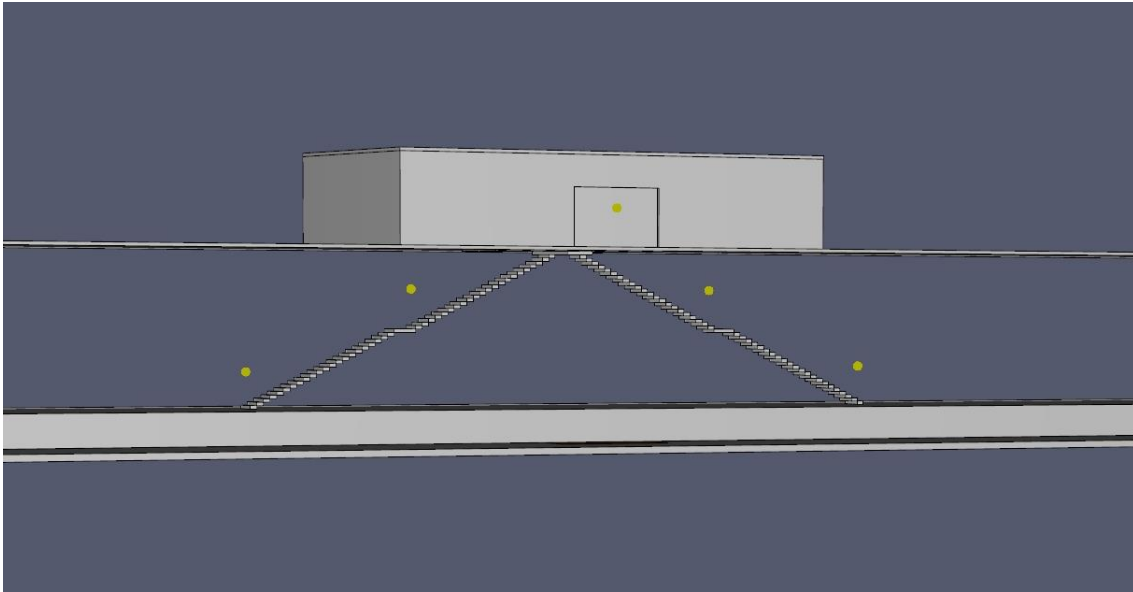
5.2 Προσομοίωση του σταθμού και της φωτιάς στο Pyrosim

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-2, το τρισδιάστατο μοντέλο του σταθμού δημιουργήθηκε από τη διατομή του σταθμού και τις κατόψεις κάθε ορόφου. Τα ανοίγματα εισόδου και εξόδου του σταθμού και τα ανοίγματα των σηράγγων στις πλατφόρμες προσομοιώθηκαν ως Open Vents. Επιλέχθηκε να γίνει για να είναι ρεαλιστική η προσομοίωση της διάδοσης ή μεταφοράς του καπνού στα κτίρια του σταθμού.



Εικόνα 5-2: 3D μοντέλο του σταθμού

Η αναπαράσταση της εστίας της φωτιάς έγινε χρησιμοποιώντας επιφάνειες (surface) τύπου Burner. Εισάγονται ο χημικός τύπος και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του καυσίμου. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο πρόγραμμα μέσω της καρτέλας αντίδρασης (reactions). Αφού μοντελοποιήθηκε ο σταθμός και η πυρκαγιά, έγινε χρήση συσκευών (devices) στα κρίσιμα σημεία του μοντέλου για να καταγραφούν διάφορες ποσότητες ανάλυσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα της εικόνας 5-3. Ως κρίσιμα σημεία πάρθηκαν όλα τα σκαλιά και οι πόρτες του συρμού και ένα ύψος 1,725 m από το κάτω μέρος της κινούμενης πλατφόρμας, το οποίο είναι το ύψος ενός Έλληνα σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Επιστημόνων NCD Risk Factor Collaboration.



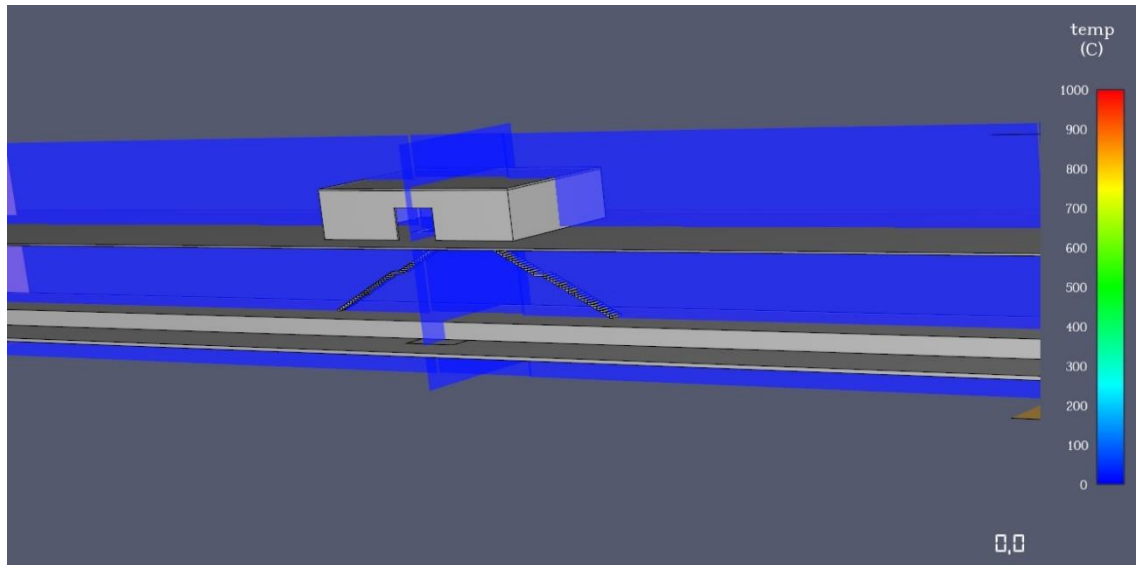
Εικόνα 5-3: Devices σε κρίσιμα σημεία

Η πρώτη συσκευή που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια "Gas Phase Device" για να μετρηθεί η ορατότητα του κτιρίου του σταθμού. Πραγματοποιήθηκε αυτό προκειμένου να ληφθούν δεδομένα που απαιτούνται για τη μείωση της ταχύτητας κίνησης του χρήστη ανάλογα με το επίπεδο ορατότητας σε κάθε περιοχή και για οποιαδήποτε χρονική περίοδο.

Η επόμενη συσκευή που έγινε χρήση της ονομάζεται Radiative Heat Flux Gas Device για τη μέτρηση της ακτινοβολίας kW/m^2 (Radiation). Γνωρίζοντας τη ροή θερμότητας ακτινοβολίας q_{rad} [kW/m^2], μπορεί να μετρηθεί ο χρόνος t_{rad} [min] όπου απαιτείται για να καεί το δέρμα από τη θερμότητα ακτινοβολίας. Τα προηγούμενα δεδομένα είναι απαραίτητα για να υπολογιστεί ο δείκτης της συνολική αποτελεσματικής δόσης θερμότητας (Fractional Effective Dose of Heat) που λαμβάνει ο άνθρωπος.

Άλλο ένα σημαντικό εργαλείο όπου προσφέρει το Pyrosim είναι τα slices. Τα slices μετρούν δεδομένα της αέριας φάσης (πίεση, θερμοκρασία, συγκέντρωση σωματιδίων, κ.λπ.) σε ευθείς άξονες παράλληλους με τον άξονα x, y ή z. Τα δεδομένα μπορούν να εισαχθούν και να αναπαραχθούν από ένα αρχείο "smokeview", παρέχοντας στους ερευνητές μια πλήρη εικόνα του τρόπου με τον οποίο κατανέμονται τα προϊόντα της καύσης. Σε αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν τα slices για τη μέτρηση του ποσοστού όρασης (visibility), της θερμοκρασίας

και της πυκνότητας των σωματιδίων μονοξειδίου του άνθρακα σε κρίσιμα σημεία του μοντέλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-4.



Εικόνα 5-4: Slices για την ορατότητα, θερμοκρασία και πυκνότητα

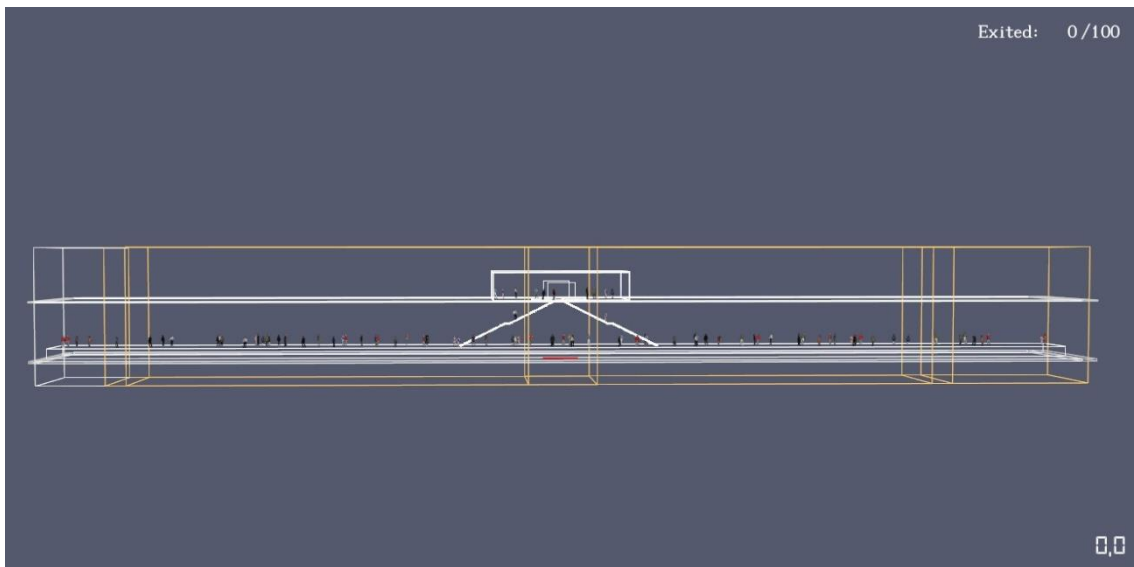
Επιπλέον, χρησιμοποιούνται επίσης ορισμένα αποτελέσματα δεδομένων PLOT3D και κάθε αρχείο μπορεί να περιέχει έως και πέντε δεδομένα- τα δεδομένα PLOT3D μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενσωματωθούν με τα αποτελέσματα FDS στο λογισμικό προσομοίωσης εκκένωσης Pathfinder, έτσι ώστε τα δεδομένα του επιλεγμένου χρήστη να εξάγονται σύμφωνα με τις επιλεγμένες ποσότητες. Στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκαν ποσότητες (4 ποσότητες) και θερμοκρασίες από τα δεδομένα του Plot3D. Η επιλογή της θερμοκρασίας έγινε για να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός του t_{conv} [min], του χρόνου που απαιτείται για να γίνει ανυπόφορος ο άνθρωπος υπό συνθήκες έκθεσης σε θερμότητα με συναγωγή σε κλειστό χώρο για τους επιλεγμένους χρήστες του σταθμού. Τα παραπάνω δεδομένα απαιτούνται για τον υπολογισμό του δείκτη κλασματικής αποτελεσματικής δόσης (FED- Fractional Effective Dose of Heat) της θερμότητας που λαμβάνει ο επιβαίνων. Η επιλογή Pathfinder Quantities δίνει δεδομένα σχετικά με την δυνατότητα όρασης και τη συγκέντρωση αερίων όπως οξυγόνου, διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα. Αυτά τα δεδομένα συγκέντρωσης αερίων των προαναφερθέντων στοιχείων χρησιμοποιούνται από το Pathfinder για τον υπολογισμό του δείκτη Fractional Effective Dose (FED- Κλασματική δραστική δόση) για τον επιλεγμένο χρήστη.

Συνοψίζοντας, πρέπει να αναφερθεί ότι στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάστηκαν δύο σενάρια κυκλοφορίας του αέρα στο σταθμό. Στο πρώτο σενάριο έχει τοποθετηθεί μία αναρρόφηση και

μία κατάθλιψη και στο δεύτερο σενάριο έχουν τοποθετηθεί δύο αναρροφήσεις. Ο χρόνος διάρκειας της προσομοίωσης των προαναφερθέντων σεναρίων 1 και 2 ήταν 420 δευτ./ 7 λεπτά.

5.3 Προσομοίωση του σταθμού και της εκκένωσης στο Pathfinder

Το αρχιτεκτονικό σχέδιο του σιδηροδρομικού σταθμού και η κάτοψη των επιπέδων του, δίνει τη δυνατότητα για δημιουργία 3D μοντέλου του σταθμού όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα 5-5



Εικόνα 5-5: Σταθμός στο Pathfinder

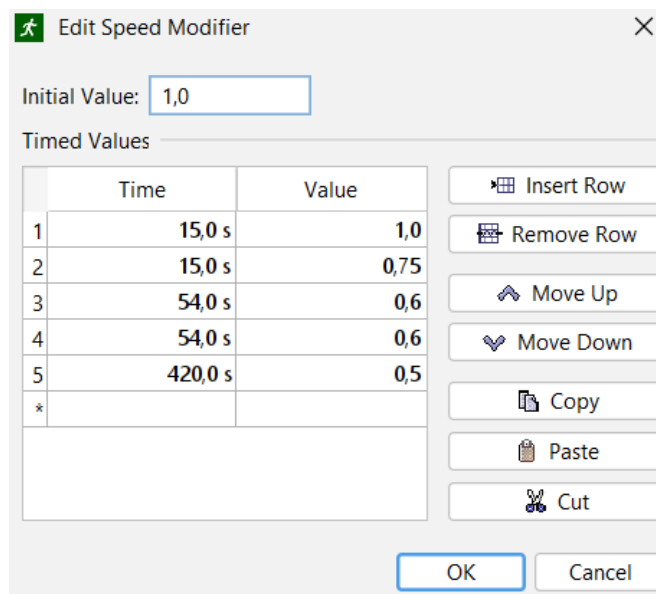
Ο αριθμός των ανθρώπων που επιβαίνουν στο σταθμό όταν γίνεται η εκκένωση αλλάζει με βάση τρία σενάρια. Το 1^ο σενάριο θα απαρτίζεται από 100 άτομα το 2^ο από 200 άτομα και το 3^ο από 300 άτομα. Όλοι οι χρήστες του σταθμού έχουν οριστεί να ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά και στα τρία σενάρια. Η προεπιλογή είναι το σενάριο που καλεί τον χρήστη στην έξοδο της επιλογής του (go to any exit).

Σε ένα σενάριο, η ταχύτητα κίνησης του χρήστη ορίστηκε σε 1,19 m/s. Ωστόσο, η μεγάλη πυκνότητα του καπνού έχει αρνητικό αντίκτυπο στην τιμή ταχύτητας του χρήστη, συγκεκριμένα όταν η ορατότητα πέφτει κάτω από 10 μέτρα. Ο καπνός επιδρά στην ταχύτητα κίνησης και εκτιμάται σύμφωνα με την απόσταση ορατότητας που προκύπτει από τα αναλυθέντα δεδομένα στο Pyrosim. Η ταχύτητα κίνησης του χρήστη μπορεί στη συνέχεια να προσαρμοστεί ανάλογα

με την ορατότητα κατά την εκκένωση χρησιμοποιώντας το διάγραμμα της Εικόνας 3-12. Ωστόσο, αυτό πρέπει να γίνει από τον χρήστη, καθώς το λογισμικό δεν έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει άμεσα αυτή τη αναλογία, δηλαδή να μειώσει την ταχύτητα κίνησης του χρήστη σύμφωνα με την δυνατότητα όρασης στην περιοχή όπου βρίσκεται ο χρήστης. Έτσι λοιπόν έπρεπε να χωριστεί ο σταθμός σε διαφορετικές περιοχές ανάλογα με την εκπομπή και τη συγκέντρωση καπνού σε κάθε σενάριο. Αυτός ο διαχωρισμός κατέστη δυνατός με δεδομένα που ελήφθησαν από τον εξοπλισμό αέριας φάσης και φέτες μέτρησης των επιπέδων ορατότητας. Βάση των αποτελεσμάτων των σεναρίων πυρκαγιάς για τις συνθήκες του περιβάλλοντος, η ταχύτητα των ατόμων εισάγεται στο Pathfinder και υπολογίζεται ο απαιτούμενος χρόνος για την εκκένωση. Ακολούθως γίνονται σχόλια σχετικά με την αποτελεσματικότητα της εκκένωσης με βάση τα όρια για την ασφαλή εκκένωση. Τα αποτελέσματα των ταχυτήτων κίνησης των ατόμων στο χώρο του καφέ ανάλογα με την ορατότητα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-6 και έτσι τα όρια κατανέμονται σύμφωνα με τα δεδομένα στο γράφημα της Εικόνας 3-14. Η μέθοδος εισαγωγής μειωμένων ταχυτήτων μετακίνησης ανάλογα με την ορατότητα, την περιοχή και τον χρόνο πραγματοποιήθηκε με τη χρήση εντολών αλλαγής ταχύτητας σε όλες τα διαχωρισμένα μέρη του σταθμού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-7.

Visibility (m)	Walking Speed (m/s)
>10	1.19
10-7	1.1
7-5	0.9
5-4	0.6
<4	0.3

Εικόνα 5-6: Ταχύτητα κίνησης ανάλογα την ορατότητα



Εικόνα 5-7: εντολή τροποποίηση ταχύτητας (Speed Modifier)

Στη μελέτη αυτή, οι επιλογές έγιναν έτσι ώστε ορισμένοι άνθρωποι με βάση την αρχική τους θέση στο σταθμό και τους χρόνους εκκένωσης και ελήφθησαν δεδομένα σχετικά με την κλασματική αποτελεσματική δόση τοξικότητας (FED) και το ύψος θερμοκρασίας στο οποίο εκτέθηκαν κατά το συμβάν της εκκένωσης για τους χρήστες αυτούς..

5.4 Αποτελέσματα και έλεγχος διαδικασίας της εκκένωσης

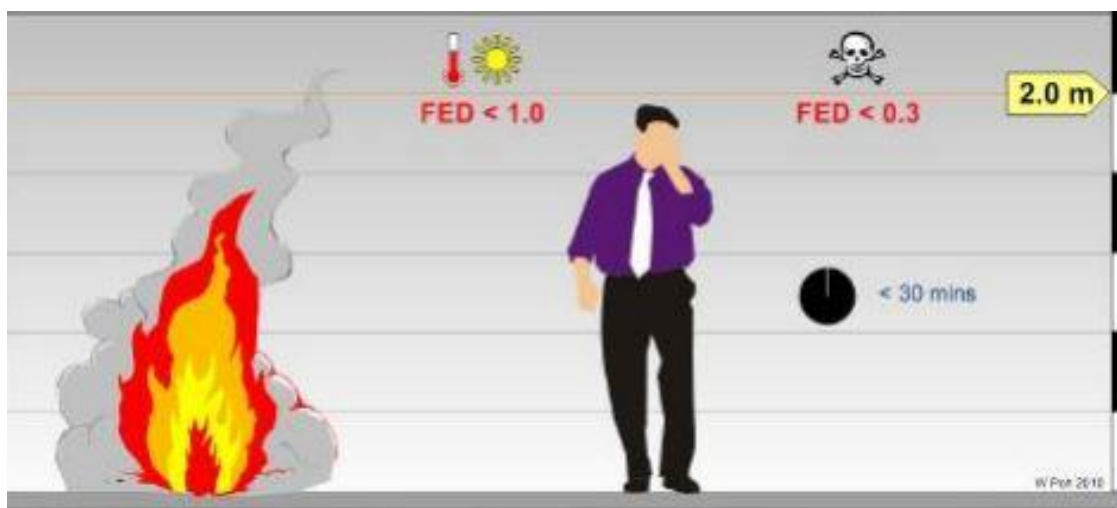
Η δοκιμή εξετάζει το χρόνο εκκένωσης των χρηστών του σταθμού και βασίζεται σε τιμές κατωφλίου για τους δείκτες τοξικών FED και θερμικών FED.

Ο NFPA 130 ορίζει τα 4 λεπτά ως ανώτατο χρόνο για να εκκενωθεί ο σταθμός από την πλατφόρμα του ως ένα ασφαλές σημείο και 6 λεπτά για να εκκενωθεί πλήρως. Τα όρια αυτά αντιπροσωπεύουν συνθήκες εκκένωσης σε περίπτωση απουσίας συμβάντος (π.χ. πυρκαγιά, έκρηξη) και συνεπώς δεν γίνεται να ληφθούν υπόψη στην παραμετροποίηση των χρόνων εκκένωσης όπου εμφανίζονται από την ανάλυση. Ωστόσο, γίνονται ποιοτικές συγκρίσεις των χρόνων.

Για τον δείκτη τοξικότητας (FED: Fractional Effective Dose), αντιπροσωπεύει τη δόση (δόση εξουδετέρωσης) που δεν μπορεί να γίνει υποφερτή από τον άνθρωπο λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα, του μονοξειδίου του άνθρακα αλλά παράλληλα και μείωσης της συγκέντρωσης οξυγόνου. Το επιτρεπτό όριο στους κανονισμούς ορίζεται σε $\leq 0,3$, καθώς τιμές του δείκτη ≥ 1 μπορούν να προκαλέσουν θάνατο, ενώ πάνω από αυτή την τιμή

υπάρχει διαφορά σε προβλήματα (αναπνευστικά, αισθητηριακά κ.λπ.). Ως εκ τούτου, το όριο ανοχής για τον δείκτη τοξικότητας ορίζεται σε 0,3.

Τέλος, ο δείκτης θερμότητας FED αντιπροσωπεύει τη συνολική αποτελεσματική ποσότητα θερμότητας που ανέχεται ο ανθρώπινος οργανισμός από τη συναγωγή και την ακτινοβολία. Η θερμότητα από συναγωγή έχει σχέση με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Η ακτινοβολούμενη θερμότητα είναι η θερμότητα που γίνεται αισθητή κοντά στη φωτιά και η θερμότητα αυτή αυξάνεται όσο πλησιάζετε στη φωτιά. Οι κανονισμοί αναφέρουν ότι όταν ο δείκτης είναι ≥ 1 , οι εσωτερικές συνθήκες αρχίζουν να γίνονται μη ανεκτές για το άνθρωπο. Ως εκ τούτου, η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή FED για τη θερμότητα ορίζεται σε 1.



Εικόνα 5-8: Τιμές οριακές για τους δείκτες FED (AFC 2010)

6 Αποτελέσματα

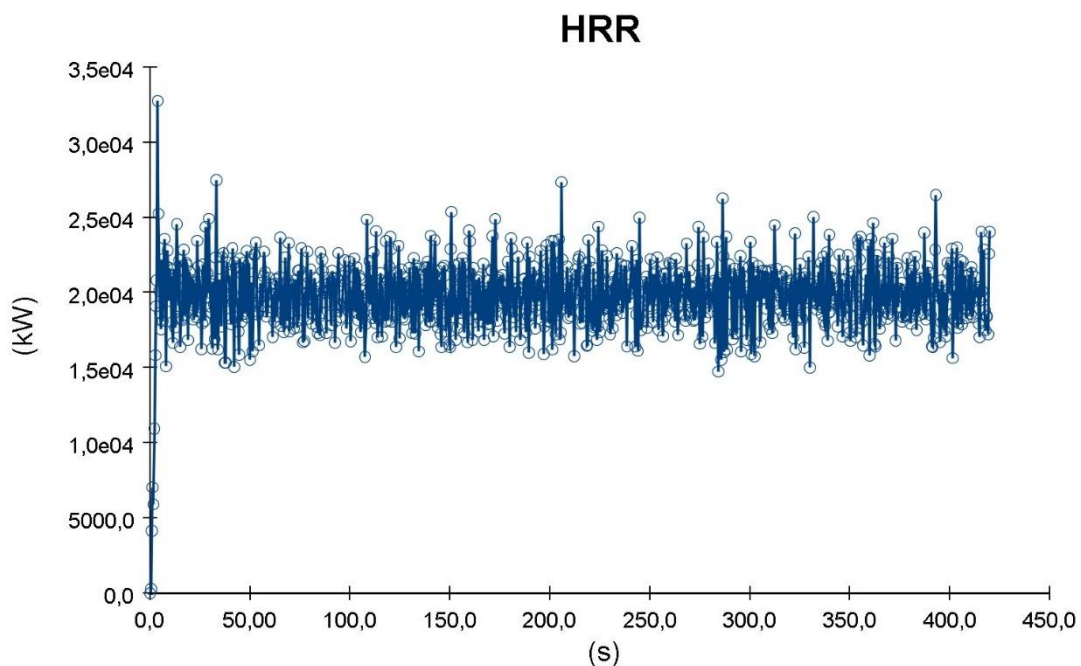
Στην συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέρχονται από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με το Pathfinder και το Pyrosim. Πρώτον, με βάση τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Pyrosim, παρουσιάζονται διάφορα διαγράμματα ανάπτυξης της πυρκαγιάς και εξάπλωσης των προϊόντων καύσης στο κτίριο του σταθμού για κάθε σενάριο ξεχωριστά. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το αποτέλεσμα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά το Pathfinder για τα 2 σενάρια. Η ανάλυση βασίζεται στη σύγκριση των χρόνων εκκένωσης ανάλογα με το σενάριο και τα πρότυπα κίνησης

των ανθρώπων. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δεικτών για τους χρήστες του σιδηροδρομικού σταθμού για όλα τα σενάρια.

6.1 Αποτελέσματα του λογισμικού Pyrosim

6.1.1 Πρώτο Σενάριο

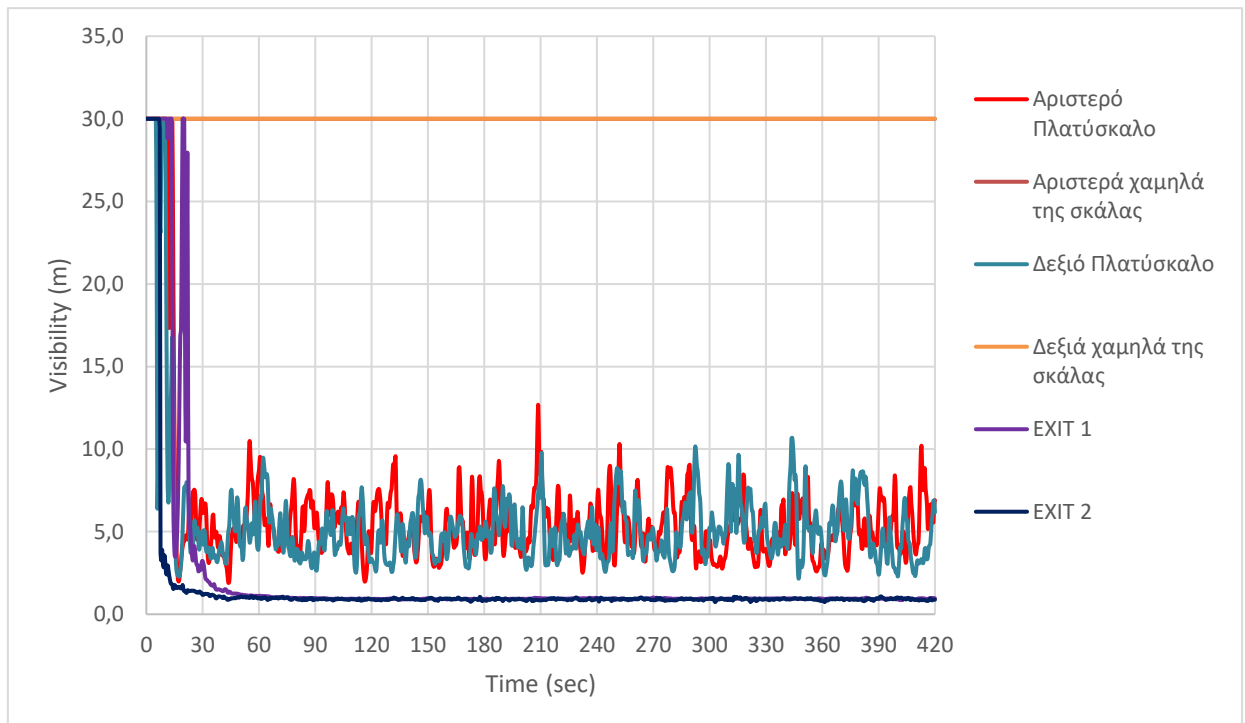
Σε αυτό το σενάριο, η γεωμετρία του σταθμού δεν θα δεχτεί καμία παραμετροποίηση κατά την προσομοίωση. Ο λόγος είναι για να παρατηρηθεί η ροή του καπνού στο συγκεκριμένο σιδηροδρομικό σταθμό και να βγουν συμπεράσματα σχετικά με την ορατότητα και θερμοκρασία χωρίς ύπαρξη κάποιας τεχνητής ροής αέρα που θα άλλαζε τα δεδομένα. Η μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας Heat Release Rate (HRR) της πυρκαγιάς προσομοιώθηκε από το λογισμικό Pyrosim όπως φαίνεται στην εικόνα 6-1.



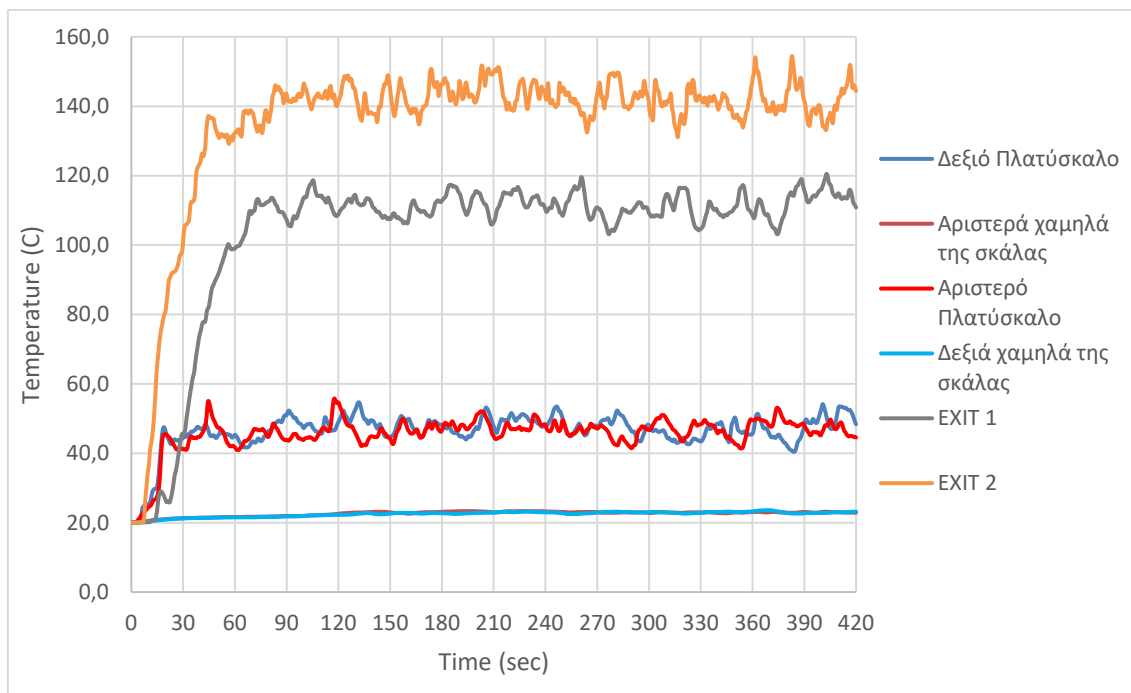
Εικόνα 6-1: Το HRR της εστίας για το πρώτο σενάριο

Με την βοήθεια των DEVICES που επιλέχθηκαν να τοποθετηθούν στα κρίσιμα σημεία του σιδηροδρομικού σταθμού όπως είναι οι σκάλες εξόδου και οι έξοδοι προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα. Στο διάγραμμα της εικόνας 6-2 παρουσιάζεται η μεταβολή ορατότητας στους χώρους του σταθμού ενώ στο 6-3 η αύξηση της θερμοκρασίας στο κατώτερο σημείο από τις σκάλες, στα πλατύσκαλα καθώς και στις δύο εξόδους με την αλλαγή του χρόνου. Όσον αφορά τις

συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα δεν παρουσιάζεται κάποιο διάγραμμα και οφείλεται στις αμελητέες τιμές που προέκυψαν βάσει της προσομοίωσης.



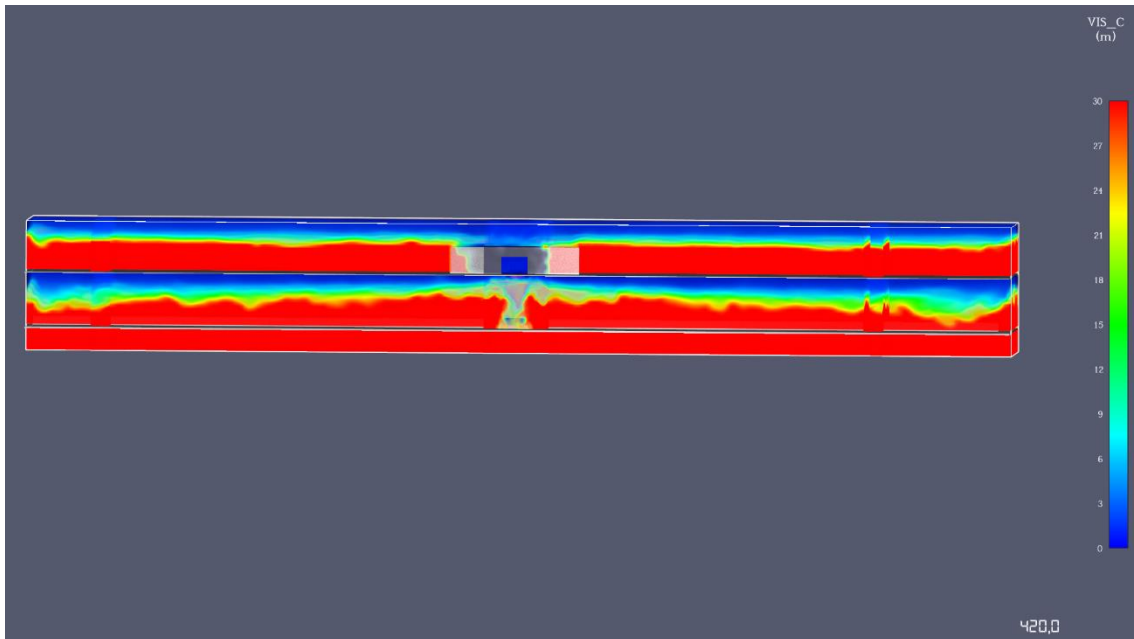
Εικόνα 6-2 Μεταβολή στην ορατότητα σε όλους τους χώρους του σταθμού κατά την διάρκεια της εκκένωσης (σενάριο 1)



Εικόνα 6-3 Μεταβολή στην Θερμοκρασία σε όλους στους χώρους του σταθμού κατά την διάρκεια της εκκένωσης (σενάριο 1)

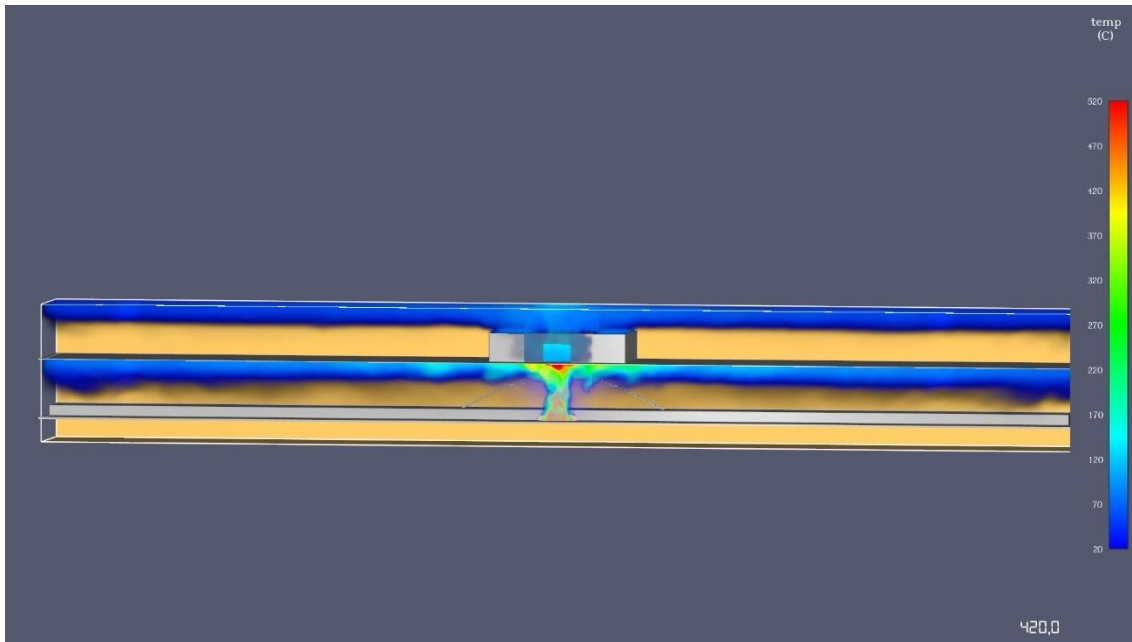
Τα DEVICES που έγινε χρήση είναι για να μετράτε η ορατότητα και η θερμοκρασία. Έγινε χρήση έξι devices που αφορούν κάθε μέγεθος και οι τοποθεσίες τους είναι, στο κάτω μέρος της κάθε σκάλας, στα δύο πλατύσκαλα και στις δύο εξόδους. Στην εικόνα 6.4 φαίνονται τα DEVICES που αφορούν την ορατότητα. Σύμφωνα με τα δεδομένα προκύπτει ότι στην αποβάθρα υπάρχει εμφανής επιρροή από την διασπορά του καπνού στα 10sec αφότου ξέσπασε η φωτιά, συγκεκριμένα στα υψηλότερα τμήματα του κάτω επιπέδου του σταθμού, όπως είναι τα πλατύσκαλα και οι εξοδοί που αποτελούν κρίσιμα σημεία, ενώ ο υπόλοιπος χώρος γεμίζει σταδιακά καπνό σε μικρές ποσότητες. Μετά τα 140sec ο σταθμός είναι εντελώς γεμάτος με καπνό, αλλά πρέπει να τονιστεί ότι η πυκνότητα του είναι χαμηλή και η ορατότητα κακή, από τα 15m έως στα 3m στα πλατύσκαλα και μηδενική στις εξόδους. Τα ορισμένα επίπεδα ορατότητας

επιρεάζουν την μετακίνηση του κάθε ατόμου ανάλογα με το διάγραμμα. 3.14 συγκεκριμένα στην αριστερή πλευρά της σκάλας.



Εικόνα 6-4: Τα DEVICES που αφορούν την δυνατότητα όρασης για τα 420sec (σενάριο 1)

Στην εικόνα 6-5 φαίνονται τα DEVICES που σχετίζονται με την θερμοκρασία. Τα δεδομένα κατά την προσομοίωση δείχνουν ότι η θερμοκρασία στο επίπεδο της αποβάθρας δεν έχει ιδιαίτερα κάποια επιρροή από τη διασπορά του καπνού, με τη θερμοκρασία να παρουσιάζει μια αύξηση μόνο 5°C. Σε άλλα επίπεδα παρατηρείται σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι η υψηλότερη θερμοκρασιακή τιμή εντοπίζεται στην έξοδο 2 που βρίσκεται σχεδόν στο πάνω μέρος της εστίας με τιμή κοντά στους 151°C.



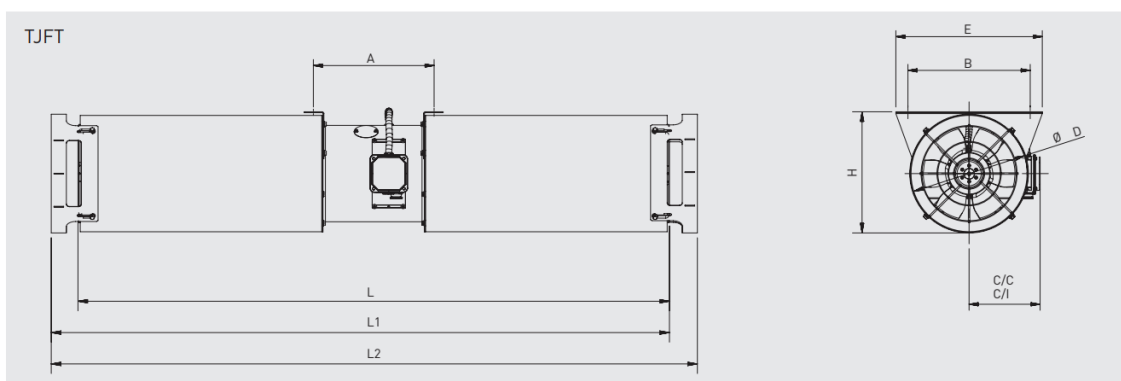
Εικόνα 6-5: Τα DEVICES που αφορούν την θερμοκρασία για χρόνο 420sec (σενάριο 1)

6.1.2 Δεύτερο Σενάριο

Σε αυτό το σενάριο, η γεωμετρία του σταθμού αποτελείται από 6 ανεμιστήρες τύπου jet fan. Όλοι οι ανεμιστήρες έχουν κατεύθυνση από τα δεξιά προς τα αριστερά. Ο λόγος που έγινε η τοποθέτηση αυτών των jet fans είναι για να παρατηρηθεί η ροή του καπνού στο συγκεκριμένο σιδηροδρομικό σταθμό. Αναλύοντας ευρύτερα την παρούσα κατάσταση γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η τοποθέτηση των jet fans πραγματοποιείται κυρίως για λόγους ασφάλειας (για την απομάκρυνση του καπνού από κρίσιμα σημεία). Παρακάτω σε κόκκινη υπογράμμιση παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις των jet fans που χρησιμοποιήθηκαν

Model	Speed (rpm)	Thrust (N)	Airflow (m³/h)	Air velocity (m/s)	Motor power* (kW)	Maximum absorbed current (A)	Sound pressure level** (LpA)		Weight (kg)
							Form A****	Form B****	
TJFT REVERSIBLE - 1 speed 2 POLE									
TJFT/2-315-CN	2790	24	4.500	16	0,75	1,6	64	64	57
TJFT/2-355-CN	2810	40	6.500	18	1,1	2,3	67	66	76
TJFT/2-400-CN	2870	60	9.000	20	1,5	4,2	71	69	89
TJFT/2-450-C	2840	85	12.100	21	2,2	4,5	75	72	133
TJFT/2-500-C	2890	144	17.500	25	4	7,5	78	75	165
TJFT/2-560-C	2925	235	25.000	28	7,5	13,6	82	78	220
TJFT/2-630-C	2945	387	36.100	33	15	27	87	82	290
TJFT REVERSIBLE - 2 speed 2/4 POLE									
TJFT/2/4-315-CN	2820/1400	24	4.500	16	0,8/0,2	1,9/0,6	64/49	64/49	57
TJFT/2/4-355-CN	2810/1390	40	6.500	18	1,1/0,25	2,4/0,75	67/52	66/51	76
TJFT/2/4-400-CN	2900/1435	60	9.000	20	1,5/0,37	4,2/1,3	71/56	69/54	89
TJFT/2/4-450-C	2845/1420	85	12.100	21	2,2/0,5	4,6/1,5	75/60	72/57	134
TJFT/2/4-500-C	2890/1440	144	17.500	25	4,4/1,1	8,6/2,8	78/63	75/60	166
TJFT/2/4-560-C	2930/1470	235	25.000	28	8/2	15,3/4,8	82/67	78/63	223
TJFT/2/4-630-C	2950/1470	387	36.100	33	16/4	30,5/9,6	87/72	82/67	311

Εικόνα 6-6: Τεχνικά χαρακτηριστικά του Jet Fan

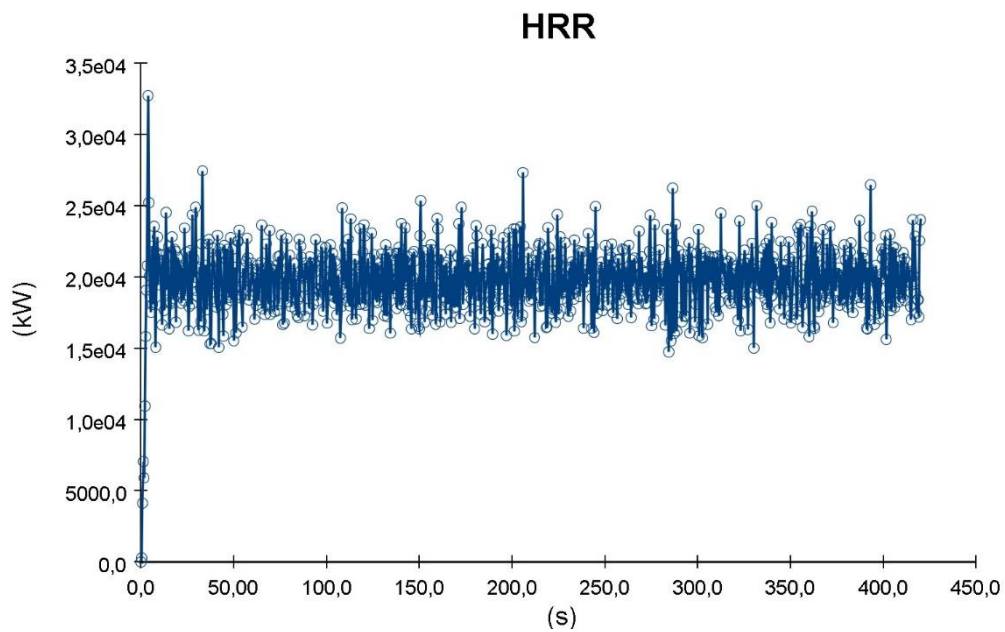


L: standard with guards, no deflector. L1: for unidirection with 1 deflector. L2: for reversible with 2 deflectors. C/C: version with terminal box (standard). C/I: version with isolator (optional).

Model	A	B	C/C	C/I	D	E	H	L	L1	L2
315	310	405	236	279	385	485	397	1754	1810	1967
355	310	445	259	302	425	525	437	1754	1810	1967
400	310	506	283	326	486	586	498	1754	1810	1967
450	539	556	313,5	362,5	536	636	548	2499	2055	2712
500	549	620	343,5	392,5	600	700	612	2499	2055	2712
560	669	680	376	425	660	760	672	3019	3072	3232
630	769	750	422	480	730	830	742	3119	3175	3332

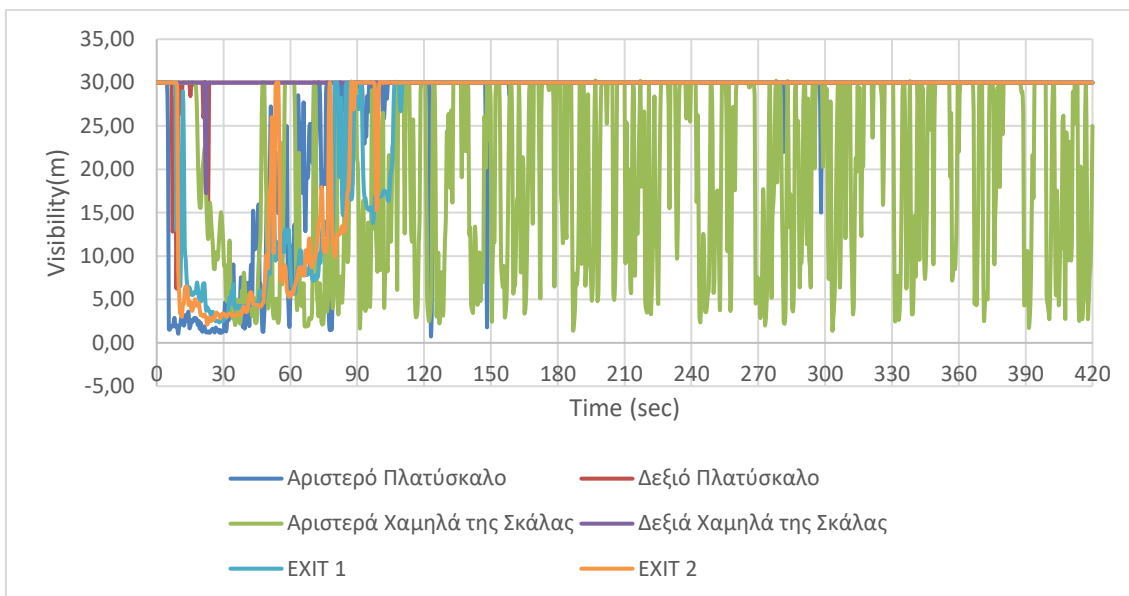
Εικόνα 6-7: Διαστάσεις Jet Fan

Η μεταβολή του ρυθμού έκλυσης θερμότητας Heat Release Rate (HRR) της πυρκαγιάς προσομοιώθηκε από το λογισμικό Pyrosim όπως φαίνεται στην εικόνα 6-6.

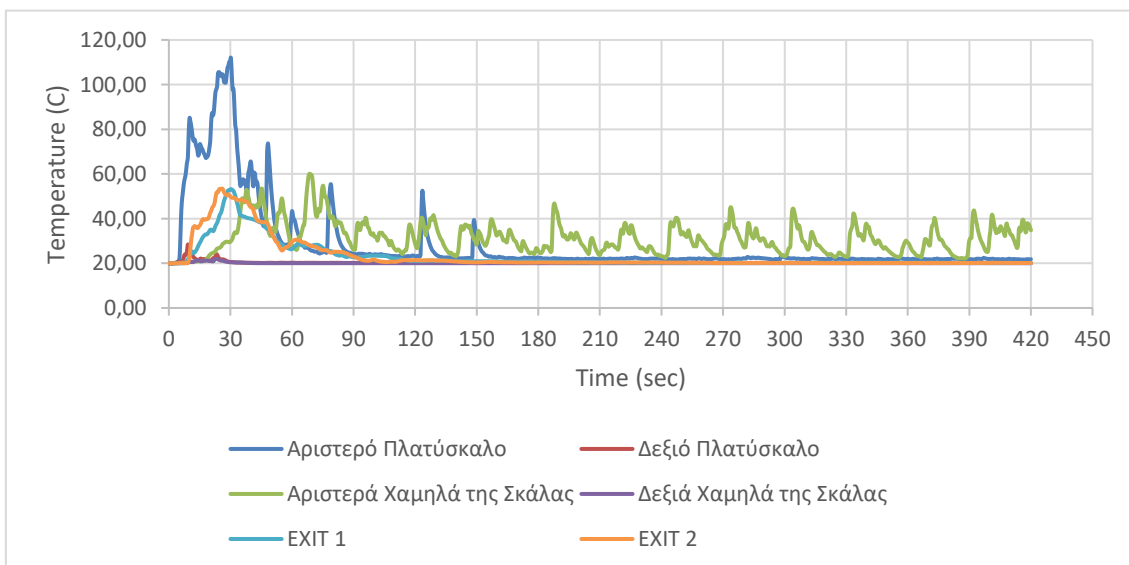


Εικόνα 6-8: Το HRR της εστίας για το δεύτερο σενάριο

Με την βοήθεια των DEVICES που επιλέχτηκαν να τοποθετηθούν στα κρίσιμα σημεία του σιδηροδρομικού σταθμού όπως είναι οι σκάλες εξόδου και οι έξοδοι προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα. Στο διάγραμμα της εικόνας 6-9 παρουσιάζεται η μεταβολή ορατότητας στους χώρους του σταθμού ενώ στο 6-10 η αύξηση της θερμοκρασίας στο κατώτερο σημείο από τις σκάλες, στα πλατύσκαλα καθώς και στις δύο εξόδους με την αλλαγή του χρόνου. Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα δεν παρουσιάζεται κάποιο διάγραμμα και οφείλεται στις αμελητέες τιμές που προέκυψαν βάση της προσομοίωσης.



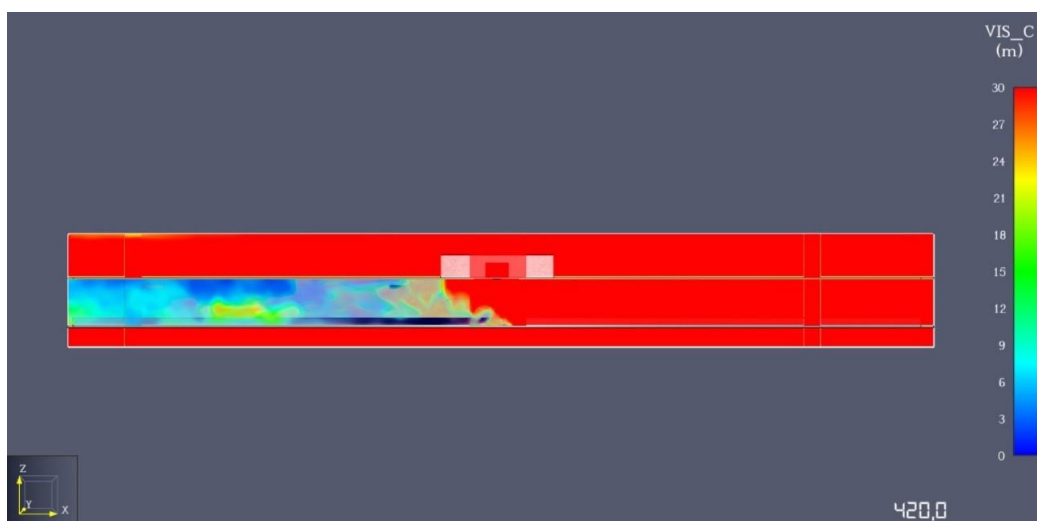
Εικόνα 6-9: Μεταβολή στην ορατότητα σε όλους τους χώρους του σταθμού κατά την διάρκεια της εκκένωσης (σενάριο 2)



Εικόνα 6-10: Μεταβολή στην Θερμοκρασία σε όλους στους χώρους του σταθμού κατά την διάρκεια της εκκένωσης (σενάριο 2)

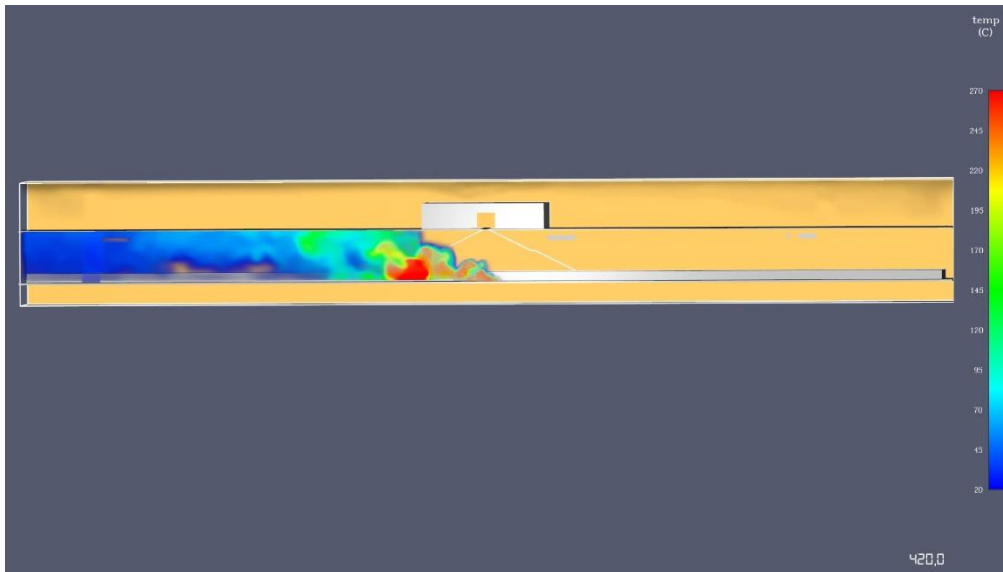
Αντίστοιχα DEVICES για την προσομοίωση είναι για τη καταγραφή του επιπέδου ορατότητας και θερμοκρασίας. Έγινε χρήση έξι devices που αφορούν κάθε μέγεθος και οι τοποθεσίες τους

είναι, στο κάτω μέρος της κάθε σκάλας, στα δύο πλατύσκαλα και στις δύο εξόδους. Στην εικόνα 6-11 φαίνονται τα DEVICES που σχετίζονται με την ορατότητα. Σύμφωνα με την προσομοίωση παρατηρείται ότι ο χώρος της αποβάθρας επηρεάζεται από την διάδοση του καπνού από τα 10sec αφότου ξέσπασε η φωτιά, συγκεκριμένα η αριστερή πλευρά του σταθμού η ορατότητα παραμένει χαμηλή μέχρι και τα 420sec, στα λοιπά μέρη του σταθμού καταγράφεται σταδιακή αύξηση του καπνού σε μικρές ποσότητες. Στα 28sec περίπου είναι γεμάτη σχεδόν όλη η αριστερή πλευρά του σταθμού με καπνό, αξίζει να τονιστεί ότι η μικρή πυκνότητα του καπνού έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ορατότητας κοντά στα 10m. Τα ορισμένα επίπεδα ορατότητας επηρεάζουν την μετακίνηση του κάθε ατόμου ανάλογα με το πίνακα. 5-6 συγκεκριμένα στην αριστερή πλευρά της σκάλας.



Εικόνα 6-11: Τα DEVICES που αφορούν την ορατότητα για χρόνο 420sec (σενάριο 2)

Στην εικόνα 6-12 φαίνονται όλα τα DEVICES που αφορούν την θερμοκρασία στο χώρο. Τα δεδομένα κατά την προσομοίωση δείχνουν ότι η θερμοκρασία στο επίπεδο της αποβάθρας στο δεξί του μέρος, δεν επηρεάζεται καθόλου από την εξάπλωση του καπνού και αυτό οφείλεται στην ροή αέρα που προκαλούν τα jetfans. Αντιθέτως το αριστερό επίπεδο γεμίζει με καπνό τον οποίο τα jetfans οδηγούν προς την σήραγγα. Στα υπόλοιπα επίπεδα η θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά σε μικρούς ρυθμούς. Αξίζει να γίνει αναφορά ότι η μέγιστη θερμοκρασιακή τιμή παρατηρείται στο αριστερό πλατύσκαλο που βρίσκεται αρκετά κοντά από την φωτιά γύρω στους 111°C.



Εικόνα 6-12: Τα DEVICES που αφορούν την θερμοκρασία για χρόνο 420sec (σενάριο 2)

6.2 Αποτελέσματα του λογισμικού Pathfinder

Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε η κίνηση των χρηστών έγινε με το steering mode. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εκκένωσης από το λογισμικό Pathfinder για 3 περιπτώσεις σε κάθε ένα από τα δυο σενάρια. Συγκεκριμένα θα επιλεγεί διαφορετικός αριθμός ατόμων, επομένως η συγκέντρωση θα είναι 100, 200 και 300 άτομα για κάθε περίπτωση.

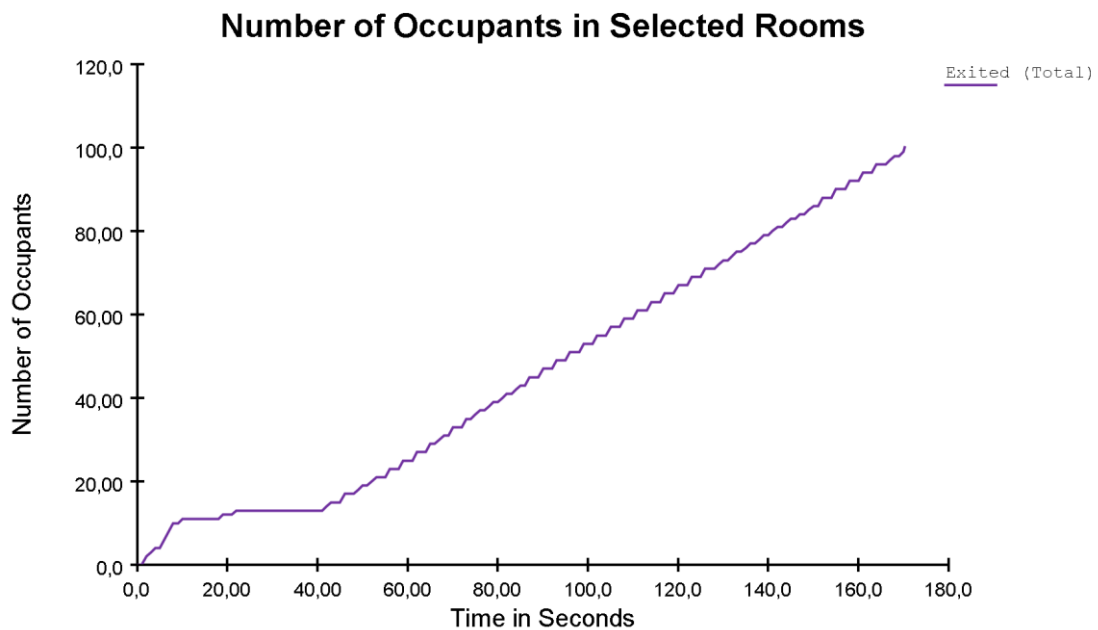
6.2.1 Ανάλυση εκκένωσης για το 1^ο σενάριο

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η πηγή πυρκαγιάς επιλέχθηκε να ξεκινά στο κέντρο των σιδηροδρομικών γραμμών, το οποίο θα είχε τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στο σταθμό. Τα αποτελέσματα του PyroSim δείχνουν επίσης ότι η πυκνότητα του καπνού έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ορατότητα των χρηστών, ιδίως μετά τα πρώτα 140 δευτερόλεπτα. Επομένως, κατά τη διάρκεια της εκκένωσης, η ταχύτητα μετακίνησης των ατόμων πέφτει ανάλογα με την ορατότητα που επικρατεί στην αντίστοιχη ζώνη κυκλοφορίας.

Εκκένωση 100 ατόμων

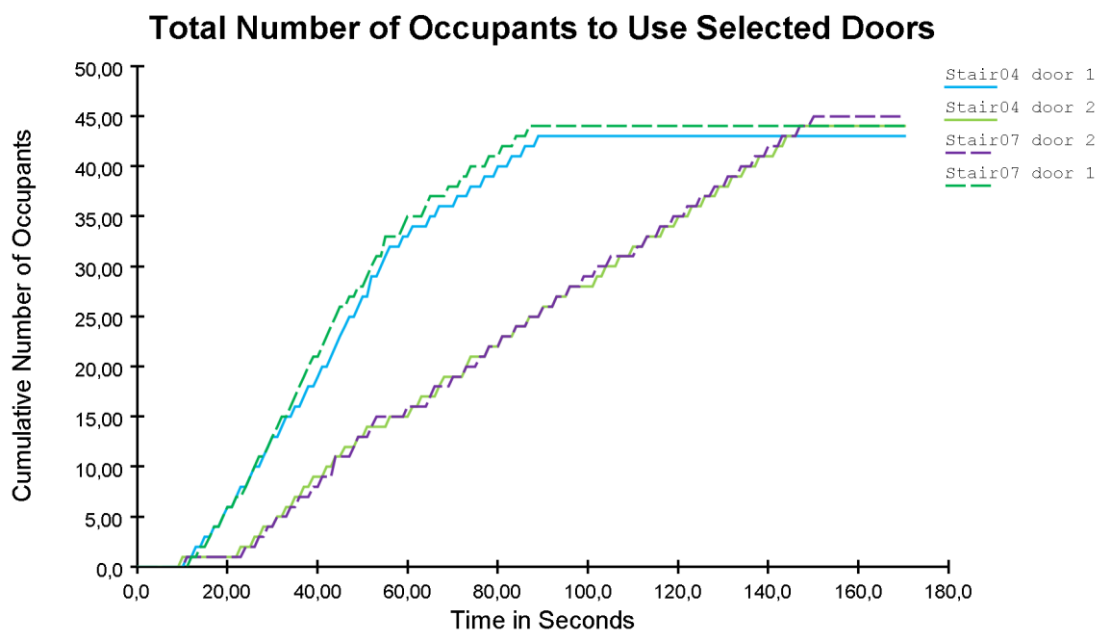
Η ανάλυση των 100 χρηστών πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε όλοι να κινούνται με ελευθερία στην περιοχή του σιδηροδρομικού σταθμού. Στο σχήμα της εικόνας 6-13 φαίνεται ο τελικός χρόνος που χρειάστηκαν όλα τα άτομα για να εγκαταλείψουν το σταθμό. Επιπρόσθετα, παρέχονται

σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με τον αριθμό των επιβατών που έχουν απομακρυνθεί από το σταθμό κάθε χρονική στιγμή. Για παράδειγμα, 50 άτομα χρειάστηκαν 95 δευτερόλεπτα για να αδειάσει ο σταθμός. Το πρώτο άτομο χρειάστηκε 1 δευτερόλεπτο για να εκκενώσει το σταθμό και το τελευταίο άτομο χρειάστηκε 169 δευτερόλεπτα. .



Εικόνα 6-13: Αριθμός ατόμων που εκκενώνουν το σταθμό με βάση το χρόνο για 100 άτομα σενάριο 1

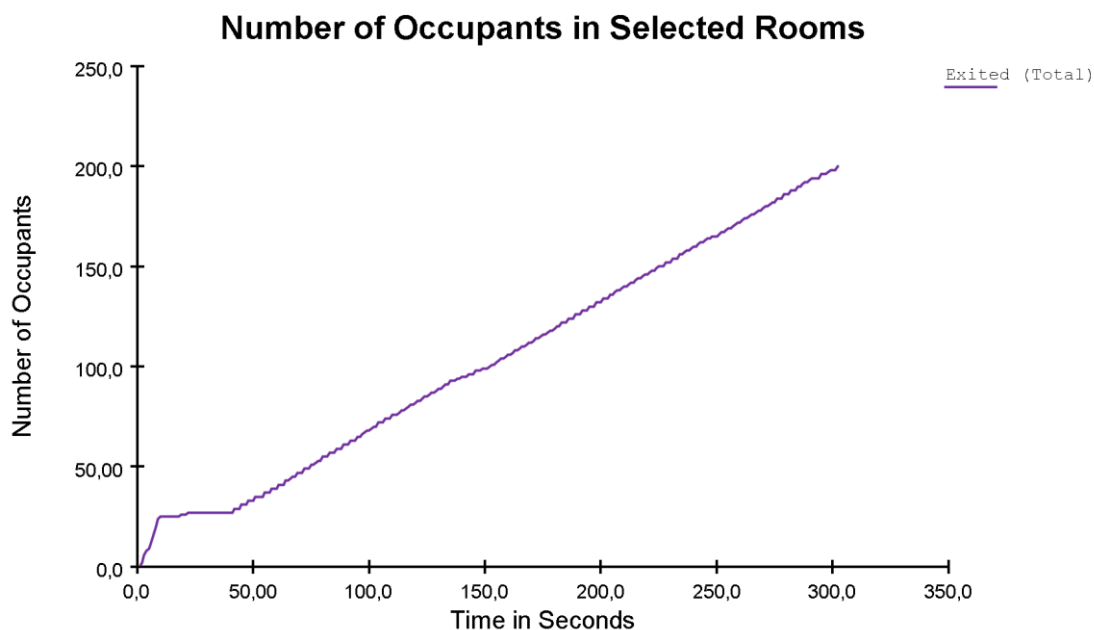
Στην εικόνα 6-14 φαίνεται συνολικά ο αριθμός των επιβατών όπου απομακρύνθηκαν από την αποβάθρα κάθε στιγμή σύμφωνα με τη σκάλα που χρησιμοποιήθηκε. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι η σκάλα (Stair) 07 υπέστη μεγαλύτερη χρήση μιας και οι περισσότεροι επιβαίνοντες χρησιμοποίησαν αυτή τη σκάλα. Αναλύοντας και όπως φαίνεται στα γράφημα των διαγραμμάτων της παρούσας εργασίας, διαπιστώνεται ότι ο χρόνος για την εκκένωση από την αποβάθρα είναι 145 δευτερόλεπτα και 169 δευτερόλεπτα για ολόκληρο τον σταθμό.



Εικόνα 6-14: Αριθμός ατόμων που χρησιμοποιούν σκάλες για την εκκένωση από την αποβάθρα (συναρτήσει του χρόνου- σενάριο 1 που αφορά 100 άτομα)

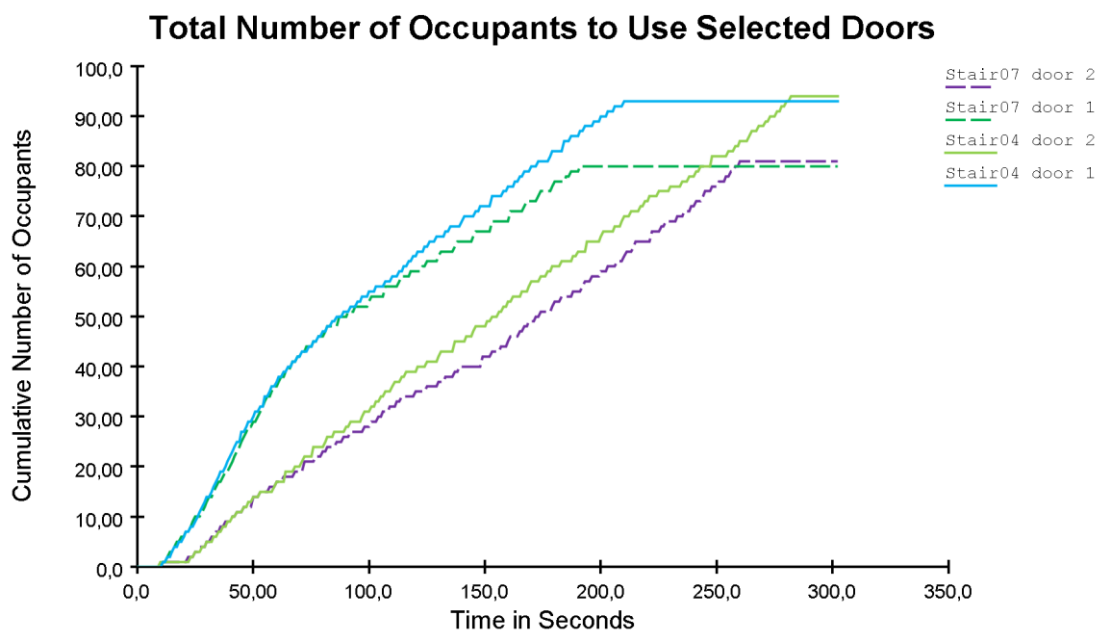
Εκκένωση 200 ατόμων

Κατά τη δεύτερη ανάλυση, και οι 200 χρήστες κινούνται με ελευθερία στην περιοχή του σταθμού όπου μελετάμε. Στο παρακάτω σχήμα 6-15 απεικονίζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκαν όλοι οι επιβαίνοντες για να εγκαταλείψουν το σταθμό. Επιπρόσθετα παρέχονται σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με τον αριθμό των επιβατών που έχουν απομακρυνθεί από το σταθμό κάθε χρονική στιγμή. Άλλο ένα παράδειγμα, είναι ότι χρειάζονται 152 δευτερόλεπτα για να εκκενώσουν το σταθμό 100 άτομα. Ο πρώτος χρήστης και ο τελευταίος χρήστης χρειάζονται αντίστοιχα 1 και 302 δευτερόλεπτα ο καθένας για να εκκενώσουν το σταθμό.



Εικόνα 6-15: Αριθμός ατόμων που εκκενώνουν το σταθμό με βάση το χρόνο για 200 άτομα σενάριο 1

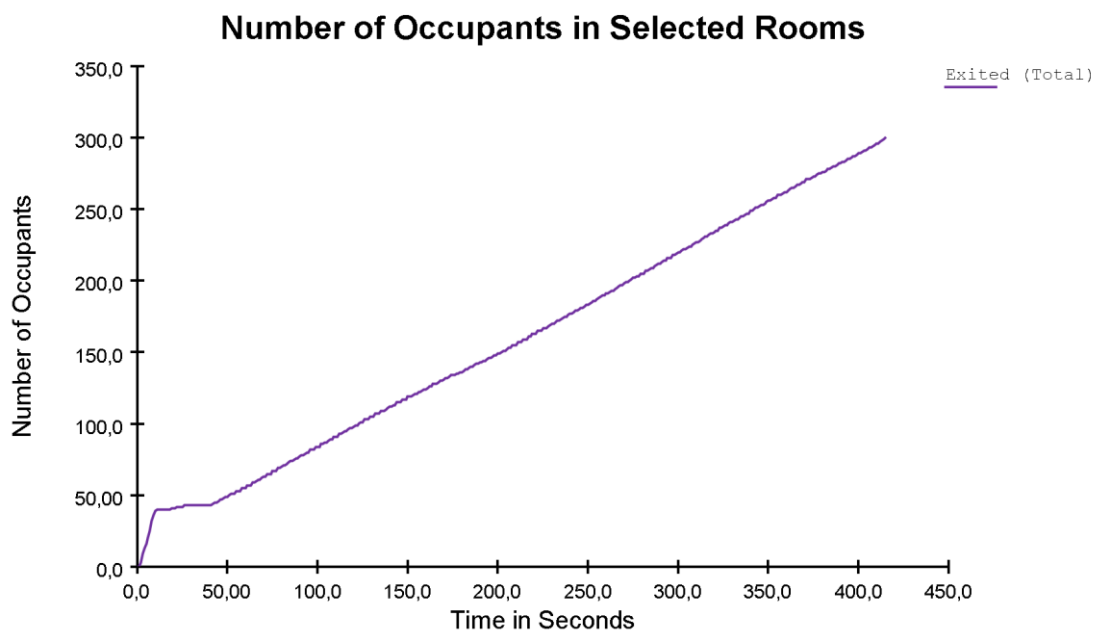
Στην εικόνα 6-16 φαίνεται συνολικά ο αριθμός των επιβατών-χρηστών που απομακρύνθηκαν από την αποβάθρα κάθε στιγμή ανάλογα με τη σκάλα που χρησιμοποιήθηκε. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι η σκάλα (Stair) 04 υπέστη μεγαλύτερη χρήση μιας και οι περισσότεροι επιβαίνοντες χρησιμοποίησαν αυτή τη σκάλα. Αναλύοντας και όπως φαίνεται στα γράφημα των διαγραμμάτων της παρούσας εργασίας, διαπιστώνεται ότι ο χρόνος για την εκκένωση από την αποβάθρα είναι 278 δευτερόλεπτα και 302 δευτερόλεπτα για ολόκληρο τον σταθμό.



Εικόνα 6-16: Αριθμός ατόμων που απομακρύνθηκαν από το σταθμό ως συνάρτηση του χρόνου με 200 άτομα στο σενάριο 1.

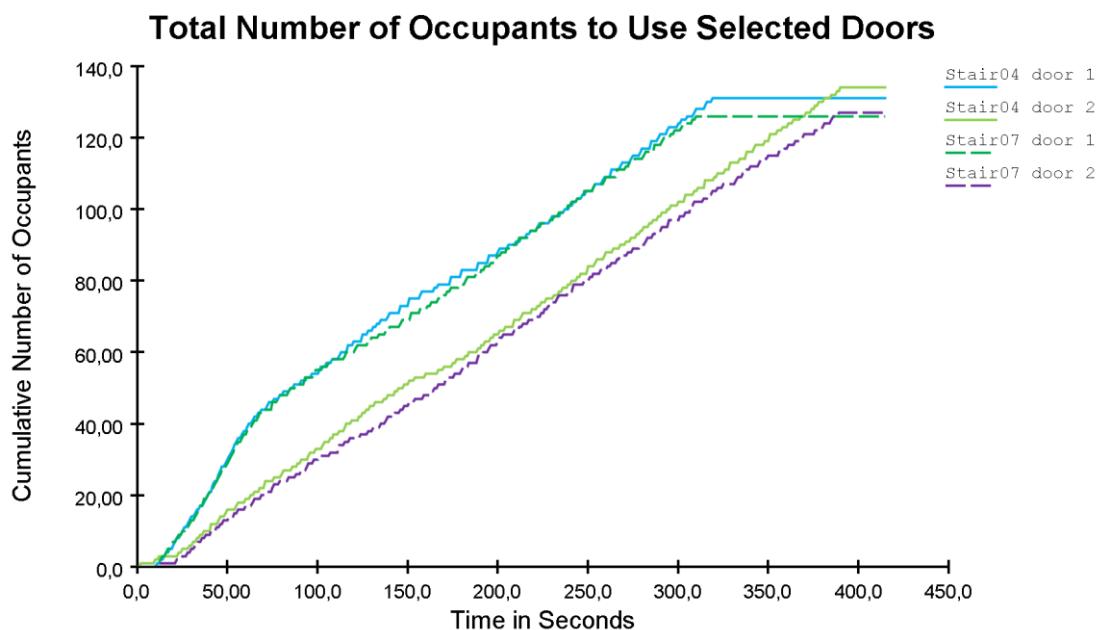
Εκκένωση 300 ατόμων

Κατά την τρίτη ανάλυση και οι 300 χρήστες κινούνται με ελευθερία στην περιοχή του σταθμού. Στο Σχήμα της εικόνας 6-17 απεικονίζεται συνολικά ο χρόνος που χρειάστηκαν όλοι οι χρήστες για να εγκαταλείψουν το σταθμό. Επιπρόσθετα, παρέχονται σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με τον αριθμό των επιβατών που έχουν απομακρυνθεί από το σταθμό κάθε χρονική στιγμή. Για παράδειγμα, 150 άτομα χρειάστηκαν 202 δευτερόλεπτα για την εκκένωση του σταθμού. Ο πρώτος χρήστης και ο τελευταίος χρειάστηκαν αντίστοιχα 1 και 414 δευτερόλεπτα για να εκκενώσουν το σταθμό.



Εικόνα 6-17: Αριθμός χρηστών που εκκενώνουν τον σταθμό στο σενάριο 1 συναρτήσει του χρόνου για 300 άτομα

Στο Γράφημα 6-18 απεικονίζεται το σύνολο των ανθρώπων που απομακρύνθηκαν από την αποβάθρα του σταθμού σύμφωνα με τη σκάλα που χρησιμοποιήθηκε. Η προσομοίωση δείχνει ότι η σκάλα (stair) 04 χρησιμοποιήθηκε από τους περισσότερους χρήστες. Από την ανάλυση και όπως φαίνεται στα σχήματα, ο χρόνος εκκένωσης για την πλατφόρμα είναι 390 δευτερόλεπτα και 414 δευτερόλεπτα για ολόκληρο το σταθμό.



Εικόνα 6-18: Αριθμός ατόμων (ως συνάρτηση του χρόνου) που χρησιμοποιούν τις σκάλες για την εκκένωση από την αποβάθρα 300 άτομα στο σενάριο 1.

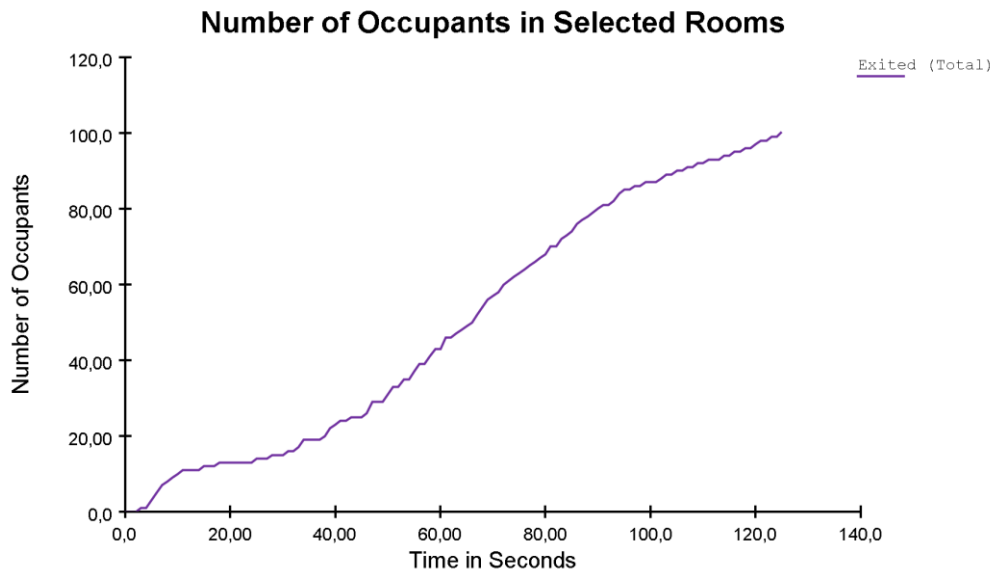
6.2.2 Ανάλυση εκκένωσης για το 2^ο σενάριο

Στο δεύτερο σενάριο όπως έχει προαναφερθεί η γεωμετρία του σταθμού αποτελείται από 6 ανεμιστήρες τύπου jet fan που έχουν κατεύθυνση από τα δεξιά προς τα αριστερά. Ο λόγος που έγινε η τοποθέτηση αυτών των jet fans είναι για να παρατηρηθεί η ροή του καπνού στο συγκεκριμένο σιδηροδρομικό σταθμό και κατά πόσο μπορεί να επηρεάσει τον χρόνο εκκένωσης του. Αναλύοντας ευρύτερα την παρούσα κατάσταση γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η τοποθέτηση των jet fans θα βοηθήσει και στην προστασία της υγείας των ατόμων.

Εκκένωση 100 ατόμων

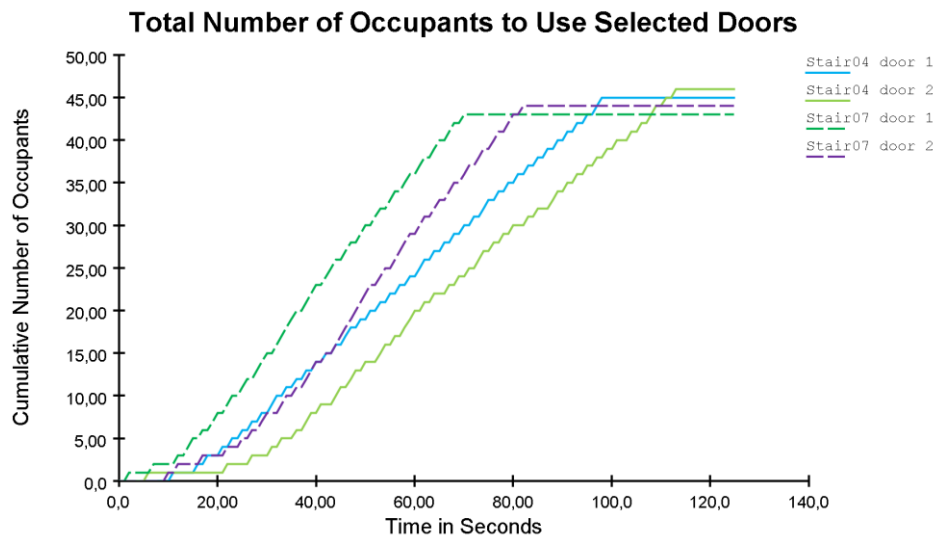
Η ανάλυση στους 100 χρήστες έγινε και όλοι τους κινούνται με ελευθερία στην περιοχή του σταθμού. Στην Εικόνα 6-19 απεικονίζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκαν όλοι οι επιβαίνοντες για την εκκένωση. Επιπρόσθετα, παρέχονται σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με τον αριθμό των επιβατών που έχουν απομακρυνθεί από το σταθμό κάθε χρονική στιγμή. Για παράδειγμα, 50 άτομα χρειάζονται 66 δευτερόλεπτα για την εκκένωση ενός σταθμού. Ο πρώτος χρήστης χρειάζεται 1 δευτερόλεπτο για την εκκένωση του σταθμού και 124 δευτερόλεπτα για

την εκκένωση του τελευταίου χρήστη. Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι η αριστερή πλευρά θα έχει αρκετή ποσότητα καπνού που θα έχει ως αποτέλεσμα της ορατότητα πιο δύσκολη.



Εικόνα 6-19: Αριθμός χρηστών που εκκένωσαν το σταθμό ως συνάρτησι του χρόνου για τα 100 άτομα στο σενάριο 2

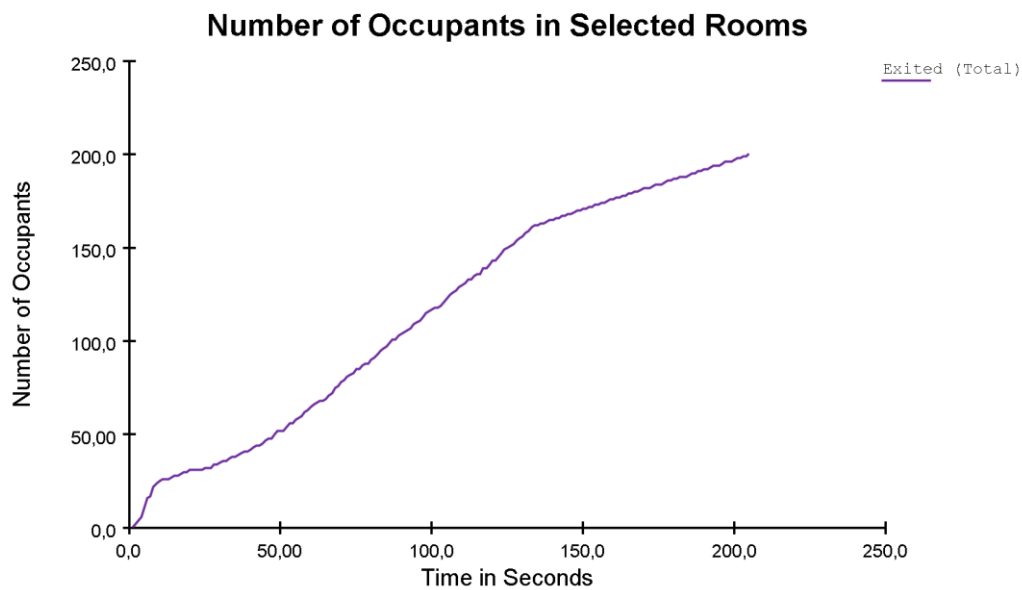
Στο Γράφημα 6-20 το σύνολο των ανθρώπων που απομακρύνθηκαν από την αποβάθρα σύμφωνα με τη σκάλα που χρησιμοποιήθηκε για κάθε στιγμή του χρόνου. Η προσομοίωση δείχνει ότι η σκάλα 04 (stair) χρησιμοποιήθηκε από τους περισσότερους χρήστες. Σύμφωνα με την ανάλυση και όπως απεικονίζεται και στα διαγράμματα διαπιστώνεται ότι ο χρόνος τον οποίο χρειάζονται οι χρήστες προκειμένου να εκκενώσουν το σταθμό 124 δευτερόλεπτα και για να εκκενώσουν την αποβάθρα χρειάστηκαν 111 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 6-20: Αριθμός ατόμων που χρησιμοποιούν τις σκάλες για την εκκένωση από την αποβάθρα (σε συνάρτηση με το χρόνο) για το σενάριο 2 για 300 ατόμων.

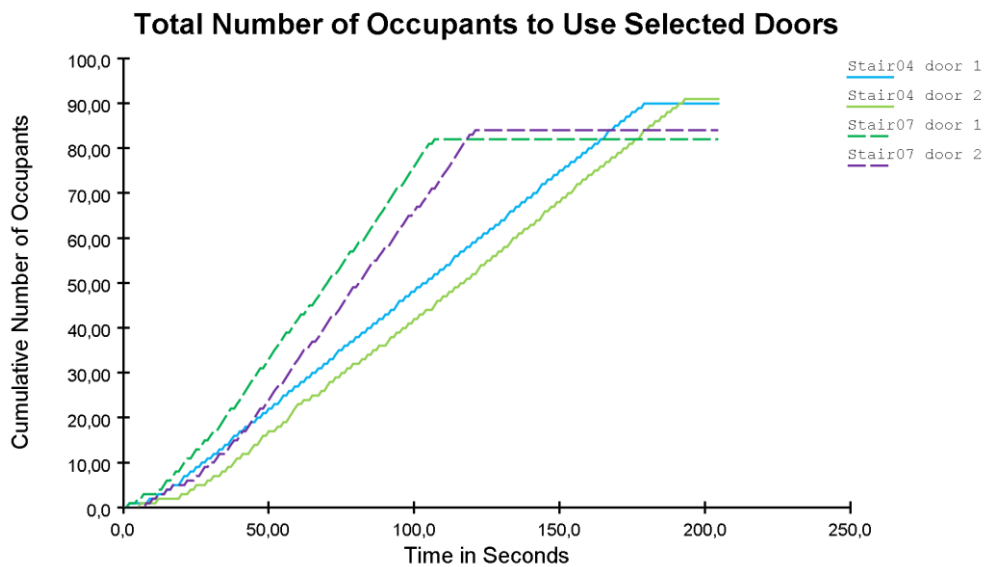
Εκκένωση 200 ατόμων

Στη δεύτερη ανάλυση που έγινε για τους 200 χρήστες όλοι κινούνται με ελευθερία στην περιοχή του σταθμού. Στο Σχήμα 6-21 απεικονίζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκαν όλοι οι επιβαίνοντες για να εκκενώσουν το σταθμό. Επιπρόσθετα, παρέχονται σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με τον αριθμό των επιβατών που έχουν απομακρυνθεί από το σταθμό κάθε χρονική στιγμή. Επίσης για παράδειγμα, χρειάζονται 87 δευτερόλεπτα για την εκκένωση του σταθμού από 100 άτομα. Ο πρώτος χρήστης εκκενώνει το σταθμό σε 1 δευτερόλεπτο, ενώ ο τελευταίος χρήστης χρειάζεται 204 δευτερόλεπτα για να εκκενώσει το σταθμό.



Εικόνα 6-21: Αριθμός χρηστών που εκκενώνουν το σταθμό σε συνάρτηση με το χρόνο για 200 άτομα σενάριο 2

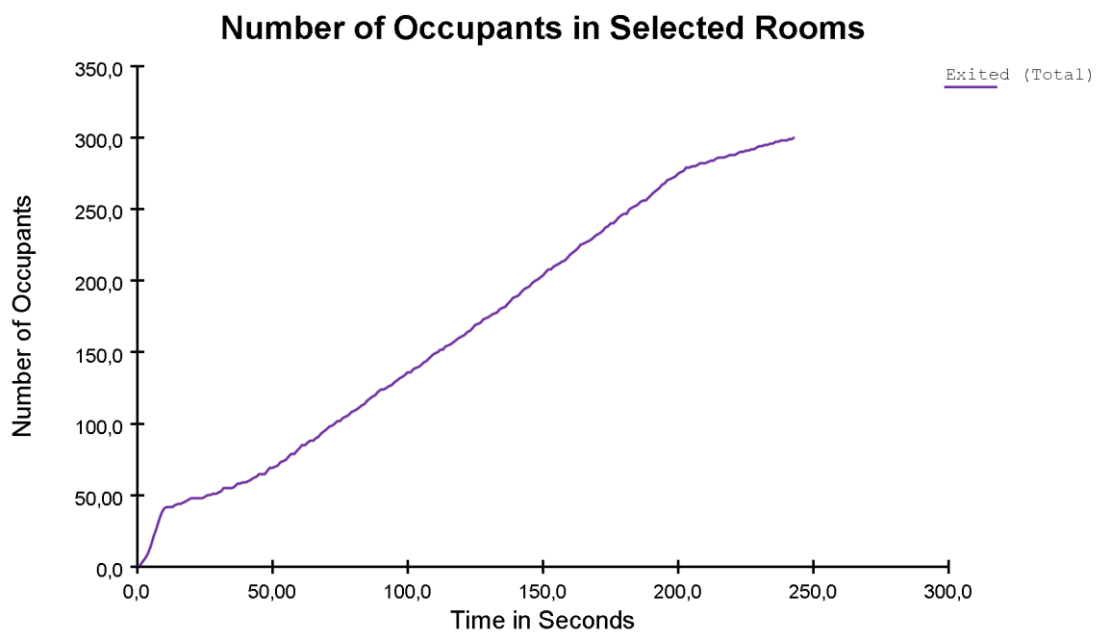
Στο Γράφημα 6-22 απεικονίζεται ο συνολικός αριθμός των ανθρώπων που εκκένωσαν την αποβάθρα σύμφωνα με τη σκάλα που χρησιμοποιήθηκε. Η προσομοίωση δείχνει ότι η σκάλα 04 (stair) χρησιμοποιήθηκε από τους περισσότερους χρήστες. Σύμφωνα με την ανάλυση και όπως φαίνεται στα γραφήματα, διαπιστώνεται ότι ο χρόνος εκκένωσης της αποβάθρας είναι 192 δευτερόλεπτα και 204 δευτερόλεπτα για ολόκληρο το σταθμό.



Εικόνα 6-22: Αριθμός ατόμων που χρησιμοποιούν τις σκάλες για την εκκένωση από την αποβάθρα (σε συνάρτηση με το χρόνο) για το σενάριο 2 των 200 ατόμων.

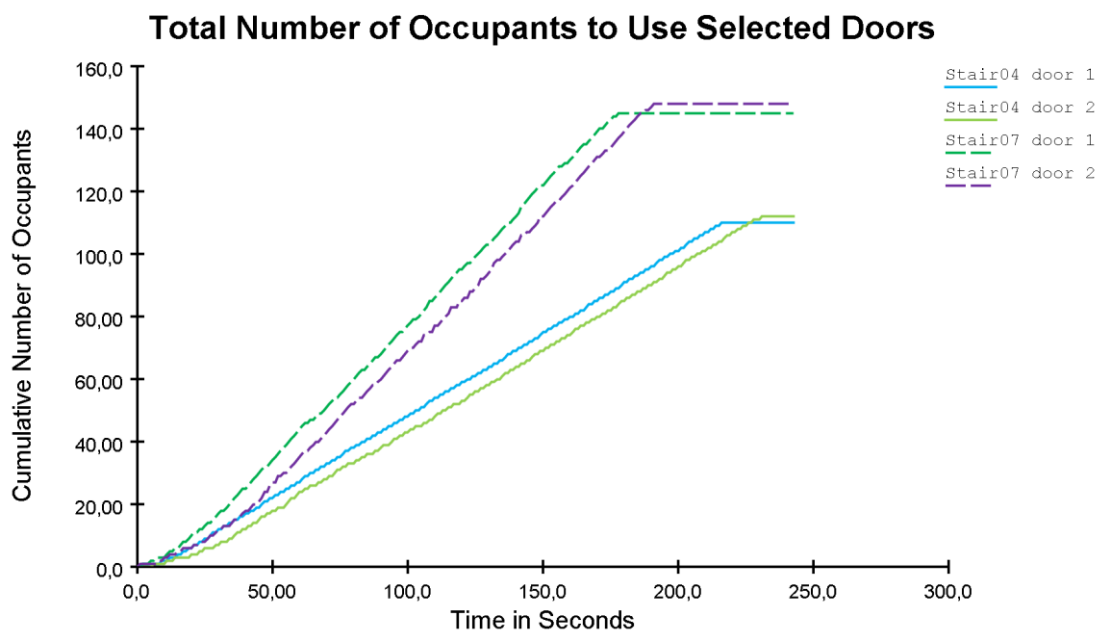
Εκκένωση 300 ατόμων

Στην τρίτη ανάλυση που έγινε, και οι 300 χρήστες μπορούσαν να κινηθούν ελεύθερα στην περιοχή του σταθμού. Στην εικόνα 6-23 παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκαν όλα τα άτομα για να εγκαταλείψουν το σταθμό. Επιπρόσθετα, παρέχονται σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με τον αριθμό των επιβατών που έχουν απομακρυνθεί από το σταθμό κάθε χρονική στιγμή. Για παράδειγμα, 150 άτομα χρειάστηκαν 110 δευτερόλεπτα για να εκκενώσουν το σταθμό. Ο πρώτος χρήστης χρειάστηκε 1 δευτερόλεπτο για να εκκενώσει το σταθμό και ο τελευταίος χρήστης χρειάστηκε 242 δευτερόλεπτα για να εκκενώσει το σταθμό.



Εικόνα 6-23: Αριθμός ατόμων που εκκενώνουν το σταθμό σε συνάρτηση με το χρόνο στο σενάριο 2 των 300 ατόμων.

Στην εικόνα 6-24 απεικονίζεται ο συνολικός αριθμός των ατόμων που έχουν εκκενώσει την αποβάθρα σύμφωνα με τη σκάλα που χρησιμοποιήθηκε. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι η σκάλα 07 (stair) χρησιμοποιήθηκε από τους περισσότερους χρήστες. Σύμφωνα με την ανάλυση και όπως φαίνεται στα γραφήματα, διαπιστώνεται ότι ο χρόνος εκκένωσης από την αποβάθρα ανέρχεται στα 231 δευτερόλεπτα και 242 δευτερόλεπτα για ολόκληρο το σταθμό.



Εικόνα 6-24: Αριθμός ατόμων που βρίσκονταν στις σκάλες κατά την εκκένωση της αποβάθρας σε συνάρτηση με το χρόνο για το σενάριο 2 και τα 300 άτομα.

Για τα 100 άτομα στο σενάριο 2, οι χρόνοι εκκένωσης μειώθηκαν κατά 34 δευτερόλεπτα (δηλαδή σε ποσοστό 23,4%) στην αποβάθρα και κατά 45 δευτερόλεπτα (δηλαδή σε ποσοστό 36,3%) σε ολόκληρο το σταθμό.

Για τα 200 άτομα στο σενάριο 2, οι χρόνοι εκκένωσης μειώθηκαν κατά 86 δευτερόλεπτα (δηλαδή σε ποσοστό 30,9%) στην αποβάθρα και κατά 98 δευτερόλεπτα (δηλαδή σε ποσοστό 32,5%) σε ολόκληρο το σταθμό.

Για τα 300 άτομα στο σενάριο 2, οι χρόνοι εκκένωσης μειώθηκαν κατά 159 δευτερόλεπτα (δηλαδή σε ποσοστό 40,8%) στην αποβάθρα και κατά 172 δευτερόλεπτα (δηλαδή σε ποσοστό 41,5%) σε ολόκληρο το σταθμό.

Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι ο χρόνος που εξοικονομείται τοποθετώντας τα Jet fans στο σενάριο 2 οδηγεί σε μία μείωση του χρόνου εκκένωσης η οποία βασίζεται κυρίως στην λειτουργία των Jet fans που επηρεάζουν σε βάθος χρόνου την πυκνότητα του καπνού. Αυτό συμβαίνει διότι μεταφέρουν τα μόρια του καπνού προς την αριστερή πλευρά του σταθμού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ορατότητα των ατόμων. Όσο περισσότερο χρόνο λειτουργούν τα Jet fans τόσο περισσότερο ικανοποιητικά είναι τα αποτελέσματα όσον αφορά την ορατότητα. Συνεπώς η αύξηση του αριθμού των ατόμων συνεπάγεται και αύξηση του χρόνου λειτουργίας του Jet fans κάτι που βοηθάει στην ασφαλέστερη εκκένωση του σταθμού.

6.3 Επιπτώσεις της φωτιάς στα άτομα του σιδηροδρομικού σταθμού

Στην ανάλυση που έγινε στο πρώτο σενάριο(σενάριο 1), τα επίπεδα της δυνατότητας όρασης επιδρούν στην ταχύτητα της κίνησης των επιβαινόντων, δηλαδή των χρηστών του σταθμού . Στην αποβάθρα, η κίνηση τους είναι η προκαθορισμένη στα 1,19m/s καθώς όμως πλησιάζουν προς την έξοδο περνώντας τις σκάλες και ανεβαίνοντας στο πάνω επίπεδο η ταχύτητα τους μειώνεται όπως έχει αναφερθεί σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας 3-14. Ο δείκτης FED of toxicity στα χαμηλά επίπεδα όπως η αποβάθρες και τα κατώτερα σημεία από τις σκάλες κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα. Αντιθέτως παρατηρείται ότι από το πλατύσκαλο της κάθε σκάλας και πάνω μέχρι και τις εξόδους, τα επίπεδα του FED of toxicity είναι πολύ υψηλά, ξεπερνώντας την οριακή τιμή που έχουμε θέσει, της μονάδας. Σχολιάζοντας τις αναλύσεις που προέκυψαν στο σενάριο 1 επακολουθεί ότι τα επίπεδα της θερμοκρασίας που επικρατούν στο σταθμό στα χαμηλά σημεία όπως η αποβάθρα και τα κάτω μέρη της κάθε σκάλας κυμαίνεται γύρω περίπου στους 20°C κάτι το οποίο δεν φαίνεται να εμφανίζει κάποιο αξιοσημείωτο πρόβλημα στους επιβαίνοντες, όμως κατά τη διάρκεια της εκκένωσης περνώντας από τα υψηλότερα σημεία του επιπέδου της αποβάθρας και προς την έξοδο η θερμοκρασίες ξεπερνούν τους 130°C, κάτι το οποίο είναι θανατηφόρο για τους ανθρώπους. Αντιθέτως με το σενάριο 1 κατά το σενάριο 2 φαίνεται ότι ο καπνός δεν έχει επιρροή στην ταχύτητα με την οποία κινούνται οι χρήστες στη δεξιά πλευρά του σταθμού και αυτό οφείλεται στα jet fans, τα οποία απομακρύνουν τον καπνό προς τα αριστερά. Ο καπνός που μεταφέρεται στην αριστερή πλευρά του σταθμού παρουσιάζει δυσκολίες ορατότητας, με αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας των ατόμων κάτι το οποίο είναι παροδικό, διότι από τα 80sec και μετά η ορατότητα επανέρχεται στο μέγιστο όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της εικόνας 6-7. Ο δείκτης FED of toxicity είναι στα επιτρεπτά όρια δηλαδή κάτω του 0,3 καθότι ο καπνός έχει απομακρυνθεί από τους ανθρώπους. Τα επίπεδα που βρίσκεται η θερμοκρασία του σταθμού κυμαίνονται γύρω στους 20°C με τις υψηλότερες θερμοκρασίες να παρατηρούνται στο αριστερό πλατύσκαλο όπου είναι 29°C, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της εικόνας 6-8.

Όσον αφορά την ακτινοβολία που είναι δυνατόν να δεχτούν οι παρευρισκόμενοι χρήστες είναι χαμηλότερο από 1kW/m² κάτι το οποίο δεν επηρεάζει τους επιβάτες γιατί σε κανένα από τα σενάρια η φωτιά δεν είναι κοντά τους, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η εστία της είναι πάνω στις σιδηροδρομικές γραμμές. Άρα συμπεραίνεται ότι για την εκκένωση κατά το σενάριο 2 η χρήση των jetfans σε μία φωτιά αυτού του επιπέδου είναι η μοναδική λύση για την επιβίωση όλων των επιβατών.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στοιχεία τα δεδομένα των χειρότερων χρηστών των σεναρίων που προέκυψαν από την ανάλυση.

Σενάριο 1	100 άτομα	200 άτομα	300 άτομα
Χρόνος Εκκένωσης	169	302	414
θερμότητα από ακτινοβολία (kW/m ²)	0,81<1	0,77<1	0,88<1
Ορατότητα (m)	0,93	0,98	0,87
FED of toxicity	0,0002<0,3	0,00019<0,3	0,00022<0,3
Θερμοκρασία από συναγωγή (°C)	140	136	145

Πίνακας 6-1: Στοιχεία για τον δυσμενέστερο χρήστη του σεναρίου 1

Σενάριο 2	100 άτομα	200 άτομα	300 άτομα
Χρόνος Εκκένωσης	124	204	242
θερμότητα από ακτινοβολία (kW/m ²)	0,0000031 <1	0,0000003<1	0,0000004<1
Ορατότητα (m)	30	30	30
FED of toxicity	0<0,3	0<0,3	0<0,3
Θερμοκρασία από συναγωγή (°C)	21,29	20,34	20,31

Πίνακας 6-2: Στοιχεία για τον δυσμενέστερο χρήστη του σεναρίου 2

7 Συμπεράσματα

Ένα από τα κυρίαρχα κριτήρια που εμπλέκονται στην ανάλυση και τη σχεδίαση ενός υπογείου έργου είναι η πτυχή που αφορά την ασφάλεια, και συγκεκριμένα η μέθοδος της απομάκρυνσης σε περιπτώσεις που προκύπτει ένα συμβάν επείγοντος χαρακτήρα. Επομένως, απαιτείται η ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου προγράμματος ασφαλείας και διαδικασίας εκκένωσης για τους υπόγειους χώρους. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να αποδίδεται όταν προκύπτει πυρκαγιά, διότι αυτή επηρεάζει τον τρόπο που σχεδιάζεται η διαδικασία εκκένωσης. Συνήθως, οι άνθρωποι που προσπαθούν να αποφύγουν τον κίνδυνο και η πορεία του καπνού κάνουν την ίδια διαδρομή, επομένως αυτό απαιτεί ειδική προσοχή κατά τον σχεδιασμό. Στα ξεσπάσματα πυρκαγιάς, η ανεπαρκής ορατότητα εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας στον καπνό αποτελεί το πρώτο εμπόδιο που περιορίζει την κινητικότητα των ανθρώπων και, συνεπώς, εμποδίζει την ασφαλή τους απομάκρυνση. Η παρουσία του καπνού επηρεάζει την ψυχολογία αρνητικά και τα άτομα που προσπαθούν να εγκαταλείψουν τον χώρο.

Η επιρροή της φωτιάς στην αντίδραση των ατόμων και στην αλλαγή της ταχύτητα μετακίνησής τους μπορεί να αναπαρασταίνεται και να μετρηθεί αριθμητικά χρησιμοποιώντας το λογισμικό Pygosim. Αυτή η ειδική εφαρμογή παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την εξέλιξη της φωτιάς και μας δίνει αποτελέσματα σχετικά με τους χρόνους που διατίθεται για την εκκένωση προτού οι τιμές του καπνού, της θερμικής επιβάρυνσης και των προϊόντων καύσης φτάσουν σε επικίνδυνα επίπεδα. Ο προγραμματισμός και η εξακρίβωση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων απομάκρυνσης γίνεται με το πρόγραμμα Pathfinder, το οποίο εκτελεί προσομοιώσεις για αυτήν την συγκεκριμένη διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, το ανωτέρω μοντέλο προσομοίωσης είναι ικανό να αναπαραστήσει με αξιοπιστία την διαδικασία απομάκρυνσης και την μετακίνηση των ανθρώπων. Η ενσωμάτωση παραγόντων που σχετίζονται με τη συμπεριφορά του πληθυσμού κατά τη διαδικασία εκκένωσης, απλώς δεν γίνεται να πραγματοποιηθούν με αναλύσεις εκκένωσης σε κλασικό επίπεδο. Η προσομοίωση, πέραν του υπολογισμού της χρονικής απομάκρυνσης, δίνει δεδομένα που αφορούν την κίνηση των ατόμων και επισημαίνει τα μέρη εκείνα όπου προκύπτουν δυσκολίες. Με την οπτικοποίηση της ανάλυσης, ο ερευνητής έχει τη δυνατότητα να παρεμβαίνει, να προσφέρει απαντήσεις πριν από το πέρας του έργου. Συμπληρωματικά, τα δεδομένα όπου δίνονται από την προσομοίωση του προγράμματος Pygosim, σε περιπτώσεις αξιολόγησης των κινδύνων φωτιάς, είναι δυνατόν να ενσωματωθούν στο λογισμικό αυτό με σκοπό τη διενέργεια μιας πιο εκτενούς ανάλυσης και μιας πιο αξιόπιστης καθοριστικής στιγμής απομάκρυνσης, προτού τα ποιοτικά προβλήματα της ατμόσφαιρας επηρεάσουν σημαντικά την ασφάλεια των χρηστών του υπογείου χώρου. Αυτή ήταν μία από τις κυριότερες επικεντρώσεις της εν λόγω έρευνας.

8 Βιβλιογραφία

Amouzandeh A, Zeiml M, Lackner R (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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.027>

Fire Safety Guidelines for Road Tunnels – 10/09/01

Fridolf K, Ronchi E, Nilsson D, Frantzich H (2013) Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels. *Fire Safety Journal* 59:8-21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.03.007>

Huan Cheng, Xiaokuan Yang (2012) Emergency Evacuation Capacity of Subway Stations Doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.10>

Jin, T. (2002). Visibility and Human Behavior in Fire Smoke. In: *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. DiNenno, P. J., Drysdale, D., Beyler, C. L., Walton, W. D., Custer, R. L. P., Watts, J. M. Jr., Hall, J. R. Jr. (Eds). National Fire Protection Association, Quincy, MA, Chapter 2, pp.42-53.

Kai Guo, Limao Zhang (2021) Simulation-based passenger evacuation optimization in metro stations considering multi-objectives Doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104010>

Na Meng, Longhua Hu (2013) 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 Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.09.014>

Na Meng, Longhua Hu, Long Wu, Lizhong Yang, Shi Zhu, Longfei Chen, Wei Tang (2013) 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 Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.09.014>

National Fire Protection Association - NFPA (2014). NFPA 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, National Fire Protection Association

Nirajan Shiwakoti, Richard Tay, Peter Stasinopoulos (2019) In an emergency evacuation situation what would you do? Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.099>

Nirajan Shiwakoti, Richard Tay, Peter Stasinopoulos, Peter Jarrod Woolley (2016) Likely behaviours of passengers under emergency evacuation in train station Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.07.017>

Pathfinder Technical Reference 2017 (Program's Handbook)

Papaioannou P, Georgiou G (2003) Human behaviour in tunnel accidents and incidents: endusers, operators and response teams. Report of European Project UPTUN

PyroSim User Manual, Thunderhead Engineering. (2017)

Qiong Liu, Renfei He, Limao Zhang (2022) Simulation-based multi-objective optimization for enhanced safety of fire emergency response in metro stations Doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108820>

SFPE 2002. Handbook of Fire Protection Engineering 3rd Edition, Chapter 13, 14.

Shi Congling, Zhong Maohua, Nong Xingzhong, He Li, Shi Jiehong, Feng Guoguan (2010) Modeling and safety strategy of passenger evacuation in a metro station in China Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.07.017>

Tong et.al. (2015) A risk-based approach for crowd evacuation performance evaluation under metro fire

Tsukahara M, Koshiba Y, Ohtani H (2011) Effectiveness of downward evacuation in a largescale subway fire using Fire Dynamics Simulator. Tunnelling and Underground Space Technology 26 (4):573-581. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.02.002>

Tu J, Yeoh G, Liu C Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. In, 2007.

Yanfeng Li, Hongyi Wang, Chao Wang, Youbo Huang (2017) Personnel evacuation research of subway transfer station based on fire environment Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.394>

Yanfeng Li, Xiaolong Sun, Xiao Feng, Chao Wang, Junmei Li (2012) Study on Evacuation in Subway Transfer Station Fire by STEPS Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.232>

Weisenpacher P, Halada L, Glasa J COMPUTER SIMULATION OF FIRE IN A TUNNEL USING PARALLEL VERSION OF FDS. In, 2011.

Zhang S, Wang J, He K, Yao Y, Peng M (2019a) Study on the smoke back-layering and critical ventilation in the road tunnel fire at high altitude. *Fire and Materials* 43 (4):422-429. doi:<https://doi.org/10.1002/fam.2714>

Zhang T, Zhang Y, Zhu H, Yan Z (2021a) Experimental investigation and multi-level modeling of the effective thermal conductivity of hybrid micro-fiber reinforced cementitious composites at elevated temperatures. *Composite Structures* 256:112988. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112988>

Zhang X, Zhang Z, Zhang Z, Xu W, Luo Q, Tao H, Li X (2020) Experimental investigation of compartment fires with circular opening: From the aspects of internal temperature and facade flame. *Combustion and Flame* 213:107-116. doi:<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.11.027>

Zhang Y, Shen Y, Carvel R, Zhu H, Zhang Y, Yan Z (2021b) Experimental investigation on the evacuation performance of pedestrians in a three-lane urban tunnel with natural ventilation in a fire scenario. *Tunnelling and Underground Space Technology* 108:103634. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103634>

National Fire Protection Association - NFPA (2014). NFPA 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, National Fire Protection Association

Assael, M. (2007). *Multimedia as a Teaching Tool. The Consequences of Fires, Explosions and Dispersion of Toxic Gases in Humans and Materials*: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών.

Babrauskas, V. (2008). Smoke Detectors: Technologies Are NOT of Equal Value or Interchangeable. *Fire Safety & Technology Bulletin*, 3, 2-4.

Fernandez, G. A. (2004). The Tipping Point—Gratuities, Culture, and Politics. *Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly*, 45(1), 48-51. doi:10.1177/0010880403260106

Fridolf, K., Nilsson, D., & Frantzych, H. (2013). Fire Evacuation in Underground Transportation Systems: A Review of Accidents and Empirical Research. *Fire Technology*, 49(2), 451-475. doi:10.1007/s10694-011-0217-x

Guo, K., & Zhang, L. (2022). Simulation-based passenger evacuation optimization in metro stations considering multi-objectives. *Automation in Construction*, 133, 104010. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104010>

Li, Y., Wang, H., Wang, C., & Huang, Y. (2017). Personnel evacuation research of subway transfer station based on fire environment. *Procedia Engineering*, 205, 431-437. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.394>

Shi, C., Zhong, M., Nong, X., He, L., Shi, J., & Feng, G. (2012). Modeling and safety strategy of passenger evacuation in a metro station in China. *Safety Science*, 50(5), 1319-1332. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.07.017>

Shiwakoti, N., Tay, R., & Stasinopoulos, P. (2020). In an emergency evacuation situation what would you do? *Transportation Research Procedia*, 48, 860-869. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.099>

Shiwakoti, N., Tay, R., Stasinopoulos, P., & Woolley, P. J. (2017). Likely behaviours of passengers under emergency evacuation in train station. *Safety Science*, 91, 40-48. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.07.017>

Sun, L., Li, H., Willson, K., Breidinger, S., Rizk, M. L., Wenning, L., & Woolf, E. J. (2012). Ultrasensitive liquid chromatography-tandem mass spectrometric methodologies for quantification of five HIV-1 integrase inhibitors in plasma for a microdose clinical trial. *Anal Chem*, 84(20), 8614-8621. doi:10.1021/ac301581h